

9968

T. C.  
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



# KAM MİLLERİNİN BURULMA TİTREŞİMLERİ

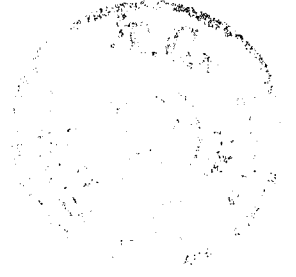
DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Ziya ŞAKA

DANIŞMAN  
Doç. Dr. Yükeci YILMAZ

KONYA, 1988

T. C.  
Yükseköğretim Kurulu  
Dokümantasyon Merkezi



## TEŐEKKÜR

Bu çalıŐmayı yÖneten ve yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer hocam Doç.Dr.Yüksel YILMAZ'a teŐekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bu tezin hazırlanması ve yazımında yardımcı olan arkadaşlarıma da minnettarlığımı belirtmek isterim.



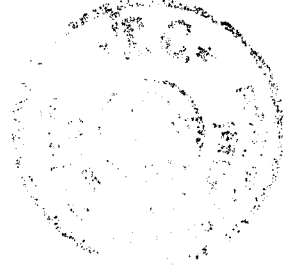
## ÖZET

Bu çalışmada kuvvet kapalı toparlaklı ve tablalı kam mekanizmalarında kam milinin, maruz olduğu değişken tork etkisinde yaptığı burulma titreşimleri ele alındı.

Radyal kam mekanizmalarında kam mili, izleyiciden kama etki eden kuvvetin oluşturduğu bir torka maruzdur. Kam dönme açısına bağlı olarak değişen bu tork elastik bir cisim olan milde burulma titreşimleri oluşturacaktır. Bunu belirlemek için kam milinin dinamik bir modeli kuruldu ve hareket denklemleri teşkil edildi. Denklemler boyutsuzlaştırılarak bazı boyutsuz katsayılar tanımlandı. Bunlar atalet oranı, frekans oranı, enerji oranı ve sönüm etki oranı ile tablalı kamlar için ayrıca tanımlanan büyüklük oranıdır. Bu katsayılar milin dinamik davranışını karakterize etmek için kullanılabilirler.

Kam millerinin burulma titreşimleri, kendi kendini besleyen parametre tahrikli zorlanmış titreşimlerdir. Nonlineer olan bu titreşimlerle ilgili diferansiyel denklemlerin çözümü nümerik olarak yapılabilir.

Tek kamlı bir mil maruz olduğu tork sebebiyle burularak kalıpta yavaşlar, inişte ise hızlanır. Zorlanmış bir titreşim olan bu olaya kuruşma adı da verilir. Tablalı kamlarda bu titreşim daha



-II-

şiddetlidir. Atalet ve enerji oranlarının artışı titreşimi şiddetlendirir, frekans oranının azalması da aynı sonucu doğurur. Bu oranların optimum seçimi ekonomi ve düzgün çalışma sağlar. Mildeki titreşimler izleyici ivmesinde ve radyal kuvvet bileşeninde teorik değerden sapmalara yol açar. Ekstrem hallerde sıçrama bile oluşturabilir.

Çok kamlı millerde de bilhassa yüksek hızlarda mildeki titreşim genlikleri büyük değerler alabilir. Genlikler girişten diğer uca doğru artar. Mil ucuna ilâve edilecek bir volan müspet etkiler oluşturur.





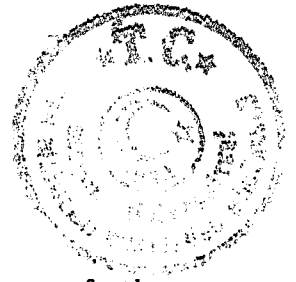
### ABSTRACT

Torsional vibrations on the camshaft subjected to variable torque on force closed cam mechanisms with the roller and flat-faced follower are investigated.

On radial cam mechanisms, the camshaft is subjected to a torque which is produced by a force exerted to cam from the follower. This torque which changes by the cam angle, will create torsional vibrations on the camshaft which is an elastic body. For this purpose a dynamic model of the camshaft was established and equations of motion were formed. The equations were nondimensionalized and some nondimensional parameters were obtained. These are the inertia ratio, the frequency ratio, the energy ratio, the damping effect ratio and in addition for cams with the flat-faced follower, the size ratio. These parameters can be used to characterize the dynamic behavior of a camshaft.

Torsional vibrations of camshafts are parameter excited and self-induced forced vibrations. The governing nonlinear differential equations related to these vibrations can be solved numerically.

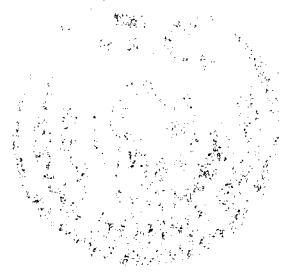
A camshaft with a single cam decelerates at rise and accelerates at fall due to the torque subjected. This is called windup which is a forced vibration. This vibration is more severe in the cams with the flat-faced follower. The increase of the inertia and the energy ratios increase the vibration and decrease of the



frequency ratio does the same effect. The optimum choose of these ratios provides economical and proper working. The vibrations on the camshaft, cause to deviations from the theoretical values of the follower accelerations and radial force component. They may cause to jumping at extreme cases.

In the camshafts with multi-cam, especially at high speeds, the amplitudes of the shaft vibrations can be very high. Amplitudes increases from the driving end to the other end of shaft. A flywheel added on the shaft end produces positive effects.



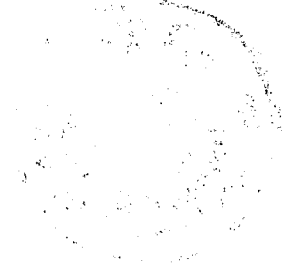


## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	I
ABSTRACT .....	III
İÇİNDEKİLER .....	V
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	VII
NOTASYON .....	XI
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Çalışmanın konusu ve amacı .....	1
2 . DOĞRUSAL YÖNLÜ KAMLARIN DİNAMIĞI .....	4
2 .1. Kam mekanizmaları ve sınıflandırılmaları ....	4
2 .2. Doğrusal yönlü kamlarda kuvvet iletimi.....	5
2 .2.1. Toparlıklı kamlarda kuvvet iletimi, basınç açısı .....	5
2 .2.2. Tablalı kamlarda kuvvet iletimi .....	10
2.3. Doğrusal yönlü kamlarda tork (burulma momenti) iletimi .....	12
2 .3.1. Toparlıklı kamlarda tork iletimi .....	12
2 .3.2. Tablalı kamlarda tork iletimi .....	14
3 . KAM MİLİNİN MODELLENMESİ ve HAREKET DENKLEMLERİNİN TEŞKİLİ .....	19
3 .1. Kam mili modelinin kurulması .....	19
3 .2. Hareket denklemlerinin teşkili .....	20
3 .3. Hareket denklemlerinin boyutsuzlaştırılması..	23

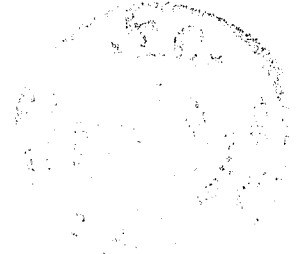
3.3.1. Boyutsuzlaştırma işlemi .....	23
3.3.2. Boyutsuz katsayılar .....	33
3.4. Hareket denklemlerinin Çözümü .....	37
4. TEK KAMLI BİR KAM MİLİNİN BURULMA TİTREŞİMLERİ .....	41
4.1.1. Tek kamı haiz bir kam milinin dinamik cevabı.....	41
4.1.2. Sönümün etkisi .....	51
4.2. Kam milinin dinamik cevabının boyutsuz katsayılara göre değişimi.....	54
4.3. Kam mili burulma titreşimlerinin izleyici hareketine etkisi .....	65
5. ÇOK KAMLI MİLLERİN BURULMA TİTREŞİMLERİ .....	73
5.1. Çok kamlı millerin dinamik cevabı .....	73
5.2. Volan ilâvesinin etkisi .....	87
6. SONUÇLAR.....	90
Referanslar .....	93
EK-A: KAM MEKANİZMALARINDA KULLANILAN HAREKET KANUNLARI .....	97
A.1. Giriş .....	97
A.2. Trigonometrik hareket kanunları .....	98
A.2.1. Harmonik (adi sinoid) hareket kanunu ..	98
A.2.2. Modifiye harmonik hareket kanunu .....	99
A.2.3. Sikloidal (Yüksek sinoid) hareket kanunu ..	99
A.3. Polinom hareket kanunları .....	100
A.3.1. Parabolik hareket kanunu .....	101
A.3.2. 3-4-5 polinom hareket kanunu .....	101
A.3.3. 4-5-6-7 polinom hareket kanunu .....	102
A.4. Teğetsel ve daire yaylı kamlar .....	103
EK-B: BİLGİSAYAR PROGRAMLARI .....	106
B.1. Giriş .....	106
B.2. Bilgisayar programları .....	106





ŞEKİLLER LİSTESİ

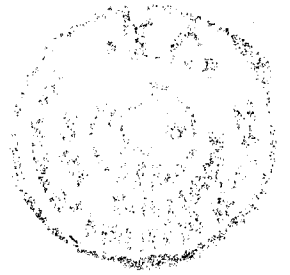
<u>ŞEKİL NO:</u>		<u>SAYFA NO:</u>
2.1	Bazı kam mekanizmaları	4
2.2	Radyal kamların sınıflandırılması	5
2.3	Toparlıklı bir kamda temas kuvveti ve bileşenleri, basınç açısı	6
2.4	Toparlıklı bir kam ve izleyicisinin serbest cisim diyagramı	8
2.5	Tablalı bir kam ve izleyicisinin serbest cisim diyagramı	11
2.6	Doğrusal yönlü radyal kamlarda kama etki eden radyal kuvvetin değişimi	12
2.7.	Toparlıklı bir kamın serbest cisim diyagramı	13
2.8.	Aynı kalkışın farklı açılarda gerçekleştirildiği iki kamda mildeki torkun değişimi	13
2.9.	Tablalı bir kamın serbest cisim diyagramı	14
2.10	Toparlıklı kamlarda mildeki torkun değişimi	17
2.11	Tablalı kamlarda mildeki torkun değişimi	18
3.1	Tek ve çok kamlı kam milleri	19
3.2a	İki kamı haiz bir milin modeli	20
3.2b	İzleyici modeli	20
3.3	Kam mili modelindeki elemanlar	21
3.4	Model atalet elemanlarının serbest cisim diyagramları	21
3.5	Çeşitli hareket kanunları için $c'(\theta_1)$ fonksiyonunun değişimi a) Toparlıklı, b) Tablalı kamlar	32



ŞEKİL NO:

SAYFA NO

4.1	Tek kamı haiz bir kam mili ve modeli	41
4.2a.	Harmonik hareket kanunlu toparlaklı bir kamı haiz bir kam milinin dinamik cevabı	43
4.2b.	Şekil 4.2a'daki milde kamın girişe nazaran izafi açısal hızının değişimi	43
4.3a.	Harmonik hareket kanunlu tablalı bir kamı haiz bir kam milinin dinamik cevabı	46
4.3b.	Şekil 4.3a'daki kamın girişe göre izafi açısal hızının değişimi	46
4.4.	Muhtelif hareket kanunları için toparlaklı kam millerinin dinamik cevabı	49
4.5.	Muhtelif hareket kanunları için tablalı kam millerinin dinamik cevabı	49
4.6.	Harmonik ve parabolik hareket kanunları için toparlaklı kam milinin dinamik cevabına sönümün etkisi	53
4.7.	Harmonik ve parabolik hareket kanunları için tablalı kam millerinin dinamik cevabına sönümün etkisi	54
4.8.	Kam millindeki maksimum burulma açısının değişimi	57
4.9.	Kam mili dinamik cevabının frekans oranına göre değişimi (Hareket Kanunu harmonik)	58
4.10.	Harmonik hareket kanunlu bir kamı haiz kam milinin dinamik cevabının enerji oranına göre değişimi	60
4.11.	Kam mili dinamik cevabının büyüklük oranına göre değişimi (Hareket Kanunu harmonik)	62
4.12.	Harmonik hareket kanunu için kam mili dinamik cevap yüzeyi	63
4.13	Sikloidal hareket kanunu için kam mili dinamik cevap yüzeyi	64
4.14.	Kam mili titreşimleri dolayısıyla izleyici ivmesinde meydana gelen sapmalar	68
4.15.	İzleyici hızında meydana gelen sapmalar	70



ŞEKİL NO:

SAYFA NO

4.16.	Normalize edilmiş $f_v$ radyal kuvvet bileşeni üzerinde kam mili titreşimlerinin etkisi	71
4.17.	Tablalı kamlarda kam mili titreşimlerinin $f_y$ normalize radyal kuvvet bileşeni üzerindeki etkisi	72
5.1	Toparlaklı 4 kamı haiz bir kam mili girişindeki torkun teorik değişimi	76
5.2.	Tablalı 4 kamı haiz bir kam mili girişindeki torkun teorik değişimi	
5.3a.	Toparlaklı ve hareket kanunu harmonik olan 4 kamı haiz bir kam milinin dinamik cevabı	78
5.3b.	Toparlaklı ve harmonik hareket kanunlu 4 kamı haiz bir kam milinin dinamik cevabı	78
5.4.	Toparlaklı ve sikloidal hareket kanunlu 4 kamı haiz bir kam milinin dinamik cevabı	79
5.5.	Toparlaklı ve parabolik hareket kanunlu 4 kamı haiz bir kam milinin dinamik cevabı	79
5.6.	Kam mili modelinde atalet elemanları ve yaylar	80
5.7.-5.8.	Harmonik ve sikloidal hareket kanunlu ve tablalı 4 kamı haiz kam millerinin dinamik cevabı	83
5.9.	Tablalı ve parabolik hareket kanunlu 4 kamı haiz bir kam milinin dinamik cevabı	84
5.10-5.11	Şekil 5.3a ve 5.7 de dinamik cevapları görülen harmonik hareket kanunlu tablalı ve toparlaklı kamları haiz kam millerinde arakesitlerdeki torkların değişimi	85
5.12.	Şekil 5.4'de dinamik cevabı görülen kam milinin arakesitlerindeki torkun değişimi (hareket kanunu sikloidal)	86
5.13.	Şekil 5.9'da dinamik cevabı görülen tablalı ve parabolik hareket kanunlu kamları haiz kam milinin arakesitlerindeki torklar.	86
5.14.	4 kamı bir milin modeli	87



ŞEKİL NO:

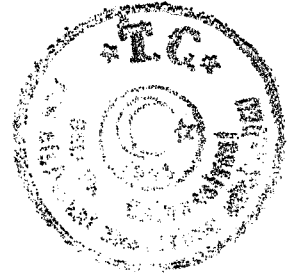
SAYFA NO

5.15.	Mil ucuna bir volan ilavesinin etkisi. Kamlar toparlaklı ve hareket kanunu harmonik	88
5.16.	Toparlaklı ve parabolik hareket kanunlu kamları haiz kam miline volan ilavesinin etkisi	88
A.1.	Harmonik hareket kanununda yol, hız ve ivme eğrileri	99
A.2.	Sikloidal hareket kanununda yol, hız ve ivme eğrileri	100
A.3.	Parabolik hareket kanununda yol, hız ve ivme eğrileri	101
A.4.	4-5-6-7 polinom hareket kanununda yol, hız ve ivme eğrileri	
A.5.	Teğetsel ve daire yaylı kamlar a) Daire yaylı, b) Teğetsel kam	103
A.6.	Daire yaylı ve toparlaklı bir kamda yol, hız ve ivme eğrileri	104
A.7.	Tablalı ve daire yaylı bir kamda yol, hız ve ivme eğrileri	104

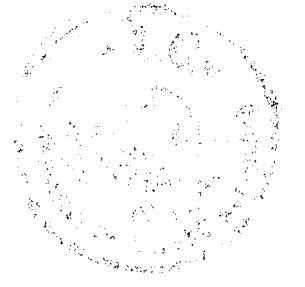


NOTASYON

$a$	: İvme
$\Delta a$	: İvmedeki boyutsuz sapma miktarı
$C$	: Sönüm etki oranı, polinom sabiti
$c$	: Sönüm sabiti
$E_D$	: Sisteme sokulan veya alınan enerji
$E_F$	: Zorlayıcı torkun enerjisi
$E_k$	: Kinetik enerji
$E_p$	: Potansiyel enerji
$F$	: Yay kuvveti
$F_d$	: Toplam dış kuvvet
$F_n$	: Temas kuvveti
$F_s$	: Sürtünme kuvveti
$F_x$	: Radyale dik temas kuvveti bileşeni
$F_y$	: Radyal temas kuvveti bileşeni
$f_y$	: Normalize edilmiş radyal temas kuvveti bileşeni
$g$	: Yerçekimi ivmesi
$h$	: Toplam kalkış miktarı, adım uzunluğu
$I$	: Kütle atalet momenti
$J$	: Polar atalet momenti
$k$	: Yay sabiti
$k_y$	: Geri dönüş yayı yay sabiti



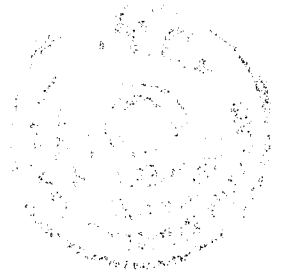
M	: Atalet oranı
m	: Kütle
N	: Frekans oranı
P.p'	: Enerji oranı
R	: Yarıçap, uzunluk
r <sub>o</sub>	: Temel daire yarıçapı
r <sub>f</sub>	: Topariak yarıçapı
S	: Normalize edilmiş boyutsuz izleyici konumu
S'	: Normalize edilmiş boyutsuz izleyici hızı
S''	: Normalize edilmiş boyutsuz izleyici ivmesi
ΔS	: Konumdaki boyutsuz sapma miktarı
s	: Kalkış miktarı, hareket kanunu fonksiyonu
s'	: Boyutsuz izleyici hızı, kam eğimi
s''	: Boyutsuz izleyici ivmesi
s <sub>o</sub>	: Öngerilme miktarı
T	: Tork(Burulma momenti)
t	: Zaman
V	: Hız
ΔV	: Hızdaki boyutsuz sapma miktarı
α	: Basınç açısı, kam başlangıç açısı
β	: Kam açısı
ρ	: Kavis yarıçapı
μ	: Sürtünme katsayısı



- $\xi$  : Büyüklük oranı  
 $\tau$  : Kayma gerilmesi  
 $\omega$  : Açısal hız  
 $\theta$  : Dönme açısı  
 $\dot{\theta}$  : Açısal hız  
 $\ddot{\theta}$  : Açısal ivme  
 $\psi$  : İzafi dönme açısı  
 $\dot{\psi}$  : Girişe göre izafi açısal hız  
 $\ddot{\psi}$  : Girişe göre izafi açısal ivme  
 $\lambda$  : Emniyet katsayısı

İNDİSLER

- i : i. elemana ait  
j : j. elemana ait  
m : Maksimum  
0 : İlk adıma ait  
1,2,...,n : 1.,2.,...,n. elemana ait  
12,34,...,nj : 1. ve 2., 4. ve 5.,...,n. ve j. elemanlarla ilgili



## 1. GİRİŞ

### 1.1. ÇALIŞMANIN KONUSU VE AMACI

Doğrudan temas yoluyla hareket iletiminde kullanılan kam mekanizmaları muhtelif yerlerde geniş ölçüde kullanılır. Kam mekanizmaları ile istenilen kinematik özelliklere sahip periyodik ötelenme ve dönme hareketleri elde edilebilir. Bir kam mekanizmasında esas fonksiyonu yerine getiren kam adı verilen ve eğrisel bir yüzeye sahip olan eleman, hemen hemen tüm konstrüksiyonlarda bir mil'e bağlı olarak dönme hareketi yapar. Şekillerine göre sınıflandırılabilen kamlardan en yaygın olanı radyal kamlardır. Radyal kamlarda kam ve bağlı olduğu mil dönerken, hareket verilen ve izleyici adını alan eleman radyal doğrultuda ötelenme veya dönme hareketi yapar. İzleyiciye hareket ya doğrudan ya da toparlak adı verilen küçük bir tekerlek üzerinden aktarılır. Kam izleyiciden radyal ve radyale dik doğrultuda dinamik kuvvetlere maruz kalır, bağlı olduğu mil de bu kuvvetler dolayısıyla dinamik bir torca maruzdur. Mil ve izleyici elastikliğinin sistemin dinamiği üzerinde önemli etkileri vardır. Bu elastikliğin izleyici hareketi üzerindeki etkileri çeşitli araştırmalara konu olmuştur.

Kam mekanizmalarının dinamiği üzerine yapılan çalışmalar 1930'lara kadar dayanır. O tarihlerde sübap yaylarının rezonansa geçerek görev yapmaması üzerine bu konunun üzerine eğilindi. Kam





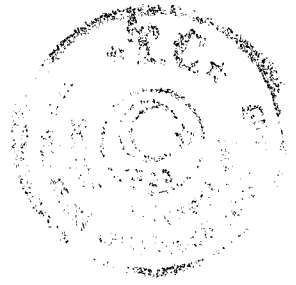
mili elastikliğinin mekanizmanın çalışması üzerindeki etkilerinin ele alınması daha yenidir. Bloom ve Radcliffe /3/ izleyiciyi rijit kabul ederek, basit bir modelle, Koster /20/ yine tek kamlı bir milde, daha detaylı bir modelle ve diğer bazı basitleştirmelerle kam mili elastikliğinin izleyici hareketi üzerindeki etkilerini araştırdılar. Koster nümerik çözümlerin izleyici cevabını gerçeğe çok yakın bir şekilde yansıttığını gösterdi. Ardayfio /1/, izleyicideki sönümü de dikkate alarak çeşitli hareket kanunları için izleyici cevabını nümerik olarak buldu. Chen ve Polvanich /8,9/ izleyici modelini daha da detaylandırarak ve kam milini rijit kabul ederek izleyici cevabını araştırdılar. Kim ve Newcombe /18/ kam mili elastikliğini ve imalat hatalarını da dikkate alarak, kam mili ve izleyicinin detaylı bir modeli ile nümerik olarak izleyici hız ve ivmesi, kam-izleyici yüzey basıncı ve mildeki tork üzerindeki etkilerini araştırdılar. Szakallas ve Savage /33/ kam milini elastik bir cisim olarak gözönüne alıp özellikle şekil kapalı kam mekanizmalarında basit bir modelle sonlu farklar metoduyla kurulum olayını araştırdılar.

Yukarda zikredilen çalışmalar daha çok kam mili elastikliğinin izleyici hareketine etkisini incelemeye yöneliktir. Kam millerinin maruz kaldıkları değişken tork etkisinde yapacakları burulma titreşimlerini ele alan bir çalışmaya literatürde raslanmamıştır. Bu çalışmada kuvvet kapalı, yani bir geri dönüş yayı ile teçhiz edilmiş kam mekanizmalarında kam milinin yapacağı burulma titreşimleri ele alındı. Kam millerinin maruz oldukları değişken tork etkisinde yapacakları titreşimlerin incelenmesi, bu titreşimlere etki eden faktörlerin tespiti, bu faktörlerin değişimi ile milin dinamik cevabında meydana gelecek değişikliklerin belirlenmesi amaçlandı. Ayrıca bir kam mekanizması dizayn edilirken milindeki titreşimlerin düzeyi, bu titreşimlerin izleyici hareketine ne ölçüde etki edeceğinin belirlenmesi için bir yöntem elde edilmesi düşünüldü. Bunun için, konu kam millerinin



titreşimi olduğundan, milin çok serbestlik dereceli, fakat izleyicinin tek serbestlik dereceli bir modeli kuruldu. Mümkün olduğu kadar basitleştirmelere gidilmeden milin hareket denklemleri, toparlaklı ve tablalı kamlar için ayrı ayrı elde edildi ve boyutsuzlaştırıldı. Non-lineer olan hareket denklemleri nümerik olarak çözüldü. Ortaya çıkan ve kam milinin dinamik davranışını karakterize eden bazı boyutsuz parametrelere göre dinamik cevabın değişimi araştırıldı. Ayrıca kam mili elastikliğinin izleyici hız ve ivmesi ile temas kuvveti üzerindeki etkileri araştırıldı. Çok kamlı millerin dinamik cevabı da bulunarak milin ara kesitlerindeki dinamik gerilmeler elde edildi. Yüksek hızlı olan çok kamlı millere volan ilavesinin meydana getireceği etkiler tespit edildi. Çok kullanılan hareket kanunları için tek veya çok kamlı millerin titreşim analizi ve titreşimlerin izleyici hareketi üzerindeki etkilerinin tespiti için BASIC dilinde bilgisayar programları hazırlandı.

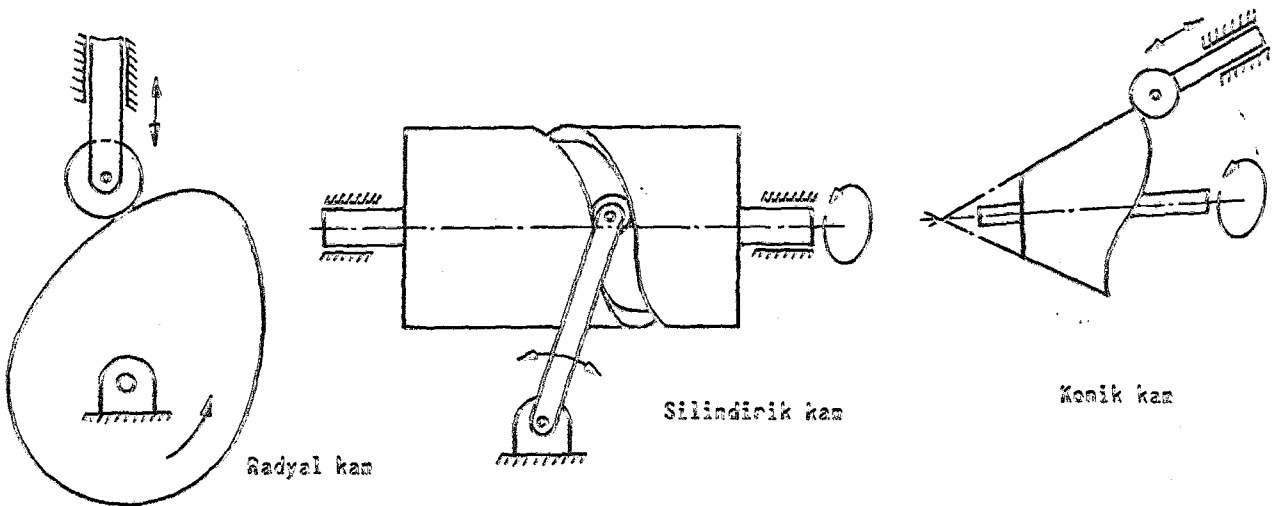
\*\*\*



## 2 . DOĞRUSAL YÖNLÜ KAMLARIN DİNAMIĞI

### 2.1. Kam mekanizmaları ve sınıflandırmaları

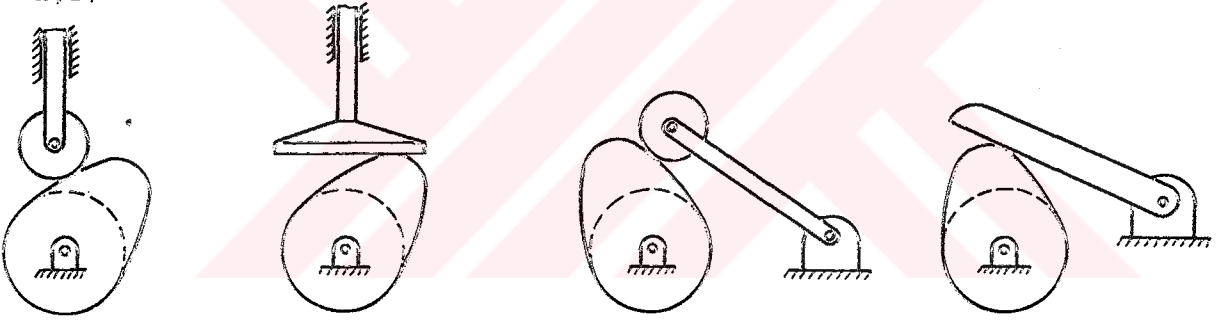
Kam, bir makina elemanına arzu edilen bir hareketi doğrudan temas yoluyla iletmek için kullanılan mekanik bir elemandır. Kinematik olarak söylenirse, hareketi doğrudan temas yoluyla ileten bir yüksek eleman çifti meydana getiren bir uzuvdur. Kam mekanizmalarında esas işlevi gören kamın yanısıra hareketin iletiildiği ve hareket iletimine yardımcı olan elemanlar bulunur. Arzu edilen şekilde hareket etmesi istenen elemana genellikle izleyici adı verilir. Arzu edilen hareketi ifade eden kinematik denklemlere de hareket kanunu denir. Motorlar, tekstil makinaları ve takım tezgahları gibi pek çok yerde kullanılan kam mekanizmalarının, icra ettikleri fonksiyonlara göre çeşitli şekillerde konstrüksiyonları mevcuttur. Zorunlu olmamakla birlikte kam mekanizmalarının büyük çoğunluğunda kam dönme hareketi yapar ve sahip olduğu eğrisel bir yüzey sayesinde arzu edilen hareketi iletir. Kam mekanizmalarını şekillerine ve hareket iletim tarzlarına göre radyal, silindirik, konik vs. şeklinde sınıflandırmak mümkündür (Şekil 2.1). En yaygın olarak kullanılan ve pratik bakımdan önemi haiz olan radyal kamlardır.



Şekil 2.1. Bazı kam mekanizmaları



Radyal kamlar, hareket ettirilen elemanın yani izleyicinin hareket şekline ve hareketin bu elemana aktarılış şekline göre sınıflandırılırlar. İzleyici doğrusal olarak hareket ediyorsa mekanizma doğrusal yönlü kam mekanizması adını alır. İzleyici dönme hareketi yapıyorsa sarkaç kollu kam mekanizması sözkonusu olur (Şekil 2.2a,b). Kam hareketi izleyiciye doğrudan temas yoluyla iletiyorsa, izleyicinin kama temas eden kısmına tabla ve mekanizmaya tabialı kam mekanizması adı verilmektedir. Tablialı mekanizmalarda kam ve tabla arasındaki kayma ve dolayısıyla sürtünme meydana gelir. Sürtünmeyi ortadan kaldırmak ve hareketi yuvarlanma yoluyla iletmek için kam ile izleyici arasına toparlak adı verilen küçük bir tekerlek konur. Böyle mekanizmalara da toparlaklı kam mekanizması denilmektedir (Şekil 2.2a,b).



a) Doğrusal yönlü toparlaklı ve tablialı kam mekanizmaları

b) Sarkaç kollu toparlaklı ve tablialı kam mekanizmaları

Şekil 2.2. Radyal kamların sınıflandırılması

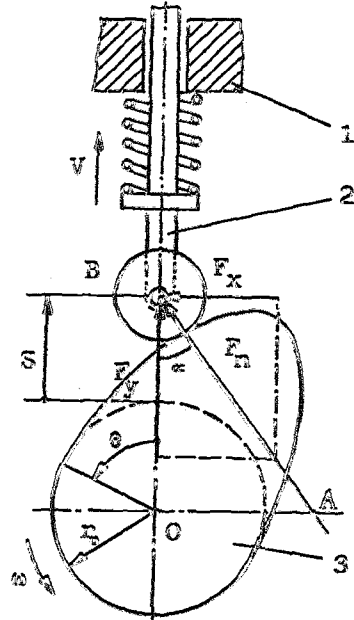
## 2.2. Doğrusal yönlü kamlarda kuvvet iletimi

### 2.2.1. Toparlaklı kamlarda kuvvet iletimi, basınç açısı

Toparlaklı kam mekanizmalarında hareket kamdan izleyiciye toparlak adı verilen küçük bir tekerlek üzerinden aktarılır. Toparlak sadece sürtünmeyi ortadan kaldırmak için kullanılır, sistemin serbestlik derecesine ve hareketliliğine etki etmez. Kinematik açıdan toparlak kullanmakla, onu ortadan kaldırıp izleyiciyi kama bir noktadan temas ettirmek arasında hiç bir fark yoktur. Toparlak kullanılmazsa,



izleyici ile kam arasında sürtünme kuvveti doğar. Toparlık yuvarlanma yoluyla sürtünmeyi ortadan kaldırır. Kamdan toparlağa sadece normal doğrultuda bir kuvvet iletilir. Toparlık da bu kuvveti aynen izleyiciye iletir. Toparlıklı bir kam mekanizmasında kamdan izleyiciye iletilen  $F_n$  normal temas kuvveti ve bileşenleri Şekil 2.3 de görülmektedir. Bu kuvvet kam yüzeyinin her noktasında yüzeyin normali doğrultusundadır. Normal her noktada farklı doğrultuda olduğu için kamın bir dönüşünde kuvvet farklı doğrultular alacaktır.  $F_n$  kuvvetinin biri izleyici hareket doğrultusunda, diğeri de buna dik doğrultuda olan bileşenlerinden sadece birincisi izleyiciyi hareket ettirmeye çalışır. Diğer bileşen izleyiciyi yana doğru iterek, içinde hareket ettiği yuva ile arasındaki sürtünmeyi artırır. İzleyiciyi hareket ettirmeye çalışan  $F_y$  radyal bileşeniyle  $F_n$  normal kuvveti arasındaki açıya basınç açısı denir.  $F_y$  izleyici hareket doğrultusunda ve  $F_n$  daima kam temas noktasındaki normal doğrultuda olduğundan, basınç açısı, temas noktasındaki normal ile izleyici hareket doğrultusu arasındaki açı olarak da tanımlanır (Şekil 2.3). Sarkaç kollu kamlarda da basınç açısı benzer şekilde tanımlanmıştır.



Şekil 2.3. Toparlıklı bir kamda temas kuvveti ve bileşenleri, basınç açısı

Kam mekanizmalarında basınç açısı kuvvet iletimi açısından çok önemlidir. Basınç açısı büyüdükçe  $F_y$  bileşeni küçüleceğinden izleyici hareketi zorlaşır ve  $F_x$  bileşeni büyür. Bu açı öyle bir değer alabilir ki,  $F_y$  bileşeni izleyiciyi hareket ettirmek için yetersiz kalır, kam sadece izleyiciyi yana doğru itmeye çalışır. Kuvvet iletiminin iyi ve hareketin rahat olabilmesi için basınç açısının  $30^\circ$ 'nin üstüne çıkması istenmez. Basınç açısının sabit bir değeri olmayıp her kam açısında farklı değerler alır. Şekil 2.3. de A noktası kam ve izleyicinin izafi ani dönme polüdür ( $P_{23}$ ). Mekanizmanın kinematığından,

$$V = \omega \cdot OA \quad (2.1)$$

Burada  $V$ , izleyicinin doğrusal hızı,  $\omega$ , kam açısal hızıdır.

Kam mekanizmalarında izleyici hareketi, hareket kanunu ile kam dönme açısına bağlı olarak belirlidir:

$$s = s(\theta), \quad V = \frac{ds}{dt} = \dot{\theta} s'(\theta), \quad a = \dot{\theta}^2 s''(\theta) + \ddot{\theta} s'(\theta) \quad (2.2)$$

Burada  $\ddot{\theta}$  kam açısal ivmesidir ve  $(\cdot)$  notasyonu kam dönme açısı  $\theta$ 'ya göre türevi ifade etmektedir.

(2.1) ve (2.2) ifadelerinden,

$$OA = s' \text{ bulunur.}$$

OAB üçgeninde  $\text{tg} \alpha$  hesaplanır ve  $r_0$  temel daire yarıçapı olmak üzere  $OB = r_0 + s$  yazılırsa;

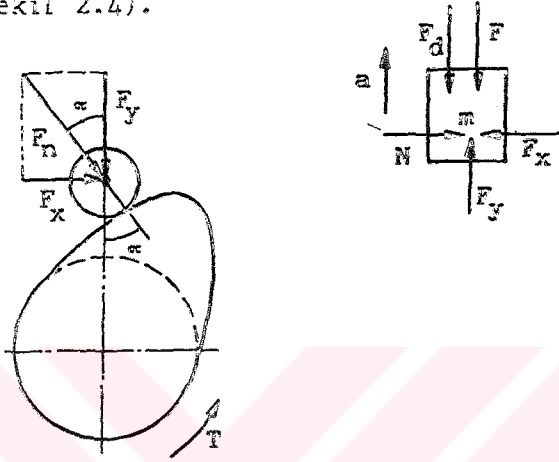
$$\text{tg} \alpha = \frac{s'}{r_0 + s} \quad (2.3)$$

ifadesi elde edilir /6/.

Burada  $s'$  ve  $s, \theta$ 'nin fonksiyonları olduğundan basınç açısı da kam dönme açısının bir fonksiyonudur. İzleyicinin kalkış veya iniş hareketi esnasında basınç açısı belli bir açıda en büyük değerini alır. Kuvvet iletimi açısından basınç açısının kalkış esnasındaki en büyük değeri önemlidir. İniş hareketi sırasında geri dönüş yayı genellikle izleyiciyi hareket ettirmek için yeterli olur. Çeşitli kam hareket kanunları için basınç açısının en büyük değeri hesaplanabilir. (2.3) ifadesinden de görülebileceği gibi temel daire yarıçapı

pının büyümesi basınç açısını küçültür. Bu, hareket rahatlığı açısından iyi sonuçlar doğurur, fakat kam boyutlarının büyümesine sebep olur.

Bir geri dönüş yayı ile teçhiz edilmiş doğrusal yönlü ve toparlaklı bir mekanizmada kam ve izleyicinin serbest cisim diyagramını çizelim (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Toparlaklı bir kam ve izleyicisinin serbest cisim diyagramı

Burada  $F$ , izleyiciye etki eden yay kuvveti,  $F_d$  ağırlık, yayın ön gerilme kuvveti vb. gibi dış kuvvetlerin toplamı ve  $T$  kama uygulanan döndürme momentidir. İzleyici ve ona bağlı olarak hareket eden elemanları temsil eden  $m$  eşdeğer kütesinin hareket denklemleri yazılırsa,

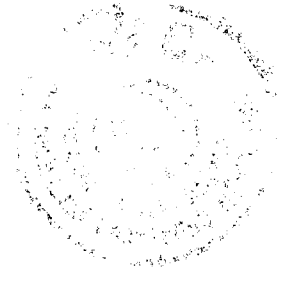
$$F_y - F - F_d = ma,$$

$$F_y = F + F_d + ma \quad (2.4)$$

$F$  yay kuvveti yayın sıkışması ile doğru orantılıdır.  $k_y$  yay sabiti olmak üzere,

$$F = k_y s \text{ yazılabilir.}$$

Geri dönüş yayının kullanım amacı toparlağı veya tablayı kam ile sürekli temasta tutmaktır. Bilhassa izleyicinin iniş hareketi sırasında negatif ivme sebebiyle atalet kuvveti ve yay kuvveti birbirine



zıt yönlü olurlar. Eğer yay kuvveti herhangi bir anda atalet kuvvetinden küçük olursa toparlak veya tablanın kam ile teması kesilir. Biraz sonra toparlak kama sert bir şekilde çarpar. Bu olaya sıçrama denir. Geri dönüş yayı sıçramayı önleyecek şekilde dizayn edilir.

$F_d$  kuvveti tüm hareket boyunca sabit kalan bir kuvvet olarak düşünülebilir.

$$F_d = mg + k_y s_0 + Z P_{dış}$$

Burada  $s_0$  yayın ön gerilme miktarıdır.

Sıçramayı önlemek için yay kuvvetinin en büyük değeri ile  $F_d$  kuvvetinin toplamı atalet kuvvetinin en büyük değerinden daha büyük olmalıdır:

$$F_{max} + F_d > m a_{max} \quad (2.5)$$

Yay kuvveti en büyük değerini izleyicinin maksimum kalkışı esnasında alır.

$$F_{max} = k_y s_{y \max} = k_y h$$

İzleyici ivmesinin en büyük değeri ivmenin negatif olduğu iniş periyodunda aranır. Zira ivmenin pozitif olduğu kalkış esnasında yay kuvveti ve atalet kuvveti aynı yönlü olduğundan sıçrama tehlikesi yoktur. İzleyici hareket kanununun zamana göre iki kez türetilmesi ile elde edilen (2.2) ivme ifadesinde, kamın sabit açısal hızla döndüğü farzedilerek;

$$a_{max} = \omega^2 s_m'' \text{ yazılır.}$$

Burada  $\omega = \dot{\theta}$  kam açısal hızı ve  $s_m'' = s''(\theta)$  fonksiyonunun kam hareket periyodunda aldığı en büyük negatif değer mutlak değeridir. (2.5) ifadesinden;

$$k_y h + F_d > m \omega^2 s_m'' \text{ ve}$$

$$k_y h > m \omega^2 s_m'' - F_d \quad (2.6)$$





Pratikte mekanizmanın elastikliği, imalat hataları ve diğer sebeplerden dolayı ivme teorik değerinden daha büyük değerler alabilir. Bu yüzden ve sıçramaya karşı bir emniyet olmak üzere geri dönüş yayının yay sabiti hesaplanırken, yay kuvveti (2.6) ifadesindeki değerden 1,5-2 kat daha fazla alınır. Bu emniyet katsayısı gerekirse daha büyük bile alınabilir /33,35,40/. Burada  $\lambda = 1,5$  alınmıştır.

$$k_y = \frac{\lambda}{h} (m \omega^2 s_m'' - F_d), \quad \lambda = 1.5 \quad (2.7)$$

(2.4) denklemini düzenlenirse;

$$F_y = m s'' \ddot{\theta} + m s'' \dot{\theta}^2 + \frac{\lambda}{h} m \omega^2 s_m'' s + F_d (1 - \frac{\lambda}{h} s) \quad (2.8)$$

Kam dönme hızı sabit kabul edilirse, yani  $\ddot{\theta} = 0$  ise;

$$F_y = m s'' \omega^2 + \frac{\lambda}{h} m \omega^2 s_m'' s + F_d (1 - \frac{\lambda}{h} s) \quad (2.9)$$

$$F_x = F_y \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.10)$$

$$F_n = (F_x^2 + F_y^2)^{\frac{1}{2}} = F_y (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha)^{\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

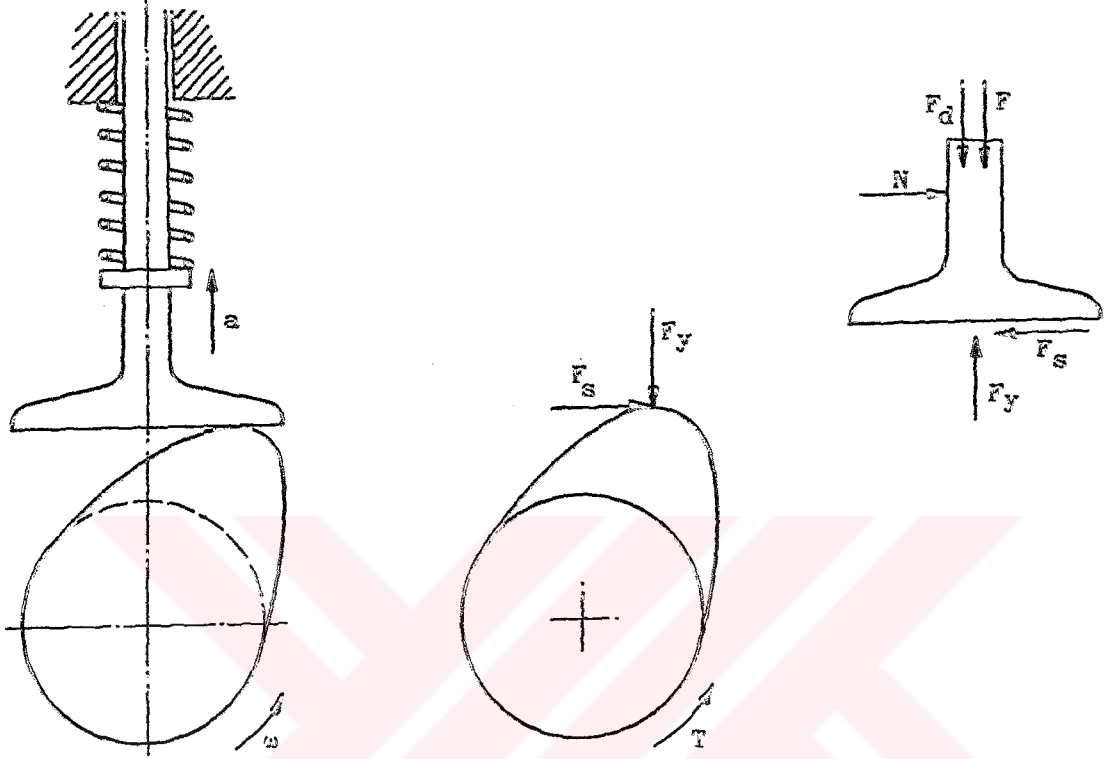
## 2.2.2. Tablalı kamlarda kuvvet iletimi

Tablalı kamlarda hareket kamdan izleyiciye doğrudan temas yoluyla aktarılır. İzleyicinin kama temas eden geniş yüzeyi sebebiyle bu isim kullanılmaktadır. Kam ile tabla arasında kayma ve dolayısıyla sürtünme meydana gelir. Tablalı ve doğrusal yönlü bir kam mekanizmasının serbest cisim diyagramı Şekil 2.5 de görülmektedir. Burada topariaklı kamlardan farklı olarak sürtünme kuvveti mevcuttur, diğer kuvvetler topariaklı kamlardaki gibidir.

Tablalı kamlarda da topariaklı kamlardakine benzer işlemler yapılarak  $F_y$  düşey bileşeni için (2.8) ifadesinin aynısı elde edilir. Kam sabit açısal hızla dönerse  $F_y$  için (2.9) ifadesi bulunur. Kam ile tabla arasındaki sürtünme kuvveti ise;

$$F_s = \mu F_y \quad (2.12)$$

şeklindedir.

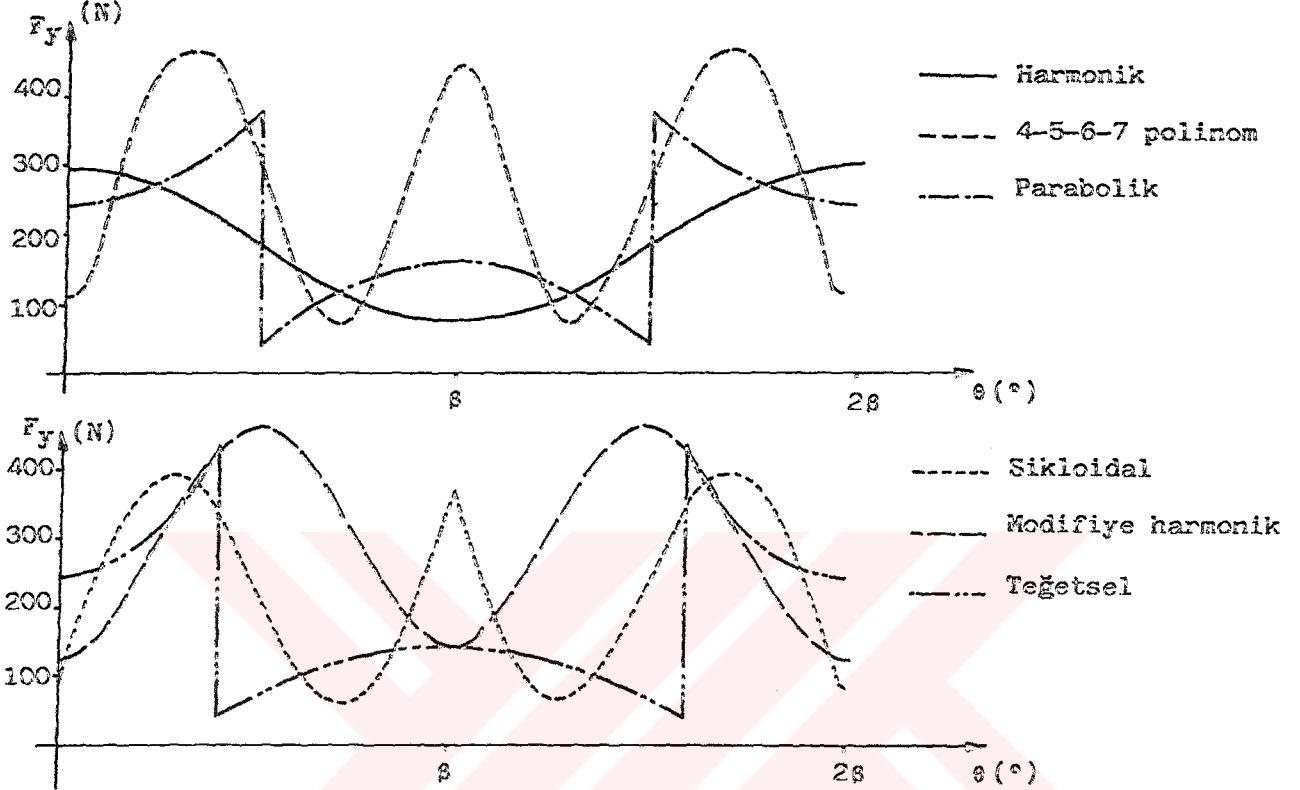


Şekil 2.5. Tablalı bir kam ve izleyicisinin serbest cisim diyagramı

İzleyiciden kama etki eden kuvvetin radyal bileşeni  $F_y$  kuvvetinin, aynı boyutlara ve aynı dinamik özelliklere sahip muhtelif hareket kanunları haiz kamlar için bir hareket periyodundaki değişimi Şekil 2.6 da görülmektedir. Bu diyagramlarda izleyici hareketi kalkış-İNİŞ-bekleme olarak alınmıştır. Diyagramlardan harmonik hareket kanunu için bu kuvvet nispeten küçük değerlerde seyrederken, modifiye harmonik ve 4-5-6-7 polinom hareket kanunları için en büyük maksimumlara ulaşmaktadır. Sıçrama ve tork iletimi açısından bu kuvvetin değişimi önemlidir. Parabolik ve teğetsel kamlarda hareket denklemindeki süreksizlik sebebiyle kuvvet eğrisinde de süreksizlik meydana gelmektedir. Bu da ani ivme değişikliklerine yol açacaktır.



dan sıçrama tehlikesini artırır ve daha sert yay kullanımını gerektirir.



Şekil 2.5. Doğrusal yönlü radyal kamlarda kama etki eden radyal kuvvetin değişimi ( $m= 0,5 \text{ kg}$ ;  $h= 1 \text{ cm}$ ;  $\omega = 100 \text{ rad/s}$ ;  $\beta = 60^\circ$ )

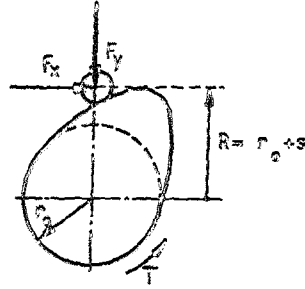
### 2.3. Doğrusal yönlü kamlarda tork (burulma momenti) iletimi

#### 2. 3.1. Toparlıklı kamlarda tork iletimi

Bir mile bağlı olan toparlıklı bir kam önceki kısımda görüldüğü gibi izleyiciden temas kuvvetinin bileşenleri olan  $F_x$  ve  $F_y$  kuvvetlerine maruzdur. Dönme hareketi yapan kama bu kuvvetleri yenmesi için bir tork (döndürme momenti) uygulanır. Şekil 2.7 deki serbest cisim diyagramında,  $R$  toparlak merkezinin kam mili dönme merkezine uzaklığı ve  $r_c$  kam temel daire yarıçapını göstermek üzere kam miline uygulanması gerekli  $T$  torku (burulma momenti),

$$T= F_x \cdot R \quad (2.13)$$

olarak yazılır.



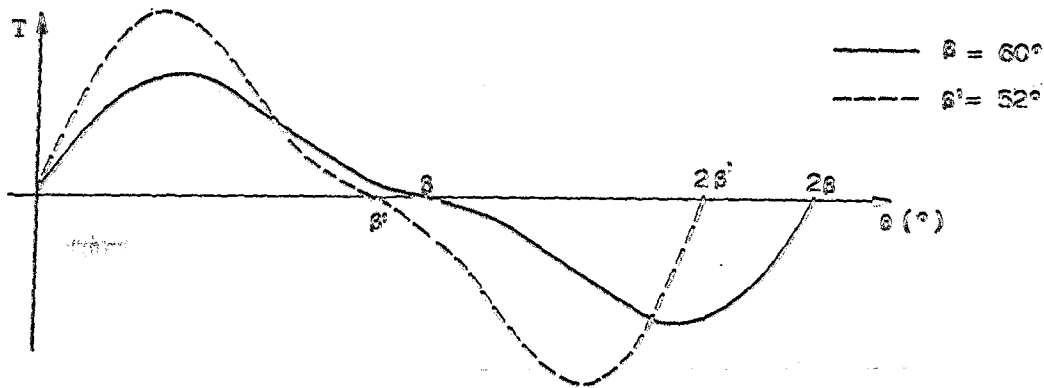
Şekil 2.7. Toparlıklı bir kamın serbest cisim diyagramı

(2.10) ve (2.3) denklemleri kullanılarak bu ifade düzenlenirse,

$$T = F_y s' \quad (2.14)$$

bulunur.

Burada  $s' = ds/d\theta$  kam yüzeyinin herhangi bir noktadaki eğimini göstermektedir. Denklemden kam eğimi arttıkça mildeki torkun da artacağı görülmektedir. Kam eğiminin artması aynı zamanda basınç açısının da artması demek olduğundan kısaca basınç açısı büyüdükçe mildeki tork da artar denilebilir. Bir kamda izleyicinin kalkış hareketinin meydana geldiği kam dönme açısı  $\theta$  küçültülürse ya da aynı kalkış daha küçük boyutlu kamlarla yapılırsa, yani temel daire yarıçapı küçültülürse basınç açısı büyür. Dolayısıyla kam milindeki tork büyür. Mildeki torku küçültmek için bu söylenenlerin tersi yapılmalıdır. Şekil 2.8 de aynı kalkışın farklı kam dönme açılarında yapıldığı harmonik hareket kanununu haiz iki toparlıklı kamda mildeki torkun değişimi görülmektedir.



Şekil 2.8 Aynı kalkışın farklı açılarda gerçekleştirildiği iki kamda mildeki torkun değişimi



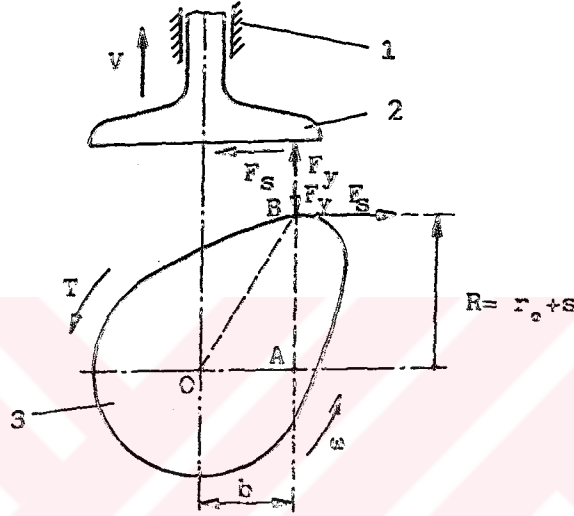
### 2.3.2. Tablalı kamlarda tork iletimi

Tablalı bir izleyiciye hareket veren bir kamın serbest cisim diyagramını ele alalım (Şekil 2.9). Kama uygulanması gerekli tork,

$$T = F_y b + F_s \cdot R$$

olarak yazılır. Ara işlemlerden sonra,

$$T = F_y [ b + \mu (r_o + s) ] \quad (2.15)$$



Şekil 2.9. Tablalı bir kamın serbest cisim diyagramı

Burada b kam ile tablanın temas noktasının izleyici hareket doğrultusuna dik uzaklığıdır ve hareket boyunca değişen bir mesafedir. A noktası kam ve izleyicinin izafi ani dönme polüdür ( $P_{23}$ ). Böylece izleyici hızı,

$V = \omega \cdot b$  olarak yazılır. İzleyici hızının aynı zamanda

$V = \omega s'$  şeklinde ifade edileceği hazırlanırsa,

$$b = s' \quad (2.16)$$

bulunur. Bu sonuç (2.15) denkleminde yerine konursa tork ifadesi nihai şeklini alır:

$$T = F_y [ s' + \mu (r_o + s) ] \quad (2.17)$$

Tablalı bir kamda kamla tabla arasında sürekli olarak sürtünme mevcut olduğundan, bekleme periyotlarında da kama bir tork etki eder. Bekleme periyodunda izleyiciden kama etki eden  $F_y$  kuvve-

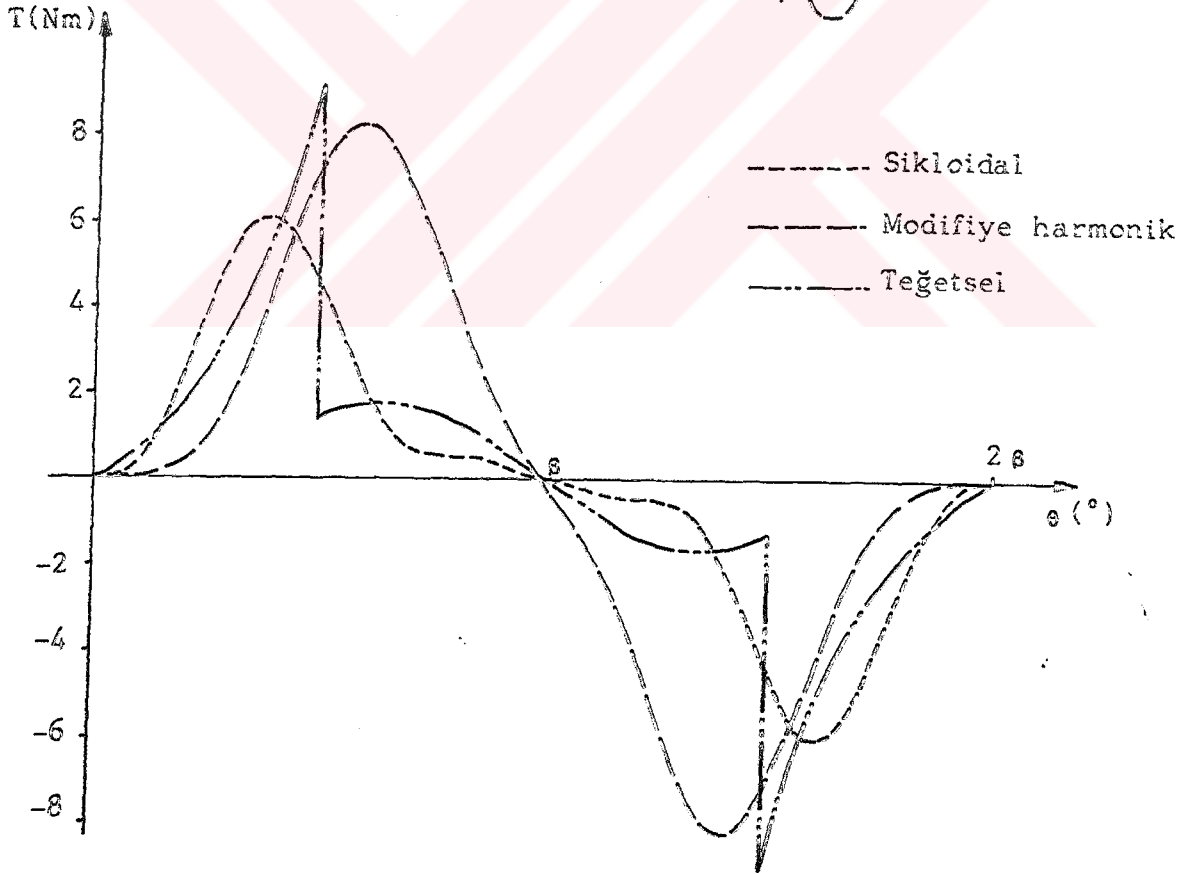
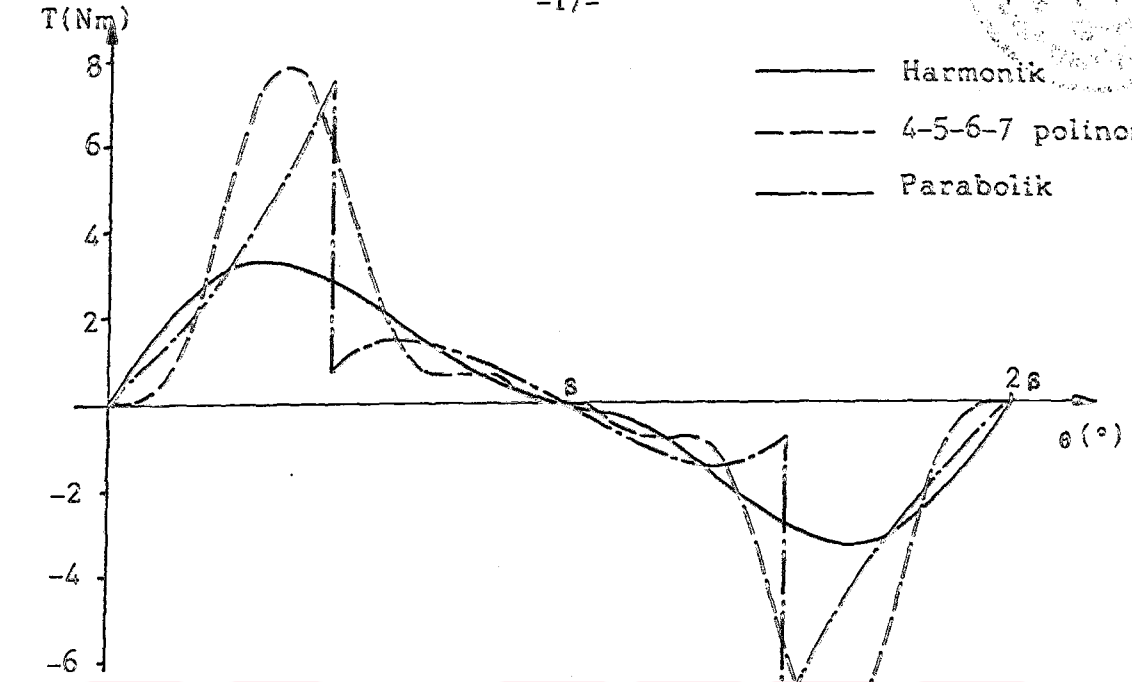
ti sadece  $F_d$  kuvvetinden ibaret kalır. İzleyici kalkışı ve hızı da sıfır olduğundan bu periyotta kama etki eden tork, (2.17) denklemin-den;

$$T = \mu r_o F_d \quad (2.18)$$

olarak bulunur.

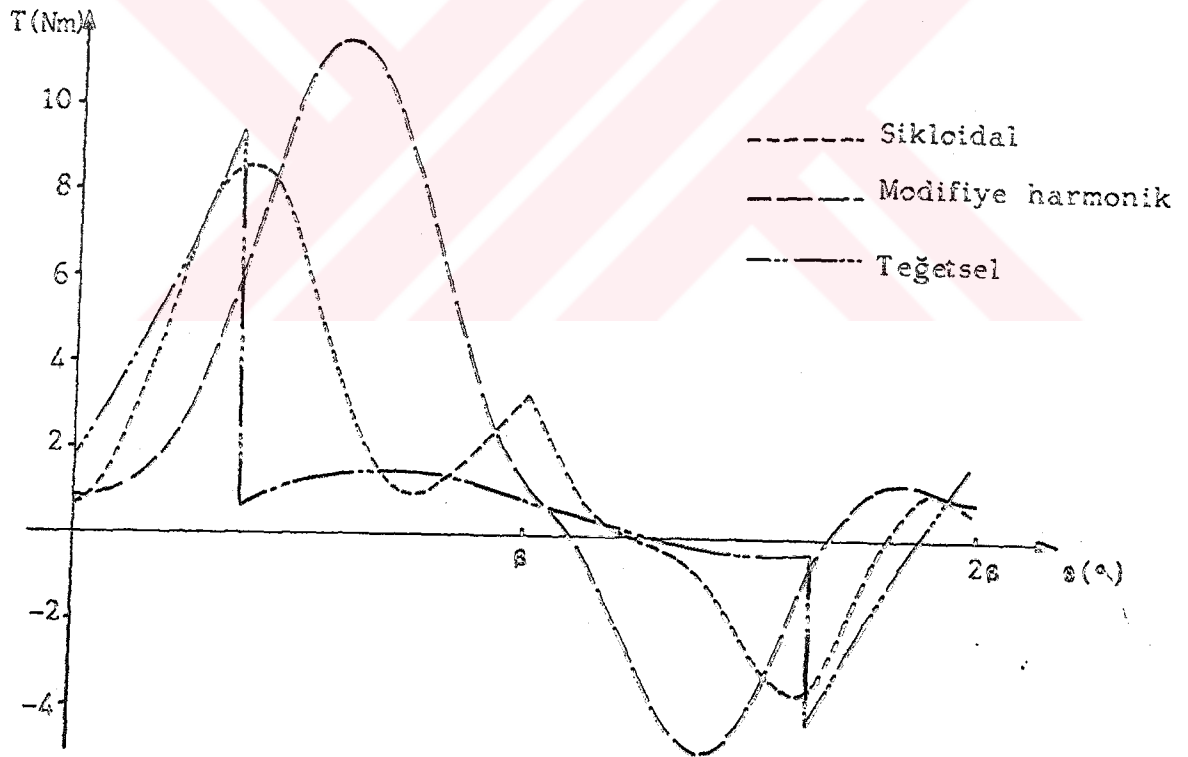
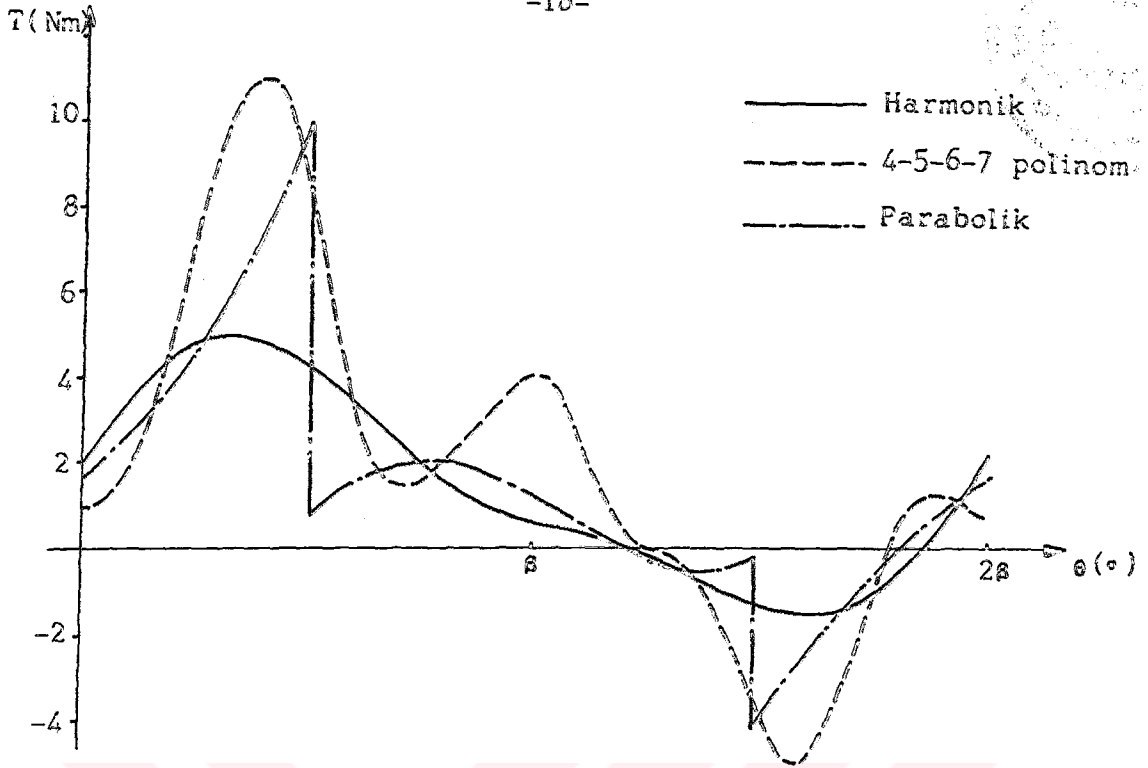
Şekil 2.10 da aynı boyutlara ve aynı dinamik özelliklere sahip çeşitli hareket kanunlarını haiz kamlar için kam milindeki torkun kam dönme açısına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Tork diyagramları toparlaklı ve tablalı kamalarda farklılık arz etmektedir. Tablalı kamalarda tabla ile kam arasındaki sürtünme ilave bir tork meydana getirmektedir. Bu sürtünme toparlaklı kamlardan farklı olarak bekleme periyotlarında da bir tork oluşturmaktadır. Ayrıca tork diyagramında negatif kısmı azaltmaktadır. Harmonik ve sikloidal hareket kanunları için mildeki tork nispeten küçük değerlerde seyrederken, 4-5-6-7 polinom ve modifiye harmonik hareket kanunları için en büyük maksimumlara ulaşmaktadır. Parabolik ve teğetsel kamalarda ise, hareket denklemlerindeki süreksizlik sebebiyle tork diyagramında sivri uçlar oluşmaktadır. Tablalı kamalarda, sürtünmenin meydana getirdiği ilâve tork, mildeki tork değişimini önemli ölçüde etkilemektedir. Torkun pozitif maksimumu ve pozitif kısmı artarken, diyagramın gidişi de değişmektedir. Başlangıçta torkun artışı daha hızlı olmakta sonda ise tork daha yavaş azalmaktadır. Gerek tablalı, gerekse toparlaklı kamalarda tork diyagramlarından görülebileceği gibi izleyicinin kalkışı esnasında kam milindeki tork hızlı bir şekilde artmaktadır. Daha sonra ise azalarak inişte negatif olmaktadır, yani kalkışın tersine inişte kam izleyiciyi değil, izleyici kamı tahrik etmektedir. Bu durumda kama etki eden tork etkisiyle bir miktar burulan mil, torkun ortadan kalkmasıyla üzerinde biriken enerjiyi geri verir ve hızlanır. İnişte izleyicinin kamı tahrik etmesi bu olayı daha da şiddetlendirir. Kalkış esnasında izleyiciden gelen direnç torku sebebiyle

azalan kam açısai hızı iniş esnasında artar ve böylece açısai hız sabit olmaktan çıkarak milde burulma titreşimi oluşur. Bu olay bil-hassa kalkışı hemen dönüşün takib ettiği kamlarda açısai hız ve iz-leyici kütlesi arttıkça önemli olabilmektedir. Açısai hızın düzgün ol-maması izleyici hareketini de etkileyerek teorik olarak farzedilenden sapmalara yol açmaktadır. İniş hareketi esnasında açısai hızdaki artış fazla olursa bu, sıçramaya bile sebep olabilmektedir. İlk defa Rothbart tarafından farkedilen bu olaya yabancı literatürde "windup" adı verilmektedir /6,7,30,33/. Türkçe literatürde ise "kurulma" ismiy-le anılmaktadır /12/.



Şekil 2.10 a. Toparlıklı kamlarda mildeki torkun değişimi  
( $m = 0,5$  kg,  $\beta = 60^\circ$ ,  $\omega = 100$  rad/s,  $h = 1$  cm)



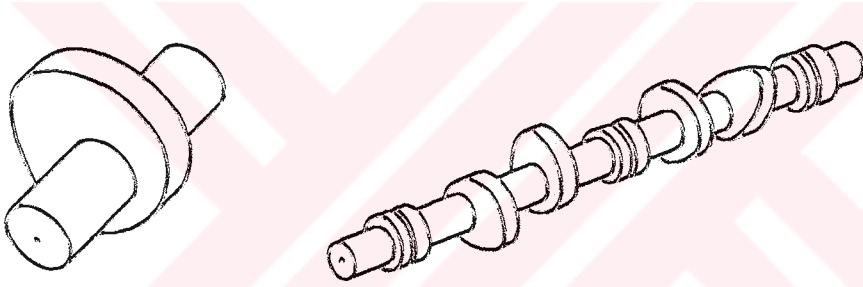


Şekil 2.10b. Tablalı kamlarda mildeki torkun değişimi  
( $m = 0,5$  kg,  $\omega = 100$  rad/s,  $h = 1$  cm,  $\beta = 60^\circ$ ,  $r_o = 3$  cm,  
 $\mu = 0,21$ )

### 3 . KAM MİLİNİN MODELLENMESİ VE HAREKET DENKLEMLERİNİN TEŞKİLİ

#### 3.1. Kam mili modelinin kurulması

Kam mekanizmalarında bir veya daha fazla kam bir mile bağlı olarak hareket ederler. Bir güç kaynağından hareket alan kam mili kamların hepsine birden hareket verir. Kullanımda tek kamlı miller yaygın olduğu gibi, özellikle içten yanmalı motorlarda çok kamlı miller vazgeçilmez elemanlardan biridir. Çok kamlı millerde kamlar mil eksenine göre farklı açısai konumlarda bulunurlar. Şekil 3.1 de tek ve çok kamlı iki kam mili görülmektedir.

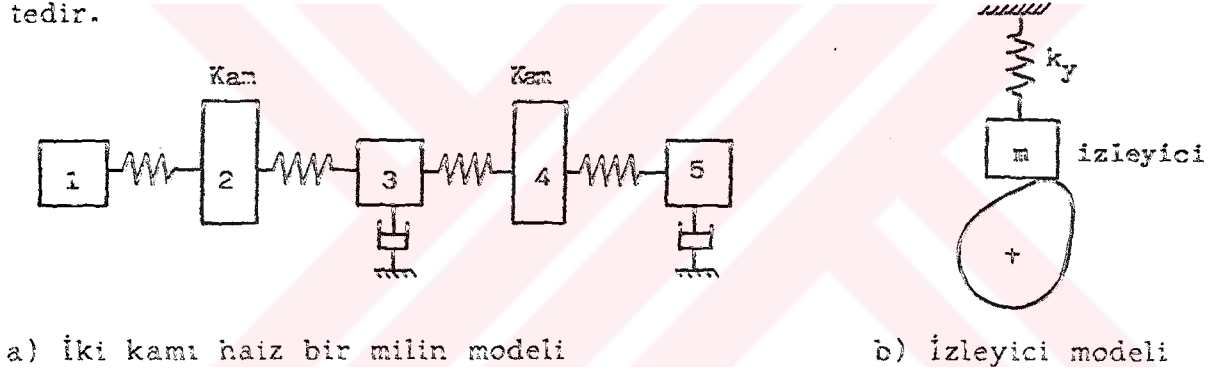


Şekil 3.1. Tek ve çok kamlı kam milleri

Kam milinin modellenmesinde her bir kam ve bunları birbirine bağlayan mil parçaları birbirine yaylarla bağlı, dönen kütleler olarak düşünülmüştür. Böylece model, kamlar ve aralarındaki mil parçaları ile beraber, mildeki kam sayısının iki katı kadar serbestlik dereceli olacaktır. Mil üzerindeki kamlar ve bunlara ait izleyiciler birbirinin aynı olabileceği gibi farklı da olabilir. Pratikte izleyiciler genellikle aynı yapırlar, fakat kamlar mil üzerine farklı açılarda yerleştirilirler. Modelde de kam ve izleyicilerin bu şekilde olduğu kabul edilmiştir. Kam mili yataklarındaki yağın viskoz sönümü yanısıra kam milinin kendi yapısal sönümü de dikkate alınabilir. Fakat pratikte yapısal sönüm çok küçük olduğundan çoğu modellerde olduğu gibi ihmal edilmiştir. Çalışmanın esas konusu kam milinin



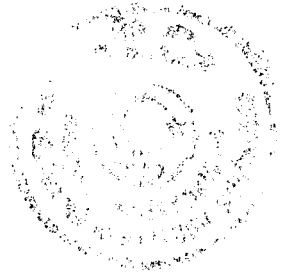
dönme hareketi ile ilgili olduğundan, izleyici modeli kurulurken, izleyici ve ona bağlı elemanlar basitlik amacıyla bir geri dönüş yayı ile teçhiz edilmiş bir kütle olarak düşünülmüştür. Bunlara etki eden sönüm ihmal edilmiştir. Böylece modelde izleyici kısmı (tij.vs.) rijit olarak kabul edilmiş olmaktadır. Araştırılan konu kam milinin titreşimleri olduğu için böyle bir kabul yapılabilir /12/. Bu sayede kam milinin titreşimleri ve II. bölümün sonunda sözü edilen kuruşma olayı diğer etkilerden arındırılmış olarak net bir şekilde incelenebilir. Ayrıca izleyici için tek serbestlik dereceli bir modelin çoğu zaman yeterli olduğu çeşitli kaynaklarda zikredilmektedir /7,20,24/. Bu düşüncelerle çizilen kam mili ve izleyici modeli Şekil 3.2 de görülmektedir.



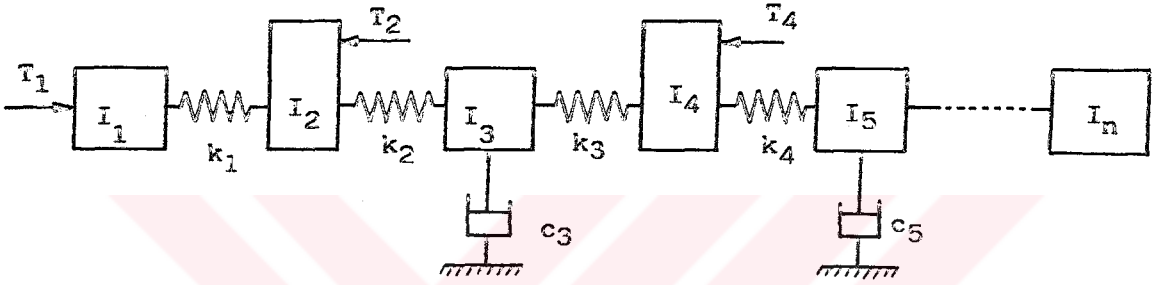
Şekil 3.2

### 3.2. Hareket denklemlerinin teşkili

Modeli Şekil 3.2b de görülen izleyiciden kama etki eden tork II. bölümde bulunmuştu. Kam milinin Şekil 3.2a da görülen modeli tekrar ele alınarak Şekil 3.3'de modeldeki elemanlar ve mile etki eden torklar gösterilmiştir. Burada  $T_1$  tahrik momenti,  $T_2, T_4, \dots$  tahrik tarafından itibaren kamlara etki eden momentler,  $I_1, I_2, I_3, \dots$  kam ve mil parçalarının mil eksenine göre kütle atalet momentleri,  $k_1, k_2, k_3, \dots$  kam ve mil parçalarının burulma yay katsayıları ve  $c_3, c_5, \dots$  sönüm katsayılarıdır. Yapısal sönüm ihmal edilmiştir. Tahrik momentinin ve tahrik açısal hızının sabit olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda mil modelindeki 1 nolu kütle sabit açısal hızda

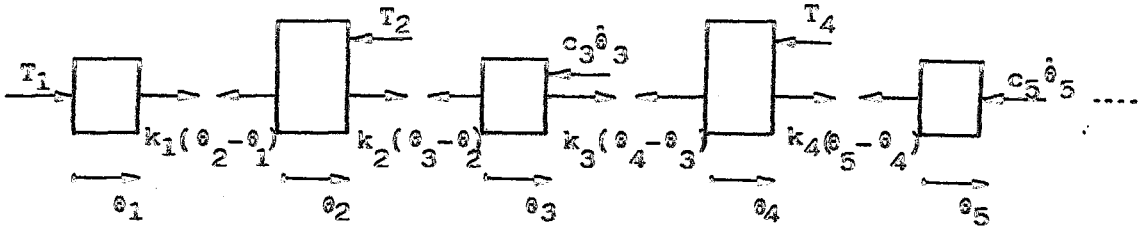


dönecektir ve bu eleman için hareket denklemleri yazılmasına gerek kalmayacaktır. Milde daha fazla kam varsa model benzer şekilde kurulur. i nolu eleman sabit açısal hızla döndüğü için bu modelin serbestlik derecesi kam sayısının iki katıdır. Bu kabuller altında çok kamlı millerin modelinin serbestlik derecesinde aynı şekilde hesaplanabilir.



Şekil 3.3. Kam mili modelindeki elemanlar.

Kam mili modelindeki hareketli elemanların serbest cisim diyagramları Şekil 3.4 de görülmektedir. Burada sağa doğru olan yönler pozitif, sola doğru olanlar negatif olarak alınmıştır. Her bir hareketli kütle için Newton'un ikinci hareket kanunu yazılırsa bir diferansiyel denklem takımı elde edilir.



Şekil 3.4. Model atalet elemanlarının serbest cisim diyagramları

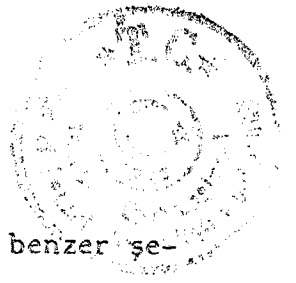
$$I_2 \ddot{\theta}_2 = k_2(\theta_3 - \theta_2) - k_1(\theta_2 - \theta_1) - T_2 \quad (3.1)$$

$$I_3 \ddot{\theta}_3 = k_3(\theta_4 - \theta_3) - k_2(\theta_3 - \theta_2) - c_3 \dot{\theta}_3 \quad (3.2)$$

$$I_4 \ddot{\theta}_4 = k_4(\theta_5 - \theta_4) - k_3(\theta_4 - \theta_3) - T_4 \quad (3.3)$$

$$I_5 \ddot{\theta}_5 = k_4(\theta_4 - \theta_5) - c_5 \dot{\theta}_5 \quad (3.4)$$

.....



Kam milinde daha fazla kam varsa denklem takımı benzer şekilde devam ettirilir. Milde ilâve sönüm ve volan gibi atalet elemanları varsa bunlarla ilgili terimler denklemlere eklenir.  $T_2$  ve  $T_4$  izleyiciden kamlara etki eden ve daha önce (2.14) ve (2.17) denklemleri ile verilen torklardır. Kamların tablalı veya toparlaklı olması halinde denklemlerde sadece bu tork ifadeleri değişir.

Kamların toparlaklı olduğu düşünülür ve (2.14) denklemindeki tork yerine konursa (3.1) denklemi şu hale gelir:

$$I_{22} \ddot{\theta}_2 = k_2 (\theta_3 - \theta_2) - k_1 (\theta_2 - \theta_1) - ms' \ddot{\theta}_2 - ms'' \dot{\theta}_2^2 - \frac{\lambda}{h} ms'' s \omega^2 - F_d (1 - \frac{\lambda}{h} s) s' \quad (3.5)$$

Kamlar tablalı ise benzer bir ifade bulunur:

$$I_{22} \ddot{\theta}_2 = k_2 (\theta_3 - \theta_2) - k_1 (\theta_2 - \theta_1) - [ms' \ddot{\theta}_2 + ms'' \dot{\theta}_2^2 + \frac{\lambda}{h} ms'' s \omega^2 + F_d (1 - \frac{\lambda}{h} s)] (s' + \mu r_0 + \mu s) \quad (3.6)$$

Bu denklemlerdeki  $s$ ,  $s'$  ve  $s''$  terimleri kam dönme açısı  $\theta_2$ 'ye bağlı olarak tanımlanmıştır ve bütün kam hareket kanunlarında genellikle trigonometrik veya polinom şeklinde fonksiyonlardır. (Ek-A) Ayrıca  $\dot{\theta}_2^2$  terimi de mevcut olduğundan bu diferansiyel denklemler nonlineer diferansiyel denklemlerdir. Diğer kamlar için yazılan denklemler de nonlineer olacağından yukarıda elde edilen diferansiyel denklem takımı nonlineerdir. Literatürde toparlaklı kamlar için elde edilmiş (3.5) benzeri daha basit denklemler mevcuttur /3,20/. Fakat bu denklemlerde yay kuvveti veya yay ön gerilme kuvvetiyle dış kuvvetler ihmal edilmiştir. Ayrıca mildeki sönüm de gözönüne alınmamıştır. Tablalı kamlar ise hiç ele alınmamıştır.

Birden çok kamı ihtiva eden kam millerinde, kamların birbirini etkileyeceği ve kam mili yataklarındaki sönümün de harekete etkisi olacağı gözönüne alınırsa, tek bir kam için elde edilen sonuçların çok kamlı bir sistem için geçerli olmayacağı açıktır. Üstelik bu ko-



nuda yapılan çalışmaların hepsinde kam milindeki elastikliğin izleyici hareketine etkisi araştırılmıştır. Kam milinin, maruz kaldığı değişken torklar sebebiyle yapacağı burulma titreşimlerini ele alan bir çalışmaya literatürde raslanmamıştır.

### 3.3. Hareket denklemlerinin boyutsuzlaştırılması

#### 3.3.1. Boyutsuzlaştırma işlemi

Önceki kısımda belirtildiği gibi Şekil 3.3 deki kam mili modelinde giriş açısal hızı  $\dot{\theta}_1 = \omega$  sabit kabul edilirse  $\theta_1$  giriş açısı zamanla düzgün olarak değişir.  $\theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$  açıları ise düzgün olarak değişmezler. Kam milinin dönüşü esnasında milin elastikliğinden dolayı burulması sebebiyle bu açılar  $\theta_1$ 'e göre kâh geri kalır, kâh ileri giderler. Yani dönme hareketi içinde bir titreşim meydana gelir. Bu değişken açıların, sabit olarak değişen  $\theta_1$  girişine göre ileri veya geri gittiğini gözlemlemek, milin titreşimini anlamak bakımından daha uygundur. Bunun için (3.1)-(3.4) diferansiyel denklem takımına  $\theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$  yerine şu değişkenleri sokalım.

$$\psi_2 = \theta_1 - \theta_2, \quad \psi_3 = \theta_1 - \theta_3, \quad \dots, \quad \psi_n = \theta_1 - \theta_n \quad (3.7)$$

Bu ifadelerden de anlaşılacağı gibi  $\psi_2, \psi_3, \dots, \psi_n$  modeldeki hareketli her bir elemanın girişe göre izafi açısal konumudur.

$$\dot{\theta}_1 = \omega = \text{sabit olduğundan}$$

$$\theta_1 = \omega t \text{ bulunur.}$$

$$\theta_2 = \theta_1 - \psi_2,$$

$$\dot{\theta}_2 = \frac{d\theta_2}{dt} = \frac{d\theta_2}{d\theta_1} \frac{d\theta_1}{dt} = \omega (1 - \psi_2') \text{ ve}$$

$$\ddot{\theta}_2 = -\omega^2 \psi_2'' \quad (3.8)$$

denklemleri elde edilir. Burada,



-24-

$$\dot{\psi}_2 = \frac{d\psi_2}{d\theta_1} \quad \text{ve} \quad \ddot{\psi}_2 = \frac{d^2\psi_2}{d\theta_1^2}$$

$\dot{\theta}_2$ ,  $\ddot{\theta}_2$  ve  $\ddot{\psi}_2$  için bulunan bu ifadeler genelleştirilir ve toparlaklı bir kam için yazılan (3.5) denkleminde yerine konduktan sonra denklem  $-\omega^2$  ve  $I_2$  ile bölünüp düzenlenirse şu hali alır:

$$\ddot{\psi}_2 \left(1 + \frac{m}{I_2} s'^2\right) + \frac{1}{\omega^2} \frac{k_2}{I_2} (\psi_2 - \psi_3) + \frac{1}{\omega^2} \frac{k_1}{I_2} \psi_2 - \frac{m}{I_2} s' s'' (1 - \psi_2^2) = \lambda \frac{m}{I_2} \frac{s''}{h} s s' + \frac{F_d}{\omega^2 I_2} \left(1 - \lambda \frac{s}{h}\right) s' \quad (3.10)$$

Tork denklemlerindeki  $s, s'$  ve  $s''$  terimleri, bütün izleyici hareket kanunları için kalkış miktarı  $h$  bir çarpan olacak şekilde ifade edilebilir. (Ek-A) Bundan faydalanarak bu terimler normalize edilebilir.

$$s = hf(\theta), \quad s' = hf'(\theta), \quad s'' = hf''(\theta)$$

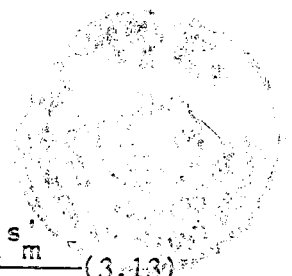
$$S = \frac{s}{h}, \quad S' = \frac{s'}{h}, \quad S'' = \frac{s''}{h} \quad (3.11)$$

$S, S'$  ve  $S''$  normalize edilmiş boyutsuz izleyici konum, hız ve ivmesidir. (3.10) denkleminde bazı düzenlemeler yapılarak bu boyutsuz değerler yerine konursa,

$$\ddot{\psi}_2 \left[1 + \frac{m s_m^2}{I_2} \left(\frac{S'}{S_m}\right)^2\right] + \frac{1}{\omega^2} \frac{k_2}{I_2} (\psi_2 - \psi_3) + \frac{1}{\omega^2} \frac{k_1}{I_2} \psi_2 - \frac{m s_m^2}{I_2} \frac{S' S''}{S_m^2} = \lambda \frac{m s_m^2}{I_2} \frac{S S'}{S_m^2} S'' + \frac{F_d s_m}{I_2 \omega^2} \frac{S'}{S_m} (1 - \lambda S) \quad (3.12)$$

Burada  $s'_m$ ,  $s'$  nün yani kam eğiminin en büyük değeridir.

Bu son denklemde ortaya çıkan ve daha sonra tekrar ele alınacak olan boyutsuz katsayılar için aşağıdaki notasyonları kullanalım.



$$M = \frac{ms_m^2}{I_2}, \quad N_{21} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{k_1}{I_2}}, \quad N_{22} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{k_2}{I_2}}, \quad p = \frac{F_d s_m}{\omega^2 I_2} \quad (3.13)$$

(3.12) denklemini yeniden düzenlenirse şu nihai formu alır:

$$\psi_2'' \left[ 1 + M \left( \frac{S'}{S_m} \right)^2 \right] + N_{21}^2 \psi_2 + N_{22}^2 (\psi_2 - \psi_3) - M \frac{S' S''}{S_m^2} (1 - \psi_2)^2 =$$

$$\lambda M S_m'' \frac{SS'}{S_m^2} + p \frac{S'}{S_m} (1 - \lambda S) \quad (3.14)$$

(3.1)-(3.4) diferansiyel denklem takımı benzer işlemler yapılarak boyutsuz hale getirilir. Sönüm sabitinin yer aldığı (3.4) denkleminde de boyutsuzlaştırma yapılırsa yukarıdakilere ilaveten yeni bir boyutsuz katsayı elde edilir:

$$C_5 = \frac{c_5}{\omega I_5}, \quad C_3 = \frac{c_3}{\omega I_3}$$

Boyutsuz haliyle diferansiyel denklem takımı düzenlenerek yazılırsa şu şekli alır:

$$\psi_2'' \left[ 1 + M \left( \frac{S'}{S_m} \right)^2 \right] + N_{21}^2 \psi_2 + N_{22}^2 (\psi_2 - \psi_3) - M \frac{S' S''}{S_m^2} (1 - \psi_2)^2 =$$

$$\lambda M S_m'' \frac{SS'}{S_m^2} + p \frac{S'}{S_m} (1 - \lambda S) \quad (3.15)$$

$$\psi_3'' = N_{33}^2 (\psi_4 - \psi_3) - N_{32}^2 (\psi_3 - \psi_2) + C_3 (1 - \psi_3) \quad (3.16)$$

$$\psi_4'' \left[ 1 + M \left( \frac{S'}{S_m} \right)^2 \right] + N_{44}^2 (\psi_4 - \psi_5) + N_{43}^2 (\psi_4 - \psi_3) - M \frac{S' S''}{S_m^2} (1 - \psi_4)^2 =$$

$$\lambda M S_m'' \frac{SS'}{S_m^2} + p \frac{S'}{S_m} (1 - \lambda S) \quad (3.17)$$

$$\psi_5'' = N_{54}^2 (\psi_4 - \psi_5) + C_5 (1 - \psi_5) \quad (3.18)$$

.....





Burada kam mili üzerindeki kamların ve bunların izleyicilerin birbirinin aynı olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda bütün kamların kütle atalet momenti, kam açıları, kalkış, hız ve ivmeleri aynı olur. Bunların farklı olması halinde denklemlerde ilgili katsayılar değiştirilir. Bu denklemlerde normalize edilmiş  $S, S'$  ve  $S''$  terimleri ait oldukları kamın dönme açısının fonksiyonlarıdır. Dolayısıyla  $\psi_i$  ve  $\theta_1$  cinsinden ifade edilebilirler. Bu fonksiyonlar trigonometrik veya polinom şeklinde olduklarından ve ayrıca  $(1-\psi_i')^2$  terimleri sebebiyle bu diferansiyel denklem takımı da türediği denklem takımı gibi nonlineerdir. Denklem takımının kamlarla ilgili olan birinci ve üçüncü denklemleri değişken katsayılı, diğerleri sabit katsayılıdır.

Topariaklı kamlarda bekleme periyodunda kam izleyiciden herhangi bir torqa maruz olmadığından ilgili diferansiyel denklem basit bir şekil alır. 2 ve 4 nolu kamlarla ilgili (3.15) ve (3.17) denklemleri bekleme periyotlarında sabit katsayılı hale gelirler:

$$\psi_2'' + N_{21}^2 \psi_2 + N_{22}^2 (\psi_2 - \psi_3) = 0 \quad (3.19)$$

$$\psi_4'' + N_{44}^2 (\psi_4 - \psi_5) + N_{43}^2 (\psi_4 - \psi_3) = 0 \quad (3.20)$$

Tablalı kam kullanılması halinde gene yukarıdakine benzer bir boyutsuzlaştırma işlemi yapılarak benzer bir diferansiyel denklem takımı elde edilir (3.6) denklemini ele alarak, denkleme  $\psi_2$  ve  $\psi_3$  değişkenlerini ithal edelim. Yukardaki gibi bölme, çarpma ve normalizasyon işlemleri yapılırsa şu nihai denklem elde edilir:

$$\psi_2'' \left(1 + \frac{M}{S_m^2} S'F\right) + N_{21}^2 \psi_2 + N_{22}^2 (\psi_2 - \psi_3) - M \frac{S''F}{S_m^2} (1 - \psi_2')^2 = \lambda MS_m'' \frac{SF}{S_m^2} + p \frac{F}{S_m} (1 - \lambda S) \quad (3.21)$$

$$\text{Burada } F = S' + \mu S + \xi, \quad F = F(\psi_2, \theta_1), \quad \xi = \mu \frac{r_0}{h} \quad (3.22)$$



(3.1)-(3.4) diferansiyel denklem takımı tablalı kamları haiz bir kam için yazılarak boyutsuzlaştırılırsa (3.15)-(3.18) denklemlerinden biraz daha değişik formda bir diferansiyel denklem takımı bulunur.

$$\psi_2'' \left(1 + \frac{M}{S_m^2} S'F\right) + N_{21}^2 \psi_2 + N_{22}^2 (\psi_2 - \psi_3) - M \frac{S''F}{S_m^2} (1 - \psi_2')^2 = \lambda MS_m'' \frac{SF}{S_m^2} + P \frac{F}{S_m} (1 - \lambda S) \quad (3.23)$$

$$\psi_3'' = N_{33}^2 (\psi_4 - \psi_3) - N_{32}^2 (\psi_3 - \psi_2) + C_3 (1 - \psi_3') \quad (3.24)$$

$$\psi_4'' \left(1 + \frac{M}{S_m^2} S'F\right) + N_{44}^2 (\psi_4 - \psi_5) + N_{43}^2 (\psi_4 - \psi_3) - M \frac{S''F}{S_m^2} (1 - \psi_4')^2 = \lambda MS_m'' \frac{SF}{S_m^2} + P \frac{F}{S_m} (1 - \lambda S) \quad (3.25)$$

$$\psi_5'' = N_{54}^2 (\psi_4 - \psi_5) + C_5 (1 - \psi_5') \quad (3.26)$$

.....

Tablalı kam mekanizmalarında kamların bekleme periyotlarında geri dönüş yayındaki ön gerilme kuvveti ve diğer dış kuvvetler sebebiyle izleyici tablası kama bastırır ve kama tabla arasında sürtünme meydana gelir. Bu sürtünme kuvveti kam milinde bir tork oluşturur. Bu yüzden toparlaklı kamlardan farklı olarak tablalı kamalarda kam mili bekleme periyotlarında da küçük de olsa bir torka maruzdur. Bu durum bir sönüm tesiri oluşturarak kam milinin titreşim karakteristiğine etki eder.

Bekleme periyotlarında (3.23) ve (3.25) diferansiyel denklemleri sabit katsayılı hale gelirler ve (3.19)-(3.20) denklemlerinden farklı olarak sağ tarafları sıfır değildir:

$$\psi_2'' + N_{21}^2 \psi_2 + N_{22}^2 (\psi_2 - \psi_3) = P' \quad (3.27)$$

$$\psi_4'' + N_{44}^2 (\psi_4 - \psi_5) + N_{43}^2 (\psi_4 - \psi_3) = P' \quad (3.28)$$



Burada  $p'$  boyutsuz bir katsayı olup daha önce tanımlanan  $p$  katsayısına benzerdir:

$$p' = \frac{\mu F_d r_0}{\omega^2 I_2} \quad (3.29)$$

Böylece kamların tablalı olması durumunda toparlaklı halden farklı olarak iki tane boyutsuz katsayı daha ortaya çıkmaktadır. Bunlardan biri  $p'$  ve diğeri (3.22) denklemindeki  $\xi$  katsayısıdır. Tablalı kamları haiz bir kam mili için elde edilen diferansiyel denklem takımı da toparlaklı kamlar için elde edilen gibi nonlineerdir. Denklemlerin mertebesi ikidir. Her iki diferansiyel denklem takımında da  $S, S'$  ve  $S''$  fonksiyonları ait oldukları kamın dönme açılarına ( $\theta_2, \theta_4, \dots$ ) bağlıdır. Bu açılar yerine denklem takımlarına  $\psi_2, \psi_3, \dots, \psi_n$  değişkenleri ihmal edilmiştir.  $\psi_1$  bağımlı değişkenleri bağımsız değişken  $\theta_1$  cinsinden ifade edildikleri için denklemlerdeki  $S, S'$  ve  $S''$  fonksiyonlarında  $\theta_1$  açık olarak vardır.

Gerek tablalı, gerekse toparlaklı kamları haiz kam milleri için elde edilen diferansiyel denklem takımlarının mahiyetini daha iyi anlamak için kam mili üzerinde tek bir kam olduğunu düşünelim ve basitlik için titreşim yapan eleman olarak sadece kamı alalım. Kam için hareket denklemini yazıp boyutsuzlaştırma işlemini de yaparsak (3.15) denklemine benzer bir denklem elde ederiz:

$$\psi_2'' \left[ 1 + M \left( \frac{S'}{S_m} \right)^2 \right] + N_{21}^2 \psi_2 - M \frac{S' S''}{S_m^2} (1 - \psi_2')^2 = \lambda MS_m'' \frac{SS'}{S_m^2} + P \frac{S'}{S_m} (1 - \lambda S) \quad (3.30)$$

Burada  $S, S'$  ve  $S''$ ,  $\theta_2$  kam açısının fonksiyonlarıdır.

$\theta_2 = \theta_1 - \psi_2$  olduğunu hatırlar ve basitlik için  $\psi_2'$ 'yi ihmal



edip  $\theta_2 = \theta_1$  kabulünü yaparsak, bu fonksiyonlar  $\theta_1$  kam mili giriş açısına bağlı olarak düşünülebilir. (3.30) denkleminde  $\psi_2$  ve türevlerinin katsayıları ile sağ taraftaki  $\theta_1$ 'e bağlı terimler birer fonksiyon olarak tanımlanır ve basitlik için denklem genel bir formda yazılırsa;

$$m(\theta_1) \psi_2'' + k \psi_2 - c(\theta_1)(1-\psi_2')^2 = f(\theta_1) \quad (3.31)$$

bulunur.

Bu denklemin nonlineerliği ilk bakışta anlaşılmaktadır. Zira lineer bir titreşim sisteminin hareket denkleminin genel formu şöyledir:

$$m\psi'' + c\psi' - k\psi = F(t)$$

Burada  $m$ ,  $c$  ve  $k$  sırayla sistemin atalet, sönüm ve yay elemanlarını karakterize eden pozitif parametrelerdir.  $F(t)$  fonksiyonu ise zamana bağlı zorlama kuvvetini ifade eden terimdir. Lineer bir sistemde sistemin davranışını belirleyen parametreler ( $m, c, k$ ) sabittir ve zamanla değişmezler.

Böyle sistemlere otonom sistem denir. (3.31) titreşim denklemi bu denklemle karşılaştırılırsa atalet ve sönüm elemanı ile ilgili parametrelerin sabit olmadığı ve zamana bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Bu şekilde zamana bağlı parametrelere sahip sistemler heteronomdur. Denklem sağ tarafındaki terime ise zorlama terimi olarak bakılabilir. (3.15-3.17) ve (3.23-3.25) denklem sistemlerinde de aynı durum sözkonusudur. Bu durum titreşim sistemine ait parametrelerin dışardan zamana bağlı olarak değiştirildiği, yani sistemin taciz edildiği anlamına gelir. Gerçekten bir kam mili, dönüşü esnasında izleyiciden etki eden değişken torkla taciz edilir. Bu taciz sisteme sadece zorlayıcı tork olarak değil, sistem parametrelerini de değiştirecek şekilde etki etmektedir. Denklemlerde bu tacizi ifade eden terimler  $\theta_1$  kam mili giriş açısına, bu açının zamanla düzgün olarak değiştiği düşünülürse dolayısıyla zamana bağlı olarak değişmektedir.



Bu şekilde bir titreşim sistemine ait bir parametre veya parametreler zamana bağlı olarak değişiyorsa, oluşan titreşimler parametre tahrikli titreşim adım alırlar /2,23/. Kam mili titreşimlerinin de parametre tahrikli titreşimler olduğu anlaşılmaktadır. Öte yandan (3.31) denklemindeki  $-c(\theta_1)(1-\psi_2')^2$  terimi titreşimlerin bir özelliğini daha ortaya çıkarmaktadır. Denklemde her terimi  $\psi_2' d\theta_1$  ile çarpıp integre edersek, sistemin enerji durumu hakkında bir fikir edinebiliriz:

$$\int m(\theta_1) \psi_2' \psi_2'' d\theta_1 = E_k, \quad \int k \psi_2 \psi_2' d\theta_1 = E_p,$$

$$\int -c(\theta_1)(1-\psi_2')^2 \psi_2' d\theta_1 = E_D, \quad \int f(\theta_1) \psi_2' d\theta_1 = E_F \quad (3.32)$$

$$E_k + E_p + E_D = E_F \quad (3.33)$$

Burada  $E_k$  ve  $E_p$  sistemin kinetik ve potansiyel enerjileri,  $E_D$  sisteme sokulan veya sistemden alınan enerji,  $E_F$  ise zorlayıcı torkun enerjisidir. Bir titreşim sisteminin karakteristiklerini tespit etmek için sistemin hareketiyle ilgili diferansiyel denklemin homejen kısmını incelemek gerekir /23/. Burada homojen kısmın ikinci teriminin katsayısı pozitif bir sayı, birinci ve üçüncü terimlerin ise değişkendir.  $m(\theta_1) = 1 + M(S'/S_m')^2$  fonksiyonu daima pozitif olduğu için kinetik enerji daima pozitif kalır.  $c(\theta_1)(1-\psi_2')^2 = -M \frac{S'S''}{S_m'^2} (1-\psi_2')^2$

terimini, kam tablalı ise,  $-M \frac{S''}{S_m'^2} [S' + \mu S + \xi] (1-\psi_2')^2$  terimini

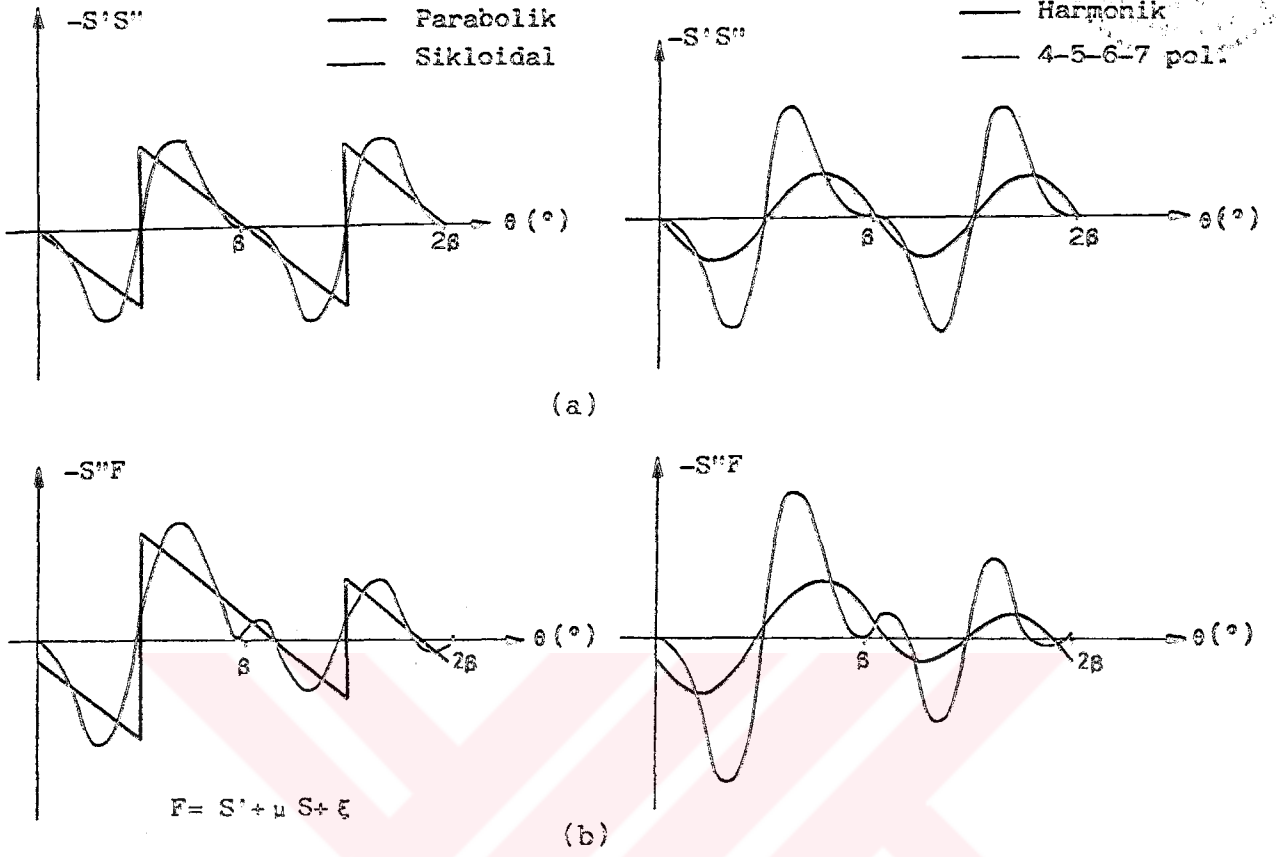
gözönüne alalım. Bu nonlineer terim, türediği terim de dikkate alınırsa lineer bir titreşim sisteminin hareket denklemindeki sönüm terimi ile eşdeğerdir. Fakat menşei mildeki sönüm değil mile izleyiciden etki eden torkdur.  $c(\theta_1)$  fonksiyonu pozitif ve negatif değerler aldığı için, kam milinin her dönüşünde bu terimden dolayı ortaya çıkan  $E_D$



enerjisi pozitif veya negatif olur. Bunun fiziksel anlamı, pozitif olduğu zaman aralıklarında milden dışarıya enerji verilmektedir, yani pozitif sönüm vardır. Terim negatif olduğu zaman ise milden dışardan enerji verilmektedir, negatif sönüm vardır. Milin enerji aldığı veya verdiği eleman izleyicidir, ayrıca tablalı kamlarda bir kısım enerji sürtünmeye harcanır. Kam milinin titreşim hareketinin devamı izleyiciden aktarılan enerji ile sağlanır. Bu şekilde titreşimin muhtelif periyotlarında dışardan enerjinin alındığı, diğer periyotlarda da kaybedildiği titreşimlere kendi kendini besleyen titreşimler denir. ve bunlar nonlineer titreşimlerdir. Bilhassa tablalı kamları haiz millerde kendi kendini besleme olayı daha barizdir. Bunlarda kamla izleyici arasında daima mevcut olan sürtünme, sürekli enerji yutan bir sönüm etkisi oluşturur. Burulma titreşimlerinin devamı izleyiciden aktarılan enerji ile sağlanır.

Şekil 3.5 de muhtelif hareket kanunlarını haiz kamlar için  $c(\theta_1)$  fonksiyonunun değişken kısmını oluşturan, toparlaklı durumda  $c'(\theta_1) = -S'S''$  ve tablalı halde  $c'(\theta_1) = -S''(S' + \mu S + \xi)$  fonksiyonlarının kalkış ve inişteki değişimleri gösterilmiştir. Burada da görüldüğü gibi toparlaklı kamlar sözkonusu ise fonksiyonun pozitif ve negatif olduğu periyotlar birbirini takip etmektedir ve hemen hemen eşittir. Buradan kamdan eşit sürelerde enerji alındığı ve verildiği anlaşılır. Tablalı durumda ise, fonksiyonun pozitif olduğu zaman aralıkları daha fazladır. Bu ise tablalı kamlara sahip olduğu zaman kam milinden daha çok enerji çekildiği anlamına gelir.

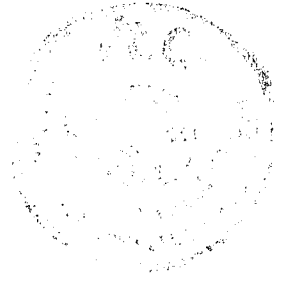
Böylece kam millerinin burulma titreşimlerinin kendi kendini besleyen parametre tahrikli titreşim karakteri gösterdiği ortaya çıkmaktadır. Böyle titreşimler nonlineer olup, sistemin hareketi için elde edilen diferansiyel denklemler analitik olarak çözülemezler. Çözüm ancak nümerik olarak veya bazı basitleştirmelerle yaklaşık olarak



Şekil 3.5. Çeşitli hareket kanunları için  $c'(\theta_1)$  fonksiyonunun değişimi a) Toparlıklı, b) Tabiiati kamlar

yapılabilmektedir./10,23/. Hele zamana bağlı olarak değişen parametreler sözkonusu olduğu zaman basit denklemlerin bile çözümü iyice zorlaşmaktadır /2,12/. Yukarıda kam milleri için elde edilen diferansiyel denklem takımları da böyle olduğundan analitik çözüm mümkün değildir, nümerik çözüm yapılabilir.

Ayrıca (3.30) denkleminde sağ taraftaki terimlere, sisteme etki eden zorlama torkunu ifade eden terimler olarak bakılabilir. Bu yüzden kam mili titreşimleri zorlanmış titreşimlerdir. Bu zorlayıcı torkun da titreşim üzerine önemli etkileri olacaktır. Kam milinin dinamik cevabı kendi kendini besleme, zorlayıcı torklar ve parametre tahrikinin ortak etkisiyle oluşacaktır.



### 3.3.2. Boyutsuz katsayılar

(3.1)-(3.4) denklem takımına ithal edilen  $\psi_2, \psi_3 \dots \psi_n$  değişkenleri,  $\theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$  kam açılarının  $\theta_1$  girişine göre izafi dönmeleridir, yani kamların titreşimlerinin izafi genlikleridir. Kam milinin dönüşü sırasında her bir elemanın girişe göre ileri gitmesini veya geri kalmasını ifade ederler. Bu değişkenlerin ithali ve ara işlemler sonucunda ortaya çıkan boyutsuz katsayıların mahiyetini daha iyi anlamak için kam mili üzerinde tek bir kam olduğunu düşünelim ve bu kama bağlı mil parçalarının kütlelerini kama dahil edelim. Bu durumda kamın hareket denklemi (3.5) denkleminde şu şekli alır:

$$(I_2 + ms'^2)\ddot{\theta}_2 + k_1\theta_2 = k_1\theta_1 - ms's''\dot{\theta}_2 - \frac{\lambda}{h} ms''\omega^2 ss' - F_d (1 - \frac{\lambda}{h}s)s' \quad (3.34)$$

Elde edilen bu nonlinear titreşim denkleminde linear sistemlerdekine benzer şekilde tabii frekansı hesaplayalım:

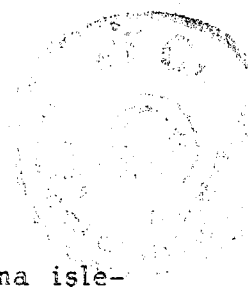
$$\omega_2 = \left( \frac{k_1}{I_2 + ms'^2} \right)^{1/2} = \left[ \frac{k_1}{I_2} \left( \frac{1}{1 + ms'^2/I_2} \right) \right]^{1/2} \quad (3.35)$$

Paydaki  $s'$  kam eğimi hareket boyunca değiştiği için bu ifade sabit değildir. Bu da titreşimin frekansının hareket periyodu boyunca değiştiğini göstermektedir. Linear sistemde görülmeyen bu durum olayın nonlineerliğinden kaynaklanmaktadır. Kamın bekleme periyotlarında olduğu gibi izleyiciye hareket vermediği veya izleyici kütesinin ihmal edilecek kadar küçük olduğu düşünülürse (3.30) denklemi basit bir linear burulma titreşimi denklemi haline gelir ve titreşimin tabii frekansı hemen yazılabilir:

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{k_1}{I_2}} \quad (3.36)$$

Bu iki frekans ifadesinden de görülebileceği gibi  $\omega_2$  frekansını değişken hale getiren  $ms'^2/I_2$  boyutsuz terimidir. Terimin en büyük



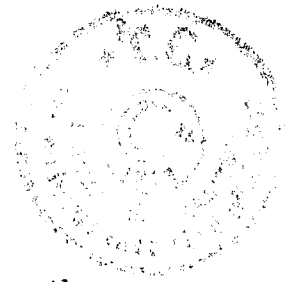


değerini boyutsuz bir katsayı olarak alalım ve boyutsuzlaştırma işleminde olduğu gibi M notasyonu ile gösterelim:

$$M = \frac{ms^2}{I_2} \quad (3.37)$$

Bu boyutsuz katsayı izleyicinin kütlesi sebebiyle sahip olduğu ataletin kamın kendi ataletine oranıdır. Ya da izleyici kütlesinin kam milinin hareketine etkisinin bir ölçüsüdür denilebilir. Bu düşüncelerle atalet oranı olarak isimlendirilir /33/. Ayrıca bu oran ne kadar küçülürse değişken nonlinear frekans, linear frekansa o kadar yaklaşacağından nonlinearliğin bir ölçüsü olarak da düşünülebilir. Kamların hareket ettirdiği izleyiciler aynı ise atalet oranı hepsi için aynıdır. Farklı kütleyle sahip izleyiciler varsa bunların atalet oranları farklı olarak dikkate alınmalıdır.

(3.36) ifadesindeki linear frekans,  $I_2$  ataletine sahip kamın  $k_1$  elastikliğini haiz 1 nolu mile bağlı olarak serbest burulma titreşimleri yaptığı zaman sahip olacağı tabii frekanstır. Tanımına uygun olarak bu tabii frekans  $\omega_{21}$  notasyonu ile gösterilebilir. Diğer kamlar veya mil parçaları için tanımlanan tabii frekanslar için de benzer notasyon kullanılabilir.  $\omega_{32}$ , 3 nolu eleman 2 nolu elemana bağlı olarak hareket ettiği zaman sahip olacağı tabii frekansı ifade etmektedir.  $\omega_{22}$  ise 2 nolu elemanın kendi ataleti ve elastikliği sebebiyle sahip olacağı tabii frekanstır. Bu şekilde tanımlanan linear tabii frekansların kam milinin giriş açısal hızına oranları boyutsuz katsayılar olarak karşımıza çıkmaktadır. Elde edilen bu katsayılara frekans oranı adı verilir /19,33/. Frekans oranları N notasyonu ile gösterilmiş ve hangi elemana ait olduğunu belirtmek üzere yukardaki gibi indisler konulmuştur. Bir kam milinde kamlar birbirinin aynı



ise frekans oranları da aynıdır. Kamları birbirine bağlayan mil parçaları için de aynı durum sözkonusudur. Milde birbirinden farklı eleman sayısı arttıkça frekans oranı sayısı da artar.

$$N_{21} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{k_1}{I_2}}, \quad N_{22} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{k_2}{I_2}}, \quad N_{32} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{k_2}{I_3}} \text{ vs. (3.38)}$$

Bir frekans oranı ait olduğu elemanın rijitliği veya kam milinin açısal hızı hakkında fikir verebilir. Rijitlik arttıkça frekans oranları artar, açısal hız arttıkça azalır. Küçük bir frekans oranı, küçük bir rijitlik veya büyük bir açısal hız akla getirir. Kütle atalet momentinin etkisi rijitlik kadar önemli değildir. Bir kam milinin titreşim karakteristiği açısından mil üzerindeki kamlarla ilgili frekans oranları, diğer elemanlarla ilgili olanlardan çok daha önemlidir. Çünkü titreşimi oluşturan kamlara etki eden torklardır ve kamların boyutları, dolayısıyla ataletleri ve rijitlikleri mil üzerindeki diğer parçalardan daha fazladır.

Boyutsuzlaştırma işleminde ortaya çıkan üçüncü boyutsuz katsayı p katsayısıdır.

$$p = \frac{F_d s'_m}{I_2 \omega^2} \quad (3.39)$$

Katsayının payındaki  $F_d s'_m$  terimi geri dönüş yayının ön gerilme kuvvetinin ve dış kuvvetlerin potansiyel enerjisi, paydasındaki  $I_2 \omega^2$  terimi ise kamın kinetik enerjisidir. Buna göre katsayı, izleyici ile kam arasındaki enerji transferi hakkında bir fikir verir ve enerji oranı olarak isimlendirilebilir. Ön gerilme kuvvetiyle kam açısal hızı arasında yakın bir ilişki vardır. Sıçramayı önlemek için, açısal hız arttıkça ön gerilme kuvveti de artırılır. Böylece kamdan izleyiciye veya tersi yönde aktarılan enerji de artar. Bu açıdan enerji oranı (3.30) denkleminde de görüldüğü gibi zorlayıcı torkun mile verdiği



enerji ile ilgilidir ve milin zorlanmış titreşimlerinin karakteristiğine etki eden bir katsayıdır.

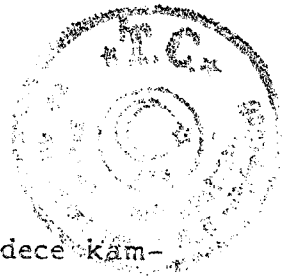
Dördüncü boyutsuz katsayı C katsayısıdır. ( $C_3, C_5 \dots$ ) Katsayının paydasındaki  $I \omega$  terimi ilgili elemanın açılal momentumudur. Mildeki sönüm bu momentumu azaltacak, yani mili yavaşlatacak şekilde etki eder. Dönme esnasında oluşan burulma titreşimlerinin genliğini azaltır. Paydaki terim ise sönüm katsayısıdır, dolayısıyla bu katsayının, sönümün milin dönme hareketine ve burulma titreşimlerine etkisinin bir ölçüsü olduğu söylenebilir. Bu bakımdan katsayı, sönüm etki oranı olarak isimlendirilmiştir.

Bu dört boyutsuz katsayı toparlaklı ve tablalı kamlar için beraberce tanımlanan katsayılardır. Boyutsuzlaştırma işlemi sırasında tablalı kamlar için iki boyutsuz katsayı daha ortaya çıkmaktadır. Bunlardan ilki  $\xi$  katsayısıdır.

$$\xi = \mu \frac{r_0}{h} \quad (3.40)$$

Burada  $r_0/h$  oranı kam büyüklüğü hakkında izafi olarak fikir veren bir orandır. Kamda alttan kesme olayı ile bu oran yakından ilişkilidir. Küçük  $r_0/h$  oranları kam temel daire yarıçapının kam kalkışına göre küçük olduğunu gösterir, ki bu kamda alttan kesmeye sebep olabilir/35/. Bu oranın büyüklüğü ise temel daire yarıçapının kalkışa nazaran izafi olarak büyük olduğunu gösterir ki bu da kamın boyutlarının büyük seçildiği anlamına gelir. Kamın boyutlarının büyümesi tablalı kamlarda sürtünme kuvvetinin momentinin büyümesine sebep olur. Dolayısıyla  $\xi$  katsayısının kam miline etki eden sürtünme torkunun büyüklüğü ile doğrudan ilişkisi olduğu söylenebilir. Bu boyutsuz katsayıya,  $r_0/h$  oranına doğrudan bağlı olduğundan büyüklük oranı adı verilmiştir.

Tablalı kamlar için ortaya çıkan ikinci boyutsuz katsayı (3.29) ifadesiyle tanımlanan  $p'$  katsayısıdır. Bu katsayı daha önce sözü



edilen enerji oranı  $p$  ye tamamen benzerdir. Ondan farkı sadece kam-  
ların bekleme periyotlarındaki titreşim karakteristiğini etkileyen bir  
katsayı olmasıdır.

### 3 .4. Hareket denklemlerinin çözümü

Tablalı veya toparlaklı kamları haiz bir kam mili için elde edilen nonlinear diferansiyel denklem takımlarını analitik olarak çözmek mümkün olmadığı için nümerik çözüme gidilmiştir. Kam dinamiğinde nümerik yöntemler geniş ölçüde kullanılmaktadır. Literatürde muhtelif yöntemlerle izleyici cevabı nümerik olarak bulunmuştur /1,8,9, 18,20,33,35/. Ayrıca yeteri kadar hassas nümerik yöntemlerin basit bir modelle bile kam mekanizmasının cevabını gerçeğe çok yakın olarak yansıttığı ve güvenle kullanılabileceği çeşitli kaynaklarda zikredilmektedir /6.7,18,20/. II. mertebe diferansiyel denklem takımlarını çözmek için çeşitli nümerik yöntemler mevcuttur. Ortalama ivme metodu, sonlu farklar metodu, çok adımlı metodlar, klasik 4. dereceden Runge-Kutta metodu bunlar arasında sayılabilir.  $\theta_1$  bağımsız değişkenini de açık olarak ihtiva ettiğinden (S,S' ve S'' fonksiyonlarında) otonom olmayan denklem takımlarını çözmek için Runge-Kutta metodunun biraz daha geliştirilmiş şekli olan Runge-Kutta-Nyström metodu /5,22/ kullanılmıştır. Klasik Runge-Kutta'dan daha hassas olan bu metod birinci ve ikinci mertebeden diferansiyel denklemlerin nümerik çözümünde kullanılmaktadır.

İkinci mertebeden bir diferansiyel denklemi şu forma soktuğumuzu düşünelim:

$$y'' = f(y, y', t)$$

Burada  $t$  bağımsız,  $y$  bağımlı değişkendir.



$$y' = \frac{dy}{dt} \quad \text{ve} \quad y'' = \frac{d^2y}{dt^2} \quad \text{dir.}$$

Bu forma sokulmuş tek bir diferansiyel denklemin çözümünde i. adımda bir önceki adımdan  $y_i$  ve  $y'_i$  biliniyor olsun. Bu metod ile şöyle bir hesaplama tablosu yapılabilir:

$$t_1 = t_i \quad m_1 = y_i \quad k_1 = y'_i \quad l_1 = \frac{h}{2} f(m_1, k_1, t_1)$$

$$t_2 = t_i + \frac{h}{2} \quad m_2 = y_i + \frac{h}{2} (y'_i + \frac{l_1}{2}) \quad k_2 = y'_i + l_1 \quad l_2 = \frac{h}{2} f(m_2, k_2, t_2)$$

$$t_3 = t_i + \frac{h}{2} \quad m_3 = m_2 \quad k_3 = y'_i + l_2 \quad l_3 = \frac{h}{2} f(m_3, k_3, t_3)$$

$$t_4 = t_i + h \quad m_4 = y_i + h(y'_i + l_3) \quad k_4 = y'_i + 2l_3 \quad l_4 = \frac{h}{2} f(m_4, k_4, t_4)$$

$$y'_{i+1} = y'_i + \frac{1}{3} (l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4)$$

$$y_{i+1} = y_i + h [y'_i + \frac{1}{3} (l_1 + l_2 + l_3)] \quad (3.41)$$

Çözümün her adımında 4 ara adım bulunur. Burada h bağımsız değişken t'nin her adımdaki artım miktarıdır. Adım sonunda bulunan  $y'_{i+1}$  ve  $y_{i+1}$  değerleri bir sonraki adımın başlangıç değerleri olarak kullanılır. Böylece çözüm bir kez başlatıldığı zaman kendisi otomatik olarak devam eder. Çözümü başlatmak için başlangıç değerleri  $y(0)$  ve  $y'(0)$  bilinmelidir. Bunlar  $f(y, y', t)$  fonksiyonunda yerine konarak  $y''(0)$  bulunur ve çözüm devam eder.

Metodun hatası  $h^5$  mertebesinde, h adımı küçük seçildiği oranda hassasiyeti artırmak mümkündür. Bu özellik bir avantaj olmasına karşılık, hesaplama zamanını artırır. Metodun diğer bir avantajı da  $y'$  türevinin de hesaplanabilmesidir.

Yukarıda tek bir diferansiyel denklemin çözümü için verilen me-

ted, bir diferansiyel denklem takımı için kolaylıkla genişletilebilir. n adet bağımlı değişkeni ve türevlerini ihtiva eden n adet ikinci mertebeden diferansiyel denklem mevcut olsun. Bu diferansiyel denklemlerin hepsi aşağıdaki gibi yazılabilir olsun, ki çözmek istediğimiz denklem takımı da bu forma sokulabilir:

$$\begin{aligned} y_1'' &= f_1(y_1, y_2, \dots, y_n, y_1', y_2', \dots, y_n', t) \\ y_2'' &= f_2(y_1, y_2, \dots, y_n, y_1', y_2', \dots, y_n', t) \\ &\vdots \\ y_n'' &= f_n(y_1, y_2, \dots, y_n, y_1', y_2', \dots, y_n', t) \end{aligned} \quad (3.42)$$

Bu formdaki diferansiyel denklem takımı için yukardakine benzer olarak şöyle bir hesaplama tablosu yapılabilir:

$$t_1 = t_i, \quad m_{1j} = y_{ji}, \quad k_1 = y_{ji}'$$

$$l_{1j} = \frac{h}{2} f_j(m_{11}, m_{12}, \dots, m_{1n}, k_{11}, k_{12}, \dots, k_{1n}, t_1)$$

$$t_2 = t_i + \frac{h}{2}, \quad m_{2j} = y_{ji} + \frac{h}{2} (y_{ji}' + 0,5 l_{1j}), \quad k_{2j} = y_{ji}' + l_{1j}$$

$$l_{2j} = \frac{h}{2} f_j(m_{21}, m_{22}, \dots, m_{2n}, k_{21}, k_{22}, \dots, k_{2n}, t_2)$$

$$t_3 = t_i + \frac{h}{2}, \quad m_{3j} = m_{2j}, \quad k_{3j} = y_{ji}' + l_{2j}$$

$$l_{3j} = \frac{h}{2} f_j(m_{31}, m_{32}, \dots, m_{3n}, k_{31}, k_{32}, \dots, k_{3n}, t_3)$$

$$t_4 = t_i + h, \quad m_{4j} = y_{ji} + h(y_{ji}' + l_{3j}), \quad k_{4j} = y_{ji}' + 2l_{3j}$$

$$l_{4j} = \frac{h}{2} f_j(m_{41}, m_{42}, \dots, m_{4n}, k_{41}, k_{42}, \dots, k_{4n}, t_4)$$

$$y_{j(i+1)}' = y_{ji}' + \frac{1}{3} (l_{1j} + 2l_{2j} + 2l_{3j} + l_{4j})$$

$$y_{j(i+1)} = y_{ji} + h \left[ y'_{ji} + \frac{1}{3} (1_{1j} + i_{2j} + i_{3j}) \right] \quad (3.43)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, n$$

Çözümüne başlamak için  $y_j(0)$  ve  $y'_j(0)$  ( $j = 1, 2, 3, \dots, n$ ) başlangıç değerleri yerine konur ve devam edilir.

Çözülecek olan diferansiyel denklem takımlarında bağımlı değişkenler  $\psi_j$  izafi genlikleri ve bağımsız değişken giriş açısı  $\theta_1$  dir. Tek veya çok kamı haiz kam milleri için yazılan denklem takımlarının çözümüne başlarken tüm izafi genlikler ve izafi hızlar ( $\psi'_j$ ) sıfır olarak alınmıştır.

$$\psi_{oj} = 0, \quad \psi'_{oj} = 0, \quad j = 2, 3, 4, \dots, n \quad (3.44)$$

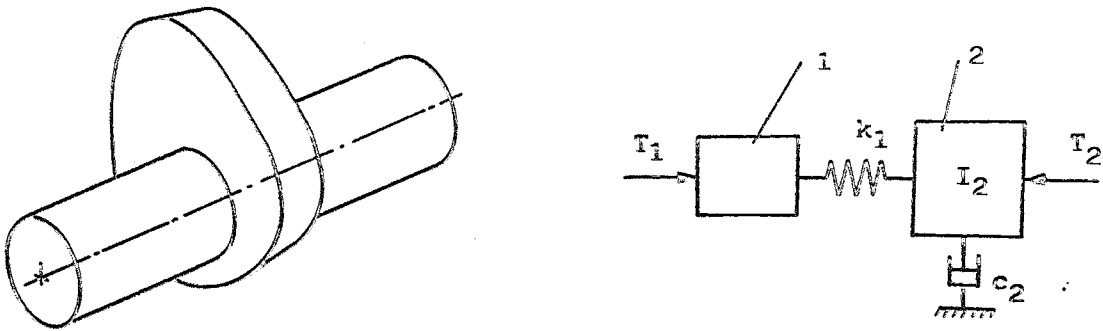
Bunun fiziksel anlamı kam mili modelindeki tüm elemanların girişle birlikte beraberce aynı açısal hızla harekete başlamalarıdır. Sistemdeki elastiklikler, ataletler ve torklar sebebi ile hareket başladıktan sonra izafi genlikler ve açısal hızlar birbirinden farklı hale gelir. Nümerik çözümde, çözüm adımları arasında  $\theta_1$  giriş açısı 0,015 radyanlık ( $0,86^\circ$ ) artımlarla artırılmıştır. Bu artım ve bunun üç katına kadar alınan artımlar için yöntemin kararlı olduğu ve yeteri hassasiyetle sonuçlar verdiği görülmüştür. Her adımda  $\theta_1$  bağımsız değişkenine (dolayısıyla zamana) bağlı olan  $S, S'$  ve  $S''$  fonksiyonları  $\theta_1$  ve ilgili izafi genlik  $\psi_j$  cinsinden ayrıca hesaplanmıştır. Bunun için ele alınan hareket kanununun denklemleri kullanılmıştır (Ek-A). Çözüm zamanı bir minibilgisayarda tek kamlı bir milin bir dönüşü için bir dakikayı aşmamaktadır. Çok kamlı millerde ise kam sayısı arttıkça çözüm zamanı doğru orantılı olarak artmaktadır.

#### 4. TEK KAMLI BİR KAM MİLİNİN BURULMA TİTREŞİMLERİ

##### 4.i.i. Tek kamı haiz bir kam milinin dinamik cevabı

Üzerinde tek bir kam taşıyan bir kam milini ele alalım. Pratikte pek çok kam mekanizması bu şekildedir. Böyle bir kam milinin izleyiciden kendisine etki eden değişken torka dinamik cevabı, hem bu bakımdan, hem de kam milinin cevabının temel bazı özelliklerini de yansıtacağından önemlidir.

Tek kamı haiz bir kam milinin dinamik modeli şekil 4.1 de görüldüğü gibi basitçe kurulabilir. Kam milinin tahrik tarafındaki kısmı doğrudan tahrik kaynağından hareket aldığından, modelde sabit tahrik açısal hızıyla döndüğü kabul edilebilir /4/. Kam ve diğer taraftaki mil parçasının da beraber hareket ettikleri kabul edilerek model kurulmuştur. İki veya daha fazla yerinden yataklanan milin yataklarındaki yağın sönümü de ihmal edilemeyecek kadar büyükse modele dahil edilir. Böylece mil yatağındaki sönüm, kamı temsil eden 2 nolu elemana etki eder.



Şekil 4.1. Tek kamı haiz bir kam mili ve modeli



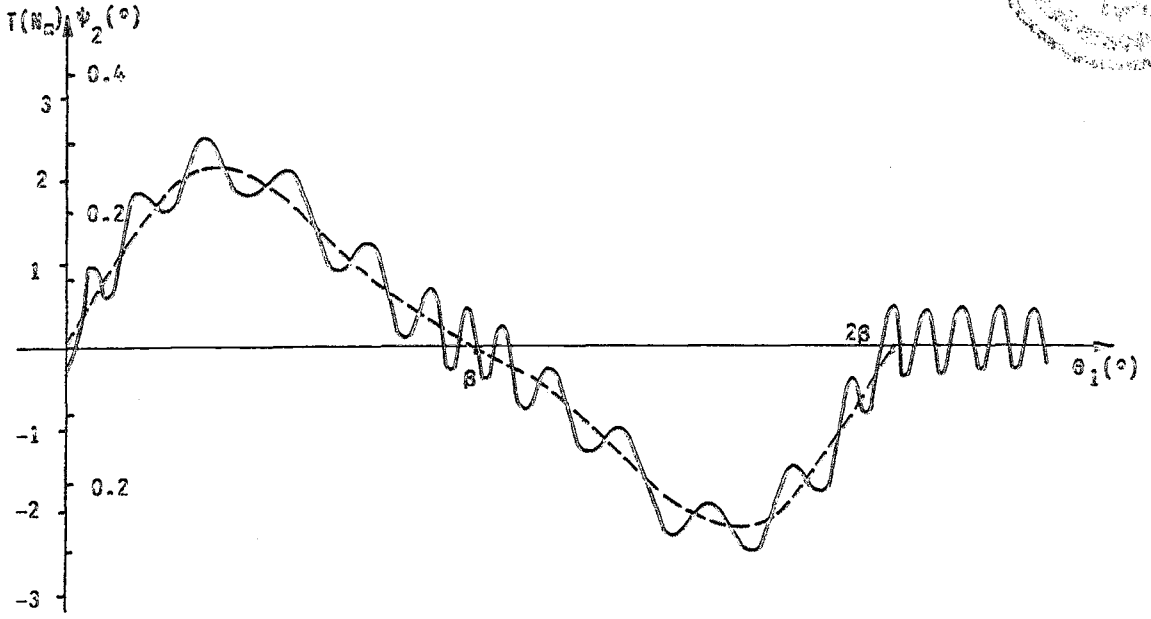


Önceki bölümde yapıldığı gibi, sönüm ihmal edilerek hareket denklemleri yazılır ve boyutsuzlaştırılırsa kamın hareketi için şu nonlineer diferansiyel denklem bulunur:

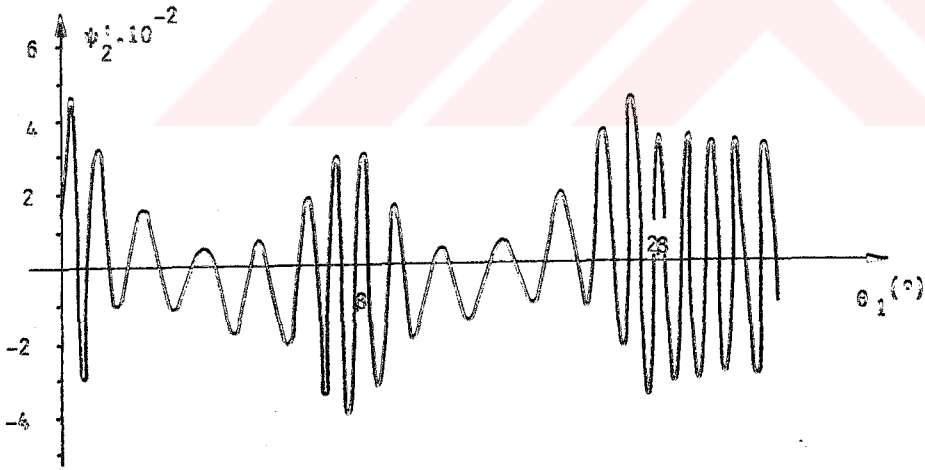
$$\psi_2'' \left[ 1 - M \left( \frac{S'}{S_m} \right)^2 \right] + N_{21}^2 \psi_2 - M \frac{S' S''}{S_m^2} (1 - \psi_2')^2 = \lambda M S_m'' \frac{S S'}{S_m^2} + p \frac{S'}{S_m} (1 - \lambda S) \quad (4.1)$$

sönüm de katılırsa denklemin sağ tarafındaki terimlere ilaveten  $C_2(1-\psi_2')$  terimi gelir.

Çeşitli izleyici hareket kanunları için bu nonlineer diferansiyel denklem nümerik olarak çözülmüş ve kam milinin dinamik cevabı bulunmuştur. Bir örnek olmak üzere Şekil 4.2a da harmonik hareket kanunu için kam milinin sürekli rejimdeki dinamik cevabı görülmektedir. Sürekli rejim ilk birkaç dönüşten sonra oluşmakta ve cevap hemen hemen tamamen aynı kalmaktadır. Şekildeki dinamik cevapta mil elastikliği sebebiyle kam mili dönüşünde girişe göre meydana gelen değişimler açık olarak görülmektedir. Kalkış-iniş-bekleme şeklindeki kam hareketinde, kalkış esnasında izleyiciden gelen direnç torqu sebebiyle kam mili burularak, kamın girişe izafi dönme miktarı  $\psi_2(\theta_1 - \theta_2)$  artmaktadır. Bunun anlamı, bu periyotta kamın girişe nazaran geri kalması ve yavaşlamasıdır. İniş periyodunda ise hem burulan milin enerjisini geri vermesi hem de izleyiciden etki eden tahrik torqu ile aynı yöndeki torqu sebebiyle kamın izafi dönme miktarı ters yönde artmaktadır, yani kam girişe nazaran ileri gitmekte ve hızlanmaktadır. Şekil 4.2b'de kamın girişe göre boyutsuz izafi hızını  $[\dot{\psi}_2 = (\omega - \dot{\theta}_2) / \omega]$  gösteren diyagramda da bu durum görülmektedir. Bütün kam mekanizmalarında meydana gelen, fakat izleyici kütlesi büyük ve mil rijitliği az olan mekanizmalarda bilhassa açısai hız arttıkça önemli olabilen bu olaya kurulma (windup) denilmektedir.



Şekil 4.2a. Harmonik hareket kanunlu toparlaklı bir kamı haiz bir kam milinin dinamik cevabı.  
( $M = 5$ ,  $p = 3$ ,  $N_{21} = 45$ ,  $\delta = 90^\circ$ )



Şekil 4.2b. Şekil 4.2a daki milde kamin girişe nazaran izafi açısal hızının değişimi.



/7,12,32,33/. Öyle ki sırf bu nedenle izleyicinin kamia teması kesile bilmekte, yani sıçrama meydana gelebilmektedir. Kendisi büyük genlikli bir burulma titreşimi olan bu olayın kendi içinde küçük genlikli bir titreşimle birlikte meydana geldiği de gözlenebilir.(4.1) denkleminde sağ taraftaki terimler, III. Bölümde de bahsedildiği gibi mildeki zorlayıcı torku ifade eden terimlerdir. Bunların etkisinde kam mili zorlanmış titreşimler yapar. Zorlayıcı tork milde bir şekil değişimi meydana getirir, bu şekil değişimi, torkun maksimuma ulaştığı konumlarda, yani kalkış ve inişin ortalarında en büyük değerlerine ulaşır. Şekil 4.2a da görüldüğü gibi, kurulma olayı zorlayıcı tork etkisinde oluşan zorlanmış bir titreşim olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu büyük genlikli titreşimle birlikte seyreden küçük genlikli titreşimler ise kendi kendini besleme olayı ile ortaya çıkan titreşimlerdir. (4.1) denkleminin sol tarafındaki son terim kendi kendini besleme olayı ile ilgili terimdir. Negatif veya pozitif sönüm etkisi oluşturan bu terim dolayısıyla, kurulma olayı ile birlikte kendi kendini besleyen, bu yüzden de zamanla ortadan kalkmayıp sürekli olan küçük genlikli bir titreşim de doğmaktadır.

Şekil 4.2a daki diyagram aynı zamanda kam milindeki torku ve gerilmeyi de ifade etmektedir. Zira kam ile giriş arasında izafi bir dönme ( $\psi_2 = \theta_1 - \theta_2$ ) söz konusudur. Milin yaylanma katsayısı  $k_1$  ise üzerindeki tork;

$$T = k_1(\theta_1 - \theta_2) = k_1 \psi_2 \quad (4.2)$$

ve kayma gerilmesi;

$$\tau = \frac{T \cdot r}{J} \quad (4.3)$$

Buradan Şekil 4.2a nın farklı ölçeklerde izafi dönme, tork ve gerilmeyi gösterdiği anlaşılmaktadır. Mil elastikliği sebebiyle oluşan titreşimli dinamik torkun, şekilde kesikli çizgilerle gösterilen teorik torktan sapması bariz bir şekilde görülmektedir.

Milın burulma elastikliğinden kaynaklanan titreşimler, iniş periyodundan sonra bekleme periyodunda da devam etmektedir. Bu titreşimler, sönüm yeterli değilse daha sonraki kalkış periyoduna da taşınarak cevabı etkileyecektir. Bekleme periyodu için geçen zaman titreşimlerin sönmesi için yeterli değilse, yani mil dönüşü hızlı ise de aynı şey olacaktır. Nitekim şekildeki titreşimin bekleme periyodunda da devam ettiği görülmektedir. Titreşimler şiddetli ise daha sonraki kalkış periyoduna taşınmaktadır.

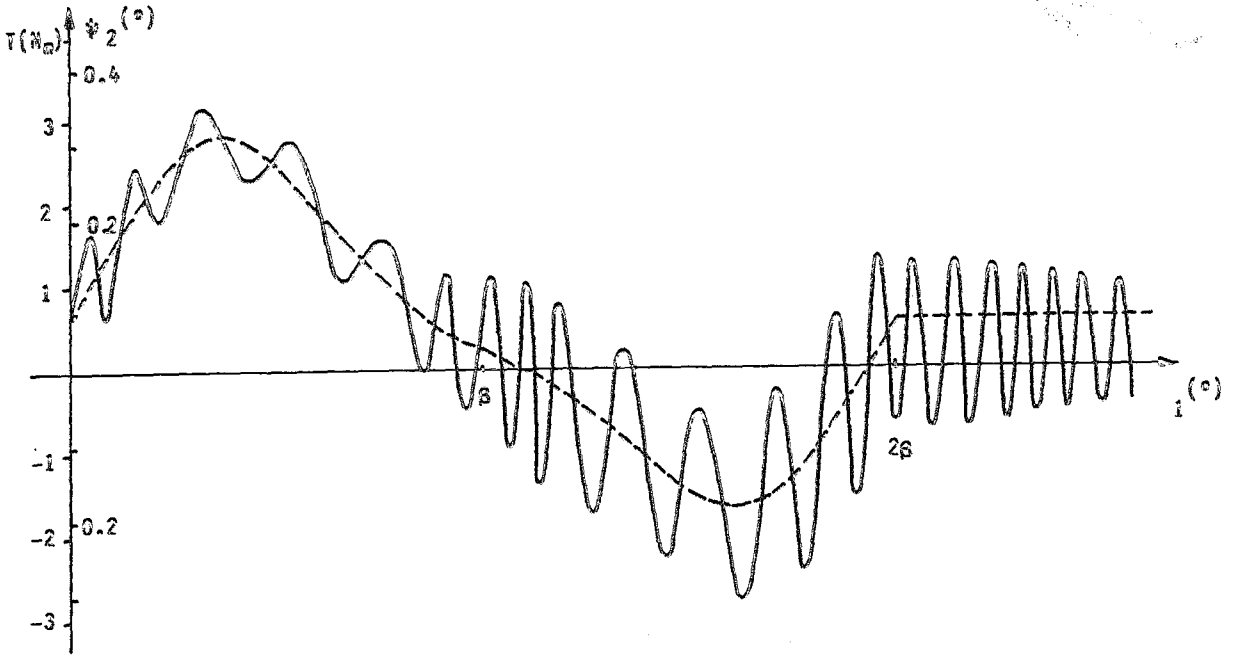
Tek kamı haiz tablalı bir kam mili için (4.1) denklemini şu şekli alır:

$$\psi_2'' \left[ 1 + M \frac{S'F}{S_m^2} \right] + N_{21}^2 \psi_2 - M \frac{S''F}{S_m^2} (1 - \psi_2')^2 = \lambda \frac{MS_m''}{S_m^2} \frac{SF}{S_m^2} + P \frac{F}{S_m} (1 - \lambda S) \quad (4.4)$$

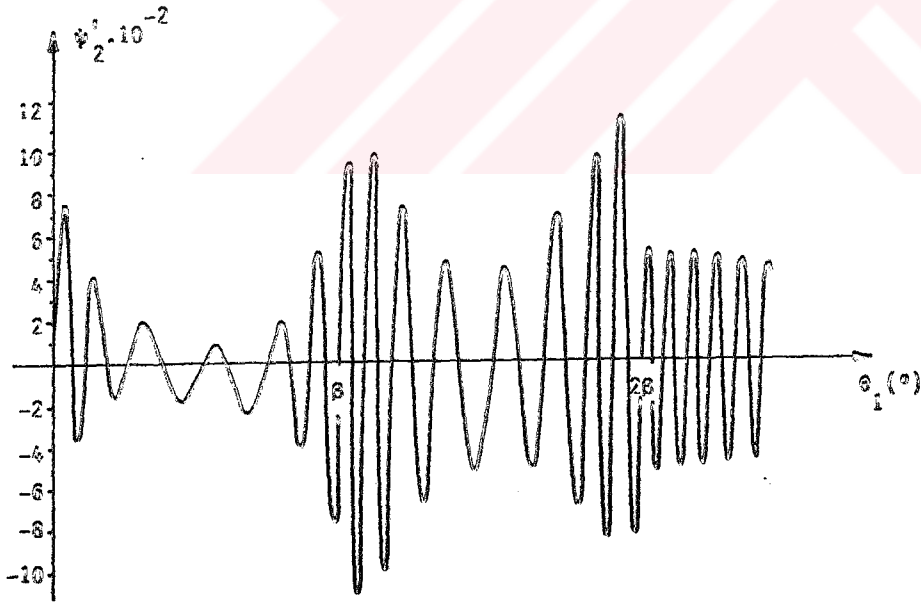
$$(F = S' - uS + \xi)$$

Sönümün de hesaba katılması halinde sağ tarafa ilaveten  $C_2(1 - \psi_2')$  terimi de eklenir.

Şekil 4.3a ve 4.3b de yine harmonik hareket kanununu haiz tablalı bir kam mili için elde edilen dinamik cevap görülmektedir. Bu cevaplar, Şekil 4.2a ve 4.2b de cevabı görülen mil ile aynı olan bir tablalı kam mili için elde edilmiştir. İlk diyagram kamın girişe göre izafi dönme miktarının ( $\psi_2$ ), ikincisi ise girişe göre boyutsuz izafi açısal hızının ( $\psi_2'$ ) değişimini göstermektedir. Tablalı halde de sürekli rejim ilk birkaç dönüşten sonra oluşmaktadır. Toparlıkla olanla karşılaştırılırsa, başlangıçta mil yine burulmakta ve kam girişine nazaran geri kalmakta, inişte ise ileri gitmektedir. Kamla tabla arasındaki sürtünme sebebiyle bu olay toparlaklı haldekine nazaran daha şiddetli bir titreşimle beraber meydana gelmektedir. Bunun sebebi tablaya sürtünen kamın daha büyük bir dirence maruz kalarak, daha fazla burulması, yani titreşimin genliğinin büyümesidir. Denklem (4.4) de görüleceği gibi zorlayıcı torkun şiddeti, sürtünme sebebiyle burada daha fazla olduğundan titreşim genliği artmak-



Şekil 4.3a. Harmonik hareket kanunlu tablalı bir kamı haiz bir kam milinin dinamik cevabı ( $M = 5$ ,  $N_{21} = 45$ ,  $p = 3$ ,  $\xi = 0.2$ ,  $\beta = 90^\circ$ )



Şekil 4.3b. Şekil 4.3a daki milde kamın girişe göre izafi açısal hızının değişimi

ta, yani kurulma olayı şiddetlenmektedir. Kendi kendini besleme olayı ile ilgili terim de büyüdüğü için, kendi kendini besleyen titreşimlerin genliği de artmıştır. Fakat inişten sonraki bekleme periyodunda bu sürtünme yine mevcut olduğundan milde yine titreşimli ve ortalama değeri sıfırdan büyük bir tork bulunmaktadır ki bu tablalı kam millerinde beklenen bir durumdur.

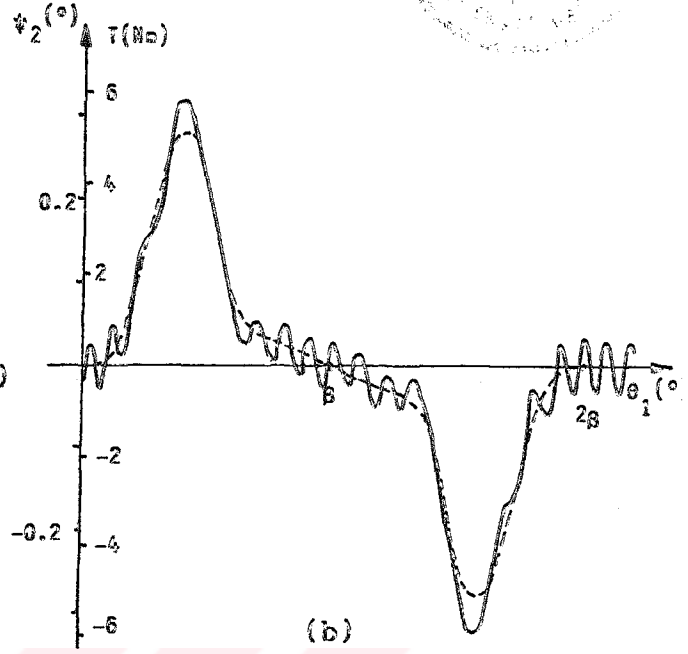
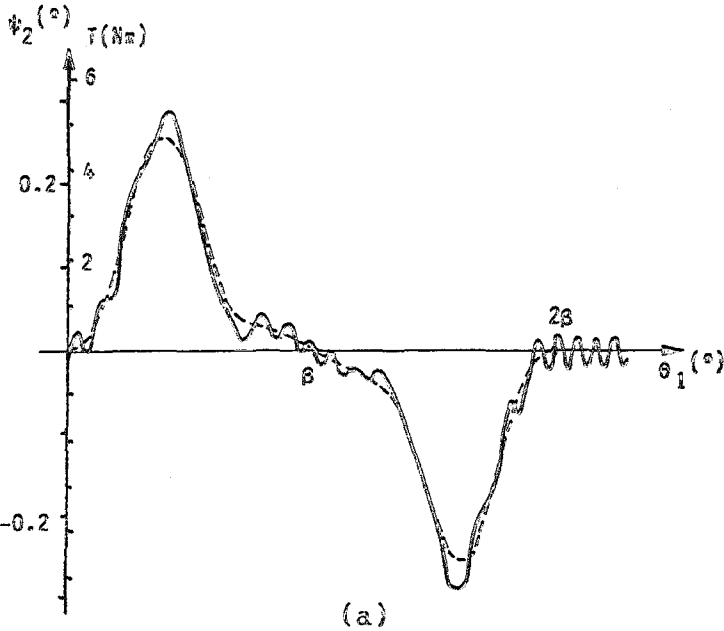
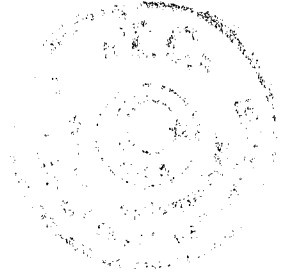
Şekil 4.4 de muhtelif hareket kanunlarını haiz kamların millerinin dinamik cevabı görülmektedir. Bu cevaplar aynı dinamik özelliklere sahip kamlar için elde edilmiştir. İzleyici hareketi hepsinde kalkış-iniş-bekleme olarak alınmıştır. Bir misal olarak temel daire yarıçapı 2,1 cm, kalkış miktarı 1,8 cm, kalkış ve iniş kam açısı  $60^\circ$  toplam izleyici kütlesi 0,55 kg, kam mili çapı 1,6 cm ve uzunluğu 15 cm (10 cm tahrik tarafı, 5 cm diğer taraf), kam kalınlığı 2 cm, geri dönüş yayı yay sabiti 300 N/cm ve ön sıkıştırma miktarı 0,5 cm olan parabolik hareket kanununu haiz bir kam için,  $I = 1,2828 \cdot 10^{-4}$   $\text{kgm}^2$ ,  $s_m = 3,43 \cdot 10^{-2}$  m,  $F_d = 170$  N ve milin burulma yay katsayısı  $k = 5120$  Nm/rad bulunur. Kam mili 130 rad/s açısal hızla tahrik edilirse ilgili boyutsuz katsayılar örnek dinamik cevapta olduğu gibi  $M = 5$ ,  $p = 3$  ve  $N_{21} = 45$  olarak bulunmaktadır. Hareket kanununun değişmesi ile kam profilinde ve maksimum kam eğiminde meydana gelecek değişiklikler az olduğundan yukardakiyle aynı geometrik ve kinematik özelliklere sahip kamların hareket kanunları farklı da olsa boyutsuz katsayılar yine yakın değerler olacaktır. Bu örnekten açısal hız büyürse frekans oranının daha küçük değerler alacağı, izleyici kütlesi artırılırsa atalet oranının oldukça büyük değerler alabileceği görülüyor. Buradan küçük boyutlu kam mekanizmalarında bile açısal hız büyük olduğu zaman kam mili elastikliğinin önemli etkiler meydana getirebileceği anlaşılmaktadır. Harmonik hareket kanununda olduğu gibi bu hareket kanunları için de sürekli rejim ilk birkaç dönüşten sonra oluşmaktadır. Dinamik cevaplardan görüldüğü gibi

kurulma olayı bütün hareket kanunları için sözkonusudur. Parabolik ve teğetsel kamlarda hız ve ivmedeki süreksizlik sebebiyle bu olay şiddetli bir titreşimle birlikte meydana gelmektedir. Diğer hareket kanunları için titreşim düşük seviyededir. Sikloidal hareket kanunu için hem kurulma olayı diğerlerine nazaran daha hafif olmakta, hem de en az titreşimle meydana gelmektedir. Böylece kam milinin titreşimi açısından en elverişli hareket kanununun sikloidal olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, harmonik hareket kanunu için kurulmanın genliği sikloidalden daha azdır. 4-5-6-7 polinom hareket kanununun performansı ise orta düzeydedir. Literatürde şekil kapalı bir kam mekanizmasında harmonik ve sikloidal hareket kanunları için sadece kalkışta benzer bir dinamik cevap bulunmuştur/33/.

Bütün hareket kanunları için bulunan dinamik cevaplarda bekleme periyotlarında milde bir miktar titreşim mevcuttur. Bilhassa ivmenin süreksiz olduğu teğetsel ve parabolik kamlarda bu titreşim oldukça şiddetlidir.

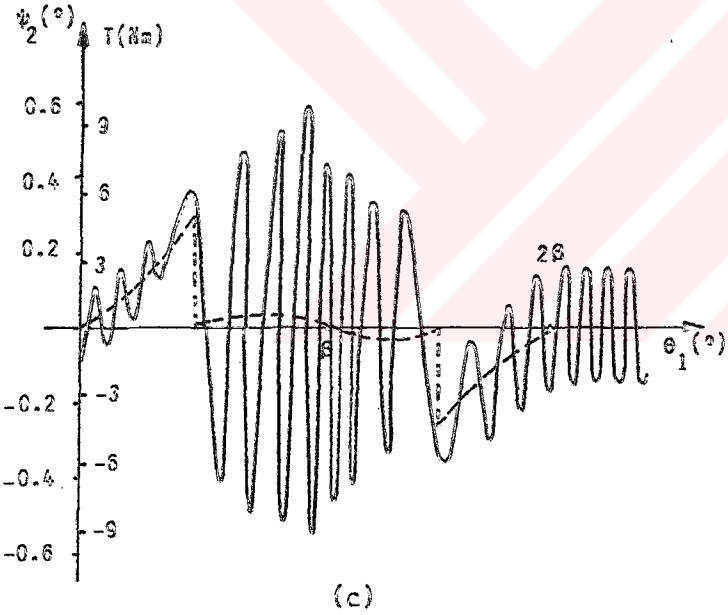
Bu dinamik cevap diyagramları daha önce de belirtildiği gibi aynı zamanda mildeki torkun değişimi de göstermektedir. Diyagramlarda teorik torkun değişimi kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Mile etki eden değişken torkun teorik torktan sapması açıkça görülmektedir. Sapmanın en az olduğu hareket kanununun da sikloidal olduğu gözlelenebilir.

Şekil 4.4 de dinamik cevapları görülen kam millerinin, kamların tablalı olması halindeki dinamik cevapları Şekil 4.5 de görülmektedir. Burada da izleyici hareketi kalkış-iniş-bekleme olarak alınmıştır. Harmonik hareket kanunu için elde edilen cevapta olduğu gibi kurulma olayı toparlaklı kamlardakine nazaran daha şiddetli bir titreşimle meydana gelmektedir. Tabla ile kam arasındaki sürtünmenin

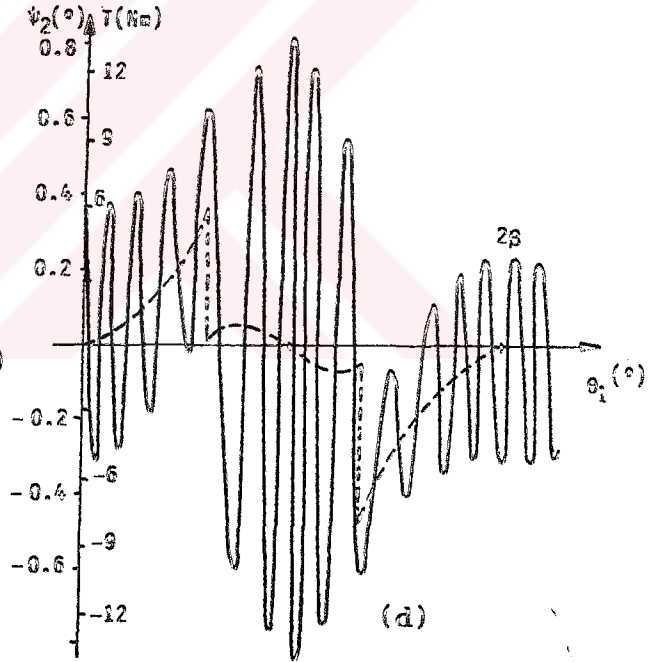


(a)

(b)



(c)



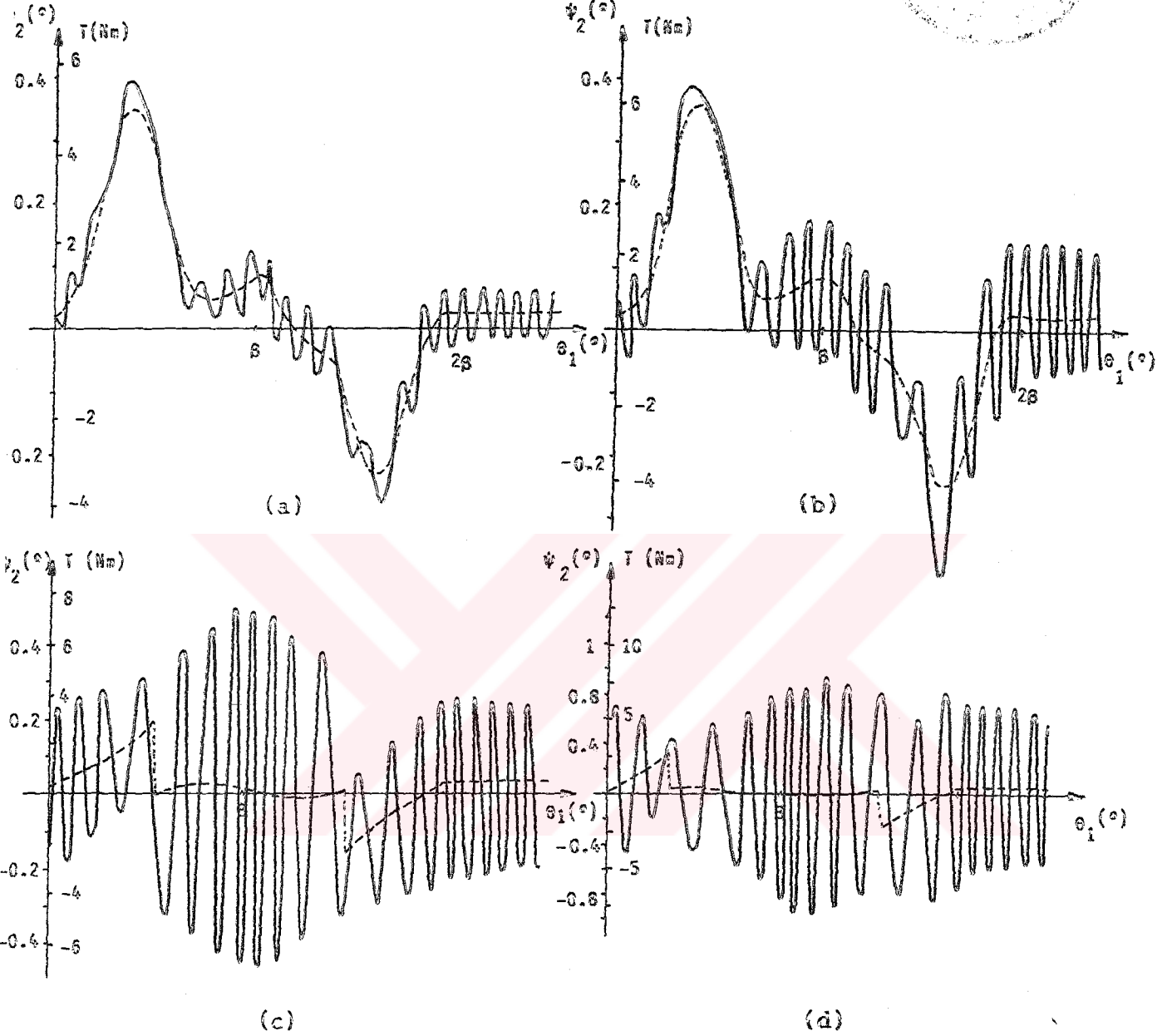
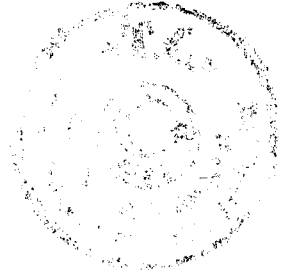
(d)

Şekil 4.4. Muhtelif hareket kanunları için toparlaklı kam mil-  
lerinin dinamik cevabı

- a) Sikloidal, b) 4-5-6-7 polinom, c) Parabolik,  
d) Yan yüzü kavisli (daire yaylı) ( $M = 5$ ,  $p = 3$ ,  
 $N_{21} = 45$ ,  $\beta = 90^{\circ}$ )

etkisi bütün diyagramlarda görülmektedir. Kalkış esnasında milin burularak kamın girişe göre geri kalması toparlaklı kamlardakine nazaran daha şiddetli olmaktadır. Buna sebep olan şey, kamia tabia





Şekil 4.5. Muhtelif hareket kanunları için tablalı kam millerinin dinamik cevabı a) Sikloidal, b) 4-5-6-7 polinom c) Parabolik, d) Daire yaylı ( $M = 5$ ,  $p = 3$ ,  $N_{21} = 45$ ,  $\xi = 0.2$ ,  $\varrho = 90^\circ$ )

arasındaki sürtünmedir. Kamla giriş arasındaki izafi dönme miktarını gösteren bu diyagramlar, aynı zamanda mildeki torku da ifade ettiği için kalkış esnasında tablalı bir kam mili, toparlaklı olana nazaran



daha büyük bir torka maruzdur. İniş esnasında ise, çıkışın aksine sürtünmenin müspet etkisi ile kamın girişe göre ileri gitmesi daha az olmakta ve mildeki tork da azalmaktadır. Bu periyotta, titreşimin kalkışa göre daha fazla olduğu da göze çarpmaktadır. Bekleme periyodunda kamlar tabla arasındaki sürtünme devam ettiğinden milde ortalama değeri sıfırdan büyük bir tork ve titreşim mevcuttur. Bu kısımda sürtünme bir sönüm tesiri oluşturarak titreşimlerin daha çabuk sönmesini sağlamaktadır. Sikloidal hareket kanunu için, toparlaklı kamlarda olduğu gibi en az titreşimli, harmonik ve 4-5-6-7 polinom hareket kanunları için ise orta düzeyde bir dinamik cevap sözkonusudur.

Tablalı ve toparlaklı kamlar için bulunan cevaplar karşılaştırılırsa, bütün hareket kanunları için tablalı bir kam milinin daha büyük ve daha titreşimli bir torka maruz olduğu görülmektedir. Başka bir deyişle, tablalı bir kam mili, kurulma olayına daha yatkındır. Toparlaklı bir kam milinin dönüşü daha yumuşak ve daha az titreşimlidir. Dikkati çeken bir husus da hem tablalı, hem de toparlaklı kamların millerinde iniş esnasında zorlanmış bir titreşim olan kurulma ile birlikte seyreden küçük genlikli titreşimlerin artmasıdır. Gerek kalkış esnasında bir miktar burulan milin, inişte üzerinden yükün kalkması ile üzerinde biriken enerjiyi geri vermesi, gerekse bu periyotta izleyicinin mili tahrik etmesi sebebiyle milde zaten mevcut olan bu titreşim hareketine bir enerji ithali olmaktadır ve böylece titreşimler şiddetlenmektedir. Kalkış periyodunda ise aksine mil izleyiciyi tahrik ettiğinden milden izleyiciye enerji aktarılır ve titreşimin şiddeti azalır.

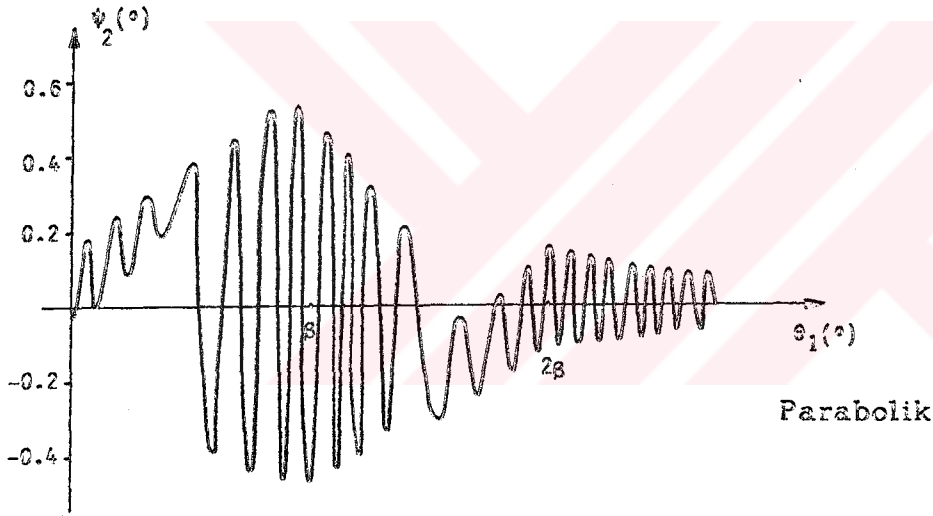
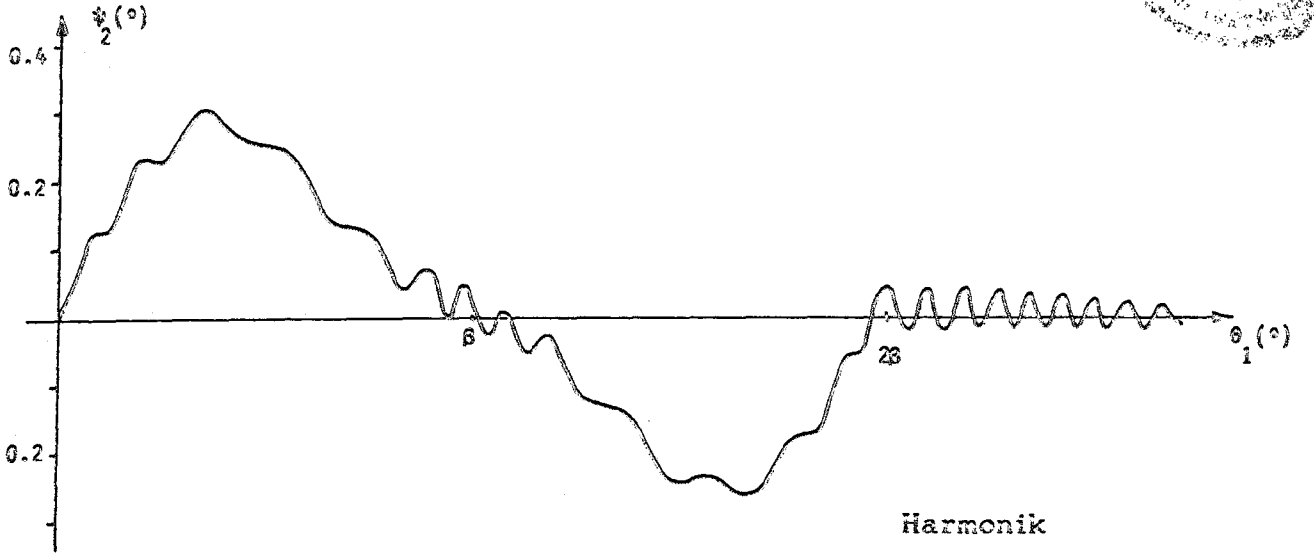
#### 4.1.2. Sönümün etkisi

Bir veya daha fazla kamı ihtiva eden bir mil iki veya daha fazla yerinden yataklanır. Yataklardaki yağlama yağının milin tit-



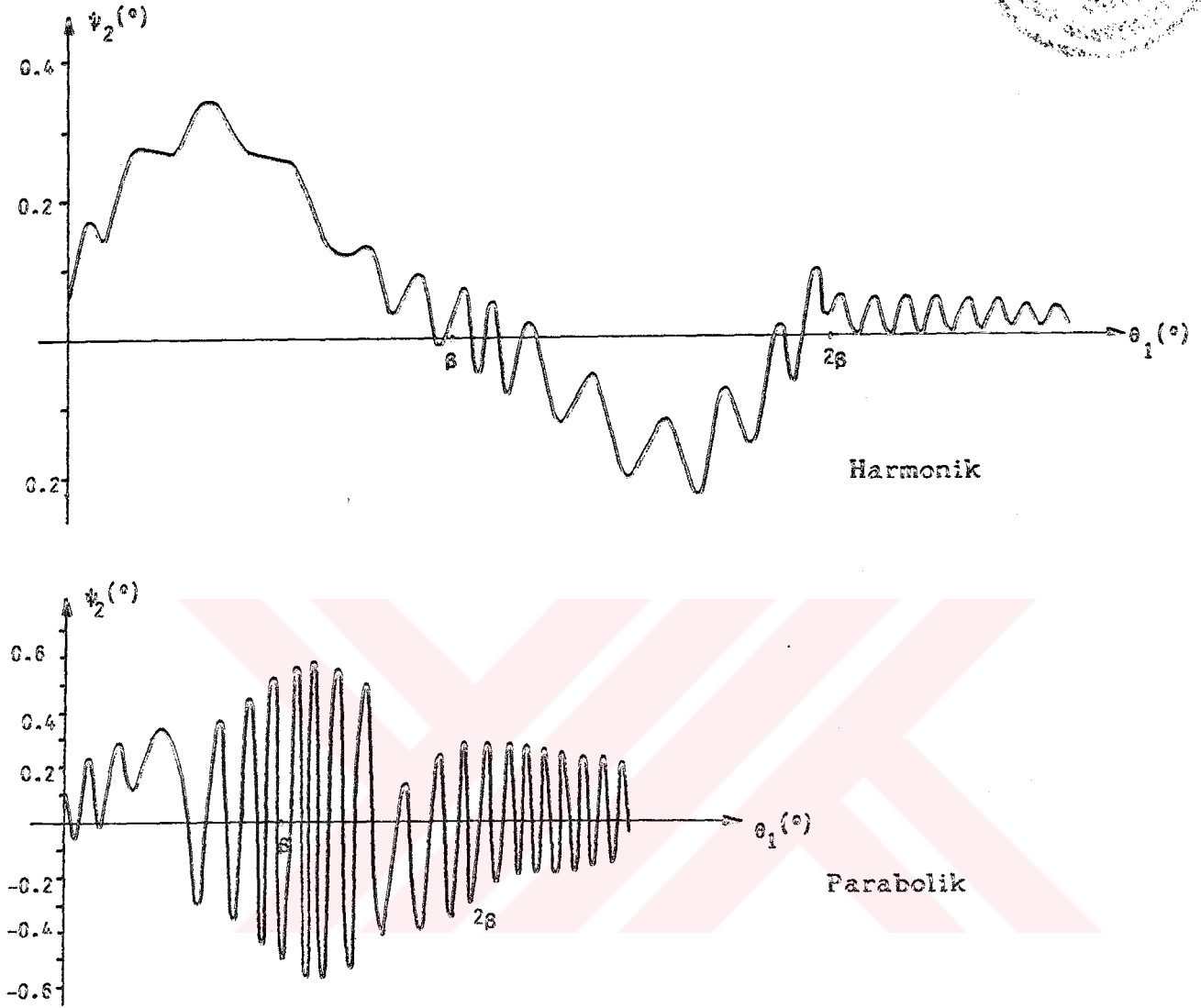
reşimlerine karşı küçük de olsa sönümlenme etkisi mevcuttur. Bu sönüm de hesaba katılırsa önceki kısımda sönümsüz olarak bulunan dinamik cevaplarda titreşimlerin azalacağı hemen tahmin edilebilir. Şekil 4.6 da harmonik ve parabolik hareket kanununu haiz toparlaklı kam millerinin sönümde hesaba katılarak elde edilen dinamik cevapları görülmektedir. Sönümün cevaba etkisi belirgin olarak göze çarpmaktadır. Kurulma yine aynı şiddette meydana gelmekte, fakat beraberindeki titreşim azalmaktadır. Bekleme periyodundaki titreşimlerin ise sönüm etkisiyle iyice azaldığı gözlenmektedir. Böylece bunların bir sonraki kalkış periyodunu etkilemesi de büyük ölçüde önlenmektedir ki, bu açıdan küçük bir sönüm dahi kendi kendini besleyen bu küçük genlikli titreşimler açısından müspet bir sonuç doğurmaktadır. Diğer hareket kanunlarını haiz kamların millerinin dinamik cevabı hakkında da benzer şeyler söylenebilir.

Şekil 4.7 de yine harmonik ve parabolik hareket kanunlarını haiz tablalı kam millerinin dinamik cevabı görülmüyor. Bu dinamik cevaplar için de yukarıdakine benzer şeyler söylenebilir. Genel olarak söylenirse sönüm, mildeki küçük genlikli titreşimleri azaltmakta ve daha çabuk sönmelerini sağlamaktadır. Kurulma, sönümsüz haldekine nazaran daha titreşimsiz, fakat yine aynı genlikle meydana gelmektedir. Mildeki hızla orantılı viskoz sönüm, daima pozitif bir sönüm oluşturur, yani milden daima enerji çekecek şekilde etki eder. Viskoz sönümün daima pozitif olması sebebiyle, beraberce düşünülürlerse (4.1) denklemindeki kendi kendini besleme ile ilgili katsayısının ( $c(\theta_1)$  fonksiyonu) negatif olduğu aralıklar azalacaktır. (Bölüm 3. 3.1) Böylece kendi kendini besleme mekanizması hafifleyerek, kurulma ile birlikte seyreden küçük genlikli titreşimlerin genlikleri küçülmektedir, fakat zorlayıcı torkun oluşturduğu zorlanmış titreşim olan kurulma olayı yine aynı şiddette oluşmaktadır. Bu arada bu diyagram-



Şekil 4.6. Harmonik ve parabolik hareket kanunları için toparlaklı kam milinin dinamik cevabına sönümün etkisi ( $M = 5$ ,  $p = 3$ ,  $N_{21} = 45$ ,  $\beta = 90^{\circ}$  harmonik için  $C_2 = 0.2$ , parabolik için  $C_2 = 0.5$ )

ların aynı zamanda mildeki torkun değişimini de gösterdiği hatırlanırsa, sönümün torkun dalgalanmasını da azaltarak müspet bir sonuç meydana getirdiği göze çarpmaktadır.



Şekil 4.7. Harmonik ve parabolik hareket kanunları için tablalı kam millerinin dinamik cevabına sönümün etkisi ( $M = 5$ ,  $N_{21} = 45$ ,  $p = 3$ ,  $\xi = 0.2$ ,  $\beta = 90^\circ$  sırayla  $C_2 = 0.2$  ve  $C_2 = 0.5$ )

#### 4.2. Kam milinin dinamik cevabının boyutsuz katsayılara göre değişimi

Kam milinin kendisine etki eden değişken torka cevabı birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörler, kamın hareket kanunu, kam açısı, kam ve milin boyutları, geri dönüş yayının sertliği, açısal hız ve sönüm olarak söylenebilir. Bölüm III. de tanımlanan boyutsuz katsayılar ve kam milinin hareketiyle ilgili olarak elde edilen diferansiyel denkle-



min katsayıları bu faktörlerle ilgilidir. Bu katsayıların değişmesi ile milin dinamik cevabında meydana gelecek değişiklikler, bu faktörlerin milin hareketine etkileri hakkında fikir verecektir.

Bir kamda aynı kalkış, daha küçük kam açılarında gerçekleştirilirse, hareket daha dar bir zamana sıkıştırıldığı için izleyici ivmesi büyük değerler alır. Bu da kam miline etki eden atalet kuvvetinin ve torkun artması demektir. Bunun yanında açısal hız büyük olursa, kalkış ve iniş dar zaman aralıklarına sıkıştırıldığı için tork darbeler halinde etki eder. Bunun sonucunda mildeki titreşimler şiddetlenir. Kam açısının küçülmesiyle kamın girişe göre geri kalması ve inişte ileri itmesi bariz bir şekilde artar. Bunun için belirli bir kam kalkışını mümkün olduğu kadar büyük bir kam açısına yaymak izleyici hareketinin kam mili elastikliğinden fazla etkilenmemesi için gereklidir.

Kam milinin dinamik cevabını karakterize eden boyutsuz katsayılarından ilki atalet oranı  $M$  dir. Bu oran kam dinamiğinde önemli rolleri olan büyüklüklerden izleyici kütlesi ve maksimum kam eğimi ile kam kütle atalet momentine bağlıdır. Bunlardan bilhassa ilk ikisinin rolleri önemlidir. Maksimum kam eğimi seçilen hareket kanununa bağlıdır ve toplam kam açısına göre belli bir değere sahiptir. Seçilen bir hareket kanunu için atalet oranı daha çok izleyici külesine bağlı olarak değişir. Kam büyüklüğü, dolayısıyla kam kütle atalet momenti tespit edildikten sonra izleyici kütlesi artırılıp azaltılarak atalet oranı değiştirilebilir.

Muhtelif hareket kanunları için diğer şartlar değiştirilmeden bu oranın değişimi ile dinamik cevabın nasıl değiştiği araştırılmıştır. Değişik  $M$  değerleri için bulunan maksimum kurulma açıları ( $\psi_{max}$ ) Şekil 4.8 de gösterilmiştir. Oranın değeri büyüdükçe kurulma olayı şiddetlenmekte, yani kam milinin titreşimlerinin genliği artmaktadır. (3.30) ve (4.1) denklemlerine bakılırsa bu oranın hem ilk terimde, hem kendi kendini besleme olayı ile ilgili üçüncü terimde, hem



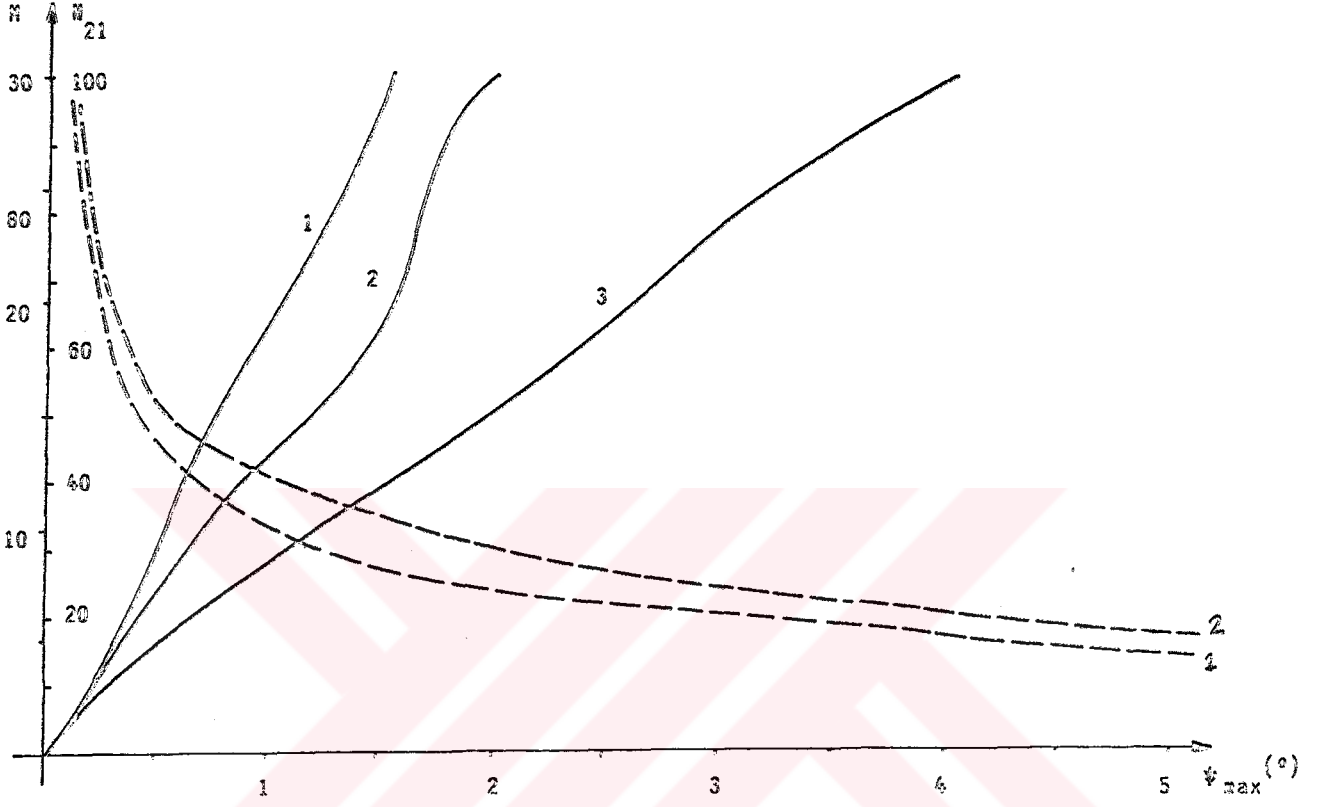
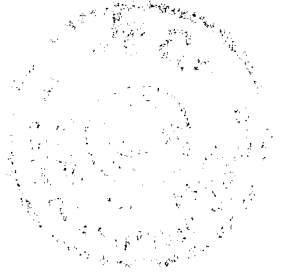
de sağ tarafta zorlama terimlerinde bulunduğu görülür. Oranın artması zorlayıcı torkun etkisini artırarak genliğin büyümesine ve kendi kendini besleme olayının da Şiddetlenmesine yol açar. Ayrıca parametre tahrikinin de etkisi artarak titreşimlerin nonlinear karakteri ağır basar, sistem lineerlikten uzaklaŐır.

Ayrıca atalet oranı büyüdükçe küçük genlikli titreşimlerin frekansı azalmaktadır. Bu, izleyicinin büyüyen ataleti sebebiyle ani hareketleri yapamaması ile izah edilebilir.

Kamlarda kalkışın gerçekleştirildiği kam açısı küçüldükçe maksimum kam eğimi ve dolayısıyla atalet oranı artar. Bu da yukarda sözü edildiği gibi kurulma olayını Şiddetlendirir.

Şekil 4.8 den görüldüğü gibi atalet oranının artışına en az hassas olan harmonik hareket kanunudur. Sikloidal hareket kanunu daha hassas, parabolik ise özelliğinden dolayı en hassastır.

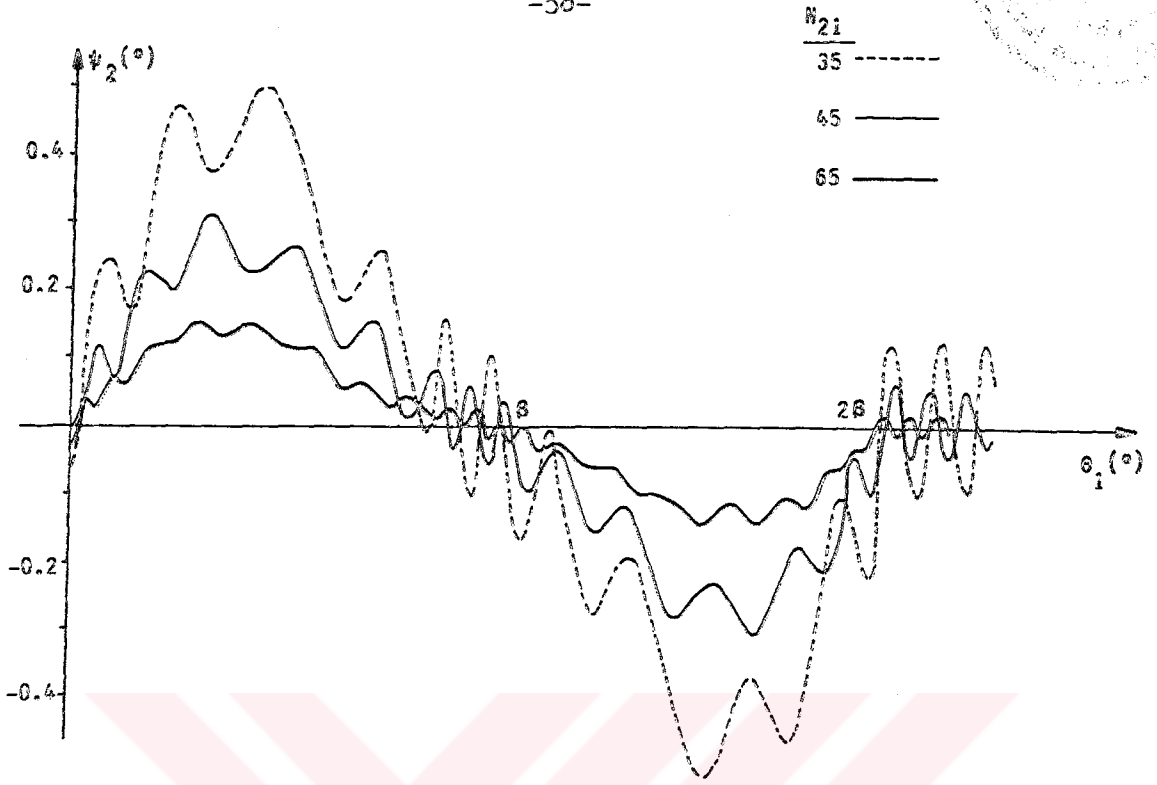
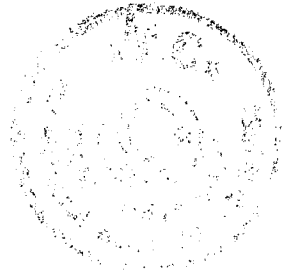
İkinci boyutsuz katsayı frekans oranıdır. Bu oran kam milinin tabii frekansının mil açısal hızına oranı olarak tanımlanabilir. Milin tabii frekansı rijitliğine ve ktle atalet momentine bağlıdır. Küçük bir frekans oranı ince bir kam mili veya büyük bir açısal hız akla getirir. Mil kesiti küçüldükçe rijitliği azalır, dolayısıyla frekans oranı azalır. Bu oran kam milinin dinamiği ile doğrudan ilgili bir boyutsuz katsayıdır. Milin rijitliği ve açısal hızı, hareketini etkileyen en önemli faktörlerden ikisidir. Rijitlik milin dinamik cevabını doğrudan etkiler, açısal hız ise mile etki eden torkla doğrudan ilgilidir. Rijitliği artarsa mil, kendine etki eden kuvvet ve momentlere daha fazla direnç göstereceğinden, Şekil deđiŐtirme miktarı, yani kurulma olayının Şiddeti ve beraberindeki titreşimlerin genliği azalır. Fakat mili çok rijit yapmak, hem ekonomik, hem de konstrüktif açıdan uygun değildir, optimum bir çözüm tercih edilmelidir.



Şekil 4.8. Kam milindeki maksimum burulma açısının değişimi. Dolu olan çizgiler atalet oranına göre değişimi, kesikli çizgiler frekans oranına göre değişimi göstermektedir. (1- Harmonik, 2- Sikloidal, 3- Parabolik, ———  $N_{21}=45$ ,  $p=3$ ,  $\phi=90^\circ$ , - - - - -  $M=10$ ,  $p=3$ ,  $\phi=90^\circ$ )

Açısal hız arttıkça izleyici atalet kuvveti ve dolayısıyla mile etki eden tork artar, bu da kurulma olayını şiddetlendirir ve titreşimleri artırır. Açısal hızın artışı rezonans tehlikesini de artırır. Özellikle ivme diyagramının süreksiz olduğu parabolik ve daire yaylı kamlarda yüksek açısal hızlar, milin titreşimleri açısından hiç uygun değildir.





Şekil 4.9. Kam mili dinamik cevabının frekans oranına göre değişimi (Hareket kanunu: harmonik,  $M = 5$ ,  $p = 3$ ,  $\beta = 90^{\circ}$ )

Diğer bir bakış açısından frekans oranının değeri, mile etki eden değişken torkun harmoniklerinin rezonans tehlikesi hakkında bir fikir verir. Oran küçüldükçe, açısal hız tabii frekansa yaklaşacağı için küçük mertebeden büyük genlikli harmoniklerin rezonansa girme tehlikesi artacaktır. Bu yüzden bilhassa yüksek hızlı kam millerinde frekans oranı yeterince büyük olmalıdır.

Kurulma olayı ile birlikte oluşan nonlineer titreşimlerin frekansı da bu orana bağlıdır. Oran büyüdükçe bu titreşimlerin frekansı artacaktır. Nitekim Şekil 4.9 da harmonik hareket kanunu için üç farklı frekans oranındaki dinamik cevaplarda da bu durum göze çarpmaktadır. Oranın yükselmesiyle birlikte büyük genlikli titreşim olan kurulma olayı ve beraberindeki küçük genlikli titreşimlerin şiddeti azalmakta, küçülmesiyle beraber, kam mili elastikliğinden doğan etkiler belirgin olarak ortaya çıkmaktadır.

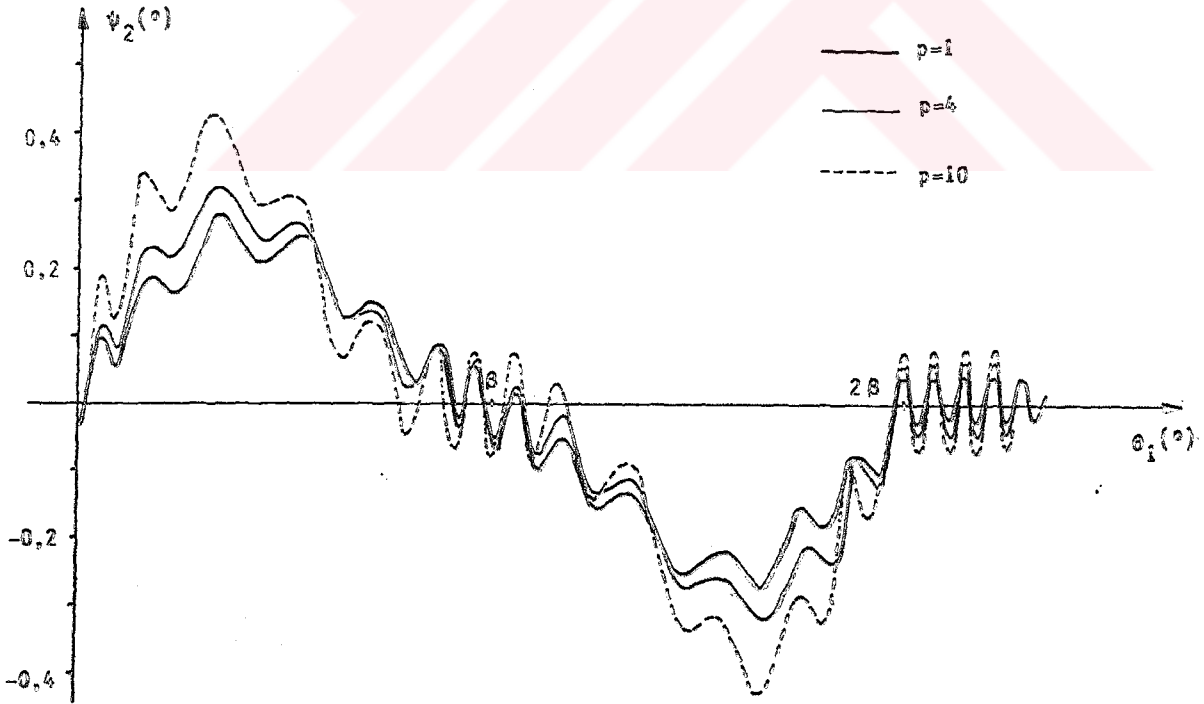


Boyutları küçük olan bir kamın konstrüksiyon gereği mili de ince yapılırsa kam ve milin toplam kütle atalet momenti küçüleceği için atalet oranı artar. Açısal hız da büyükse frekans oranı küçülür. Böylece mildeki kurulma olayı şiddetli bir hal alarak mil aşırı ölçüde şekil değiştirir. Sıçrama oluşabilir ve milde ciddi bir titreşim oluşarak dönüşü düzensiz hale gelir. Bunun önüne geçmek için bir çözüm kütle atalet momentini artırmaktır. Bu da mile bir volan takmakla sağlanabilir. Volan sayesinde atalet oranı azalır ve milin dönüşündeki düzensizlikler azalarak makul bir seviyeye iner. Gerçekten de bazı yüksek hızlı motorlarda kam miline volan eklenerek milin dönüşü düzgün hale getirilmiştir.

Üçüncü boyutsuz katsayı enerji oranı  $p$  dir. Bu oran izleyiciye (dolayısıyla kama) etki eden ağırlık, yay öngerilme kuvveti gibi sabit kuvvetler toplamına, kam eğimi ve kütle atalet momentine, açısal hıza bağlı olarak değişir. Milin hareketi esnasında maruz olduğu değişken tork (2.14) ve (2.15) denklemlerinde görüldüğü gibi izleyiciden kama etki eden kuvvetle doğru orantılıdır. Bu kuvvet biri sabit, diğeri de değişken iki kısma ayrılırsa torkun da bu ikisinin mil eksenine göre momentinden oluştuğu söylenebilir. Kuvvetin sabit kısmı ne kadar büyük olursa mildeki tork da o derecede büyük değerlere ulaşır. Yani sabit kuvvet milde bir tork oluşturarak onu bir miktar döndürür, böylece iş yapmış olur. Bu şekilde bu boyutsuz katsayının anlamı ve burulma titreşimlerindeki rolü daha iyi anlaşılmaktadır. Ayrıca milde meydana gelen titreşimler zorlanmış titreşimlerdir ve bunların devamı izleyiciden mile aktarılan enerji ile sağlanır. Böylece enerji oranının mil ve izleyici arasındaki enerji alışverişinin bir ölçüsü olduğu anlaşılır. Bu enerji transferi izleyiciye etki eden statik kuvvetlerin potansiyel enerjisi ve milin kinetik enerjisi ile ilgilidir. İzleyiciden etki eden dinamik kuvvetlerin bu oranla ilgisi



yoktur. Gerçekten  $p=0$  olduğu zaman izleyiciden mile yine bir tork etki eder, fakat bu sadece dinamik kuvvetlerin oluşturduğu torkdur.  $p \neq 0$  halinde izleyiciye etki eden statik kuvvetlerin oluşturduğu tork da mile etki eder ve milin daha fazla şekil değiştirerek kurulma olayının ve beraberindeki titreşimlerin şiddetlenmesine sebep olur.  $p$  ne kadar büyükse bu etki de o kadar büyük olacaktır. Şekil 4.10 da harmonik hareket kanunu için üç farklı enerji oranında elde edilen dinamik cevaplarda da bu durum görülmektedir. Buradaki kam mili toparlaklı bir kamı haizdir, tablalı kam olması durumunda da aynı şeyler söylenebilir. Şekilden bu oranın artmasının sadece genliği artırdığı, büyük genlikli titreşimin beraberindeki titreşimlerin frekansının değişmediği görülebilir. Ayrıca titreşimlerin genliğinde meydana gelen artışın oranın artışına çok hassas olmadığı da görülmektedir. Bu hassasiyet atalet ve frekans oranları için daha fazladır.



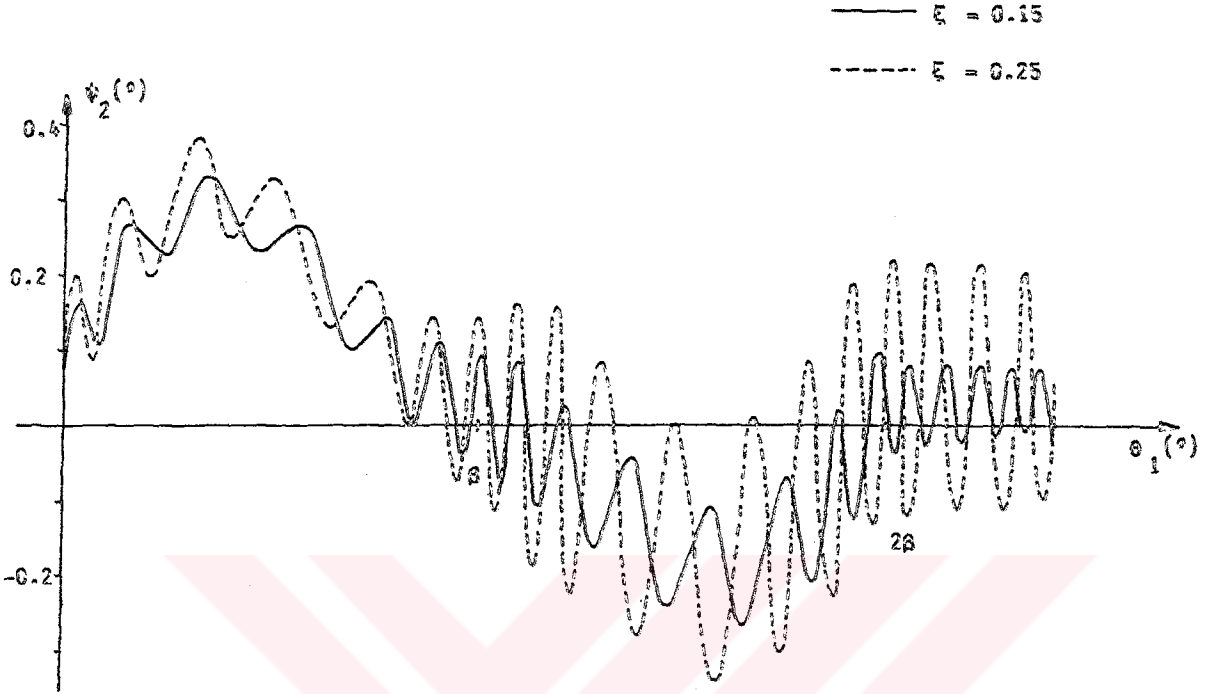
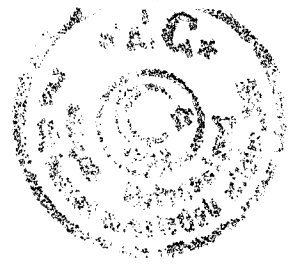
Şekil 4.10. Harmonik hareket kanunlu bir kamı haiz kam milinin dinamik cevabının enerji oranına göre değişimi ( $M = 5$ ,  $N_{21} = 45$ ,  $\beta = 90^{\circ}$ )



Tablalı ve toparlaklı kamlar için beraberce tanımlanan sönüm boyutsuz katsayı sönüm etki oranı  $C$ , mil yataklarındaki viskoz sönümle ilgilidir. Sistemin diferansiyel denkleminde bu katsayının bulunduğu terim, lineer sönüm terimidir. Bu oran, sönümün milin titreşimli dönme hareketine etkisinin bir ölçüsü olduğundan, büyümesi ile birlikte kurulma olayı ile birlikte seyreden titreşimlerin genliğinin azalması beklenir. Nitekim oranın değeri arttıkça kurulma olayının yine aynı şiddette meydana geldiği, fakat beraberindeki titreşimin daha küçük genlikli hale geldiği nümerik çözümlerde gözlenmiştir. Katsayı pratikte genellikle küçük değerleri haizdir, açısal hız arttıkça daha da küçülür. Değerinin büyük olması, sönümün fazla enerji yuttuğu anlamına gelir ki, bu arzu edilmeyen bir şeydir.

Tablalı kamları haiz miller için tanımlanan büyüklük oranı da önemli bir katsayıdır. Bu oran, kamın büyüklüğü hakkında izafi bir fikir verir ve ayrıca kam ile tabla arasındaki sürtünme katsayısı ile de ilgilidir. Dolayısıyla kam milindeki torkun büyüklüğü ile doğrudan ilişkisi vardır (Denklem 2.17). Oranın büyük olması kam boyutlarının mil çapına göre izafi olarak büyük seçildiği veya sürtünme katsayısının büyük olduğu anlamına gelir ki, bu da mildeki torkun artması demektir. Oranın artmasıyla birlikte kam milindeki kurulma olayı ve beraberindeki titreşimlerin çok şiddetlendiği görülmür. Şekil 4.11 deki iki farklı büyüklük oranı için bulunan örnek dinamik cevaplarda da bu durum görülmektedir. Bu cevaplar harmonik hareket kanunu için bulunmakla beraber, diğer hareket kanunları için de tamamen aynı şeyler söylenebilir.

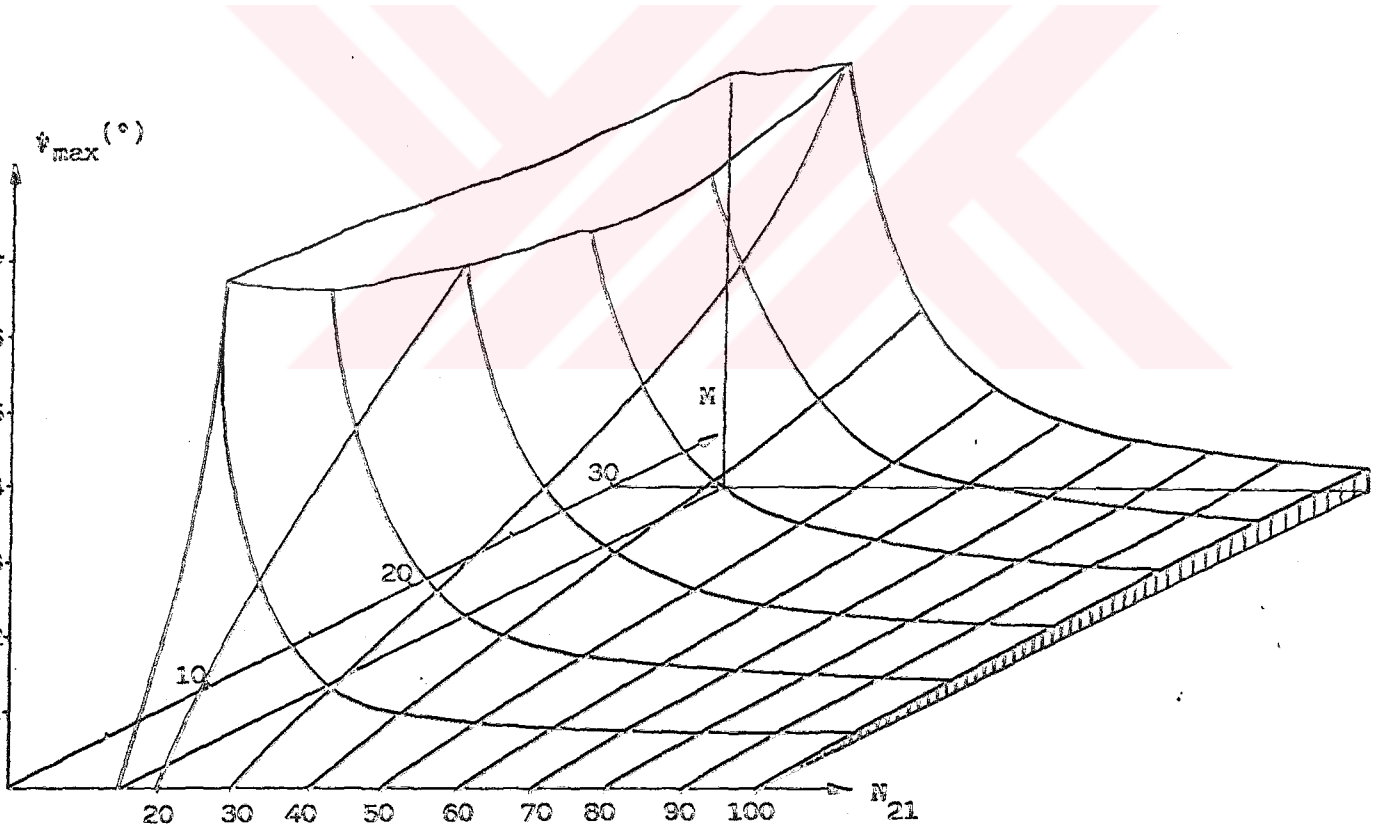
Şekil 4.12 de harmonik, 4.13 de sikloidal hareket kanunlu bir kamı haiz kam millerinin dinamik cevap yüzeyleri görülmektedir. Burada en önemli iki katsayı olan frekans ve atalet oranları beraberce değerlendirilerek bunların belirli değerlerinde milin burulma titreşi-



Şekil 4.11. Kam mili dinamik cevabının büyüklük oranına göre değişimi (Hareket kanunu: Harmonik,  $M = 5$ ,  $N_{21} = 45$ ,  $p=3$ ,  $\beta = 90^\circ$ )

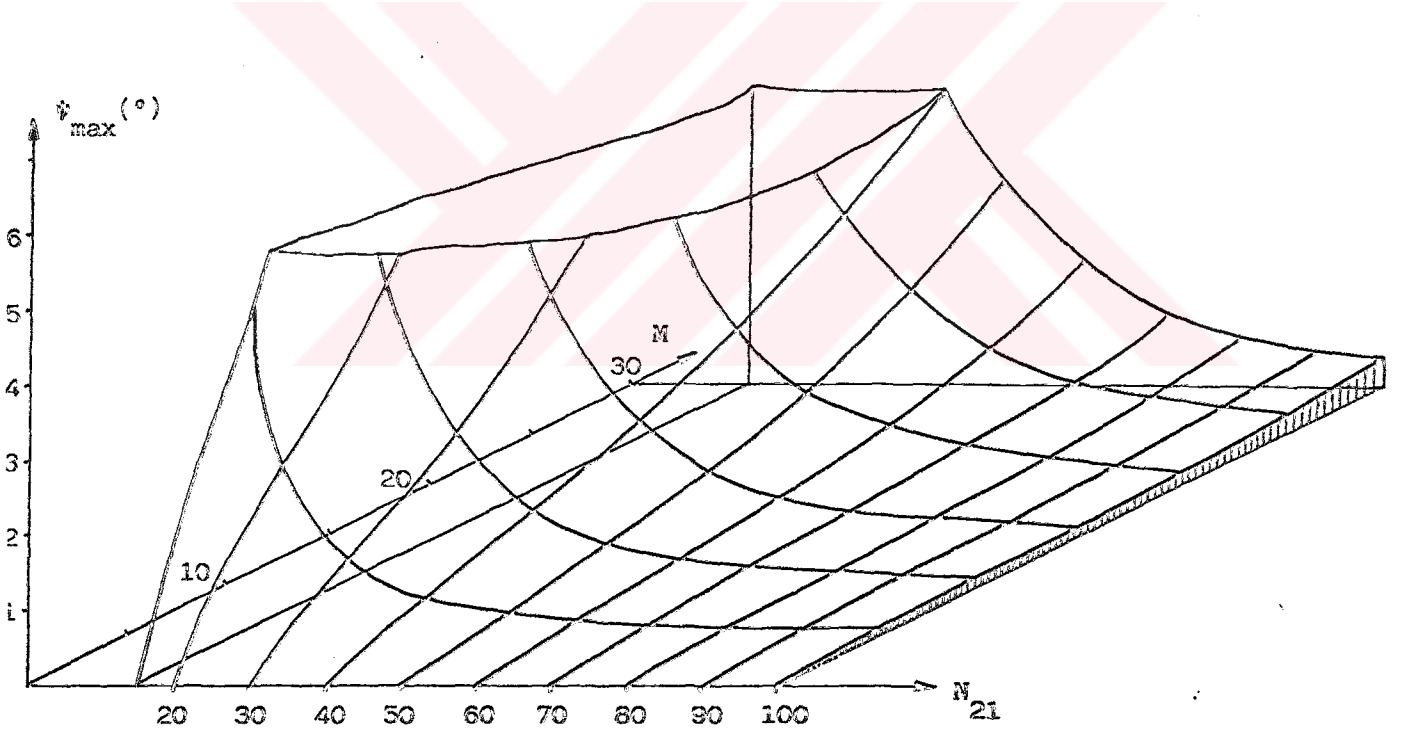
mindeki en büyük genliğinin ne olacağı görülebilir. Bu cevap yüzeyleri enerji oranının belli bir değeri için elde edilmiş olmakla birlikte mildeki titreşimin genliği enerji oranına karşı fazla hassas olmadığı için, daha büyük enerji oranları için yüzeyin biraz üstte çıkacağı, daha küçük oranlar için ise biraz alta ineceği, fakat şeklinde fazla bir değişme olmayacağı açıktır. Kam milinin maksimum burulma miktarı olan  $\psi_{\max}$  büyüdükçe mildeki titreşimlerin izleyici hareketine etkisi de artar ve sıçrama meydana gelir. Bu nedenle cevap yüzeylerinin belli bir  $\psi_{\max}$  değerinden daha üstte kalan kısımlarının pratik bakımdan anlamı yoktur, sadece bir fikir vermek için çizilmiştir. Sıçrama tehlikesinin oluşacağı  $\psi_{\max}$  değeri harmonik hareket

kanunu için biraz daha büyük olmakla birlikte yaklaşık  $1^{\circ}$ - $1.5^{\circ}$  civarındadır. Ayrıca frekans oranının 15 den küçük ve atalet oranının 30 dan büyük değerleri için mildeki burulma çok fazla olduğundan, frekans oranının 100 den büyük değerleri için de çok küçük olduğundan, yüzeyler bu değerlerde kesilmiştir. Atalet oranının büyümesi kamdaki yükün fazla olduğunu gösterir ki bu da kurulmayı çok şiddetlendirir. Frekans oranının küçülmesi ise daha önce de belirtildiği gibi mil kesitinin incelendiğini veya açısal hızın arttığını belirtir ki bu da titreşimlerin şiddetlenmesine yol açar. Frekans oranı büyük



Şekil 4.12. Harmonik hareket kanunu için kam mili dinamik cevap yüzeyi ( $p=3$ ,  $\theta=90^{\circ}$ )

değerler alırsa ( $> 100$  gibi), milin açısal hızına göre rijit olduğu anlaşılır. Dinamik cevap yüzeyinden mildeki titreşimlerin makul bir seviyede olması ve sıçrama tehlikesi olmaması için optimum olarak frekans oranının  $40 \leq N_{21} \leq 80$  ve atalet oranının  $M < 20$  olması gerektiği anlaşılmaktadır. Hız ve ivmesinde süreksizlikler olan parabolik ve teğetsel kamlarda frekans oranı biraz daha yüksek, atalet oranı biraz daha küçük olmalıdır. Frekans oranının büyütülmesi titreşimleri minimum seviyeye indirmekle birlikte milin lüzumsuz olarak kalın yapılması demektir.



Şekil 4.13. Sikloidal hareket kanunu için kam mili dinamik cevap yüzeyi ( $p=3$ ,  $\beta=90^{\circ}$ )

#### 4.3. Kam mili burulma titreşimlerinin izleyici hareketine etkisi

Önceki kısımlarda görüldüğü gibi değişken bir torka maruz olan kam mili hareketi esnasında girişe nazaran bazen yavaşlayıp, bazen hızlanmakta yani burulma titreşimi yapmaktadır. Milin hareketindeki bu düzensizlikler, mil üzerindeki kamdan hareket alan izleyicinin de hareketini etkiler ve teorik olarak farzedilenden sapmalara yol açar. Kam dizaynında kam milinin sabit açısal hızla düzgün olarak döndüğü farzedilir. Elastikliği sebebiyle kam milinin açısal hızında meydana gelen değişikliklerin izleyici hareketine önemli etkileri olabilir. Daha önce de bahsedildiği gibi kurulma olayı çok şiddetli olursa, izleyici ile kamın teması bile kesilebilir, yani sıçrama oluşabilir. Gerçi sıçrama bu yüzden ortaya çıkabilecek ekstrem bir olaydır, fakat milin elastikliği, özellikle izleyici ivmesinde hatırı sayılır dalgalanmalara sebep olabilir. Aynı etki daha küçük çapta hızda da ortaya çıkabilir. Bu durum izleyici hareketinde istenmeyen etkilere sebep olur. Şüphesiz izleyici hareketini etkileyen diğer bazı faktörler daha vardır:

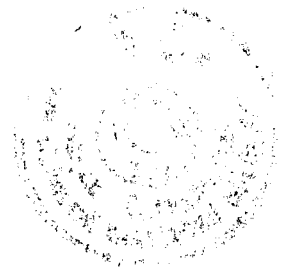
İzleyicinin kendi elastikliği, sürtünme, kam imalatında yapılan profil hataları gibi /8,18,40/. Bunların yanında kam mili elastikliği de önemli bir faktördür. Burada diğer faktörler dikkate alınmadan kam mili elastikliğinin izleyici hareketi üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Kam milinin açısal hızının sabit olduğu kabul edilerek, izleyici konum, hız ve ivmesi kam dönme açısının fonksiyonu olarak şöyle hesaplanır:

$$s = s(\theta), \quad V = \frac{ds}{dt} = \dot{\theta} s'(\theta), \quad a = \dot{\theta}^2 s''(\theta)$$

Gerçekte, teorik olarak farzedilenin aksine açısal hız muhtelif sebeplerden dolayı değişken olur ve ivme ifadesine bir terim daha eklenir:





$$a = \dot{\theta}^2 s''(\theta) + \ddot{\theta} s'(\theta)$$

Açısal hızın değişken olmasıyla birlikte izleyici hız ve ivmesi de teorik olarak farzedilenden sapmalar gösterir. Kam mili giriş açısını  $\theta_1$  ve kam açısını  $\theta_2$  ile ifade edersek, bunlar arasında bir fark oluşur. Kam açısı  $\theta_2$  yerine  $\psi_2$  izafi dönme açısını ithal edelim:

$$\psi_2 = \theta_1 - \theta_2, \quad \theta_2 = \theta_1 - \psi_2$$

$$\dot{\theta}_2 = \omega(1 - \dot{\psi}_2), \quad \ddot{\theta}_2 = -\omega^2 \psi_2''$$

$$V = \omega(1 - \dot{\psi}_2) s'(\theta_1 - \psi_2) \quad (4.5)$$

$$a = \omega^2(1 - \dot{\psi}_2)^2 s''(\theta_1 - \psi_2) - \omega^2 \psi_2'' s'(\theta_1 - \psi_2) \quad (4.6)$$

Kam milinin sabit açısal hızla döndüğü farzedilirse,  $\dot{\psi}_2 = 0, \theta_1 = \theta_2$  yani kam dönme açısı giriş açısına eşit olur:

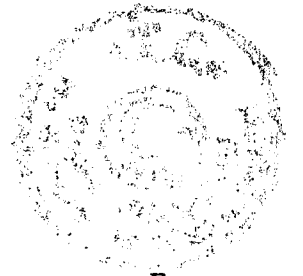
$$V = \omega s'(\theta_1), \quad a = \omega^2 s''(\theta_1) \quad (4.7)$$

(4.5)-(4.7) denklemlerindeki hız ifadelerini  $\omega$ , ivme ifadelerini  $\omega^2$  ve  $s', s''$  fonksiyonlarını kalkış miktarı  $h$  ile bölerek normalize edelim. Gerçek hız ve ivmenin teorik olandan farkını teşkil ederek hız ve ivmedeki boyutsuz sapma miktarlarını elde ederiz:

$$\Delta V = (1 - \dot{\psi}_2) S'(\theta_1 - \psi_2) - S'(\theta_1) \quad (4.8)$$

$$\Delta a = (1 - \dot{\psi}_2)^2 S''(\theta_1 - \psi_2) - \psi_2'' S'(\theta_1 - \psi_2) - S''(\theta_1) \quad (4.9)$$

Böylece hız ve ivmedeki sapma miktarları boyutsuz hız ve ivme ( $\dot{\psi}_2$  ve  $\psi_2''$ ) cinsinden ifade edilmiş olur. İzleyici konumu da kam mili dönüşündeki düzensizliklerden etkilenir. Kamın kalkışta girişe nazaran geri kalması sebebiyle izleyici bulunması gereken konuma daha geç varır, ya da inişte kamın hızlanması yüzünden daha erken

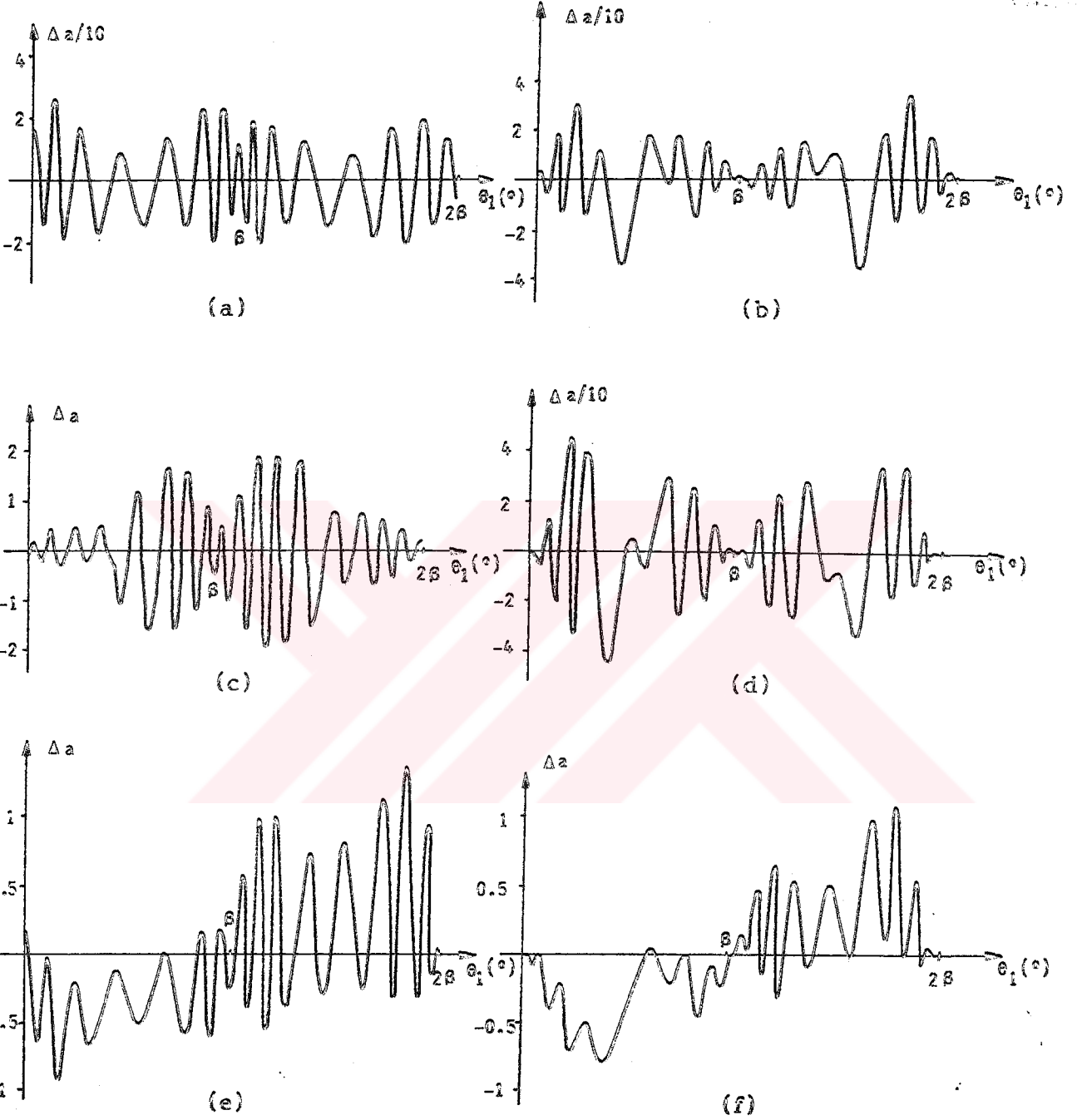


varır, ya da inişte kamın hızlanması yüzünden daha erken varır. Fakat konumda meydana gelen bu düzensizlikler hız ve ivmedekine nazaran daha az ve nispeten önemsizdir. Konumdaki sapma da basitçe yazılabilir:

$$\Delta S = S(\theta_1 - \psi_2) - S(\theta_1) \quad (4.10)$$

Şekil 2.14 de toparlaklı ve tablalı kamlarda izleyici ivmelerinde meydana gelen sapmalar görülmektedir. Buradaki değerlerin  $\omega^2$  ve  $h$  ile çarpılarak gerçek sapma miktarlarının elde edileceği düşünülürse bilhassa ivmede hatırı sayılır sapmalar meydana gelmektedir ki, bu izleyici ve ona bağlı elemanların hareketinde önemli etkilere gürültü, titreşim vs. sebep olur. Toparlaklı kamlardaki sapma miktarları tablalılara nazaran daha azdır. Özelliği sebebiyle parabolik hareket kanunu için sapma miktarı diğerlerine kıyasla oldukça fazladır. En az sapma sikloidal ve harmonik hareket kanunlu kamlarda meydana gelmektedir. Sapma miktarını gösteren eğrilerin gidişine bakılırsa kam eğiminin en büyük değerine ulaştığı kalkış ve iniş periyotlarının ortalarında izleyici ivmesinde azalma olmaktadır ki, bu izleyicinin yavaşlaması demektir. Toparlaklı kamlarda izleyici hareketindeki hızlanma ve yavaşlamalar birbirini takibetmektedir. Tablalı kamlarda farklı olarak kalkış periyodunda kam mili daha büyük bir dirence maruz olduğundan yavaşlamakta, dolayısıyla izleyici ivmesinde de azalma meydana gelmektedir. İniş periyodunda ise direnç ortadan kalktığı anda izleyici ivmesi belirgin olarak artmaktadır. Bu artışta görülen dalgalanma ivmeyi de dalgalı hale getirir. Tablalı kamlardaki sapma miktarlarının toparlaklı olanlara nazaran iki katı kadar fazla olduğu da göze çarpmaktadır. Ayrıca izleyicinin yavaşlaması ve hızlanması gayet barizdir.

Atalet ve enerji oranlarının artmasıyla kam milindeki kurulma ve titreşimlerin artması izleyici hareketini de etkileyerek sapma miktarlarının artmasına sebep olacaktır. Bilhassa atalet oranının artma-



Şekil 4.14. Kam mili titreşimleri sebebiyle izleyici ivmesinde meydana gelen sarpmalar. a,b,c,d-Topariaklı kamlar e,f-Tablialı kamlar. a) Harmonik, b) Sikloidal, c) Parabolik, d) 4-5-6-7 polinom hareket kanunlari ( $M = 5$ ,  $N_{21} = 45$ ,  $p = 3$ ,  $\beta = 90^\circ$ ), e) Harmonik, f) Sikloidal ( $\xi = 0.2$ )



sıyla izleyici kütlesi de izafi olarak artacağı için ivmede meydana gelecek sapmaların da bariz bir şekilde artacağı ve sıçrama oluşabileceği aşikârdır. İzleyici hareketinin atalet oranındaki artışlara daha hassas olduğu da hemen söylenebilir, çünkü bu oran doğrudan izleyici kütlesi ile ilgilidir.

Şekil 4.15 de bir örnek olmak üzere sikloidal ve parabolik hareket kanunları için izleyici hızında meydana gelen sapmalar gösterilmiştir. Buradan da görüleceği gibi hızdaki sapma miktarları ivmedekine nazaran daha önemsizdir.

Kam milinin dönme hareketindeki düzensizlikler sebebiyle izleyici ivmesinde meydana gelen sapmalar, izleyiciden kama etki eden temas kuvvetinde de değişimlere yol açar. Kama izleyiciden etki eden kuvvetin  $F_y$  radyal bileşeninin Şekil 2.6 daki teorik diyagramı değişir. Bu değişim boyutsuz katsayıların değerlerine göre az veya çok olabilir.

$F_y$  radyal temas kuvveti bileşeninin denklem (2.8) deki ifadesini alalım ve kam açısı olarak  $\theta_2$  yazalım:

$$F_y = ms'\ddot{\theta}_2 + ms''\dot{\theta}_2^2 + \frac{\lambda}{h} m\omega^2 s''_m s + F_d \left(1 - \frac{\lambda}{h}s\right)$$

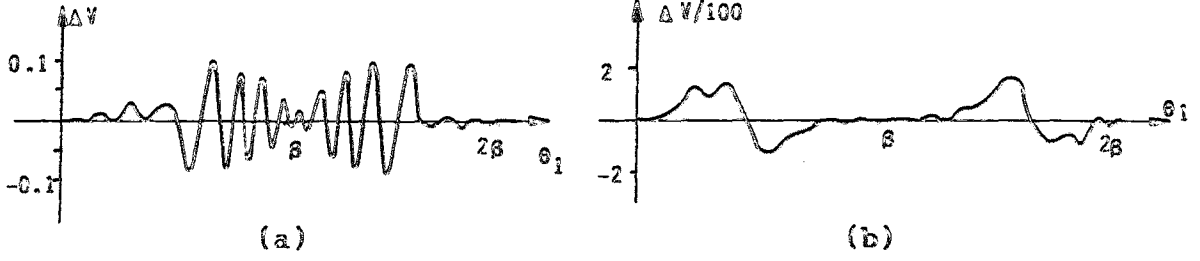
Bu denklemde  $\theta_2$  yerine  $\psi_2 = \theta_1 - \theta_2$  değişkeni ithal edilir ve düzenlenirse:

$$F_y = -m\omega^2 s'\psi_2'' + m\omega^2 s''(1-\psi_2')^2 + \lambda S m\omega^2 s''_m + F_d(1-\lambda S)$$

Bu son denklemde bütün terimler  $h$ ,  $\omega^2$  ve  $I_2$  ile bölünür ve  $s''_m$  ile çarpılırsa, boyutsuz katsayılar  $M$  ve  $p$  cinsinden, normalize edilmiş  $f_y$  kuvveti ifadesi bulunur:

$$f_y = M \left[ s''(1-\psi_2')^2 - s'\psi_2'' + \lambda S'' S \right] + p S'_m (1-\lambda S) \quad (4.11)$$

İzleyicinin kam ile daima temasta kalması yani sıçramanın meydana gelmemesi için bu kuvvetin değeri daima sıfırdan büyük olmalıdır.



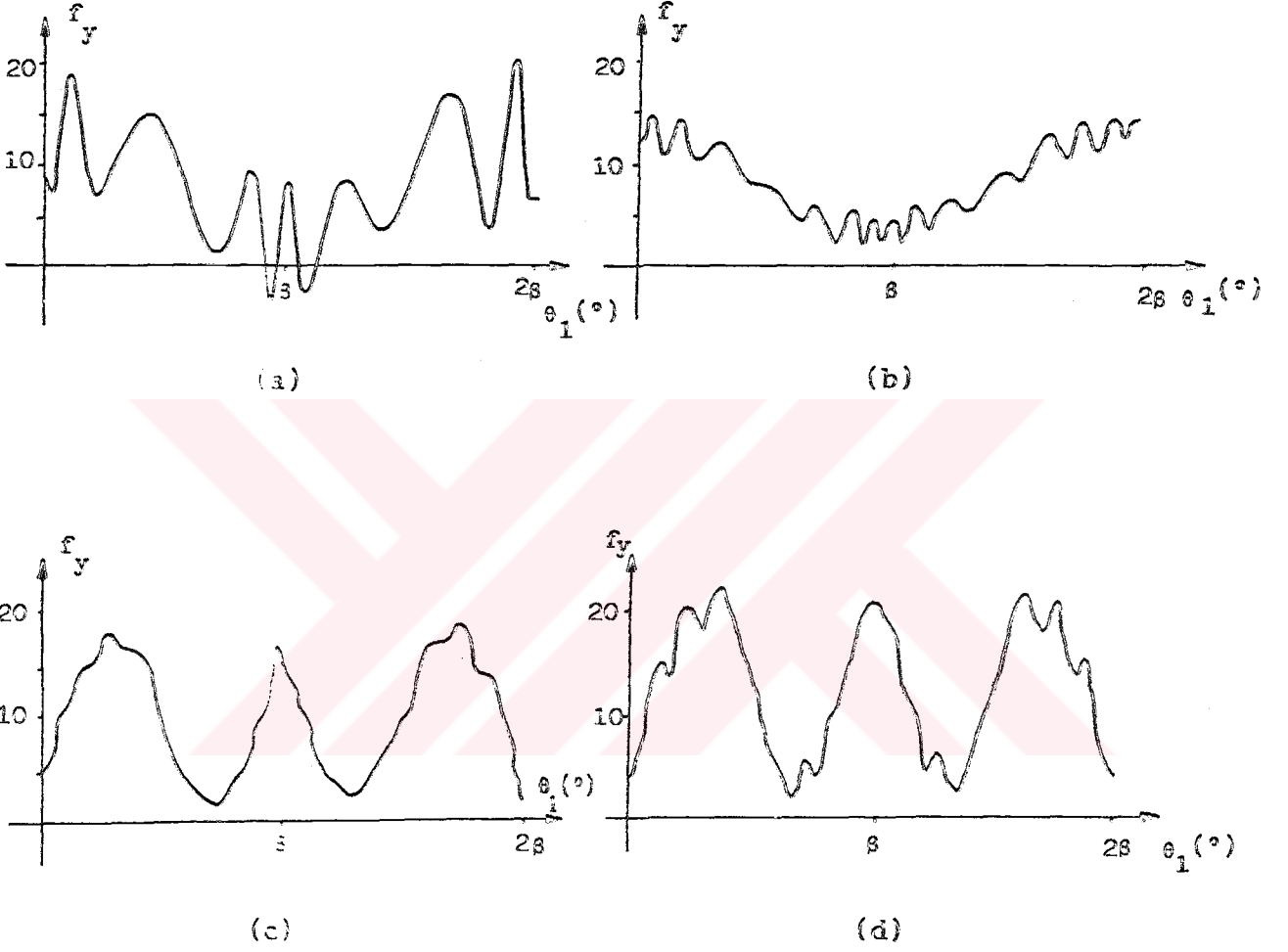
Şekil 4.15. İzleyici hızında meydana gelen sapmalar.  
a) Parabolik, b) Sikloidal har.k. ( $M=5$ ,  $N_{21}=45$ ,  
 $p=3$ ,  $\beta=90^\circ$ )

$$M/p[S''(1-\psi_2')^2 - S'\psi_2'' + \lambda S_m'' S] + S_m'(1-\lambda S) > 0 \quad (4.12)$$

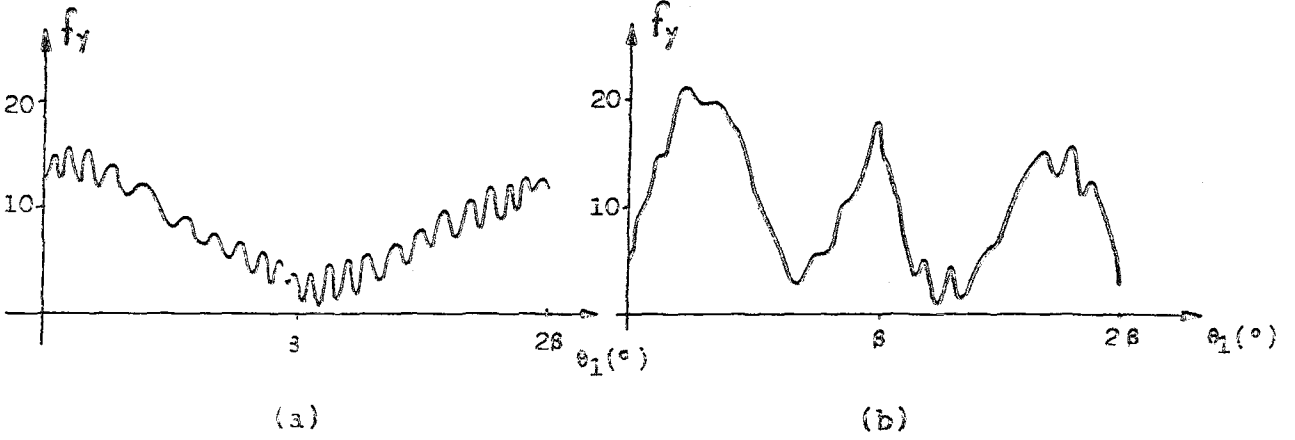
Yukardaki ifadelerden  $f_y$  normalize radyal kuvvet bileşeninin  $M$  ve  $p$  boyutsuz sayılarına bağlı olduğu görülmektedir. Bunun anlamı sıçrama olayı ile izleyici kütlesi, kam mili kütle atalet momenti, yay öngerilme kuvveti ve kam eğimi arasında sıkı bir ilişki olduğudur. Bu faktörlerin uygun seçimiyle kam mekanizmasının çalışması iyileştirilebilir.

Şekil 4.16 da normalize edilmiş  $f_y$  radyal kuvvet bileşeninin bazı hareket kanunları için değişimi görülmektedir. İlk grafikte diğerlerine nazaran oldukça elastik bir kam milinde kalkışın sonunda kuvvetin negatif değerler aldığı yani sıçrama oluşabildiği gözlenmektedir. Milin daha rijit olduğu diğer örneklerde ise radyal kuvvetin bir dalgalanma gösterdiği, fakat sıçramanın meydana gelmediği anlaşılmaktadır. Harmonik hareket kanunu gerek kuvvetin şiddetinin azlığı, gerekse şiddetteki değişimin az olması bakımından en elverişli durumdadır. Sikloidal ve harmonik hareket kanunları için bulunan bu sonuçlar, literatürde sadece bunlar için bulunanlarla uyum arz etmektedir /33,8/. Kam mili daha rijit yapılırsa diğer bir deyişle

frekans oranı yükseltirse, kuvvetin şiddetindeki bu dalgalanmanın minimum seviyeye ineceği açıktır.

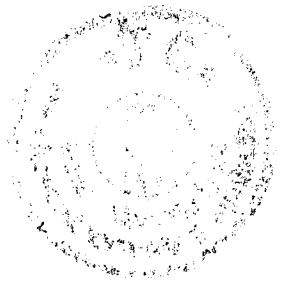


Şekil 4.16. Normalize edilmiş  $f_y$  radyal kuvvet bileşeni üzerinde kam mili titreşimlerinin etkisi.  
a) Harmonik, ( $M=5$ ,  $N_{21}=20$ ,  $p=3$ ), b) Harmonik, ( $M=5$ ,  $N_{21}=45$ ,  $p=3$ ), c) Sikloidal, d) 4-5-6-7 polinom har.k. ( $M=5$ ,  $N_{21}=45$ ,  $p=3$ ,  $\delta=90^\circ$  ve kamlar toparıklı)



Şekil 4.17. Tablalı kamlarda kam mili titreşimlerinin  $f_y$  normalize radyal kuvvet bileşeni üzerindeki etkisi.  
a) Harmonik, b) Sikloidal har.k.  
( $M = 5$ ,  $N_{21} = 45$ ,  $p = 3$ ,  $\xi = 0.2$ )

Şekil 4.17 de de tablalı kamları haiz iki mil için  $f_y$  radyal kuvvetinin gidişi görülmektedir. Tablalı halde kuvvet biraz daha dalgalı olarak değişmektedir. Göze çarpan diğer bir husus da burada iniş esnasında radyal kuvvet daha küçük değerlerde seyretmektedir. Bunun sebebi Şekil 4.14 de de görüldüğü gibi izleyicinin bu periyotta ivmesinin artmasıdır. İvmenin artmasıyla birlikte (4.15) denklemi-  
mindeki  $-S''\psi''_2$  terimi büyüyerek  $f_y$  kuvvetinin azalmasına neden olmaktadır. Bu durum tablalı kamlarda iniş periyodunda kam mili elastikliğinin sıçrama ihtimalini artırdığı anlamına gelir.



## 5. ÇOK KAMLI MİLLERİN BURULMA TİTREŞİMLERİ

### 5.1. Çok kamlı millerin dinamik cevabı

Üzerinde bir kamı ihtiva eden kam millerinin kullanımı yaygın olduğu gibi, iki veya daha fazla kamın bir mile bağlı olarak hareket ettiği kam mekanizmaları da birçok yerde kullanılır. Çok kamlı bir milde, kamlar mil üzerinde farklı açısal konumlarda bulunurlar (Şekil 3.1). Gerçekleştirilmek istenen harekete göre kamlar birbirinin aynı olabildikleri gibi, farklı da olabilirler. Motorlardaki uygulamada emme ve eksoz subaplarını hareket ettiren kamlar ayrı ayrı birbirinin aynıdır. Muhtelif popmalarda kullanılan kamlar yine birbirinin aynıdır. Muhtelif pompalarda kullanılan kamlar yine birbirinin aynıdır. Mil üzerinde en az iki yatak bulunur ve mile destek vazifesi görürler. Diğer makinalarda da bir mile birden çok kam bağlanırsa benzer konstrüksiyonlar uygulanır.

Bir kam mili dönüşü esnasında izleyicilerden kamlara etki eden değişken kuvvetler sebebiyle değişken torklara maruzdur. Mil üzerindeki her kamın açısal konumu farklı olduğundan herhangi bir anda her kama değişik şiddette ve yönde torklar etki eder. Kam mili girişindeki tork, mil rijit kabul edilirse bütün bu torkların toplamına eşittir. Bu toplamı oluşturan torklar değişken olduklarından toplam tork da değişkendir ve milin her dönüşünde aynı değişimi gösterir, yani periyodiktir. Şekil 5.1 ve 5.2 de muhtelif hareket kanunlarını haiz toparlaklı ve tabialı çok kamlı millerde girişteki teorik torkun değişimi görülmektedir. Kam sayısına ve kamların mil üzerindeki yerleşimine göre çok çeşitli kombinasyonlar mümkündür. Her du-





rum için girişteki tork başka bir değişim gösterecektir. Buradaki örnekler bu kombinasyonlardan biri içindir.

Toparlıklı durumda kamların maruz olduğu tork sıfırdan başlayıp yine sıfırdan sona erdiği için bunların toplanması ile elde edilen toplam tork eğrisi de sürekli dir. Fakat tablalı kamlarda tork pozitif bir değerden başlayıp, pozitif bir değerde bittiği için toplam torkda süreksizlik meydana gelmektedir ki, bu durum milin dinamiği açısından olumsuz bir etki yapar, süreksizlik noktalarında darbelere sebep olur.

Çok kamlı bir milin modelinin kurulması Bölüm 3 de izah edildiği gibidir. Modelleme yapılarak, hareket denklemleri kurulduktan sonra denklemlere  $\psi_2, \psi_3, \psi_4, \dots, \psi_n$  değişkenleri sokularak, boyutsuzlaştırma işlemi yapılır ve toparlıklı kamlar için (3.15-3.18 ve devamı), tablalı kamlar için (3.23-3.26 ve devamı) diferansiyel denklem takımları bulunur. Mil üzerindeki kam sayısına göre bu denklemlerin sayısı da artar. Burada  $\psi_2 = \theta_1 - \theta_2, \psi_3 = \theta_1 - \theta_3, \dots, \psi_n = \theta_1 - \theta_n$  değişkenleri her elemanın girişe göre izafi dönme miktarlarını ifade ederler. Kurulan modele göre çift indisli olanlar kamlara, tek indisli olanlar kamların arasındaki elemanlara ait izafi dönmeleri göstermektedir. Milin dönüşü esnasında her eleman elastikliği sebebiyle hem girişe göre, hem de komşu elemanlara nazaran bir miktar burulur. İlk kamı temsil eden 2 nolu elemanın izafi dönme miktarı  $\psi_2$  ise, girişteki tork;

$$T_{12} = k_1 \psi_2 \text{ olarak bulunabilir.}$$

Modeldeki i. elemanın (i+1). ve (i-1). elemanlara uyguladığı torklar da izafi dönmeler cinsinden yazılabilir. Örneğin 4. elemanın yani girişten itibaren 2. kamın 3. ve 5. elemanlara uyguladığı torklar, şöyle yazılır:

$$T_{43} = k_3 (\psi_4 - \psi_3)$$

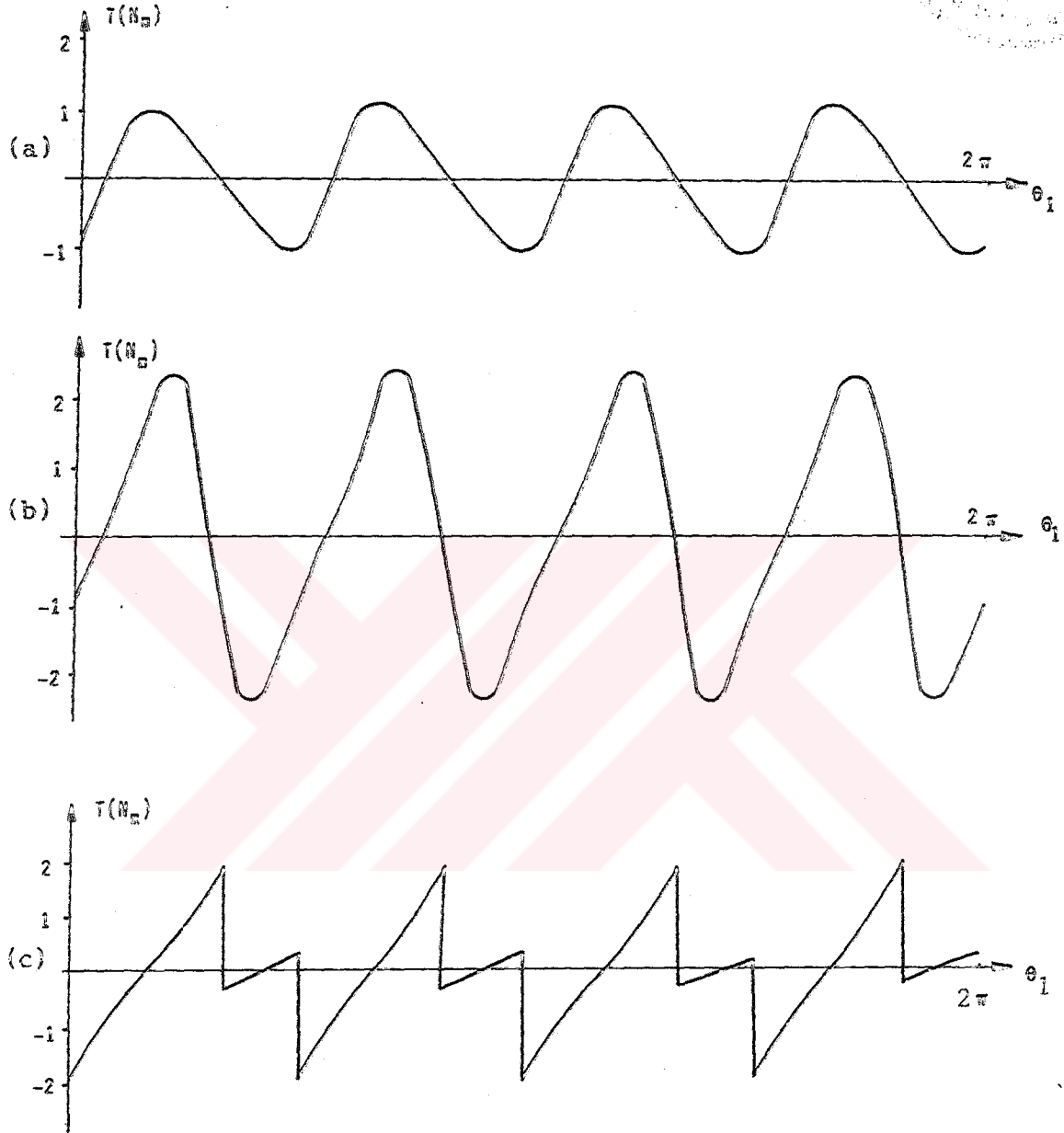
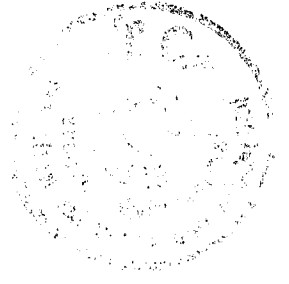
$$T_{45} = k_4 (\psi_5 - \psi_4)$$

(5.1)

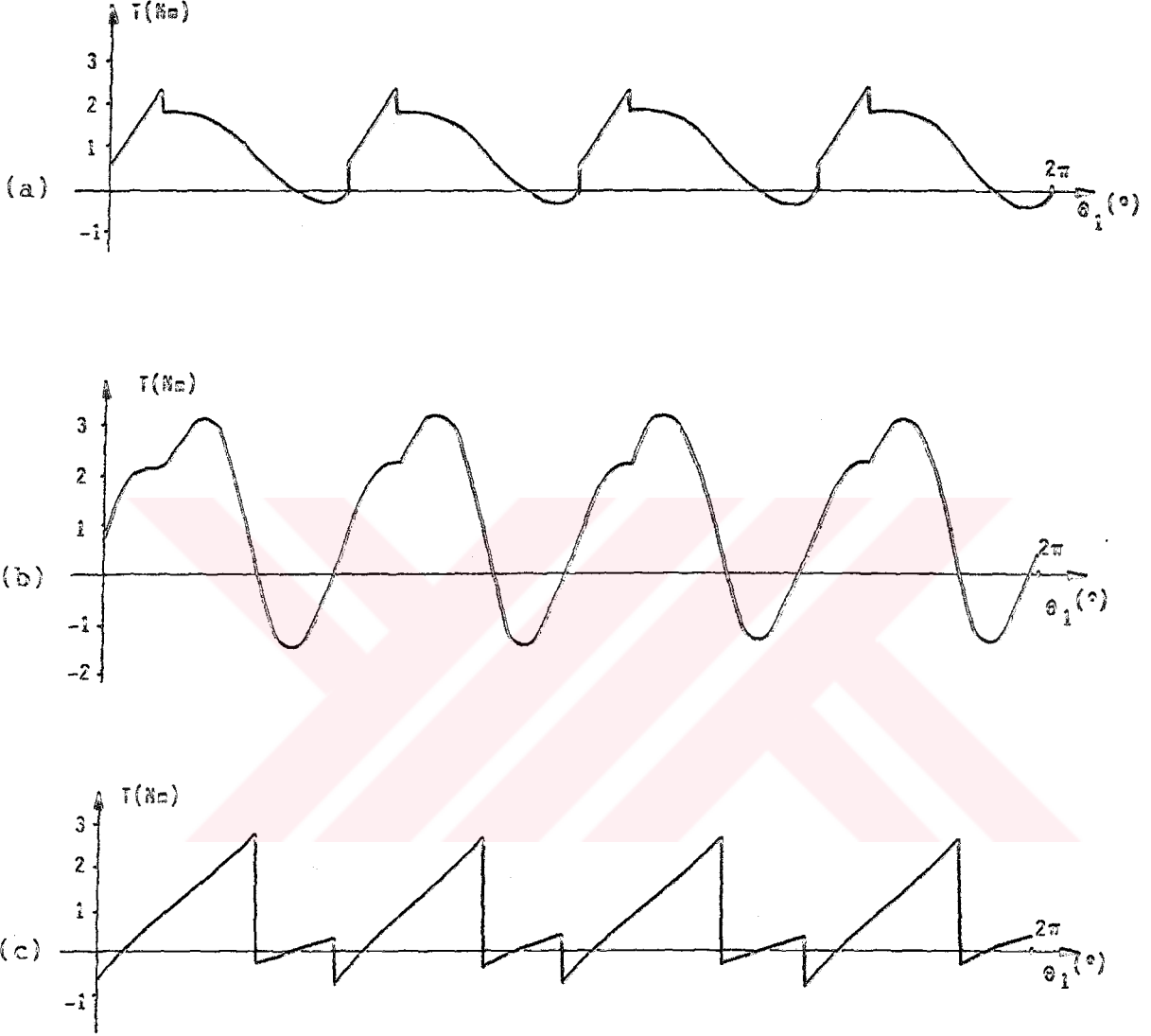
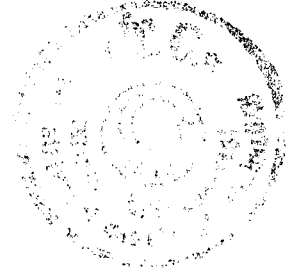
Böylece kam milinin hareketi ile ilgili diferansiyel denklemlerin nümerik çözümü ile elde edilecek  $\psi_2, \psi_3, \dots, \psi_n$  izafi dönmeleri yardımıyla girişteki ve milin çeşitli kesitlerindeki torkların bulunabileceği anlaşılmaktadır.  $\psi_2$  izafi dönmesi için elde edilecek bir diyagram aynı zamanda değişik bir ölçekte girişteki torku ve gerilmeyi ifade edecektir. Yine aynı şekilde  $(\psi_4 - \psi_3)$  farkı kam milinin birinci ve ikinci kamlar arasında kalan kısmındaki,  $\psi_6 - \psi_5$  ikinci ve üçüncü kamlar arasında kalan kısmındaki.. vs. torku değişik ölçekte ifade edecektir. Muhtelif mil kesitlerindeki ve bu arada kamlardaki tork ve gerilmeler bu şekilde bulunabilecektir.

Çok kamlı bir milde her kam izleyiciden etki eden bir torkun yanında, diğer kamlardan gelen torklara da maruzdur. Bu yüzden kam milinin bir bütün olarak dinamik cevabı tek kamlı halden farklı olacaktır. Kamların yerleştirme durumuna ve çeşitliliğine göre muhtelif kombinasyonlar mümkündür. Her durumda cevap farklı olacaktır. Hazırlanan bilgisayar programıyla muhtelif hareket kanunları ve kombinasyonlar için dinamik cevap bulunabilir ve değerlendirilebilir (Ek-B).

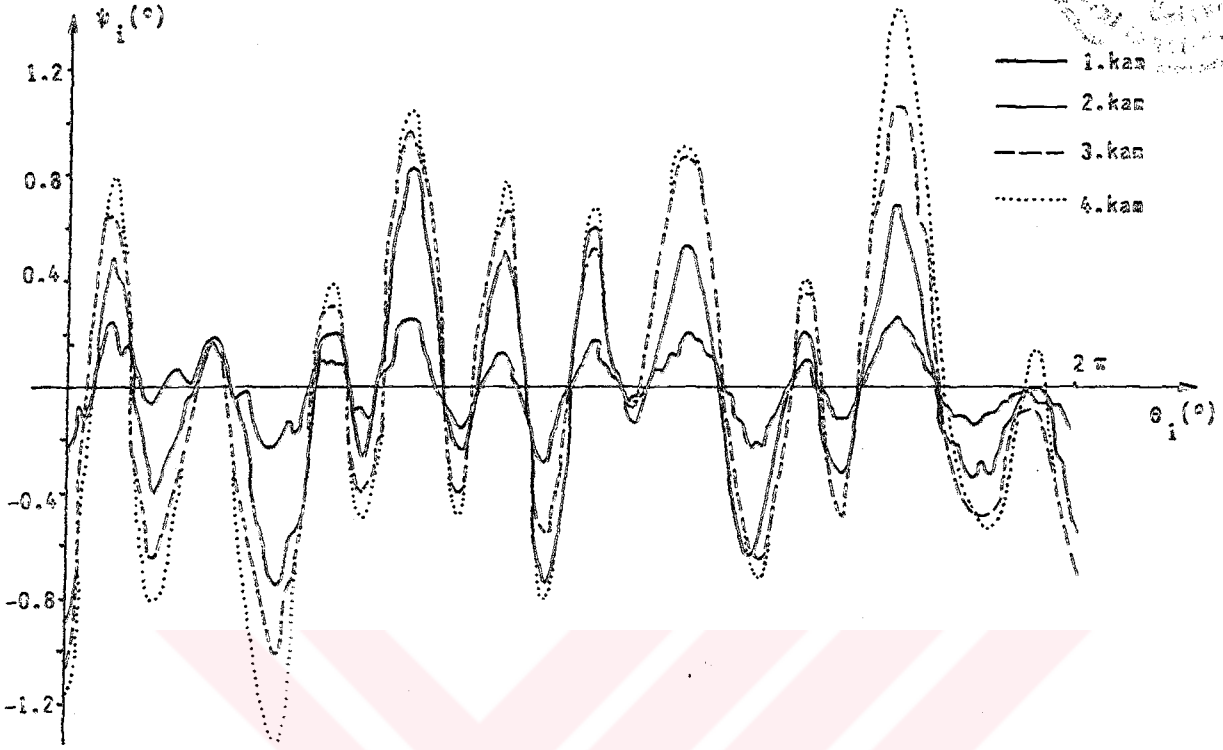
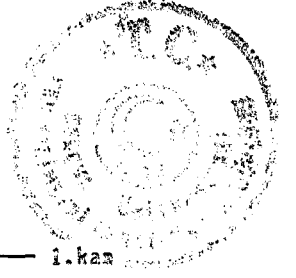
Şekil 5.3, 5.4 ve 5.5 de harmonik, sikloidal ve parabolik hareket kanunlu 4 adet toparlaklı kamı haiz kam millerinin dinamik cevapları görülmektedir. Dinamik cevabın boyutsuz katsayıların değişik olmasından, yani mil kesitlerinin ve kamların özelliklerinin farklı olmasından etkilenmemesi ve genel karakterinin daha net olarak görülebilmesi için kamlar ve bunlar arasındaki mil parçaları birbirinin aynı alınmıştır. Mildeki ve kamlardaki değişikliklerin dikkate alınarak cevaba etkilerinin tespiti kolaylıkla yapılabilir. Burada görülen eğriler, her bir kamın girişe göre izafi dönme miktarını göstermektedir. İlk kamın izafi dönme miktarını gösteren eğri aynı zamanda değişik ölçekte girişteki torku göstermektedir. İkinci ve daha



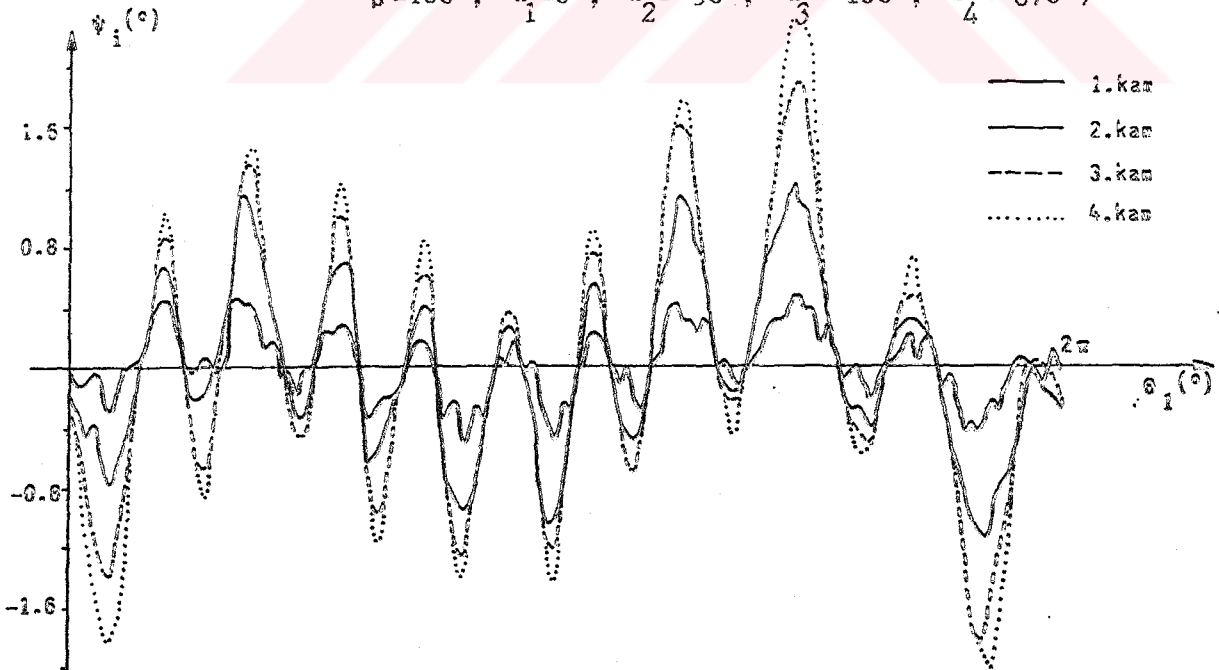
Şekil 5.1. Topariaklı 4 kamı haiz bir kam mili girişindeki torkun teorik değişimi. a) Harmonik, b) Sikloidal ( $s = 100^\circ$ ), c) Parabolik ( $s = 120^\circ$ ) har.kan. ( $h=1$  cm,  $m= 0,3$  kg,  $\omega = 200$  rad/s, kamların başlangıç açıları:  $\alpha_1=0^\circ$ ,  $\alpha_2=90^\circ$ ,  $\alpha_3=180^\circ$ ,  $\alpha_4=270^\circ$ )



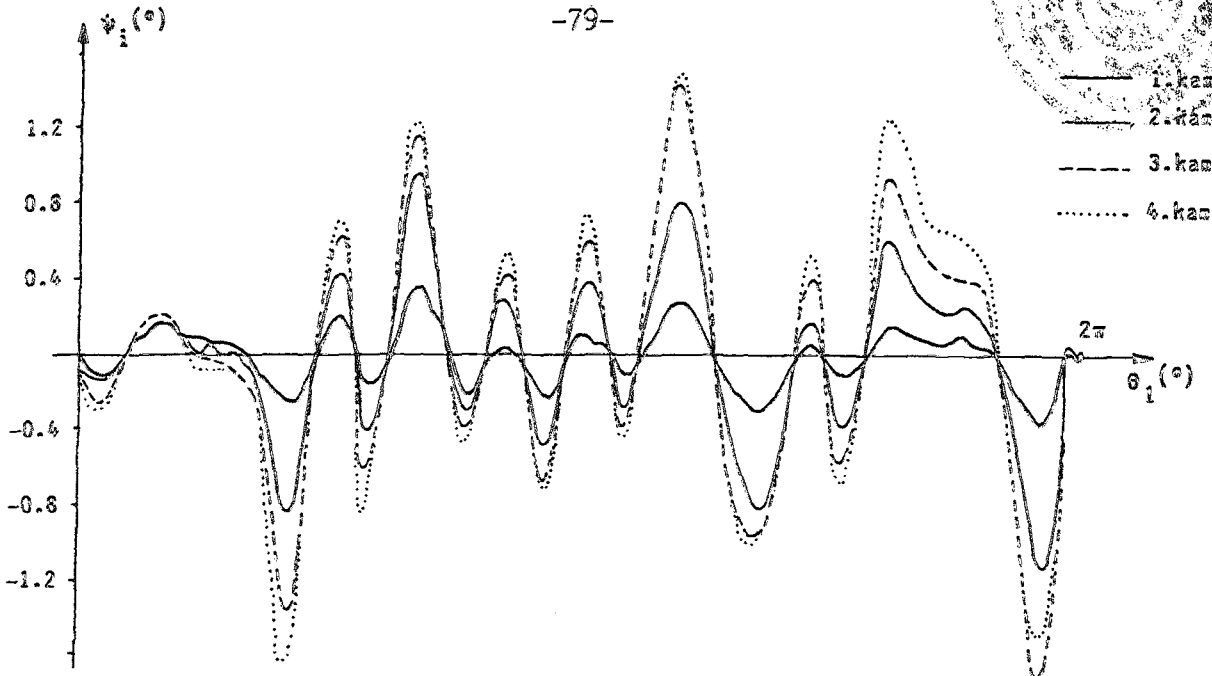
Şekil 5.2. Tablalı 4 kamı haiz bir kam mili girişindeki torkun teorik değişimi. a) Harmonik, b) Sikloidal ( $\beta = 100^\circ$ ) c) Parabolik ( $\beta = 120^\circ$ ) har. kan. ( $h = 1$  cm,  $m = 0,3$  kg,  $r_c = 2,5$  cm,  $\mu = 0,1$ ,  $\omega = 200$  rad/s,  $\alpha_1 = 0^\circ$ ,  $\alpha_2 = 90^\circ$ ,  $\alpha_3 = 180^\circ$ ,  $\alpha_4 = 270^\circ$ , kam başlangıç açıları)



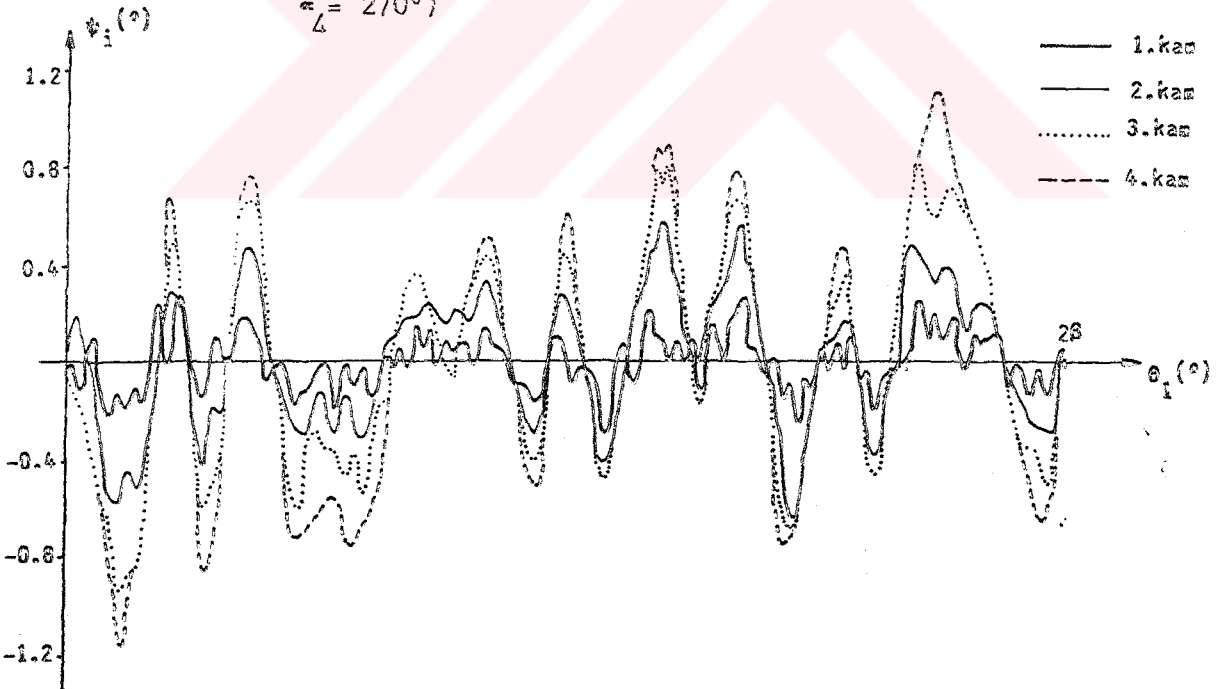
Şekil 5.3a. Toparlıklı ve hareket kanunu harmonik olan 4 kamı haiz bir kam milinin dinamik cevabı. (Tüm kamlar birbirinin aynı,  $M=5$ ,  $p=3$ ,  $N_{21}=N_{22}=60$ ,  $N_{32}=N_{33}=80$ ,  $\delta=100^{\circ}$ ,  $\alpha_1=0^{\circ}$ ,  $\alpha_2=90^{\circ}$ ,  $\alpha_3=180^{\circ}$ ,  $\alpha_4=370^{\circ}$ )



Şekil 5.3b. Toparlıklı ve harmonik hareket kanunlu 4 kamı haiz bir kam milinin dinamik cevabı (Kamlar birbirinin aynı,  $M=5$ ,  $p=3$ ,  $N_{21}=N_{22}=60$ ,  $N_{32}=N_{33}=80$ ,  $\delta=80^{\circ}$ ,  $\alpha_1=0^{\circ}$ ,  $\alpha_2=40^{\circ}$ ,  $\alpha_3=200^{\circ}$ ,  $\alpha_4=240^{\circ}$ )

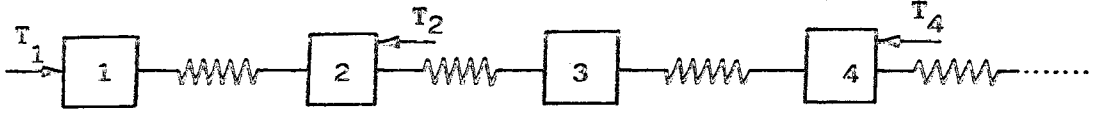


Şekil 5.4. Topariaklı ve sikloidal hareket kanunlu 4 kamı haiz bir kam milinin dinamik cevabı (Kamlar birbirinin aynı,  $M=5$ ,  $p=3$ ,  $N_{21}=N_{22}=60$ ,  $N_{32}=N_{33}=80$ ,  $\beta=100^{\circ}$ ,  $\alpha_1=0^{\circ}$ ,  $\alpha_2=90^{\circ}$ ,  $\alpha_3=180^{\circ}$ ,  $\alpha_4=270^{\circ}$ )



Şekil 5.5. Topariaklı ve parabolik hareket kanunlu 4 kamı haiz kam milinin dinamik cevabı (Kamlar birbirinin aynı,  $M=5$ ,  $p=3$ ,  $N_{21}=N_{22}=60$ ,  $N_{32}=N_{33}=80$ ,  $\beta=120^{\circ}$ ,  $\alpha_1=0^{\circ}$ ,  $\alpha_2=90^{\circ}$ ,  $\alpha_3=180^{\circ}$ ,  $\alpha_4=270^{\circ}$ )

sonraki kamların izafi dönme miktarları ilk kama nazaran daha fazladır, en uçtaki kamda ise en fazladır. Kam mili modelinde her elemanın bir burulma elastikliği olduğundan sistem yaylara bağlı atalet elemanları şeklindedir (Şekil 5.6). Bu burulma yayları hemen görüleceği gibi birbirine seri bağlıdır. Sistem girişten ve her kam-



Şekil 5.6. Kam mili modelinde atalet elemanları ve yaylar

dan etki eden tork sebebiyle burulmaya maruzdur. En uçtaki kamın ucu serbesttir. Her bir kam, izleyiciden etki eden zorlayıcı tork etkisinde, yaylanma elastikliği kamdan girişe kadar olan yayların toplam elastikliğine eşit bir yaya bağlı bir atalet elemanı olarak düşünülebilir. Yaylar seri bağlı olduğundan bunların toplam elastikliği, herbirinin münferit elastikliğinden daha fazladır, veya toplam rijitliği, her birininkinden daha azdır. Dolayısıyla girişten uzaklaştıkça rijitlik azalacağından en uçtaki kam en fazla burulacaktır, yani girişe göre izafi dönme miktarı en fazla olacaktır. Ayrıca birinci kamdan başlayarak izafi dönme miktarlarının birbirine eklendiğini de gözden kaçırmamak gerekir. Bundan dolayı şekillerden de görüldüğü gibi en büyük izafi dönme miktarları en uçtaki kamalarda meydana gelmektedir. En az izafi dönme ise ilk kam ile giriş arasındadır. Kam milinde meydana gelen burulma titreşimlerinden en fazla etkilenen izleyici en uçtaki kamın izleyicisi olacaktır. Ayrıca milin dönüşünü düzenlemek üzere bir volan koymak gerekirse bunun en uca konulması gerektiği de anlaşılmaktadır, çünkü en fazla düzensizlik buradadır.

Şekillerden görüldüğü gibi, kam mili kendisine etki eden değişken torklar etkisinde burulma titreşimleri yapmaktadır. Nonlineer olan bu titreşimler izleyicinin hareketini de etkileyecektir. Örnekler-

deki kam mili ile ilgili boyutsuz katsayılardan frekans oranlarının değerleri nispeten küçüktür ki, bu milin açısal hızının yüksek olması demektir. Yüksek hızlarda kam milinin titreşim genliğinin ciddi boyutlarda olabileceği bu dinamik cevaplardan anlaşılmaktadır. Tek bir kamı haiz kam millerinin dinamik cevabı ile ilgili sonuçlar genelde çok kamlı miller için de geçerlidir. Atalet oranı ile enerji oranı arttıkça ve frekans oranları küçüldükçe kam milindeki kurulma olayının şiddetleneyeceği ve titreşimlerin genliğinin artacağı aşikârdır.

Dinamik cevaplardan büyük genlikli titreşimlerin, yani kam milinin kendisine etki eden tork sebebiyle burulmasıyla oluşan kurulma olayının beraberinde küçük genlikli bir titreşimin de olduğu görülebilir. Bilhassa, özelliğinden dolayı parabolik hareket kanunu için bu durum belirgindir. Çok kamlı millerde de kurulma olayı oluşmakta, yani her bir kam kalkış periyodunda girişe nazaran geri kalmakta, inişte ise ileri gitmektedir. Fakat aynı mile bağlı oldukları için kamların iniş ve kalkış periyotları iç içe girmekte ve böylece birine etki eden tork değerine de etki ettiği için toplam bir dinamik cevap oluşmaktadır. Fakat girişteki teorik toplam tork eğrileri ile ilk kamın aynı zamanda girişteki torkun değişimini gösteren izafi dönme eğrisi karşılaştırılırsa ikisi arasında büyük benzerlik olduğu, yani her kamda yine kurulma olayının oluştuğu gözlenebilir.

Her üç hareket kanunu için görülen dinamik cevaplar, ilk birkaç dönüşten sonra elde edilmiştir. Böylece başlangıçtaki geçici etkilerin ortadan kalkarak, milin sürekli rejimdeki cevabının bulunması amaçlanmıştır. Bu cevapların her dönüşte küçük ölçüde değişse dahi, hemen hemen aynı kaldığı gözlenmiştir. Titreşim genliğinin nispeten daha az ve titreşimin daha yavaş değişen, yani ortalama frekansın daha düşük olması sebebiyle sikloidal hareket kanunu milin cevabı daha iyi özelliktedir. Parabolik hareket kanunu için özelliğinden dolayı daha büyük genlikli ve daha dalgalı bir cevap bulunmuştur. Bu

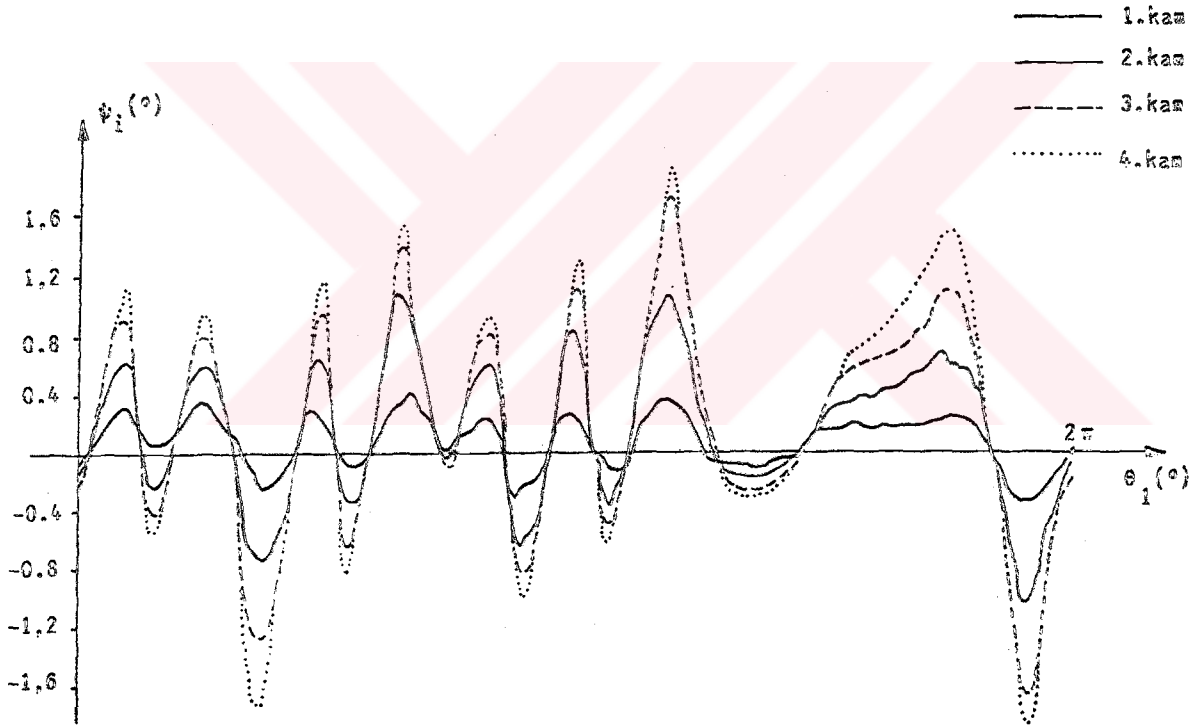
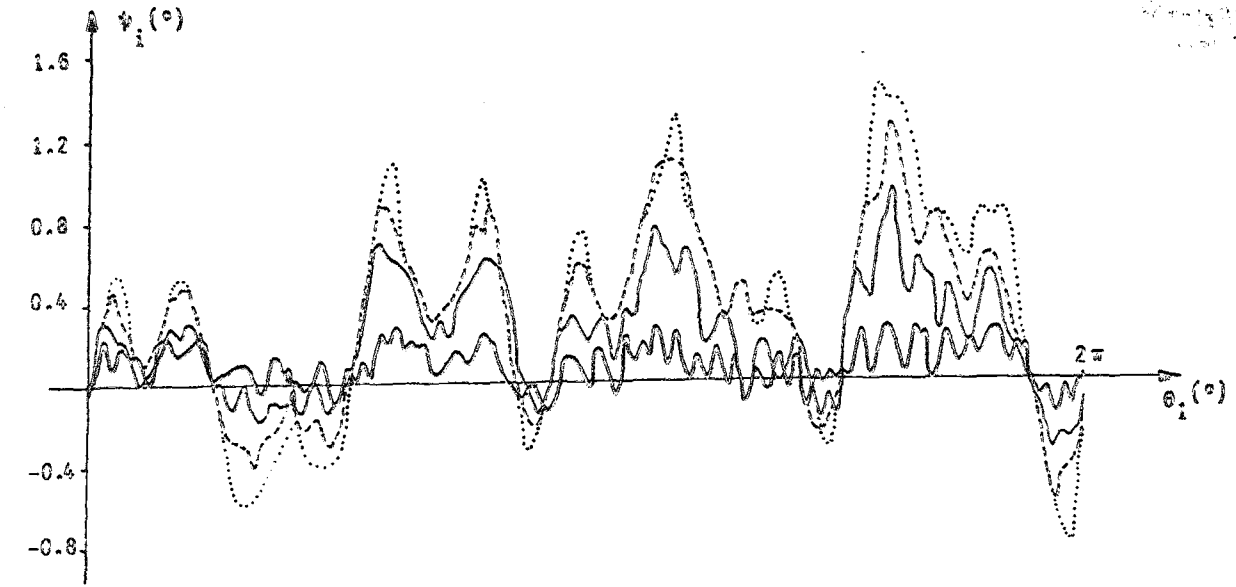
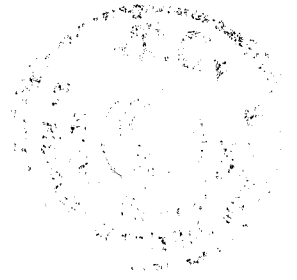




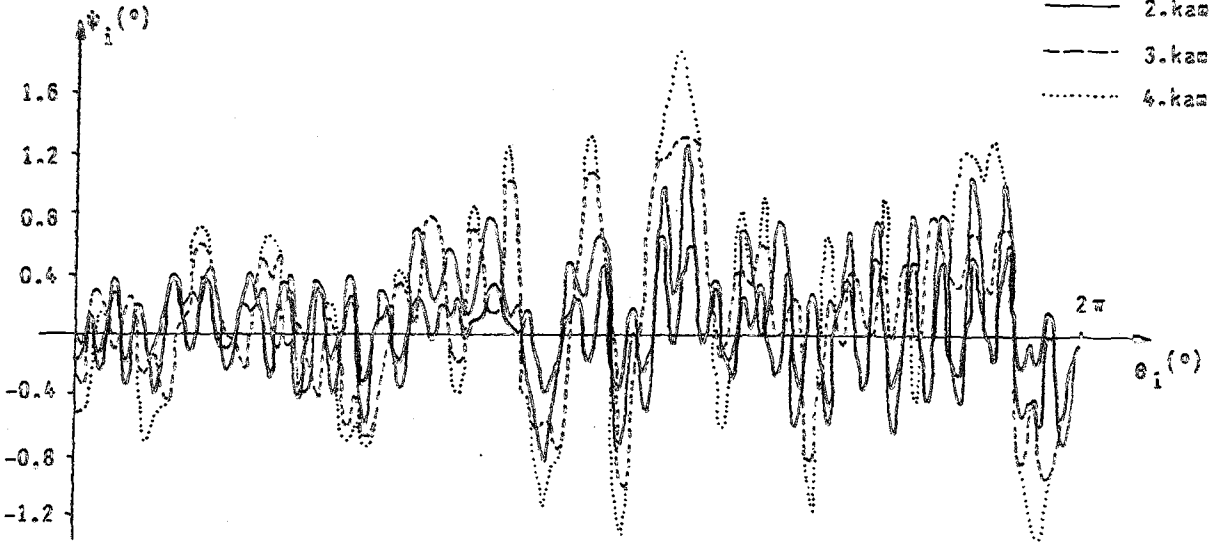
hareket kanunu gibi hız ve ivmesinde süreksizlikler olan teğetsel ve daire yaylı kamları haiz miller için de benzer bir dinamik cevap elde edileceği hemen söylenebilir. Burada gösterilmemekle birlikte 4-5-6-7 polinom hareket kanunu için de sikloidal hareket kanununki- ne çok benzer bir cevap bulunmuştur.

Dinamik cevaplarda izafi dönmelerin pozitif ve negatif değer- ler aldığı periyotların yaklaşık eşit olduğu görülmektedir. Bu, milin her iki yönde de aynı miktar burulduğu anlamına gelir.

Şekil 5.7, 5.8 ve 5.9 da aynı hareket kanunlarının haiz tab- lalı dört kamı ihtiva eden kam millerinin dinamik cevapları görülü- yor. Toparlıklı haldekinden farklı olarak burada kam milinin daha titreşimli bir dönme yaptığı ve daha fazla şekil değiştirdiği anlaşıl- maktadır. Kamların izafi dönme miktarları artmış ve pozitif tarafa kaymıştır, yani kam mili bir yönde daha fazla burulmaktadır. En uçtaki kamda yine en fazla izafi dönme sözkonusudur. Girişteki tork, toparlıklı haldekine nazaran daha büyük değerlere ulaşmaktadır. Burada da dinamik açıdan en iyi cevap sikloidal hareket kanunu için bulunandır. Parabolik hareket kanunu için oldukça dalgalı (sık değişen) bir dinamik cevap bulunmuştur. Tablalı kamlarda tabla ile kam arasındaki sürtünme burada da etkisini açıkça göstererek hem izafi dönme miktarlarını artırmakta, hem de milin bir yönde daha fazla burularak, milde ortalama değeri sıfırdan büyük pozitif bir torkun bulunmasına sebep olmaktadır. Buradaki dinamik cevaplar, toparlıklı olarak cevabı bulunanlarla aynı özelliklere sahip tablalı kamları haiz miller için elde edilmiştir. İki hal arasındaki fark bü- tün kalkış, iniş ve bekleme periyotlarında etki eden sürtünmedir. Tek kamlı millerde olduğu gibi çok kamlı millerde de tablalı halde mil- deki burulma titreşimleri daha şiddetli olmaktadır.



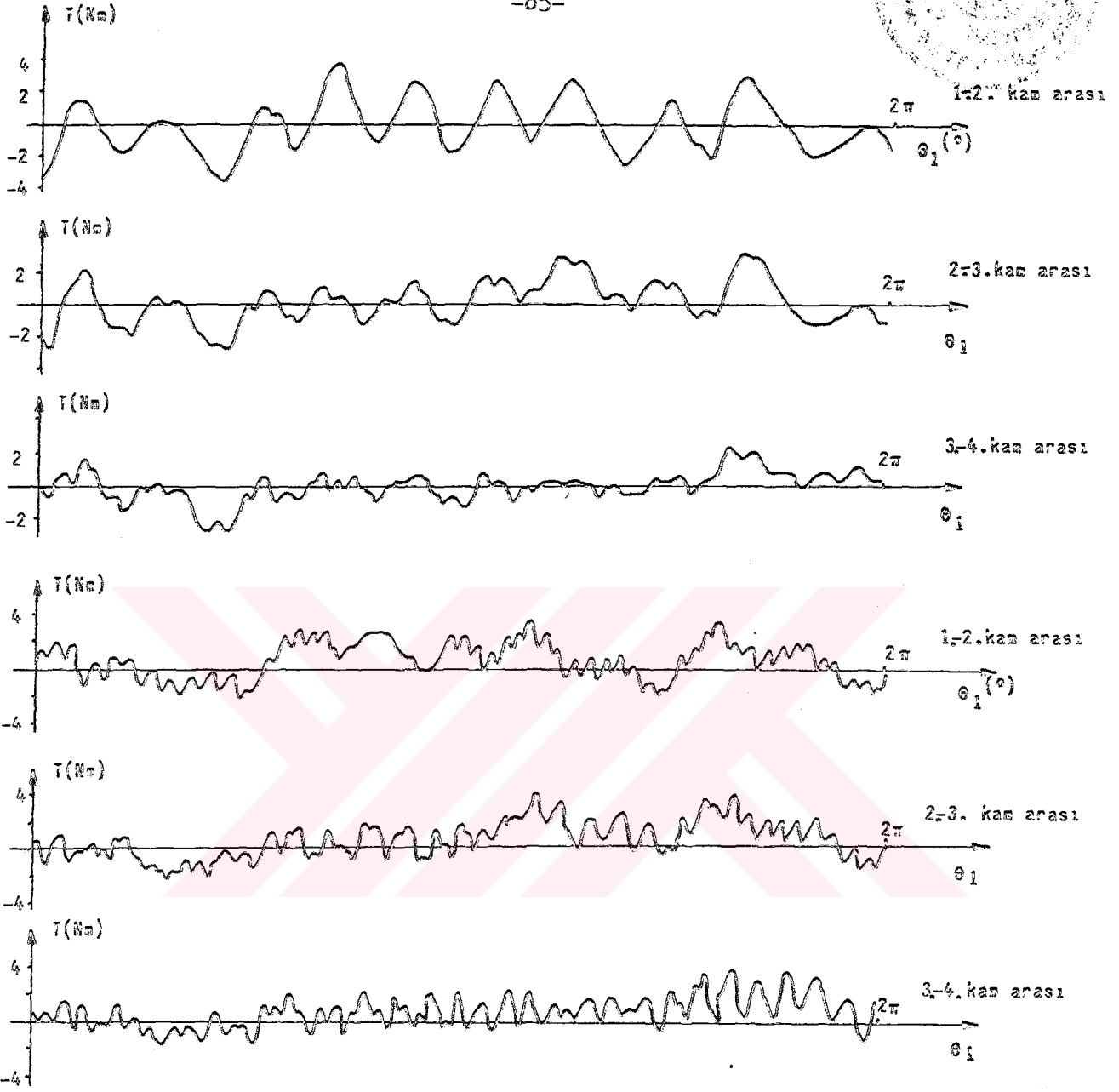
Şekil 5.7-5.8. Harmonik ve sikloidal hareket kanunlu ve tablalı 4 kamı haiz kam millerinin dinamik cevabı ( $M = 5$ ,  $p = 3$ ,  $N_{21} = N_{22} = 60$ ,  $N_{32} = N_{33} = 80$ ,  $\delta = 100^\circ$ ,  $\xi = 0.2$ ,  $\alpha_1 = 0^\circ$ ,  $\alpha_2 = 90^\circ$ ,  $\alpha_3 = 180^\circ$ ,  $\alpha_4 = 270^\circ$ )



Şekil 5.9. Tablalı ve parabolik hareket kanunlu 4 kamlı haiz bir kam milinin dinamik cevabı ( $M=5$ ,  $p=3$ ,  $N_{21}=N_{22}=60$ ,  $N_{32}=N_{33}=80$ ,  $\xi=0.2$ ,  $\beta=120^\circ$ ,  $\alpha_1=0^\circ$ ,  $\alpha_2=90^\circ$ ,  $\alpha_3=180^\circ$ ,  $\alpha_4=270^\circ$ )

Gerek toparlaklı, gerekse tablalı kamları haiz çok kamlı millerin burada bulunan dinamik cevaplarında sönüm ihmal edilmiştir. Milde küçük bir sönüm olduğu düşünülürse, bunun titreşim genliklerini biraz azaltacağı, fakat tek kamlı millerde olduğu gibi titreşim karakteristiklerine önemli bir etkisi olmayacağı söylenebilir.

Şekil 5.10 ve 5.11 de yukarıda dinamik cevabı bulunan harmonik hareket kanununu haiz 4 adet kamlı ihtiva eden kam milinde kamların aralarında kalan kesitlerindeki torkların (dolayısıyla gerilmelerin) değişimi gösterilmiştir. Bunun için  $(\psi_4 - \psi_3)$ ,  $(\psi_6 - \psi_5)$  ve  $(\psi_8 - \psi_7)$  izafi dönme farkları teşkil edilmiş ve bunlar belirli bir ölçekte çizilmiştir. Kamlar ve aralarındaki kısımlar birbirinin aynı olduğundan, bu örneklerde izafi dönme farkları  $k_3$  yay katsayısı ile çarpıldığı zaman sözkonusu mil kesitlerindeki torku verir. Yani bu şekillerdeki eğriler aynı zamanda değişik ölçekte mil kesitlerindeki dinamik torkun değişimini göstermektedir.

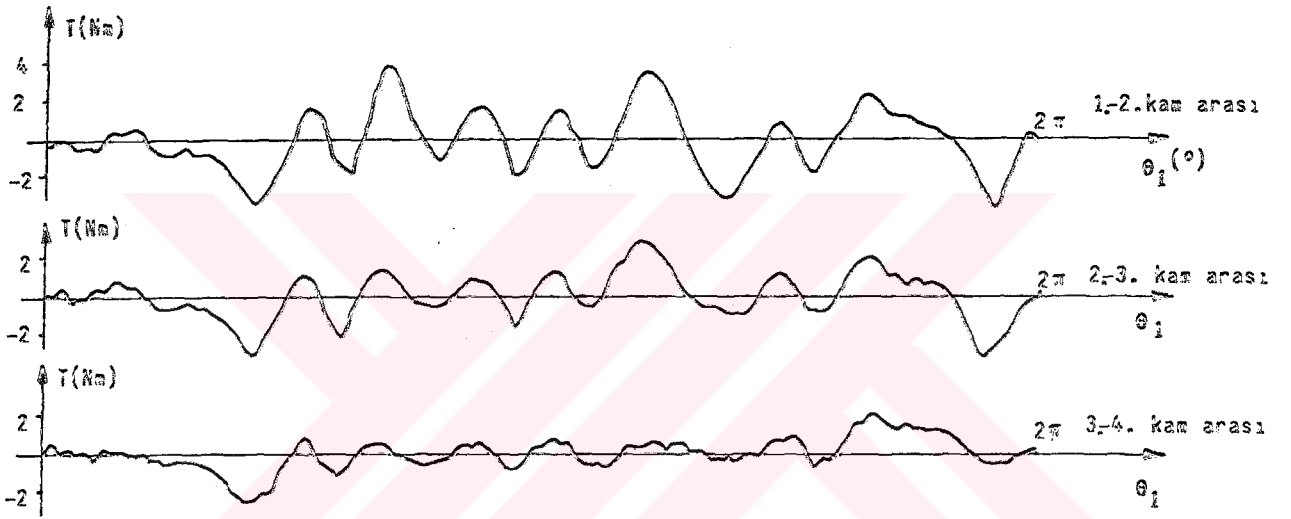


Şekil 5.10-5.11. Şekil 5.3a ve 5.7 de dinamik cevapları görülen harmonik hareket kanunlu tablalı ve toparlaklı kamları haiz kam millerinde arakesitlerdeki torkların değişimi.

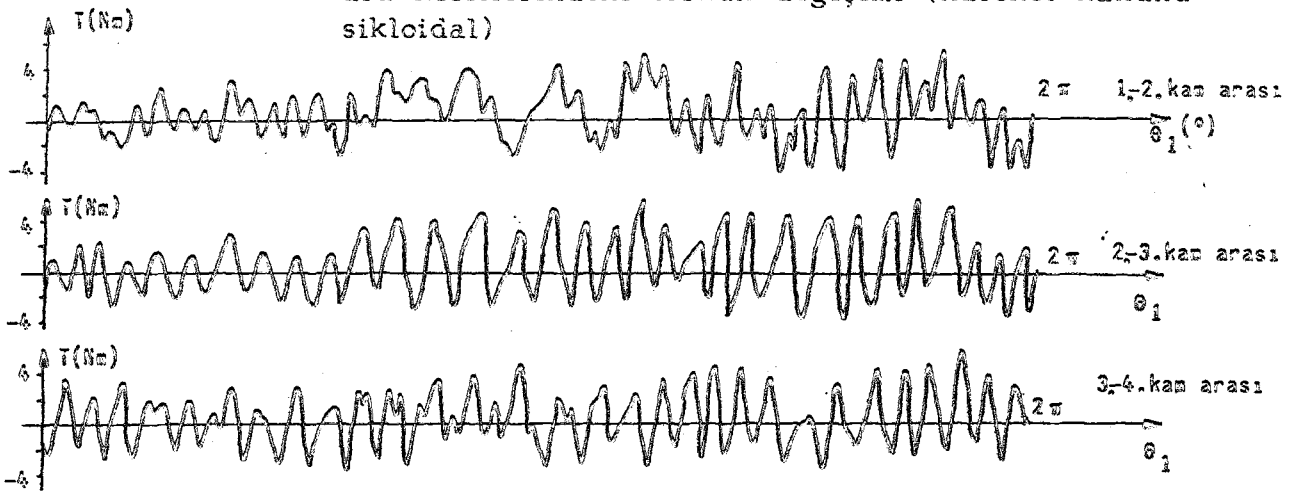
Şekillerden mil ucuna doğru gidildikçe kesitlerdeki torkun azaldığı görülmektedir. Kam mili girişindeki torkun diğer kesitlerinden daha büyük olduğu da anlaşılmaktadır. Kamların toparlaklı olduğu durumda, mil kesitleri tablalı duruma nazaran daha küçük şiddette torklara maruzdurular. Ayrıca tablalı halde izleyici-kam sür-



tünmesi sebebiyle mildeki tork pozitif tarafa kaymıştır ve daha dalgalı bir hal almıştır. Dinamik cevap eğrilerindeki  $\frac{1}{2}$  izafi dönmesi aynı zamanda mil girişindeki torku gösterdiğinden burada gösterilmemiştir. Harmonik hareket kanunu için varılan bu sonuçlar diğer hareket kanunları için de genelleştirilebilir. Nitekim Şekil 5.12 ve 5.13 de sikloidal ve parabolik hareket kanunlu toparlaklı ve tablalı kamları haiz kam milleri için bulunan tork diyagramları da bunu doğrulamaktadır.



Şekil 5.12. Şekil 5.4 de dinamik cevabı görülen kam milinin ara kesitlerindeki torkun değişimi (Hareket kanunu sikloidal)



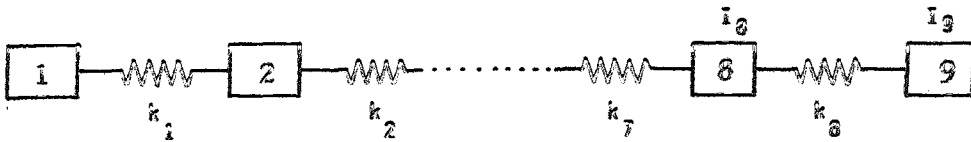
Şekil 5.13. Şekil 5.9 da dinamik cevabı görülen tablalı ve parabolik hareket kanunlu kamları haiz kam milinin ara kesitlerindeki torklar



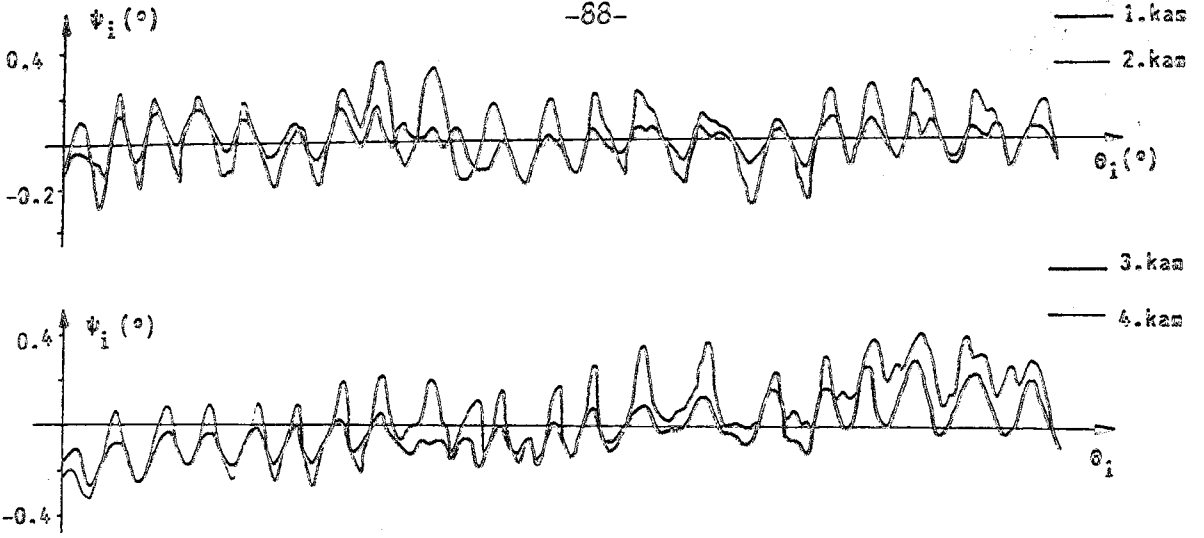
## 5.2. Volan ilavesinin etkisi

Çok kamlı millerde atalet oranının büyük değerler almasıyla, yani izleyicinin kütlesinin kam kütle atalet momentine nazaran izafi olarak artması ile, bilhassa uçtaki kamların yapacağı titreşimlerin genliği, hızı ve ivmesi büyür. Açısal hız arttıkça-ki bu frekans oranlarının azalması anlamına gelir-bu titreşimler çok ciddi bir hal alarak milin dönüşü düzensiz hale gelebilir. Bu düzensizlik bilhassa izleyicilerin hareketini de etkiler ve sonuçta kam mekanizmasının çalışması bozularak darbe, gürültü ve izleyici ile kam arasında aşırı yüzey basınçları doğar, sıçrama oluşabilir. Bu olumsuz etkilerin önüne geçmek için milin ucuna bir volan takmak iyi bir çözüm olabilir. Bazı yüksek hızlı motorlarda böyle bir çözüme gitmek gereği duyulmuş ve kam miline volan takılmıştır.

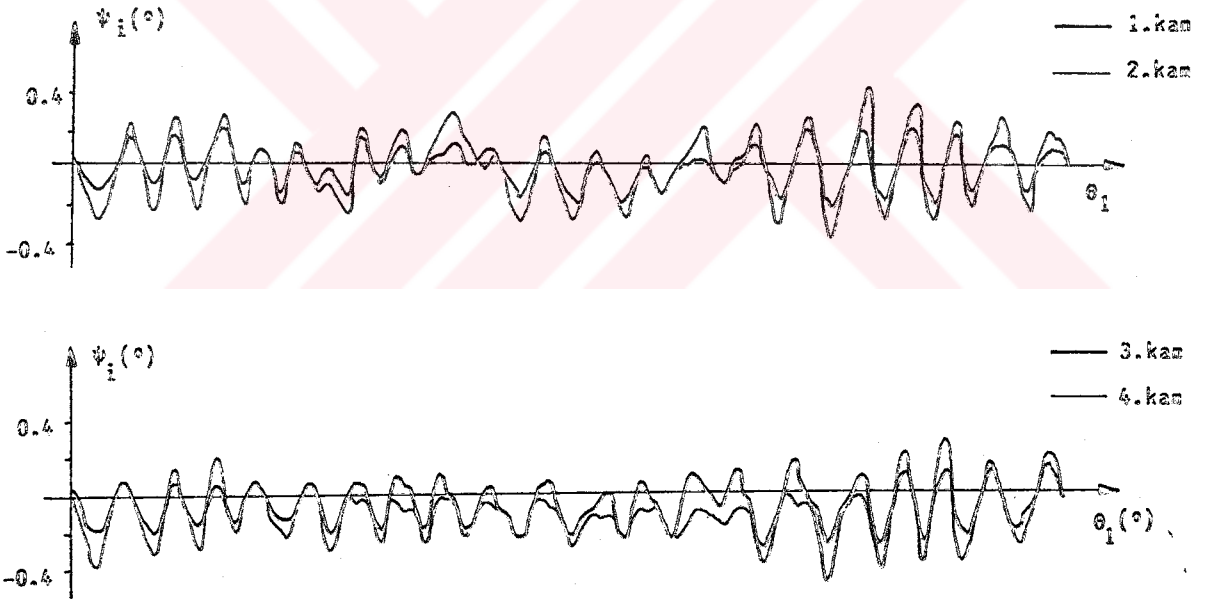
Mil ucuna bir volan ilave edildiği zaman modelde bunu milin en ucundaki kısmını temsil eden elemana dahil olarak düşünmek gerekir. Volanın kütle atalet momenti mil üzerindeki diğer elemanlara nazaran oldukça fazla olduğundan bu elemanla ilgili frekans oranı küçülecektir. Şekil 5.14 de görüldüğü gibi yukarıda ele alınan 4 kamlı millerde volanın kütle atalet momenti mil ucundaki 9 nolu elemanın kine dahil edilince  $I_9$  büyüyerek  $N_{98} (\sqrt{k_8/I_9}/\omega)$  frekans oranı oldukça küçülecektir.



Şekil 5.14-4 kamlı bir milin modeli



Şekil 5.15. Mil ucuna bir volan ilavesinin etkisi. Kamlar toparlaklı ve hareket kanunu harmonik ( $M = 5$ ,  $p = 3$ ,  $N_{21} = N_{22} = 60$ ,  $N_{32} = N_{33} = 80$ ,  $N_{98} = 4$ ,  $\beta = 100^\circ$ ,  $\alpha_1 = 0^\circ$ ,  $\alpha_2 = 90^\circ$ ,  $\alpha_3 = 180^\circ$ ,  $\alpha_3 = 270^\circ$ )



Şekil 5.16. Topariaklı ve parabolik hareket kanunlu kamları haiz kam miline volan ilavesinin etkisi ( $M = 5$ ,  $p = 3$ ,  $N_{21} = N_{22} = 60$ ,  $N_{32} = N_{33} = 80$ ,  $N_{98} = 4$ ,  $\beta = 120^\circ$ ,  $\alpha_1 = 0^\circ$ ,  $\alpha_2 = 90^\circ$ ,  $\alpha_3 = 180^\circ$ ,  $\alpha_4 = 270^\circ$ )

Dinamik cevapları bulunmuş olan çok kamlı millerde mile bir volan ilavesinin meydana getireceği etkiler araştırılmıştır. Bunun için volanın bağlı olduğu mil parçasının frekans oranı, diğer frekans oranlarına nazaran çok küçük alınarak, bulunan dinamik cevaplar Şekil 5.15 ve 5.16 da gösterilmiştir. Bu cevaplar daha önce bulunanlarla karşılaştırılırsa kamların izafi dönme miktarlarının, yani burulma titreşimlerinin genliklerinin büyük oranda azaldığı ve milin dönüşünün gayet düzenli bir hale geldiği görülebilir. Mevcut küçük genlikli titreşimlerin izleyicilerin hareketlerine etkilerinin de gayet az olacağı söylenebilir. Volan ilavesinin etkilerinin gayet olumlu olduğu dikkate alınırca, bilhassa yüksek hızlı ve çok kamlı millerde volan takılmasının tavsiye edilebileceği görülmektedir.



## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada doğrusal yönlü ve kuvvet kapalı, yani bir geri dönüş yayı ile teçhiz edilmiş kamların millerinde meydana gelen burulma titreşimleri ele alındı. İzleyicinin toparlaklı veya tablalı oluşu ayrı ayrı gözönüne alındı. İzleyici tek ve kam mili çok serbestlik dereceli bir modelle temsil edilerek milin hareket denklemleri elde edildi. Nonlineer olan hareket denklemleri boyutsuzlaştırılarak bazı boyutsuz katsayılar tanımlandı. Tek ve çok kamlı millerin dinamik cevapları, denklemler nümerik olarak çözümlenerek bulundu.

Konuyla ilgili olarak varılan sonuçlar birkaç maddede özetlenebilir:

1. Kam milinin elastikliğinin bilhassa yüksek hızlarda mekanizmanın çalışmasına önemli etkileri olabilir. Elastik bir cisim olan bir kam milinin hareketi esnasında üzerine izleyicilerden etki eden değişken torklar sebebiyle yapacağı burulma titreşimleri, kendi kendini besleyen, parametre tahrikli zorlanmış titreşimlerdir. Bu şekildeki titreşimler nonlineerdir ve ilgili diferansiyel denklemler analitik olarak çözülemediğinden, bunlar için analitik bir ifade bulmak, denklemlerin hayli nonlineer olması sebebiyle yaklaşık olarak dahi mümkün değildir. Bilgisayarların de devreye girmesiyle nümerik çözümler önem kazanmış ve kam dinamiğinde kuvvetli bir metod olarak yerini almıştır.

2. Kam milinin dinamik davranışını belirtmek üzere, toparlaklı kam halinde üç, tablalı kam halinde dört önemli boyutsuz katsayı

tanımlanmıştır. Bunlar, her iki tipte de ortak olan atalet oranı, frekans oranı ve enerji oranıdır. Tablalı kamlarda bunlara ilaveten büyüklük oranı vardır. Ayrıca daha önemsiz olan ve ortak olarak tanımlanan sönümle ilgili sönüm etki oranından da sözedilebilir. Atalet oranı izleyici kütesinin kam mili titreşimlerine etkisinin ve titreşimlerin lineerlikten sapma derecesinin bir ölçüsüdür. Büyümesiyle birlikte mil titreşimleri şiddetlenir. Frekans oranı mil modelindeki her bir elemanın tabii frekansının milin açısal hızına oranıdır. Oran, milin elastikliğinin, hareketine etkisinin bir ölçüsüdür ve küçüldükçe mildeki titreşimler şiddetlenir. Enerji oranının artmasıyla da titreşimlerin şiddeti artar. Tablalı kamlarda kamın büyüklüğü hakkında izafi bir fikir veren büyüklük oranı da önemli bir katsayı olarak milin dinamik davranışı hakkında fikir verir, büyümesi ile mile etki eden tork artar ve titreşimleri şiddetlenir.

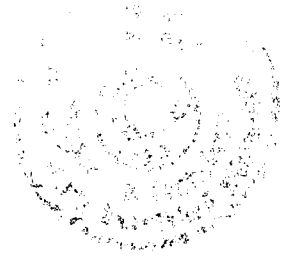
3. Kam mili kendisine etki eden zorlayıcı tork etkisiyle burulur, zorlanmış burulma titreşimleri yapar. Bu titreşim, kendisiyle birlikte meydana gelen ve kendi kendini besleme olayı ile oluşan daha küçük genlikli titreşime nazaran oldukça büyük genliklidir. Mil, kalkış periyodunda etki eden hareketine ters yöndeki direnç torku yüzünden burulur, iniş periyodunda ise hem hareketiyle aynı yönde etki eden tork sebebiyle, hem de burulanan milin enerjisini geri vermesi sebebiyle ters yönde burulur. Bu olaya kurulma adı verilir. Zorlanmış burulma titreşimi olan bu olayda büyük açısal hızlarda genlik büyük değerlere ulaşabilir. Öyle ki bu olay sırf kendi başına sıçrama olayına sebep olabildiği gibi, çoğu zaman diğer etkilerle birleşerek sıçrama ihtimalini artırır. İvme eğrisinde süreksizlik olan hareket kanunları için (parabolik gibi) bu etkiler daha şiddetlidir. İvmesinde süreksizlik olmayan sikloidal gibi hareket kanunlarında bu etkiler düşük seviyededir. Bu olumsuz etkinin önüne geçmek için atalet oranı küçültülmeli, frekans oranı büyütülmelidir. Dizayn edilen

bir kam için bu oranlar hesaplanarak, Şekil 4.12 ve 4.13 den, ayrıca hazırlanan bilgisayar programı kullanılarak titreşim genliğinin en büyük değeri ve milin dinamik cevabı bulunabilir, burulma titreşimlerinin izleyici hareketine etkisi tespit edilebilir.

4. Bulunan dinamik cevaplarda tablalı kamları haiz millerin aynı büyüklükteki toparlaklı olanlara nazaran daha büyük genlikli titreşimler yaptıkları, kurulma olayının daha şiddetli olduğu ve kamlar tabla arasındaki sürtünme arttıkça bu etkilerin daha da şiddetlendiği görülmüştür. Buradan tablalı kam millerinde kam mili elastikliğinin etkisinin ve öneminin daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca yağlamanın önemi de ortaya çıkmaktadır.

5. Kam milinde meydana gelen titreşimler, izleyici hareketini de etkileyerek, bilhassa ivmesinde hatırı sayılır sapmalar meydana getirebilmektedir. Bu sapma, izleyici ve kam arasındaki temas kuvvetini de etkileyerek ekstrem hallerde temasın kesilmesine, yani sıçramaya bile sebep olabilir. Sıçrama meydana gelmese bile ivmedeki değişimler izleyicide titreşime sebep olur. Hızda meydana gelen sapmalar nispeten azdır.

6. Çok kamlı millerde de kam milinde kamlardan etki eden değişken torklar etkisiyle kurulma olayı meydana gelmektedir. Yüksek hızlarda, oluşan burulma titreşimlerinin genlikleri büyük değerler alabilir. Bilhassa tahrik tarafından en uzakta bulunan kamdaki titreşim genliği en büyük değerlerine ulaşmaktadır ve girişten uzaklaştıkça genlikler artmaktadır. Kamlar tablalı ise mildeki titreşimler daha dalgalı (sık değişen) hale gelmekte ve mildeki ortalama tork pozitif tarafa kaymaktadır. Kam mili kesitlerinin maruz olduğu dinamik gerilmelerin şiddeti girişten uzaklaştıkça azalmaktadır. Milin hızı yüksek ve dönüşündeki düzensizlik fazla ise mil ucuna takılacak bir volan milde oluşan burulma titreşimlerinin genliğini azaltarak olumlu bir sonuç meydana getirmektedir.



Referanslar:

1. Ardayfio, D., Dynamics of High - Speed Cam Mechanisms with Damped Flexible Followers Driven by Flexible Camshafts ASME 76-DET-63, 1977.
2. Blaquiére, A., Nonlinear System Analysis, Academic Press, NY, 1966.
3. Bloom, D., and Radcliffe, C.W., The Effect of Camshaft Elasticity on The Response of Cam Driven Systems, ASME 64-Mech -41.
4. Cannon, Jr.R.H., Dynamics of Physical Systems, Mc Graw-Hill, 1967.
5. Chai, A.S., A Fifth-order Modified Runge-Kutta Integration Algorithm, Simulation 18, January 1972, 21-27.
6. Chen, F.Y., Mechanics and Design of Cam Mechanisms, Mc Graw-Hill New York 1981.
7. Chen, F.Y., A Survey of the State of the Art of Cam System Dynamics, Mechanism and Machine Theory, Vol.12, No.3 201-224.
8. Chen, F.Y. and Polvanich, N., Dynamics of High-Speed Cam-Driven Mechanisms, Part 1: Linear System Models, J. of Eng. for Ind., 769-776, Aug. 1975.

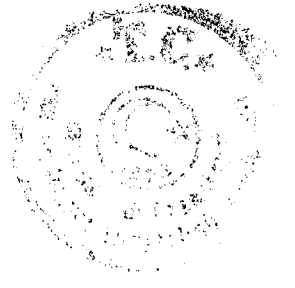
9. Chen, F.Y. and Polvanich, N., Dynamics of High-Speed Cam-Driven Mechanisms, Part 2: Nonlinear System Models, J. of Eng. for Ind., 777-784, Aug. 1975.
10. Cunningham, W.J., Introduction to Nonlinear Analysis, Mc Graw-Hill, New York, 1958.
11. Designing A Variable Timing Camshaft, Automotive Engineering, pp. 50-53, May 1974.
12. Dizioğlu, B., Dinamik, C.3, Çev. F. Pasin, M.Gürgöze, İTÜ MMF, 1976.
13. Erisman, R.J., Automotive Cam Profile Synthesis and Valve Gear Dynamics from Dimensionless Analysis, SAE Trans., 75(1), 128-147, 1967.
14. Fenton, R.G., Cam Design, Automobile Engineer, 184-187, May 1967
15. Freudenstein, F., Mayourian, M., Maki, E.R., Energy Efficient Cam-Follower Systems, J. of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, Vol.105. pp.681-685, 1983.
16. Gürgöze, M., Analitik Metotlarla Titreşimlerin Etüdü, İTÜ Fen Bilimleri Enst., 1984.
17. Karadağ, V., Değişken Momentler Etkisi Altındaki Krank Milinin Stasyoner ve Geçici Sönümlü Burulma Titreşimleri, II. Ulusal Makina Teorisi Simp. 22-24 Eylül 1986, Gaziantep s.249-260.
18. Kim, H.R., Newcombe, W.R., The Effect of Cam Profile Errors and System Flexibility on Cam Mechanism Output, Mechanism and Machine Theory, Vol.17, No.1, pp.57-72 1982



19. Kojima, H., Nagaya K., Nonlinear Torsional Vibrations of a Rotating Shaft System with a Magnet Coupling, Bulletin of JSME, Vol.27, No.228, June 1984, 1258-1263
20. Koster, M.P. Effect of Flexibility of Driving Shaft on the Dynamic Behavior of a Cam Mechanism, Journal of Eng. for Ind., May 1975, 595-602.
21. Köseoğlu, M., Yılmaz, Y., Mekanizma Tekniği, İTÜ Makina Fak., 1987
22. Kreyszig, A., Advanced Engineering Mathematics, John Wiley, N.Y., 1985.
23. Magnus, K., Titreşimler, Çev.F.Pasin, M. Gürgöze, İTÜ MMF Yayın No: 127, 1978.
24. Matthew, G.K., Tesar, D., Cam System Design: The Dynamic Synthesis and Analysis of the One Degree of Freedom Model, Mech. and Mach. Theory, Vol.11, pp. 247-257, 1976.
25. Mathew, G.K., Tesar, D., The Design of Modeled Cam Systems, Part II: Minimization of Motion Distortion Due to Modeling Errors, J. of Eng. for Ind., 1181-1189, Nov. 1975.
26. Molian, S., The Design of Cam Mechanisms and Linkages, Constable London, 1968.
27. Palavan, S., Mekanik Titreşimler Dersleri İTÜ Küt. Sayı: 773, 1973
28. Pouyet, J.M., Latadaille, J.L., Torsional Vibrations of A Shaft with Non-Uniform Cross Section, J. of Sound and Vibration, 76(1), 13-22, 1981



29. Rao, A.C., Optimum Elastodynamic Synthesis of a Cam-Follower Train Using Stochastic-Geometric Programming, Mech. and Mach. Theory, Vol.15, pp.127-135, 1980.
30. Rothbart, H.A., Cams, John Wiley, New York, 1965.
31. Scheid, F., Numerical Analysis, Mc Graw-Hill, New York, 1968.
32. Shigley, J.E., Uicker, J.J., Theory of Machines and Mechanisms, Mc Graw-Hill, 1980.
33. Szakallas, S.E., Savage, M., The Characterization of Cam Drive System Windup, J. of Mech. Des. Vol. 102, April 1980, 278-285.
34. Taşcan, S., Yürek Mekanizmalarında Tahrik Milinin Düzgün Hareketinin Temini Üzerine, I. Ulusal Makina Teorisi Simp. 12-14 Eylül 1984, ODTÜ, s.13-19.
35. Terauchi, Y., El-Shakery, S., A Computer-Aided Method for Optimum Design of Plate Cam Size Avoiding Undercutting and Separation Phenomena-i, Meh. and Mach. Theory, Vol.18, No:2, pp.157-163, 1983.
36. Thomson, W.T., Theory of Vibration with Applications, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1981.
37. Timoshenko, S., Young, D.H., Weaver, Jr.W., Vibration Problems in Engineering, 4<sup>th</sup> Ed., John Wiley and Sons, New York, 1964.
38. Tse, F.S., Morse, I.E., Hinkle, R.T., Mechanical Vibrations, Theory and Applications, Allyn and Bacon Inc., 1978.
39. Vidyasagar, M., Nonlinear Systems Analysis, Prentice-Hall Inc., 1978
40. Yılmaz, Y., Köseoğlu, M., Doğrusal yönlü yürek mekanizmasında profil hatalarının çıkış büyüklüklerine etkisinin araştırılması, II. Ulusal Makina Teorisi Simpozyumu, 22-24 Eylül 1986, ODTÜ, Gaziantep, s.36-48.



## EK-A: KAM MEKANİZMALARINDA KULLANILAN HAREKET KANUNLARI

### A.1. Giriş

Kam mekanizmalarında kamdan hareket alan izleyicinin hareketini belirleyen denklemlere hareket kanunu adı verilir. Bir kam mekanizması dizayn edilirken ilk yapılacak işlerden biri hareket kanununun seçimidir. Bu seçim yapılırken hareket kanununun bazı özellikleri taşınması istenir. Bir kam mekanizması dinamik açıdan bir titreşim sistemidir. Mekanizmanın hem izleyici kısmı, hem de kam mili hareket esnasında titreşim yaparlar. Düzgün çalışma ve ömür açısından bu titreşimlerin en aza indirilmesi gerekir. Hareket kanununda, bunun için ivme ve hız eğrilerinin sürekli olması aranan bir özelliktir. Bunun yanısıra atalet kuvvetinin küçük olması için ivmenin maksimum değerinin de küçük olması istenir.

Kam mekanizmasında hareket doğrudan temas yoluyla iletiildiği için izleyici ve kam arasında küçük bir yüzey üzerinden kuvvet iletimi söz konusudur. Bu durum yüksek yüzey basınçlarına ve dolayısıyla aşınmaya sebep olur. Aşınmayı azaltmak ve ömrü uzatmak için temas kuvveti küçük olmalıdır. Ayrıca kam milindeki tork da temas kuvvetine bağlıdır. Temas kuvvetinin büyük olması, hem kam, hem de kam milinin boyutlarının büyümesine sebep olur. Bu açıdan temas kuvvetinin büyüklüğü de dizaynda gözönüne alınacak bir kriterdir. Bunların yanında imalat kolaylığı, görülmüş çalışma gibi kriterlere de bağlı olarak hareket kanunu seçilir.





Hareket kanunları başlıca iki ana guruba ayrılır:

- a) Trigonometrik hareket kanunları,
- b) Polinom hareket kanunları /30/.

Her iki sınıf hareket kanununda da izleyici hareketi kam dönme açısı  $\theta$  ya bağlı olarak tanımlanmıştır. Bunların dışında daire yaylı ve teğetsel kamlar, daire yaylarının veya daire yayları ile doğruia-  
rın birleştirilmesi ile oluşturulmuş kamlardır. Mekanizmada aranan özelliklere göre bunlardan biri hareket kanunu olarak seçilir. Bazı kamlarda da trigonometrik ve polinom hareket kanunları ardarda ek-  
lenerek değişik özellikte hız ve ivme eğrileri elde edilir.

#### A.2. Trigonometrik hareket kanunları

Trigonometrik hareket kanunları, hareket denkleminde trigonometrik fonksiyonlar bulunduğu için bu ismi almışlardır.

##### A.2.1. Harmonik (adi sinoid) hareket kanunu

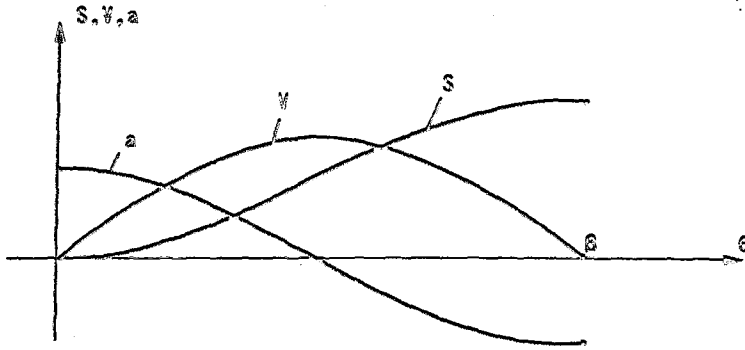
Basitliği sebebiyle çok kullanılır. Orta hızlarda uygundur.  $\theta$  kam dönme açısı,  $\beta$  kalkışın gerçekleştiği toplam kam açısı, ve  $h$  toplam kalkış olmak üzere, kalkış hareketi için yol, hız ve ivme denklemleri şu şekildedir:

$$s = \frac{h}{2} \left( 1 - \cos \frac{\pi \theta}{\beta} \right)$$

$$s' = \frac{h \pi}{2\beta} \sin \frac{\pi \theta}{\beta}$$

$$s'' = \frac{h \pi^2}{2\beta^2} \cos \frac{\pi \theta}{\beta}$$

Şekil A.1 de kalkış hareketi için yol, hız ve ivme diyagramları görülmektedir. Hız ve ivme eğrileri süreklidir, bununla birlikte ivme eğrisi uçlarda süreksizdir. Bu ise yüksek hızlarda gürültüye sebep olur.



Şekil A.1- Harmonik hareket kanununda yol,hız ve ivme eğrileri

### A.2.2. Modifiye harmonik hareket kanunu

Harmonik hareket kanununda ivmenin başlangıçtaki süreksizliğini ortadan kaldırmak için iki harmonik kalkış eğrisinin süperpozisyonu ile modifiye harmonik hareket kanunu elde edilmiştir. Orta hızlarda uygun olan bu hareket kanunu dinamik açıdan harmonik hareket kanunundan daha iyidir ve daha çok kalkış-iniş-bekleme şeklindeki izleyici hareketleri için uygundur. Yol, hız ve ivme denklemleri şu şekildedir:

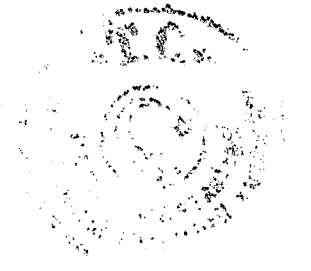
$$s = \frac{h}{2} \left[ \left(1 - \cos \frac{\pi \theta}{\beta}\right) - \frac{1}{4} \left(1 - \cos \frac{2\pi \theta}{\beta}\right) \right]$$

$$s' = \frac{h\pi}{2\beta} \left( \sin \frac{\pi \theta}{\beta} - \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi \theta}{\beta} \right)$$

$$s'' = \frac{h\pi^2}{2\beta^2} \left( \cos \frac{\pi \theta}{\beta} - \cos \frac{2\pi \theta}{\beta} \right)$$

### A.2.3. Sikloidal(Yüksek sinoid) hareket kanunu

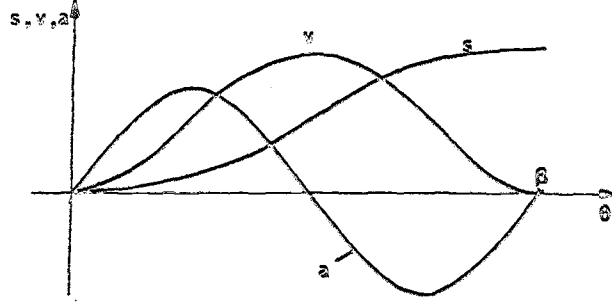
Yüksek hızlarda çok iyi performansa sahip bir hareket kanunudur. Şekil A.2 den de görülebileceği gibi hız ve ivme eğrileri sürekli-lidir. Bu nedenle diğer trigonometrik eğrilere nazaran en az titreşim ve gürültü oluşturur. Yol, hız ve ivme denklemleri şöyledir:



$$s = h \left( \frac{\theta}{\beta} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi\theta}{\beta} \right)$$

$$s' = \frac{h}{\beta} \left( 1 - \cos \frac{2\pi\theta}{\beta} \right)$$

$$s'' = \frac{2h\pi}{\beta} \sin \frac{2\pi\theta}{\beta}$$



Şekil A.2. Sikloidal hareket kanununda yol, hız ve ivme eğrileri

Bunlar dışında az kullanılan modifiye sikloidal, yarım harmonik, yarım sikloidal ve eliptik gibi trigonometrik hareket kanunları da mevcuttur.

### A.3. Polinom hareket kanunları

Bu hareket kanunlarında izleyicinin hareket denklemi bir polinom şeklinde düşünülmüştür. Polinomun genel şekli şöyledir:

$$s = C_0 + C_1 \theta + C_2 \theta^2 + C_3 \theta^3 + \dots + C_n \theta^n \quad (A.3.1)$$

Burada s, izleyici hareket miktarını,  $\theta$  kam dönme açısını ve  $C_i$ 'ler de sabit katsayıları göstermektedir.

Hareket kanunu seçilirken, bu polinomun baştan itibaren belli sayıda terimi alınır. İzleyici hareketinin sağlanması istenen sınır şartları yazılarak  $C_n$  katsayıları bulunur. Terim sayısı istenildiği kadar alınabilir, fakat terim sayısı arttıkça, verilmesi gereken şartlar da artar.

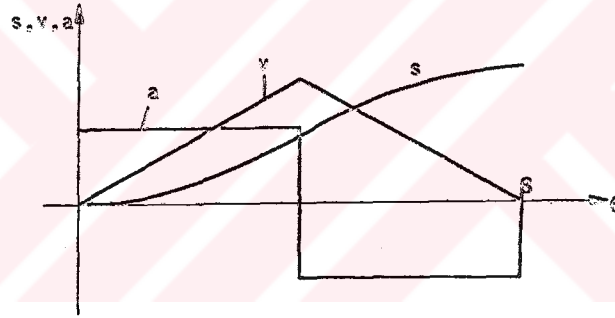


### A.3.1. Parabolik hareket kanunu

En basit polinom hareket kanunudur. (A.3.1) denkleminde ilk üç terim alınır ve ivmenin sabit olması şartı yazılırsa hareket denklemleri elde edilir. Şekil A.3 den görüldüğü gibi ivmenin maksimum değeri küçük ve ivme sabit olduğu halde süreksizdir. Bu da titreşim, görültü ve aşınmaya sebep olur, bu yüzden düşük hızlarda kullanılır. Kalkış hareketi için yol, hız ve ivme denklemleri şöyledir:

$$0 < \theta < \pi/2 \text{ için: } s = 2h\left(\frac{\theta}{\beta}\right)^2, s' = \frac{4h}{\beta^2} \theta, s'' = \frac{4h}{\beta^2}$$

$$\pi/2 < \theta < \pi \text{ için: } s = h\left[1 - 2\left(1 - \frac{\theta}{\beta}\right)^2\right], s' = \frac{4h}{\beta}\left(1 - \frac{\theta}{\beta}\right), s'' = -\frac{4h}{\beta^2}$$



Şekil A.3. Parabolik hareket kanununda yol, hız ve ivme eğrileri

### A.3.2. 3-4-5 polinom hareket kanunu

(A.3.1) denkleminde baştan itibaren ilk beş terim alınıp, hız ve ivmenin kalkışın hem başında, hem sonunda sıfır olması, izleyici kalkışının ise başlangıçta sıfır, sonda h olması şartları yazılırsa bu hareket kanunu elde edilir. 3-4-5 hareket kanunu sikloidal hareket kanununa benzer özellikler taşır, fakat performansı daha düşüktür. Kalkış için yol, hız ve ivme denklemleri şu şekildedir:

$$s = h \left[ 10 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^3 - 15 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^4 + 6 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^5 \right]$$

$$s' = 30h \left[ \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^2 - 2 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^3 + \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^4 \right]$$

$$s'' = 60h \left[ \frac{\theta}{\beta} - 3 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^2 + 2 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^3 \right]$$

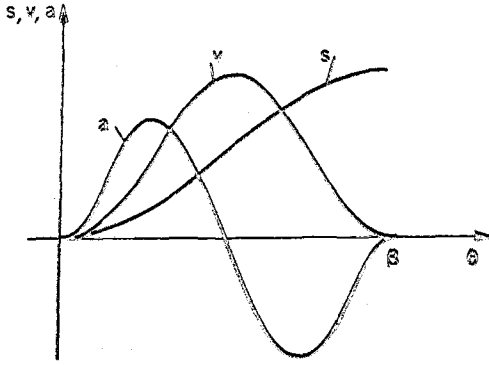
### A.3.3. --5-6-7 polinom hareket kanunu

(A.3.1) denkleminde ilk 7 terim alınarak hız, ivme ve silikintinin (jerk) kalkışın başında ve sonunda sıfır olması, kalkışın başlangıçta sıfır, sonda h olması istenirse bu hareket kanunu elde edilir. Yüksek hızlara uygundur, ivmenin maksimum değeri 3-4-5 polinomunkinden fazladır. Kalkış hareketi için yol, hız ve ivme eğrileri Şekil A.4 de görülmektedir.

$$s = h \left[ 35 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^4 - 84 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^5 + 70 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^6 - 20 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^7 \right]$$

$$s' = 140h \left[ \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^3 - 3 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^4 + 3 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^5 - \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^6 \right]$$

$$s'' = 420h \left[ \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^2 - 4 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^3 + 5 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^4 - 2 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^5 \right]$$



Şekil A.4. 4-5-6-7 polinom hareket kanununda yol, hız ve ivme eğrileri.

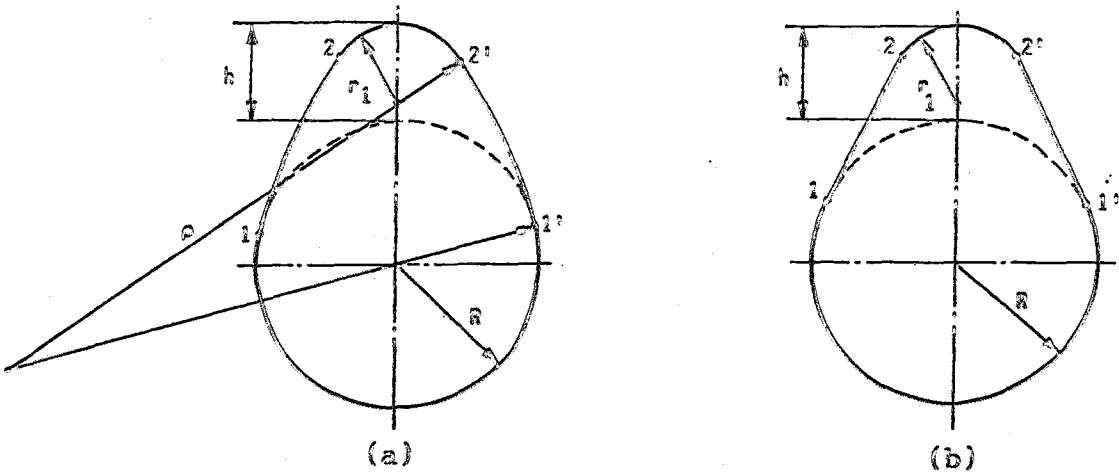


Bunların dışında kalkış-iniş-bekleme şeklindeki izleyici hareketleri için uygun olan 8. derece polinom hareket kanunu, kübik hareket kanunu gibi polinom hareket kanunları mevcuttur. Polinom hareket kanunları ile istenen kinematik şartları sağlayan kamlar elde edilebilir. Polinom derecesi arttıkça imalat hassasiyetinin de artması gerekir. Bugün 7 terimli ve 30'dan fazla dereceli polinom hareket kanunları kullanılmaktadır.

#### A.4. Teğetsel ve daire yaylı kamlar

İmalat kolaylığı açısından eski yıllarda ve bir ölçüde günümüzde bilhassa motorlarda yaygın olarak kullanılan bu kamlar isimlerini kam profilinin geometrik yapısından almaktadırlar. Şekil A.4 den de görüldüğü gibi teğetsel kamlarda kam profili bir doğru ve bir daire yayının birleşmesiyle meydana gelmiştir. Daire yaylı veya yan yüzü kavisli kamlarda ise doğru yerine, geniş kavisli bir daire yayı kullanılır. İzleyici topariaklı veya tablalı olabilir. Teğetsel kamlarda genellikle topariaklı izleyici kullanılır.

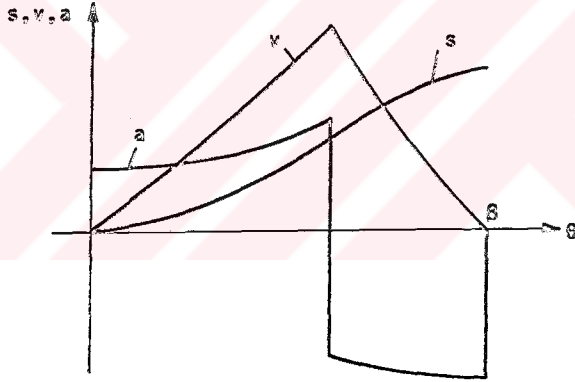
Bu kamlar dizayn edilirken önce kam boyutları tespit edilir, daha sonra hareket diyagramları çizilir, diyagramlar uygun değilse boyutlarda düzeltme yapılır.



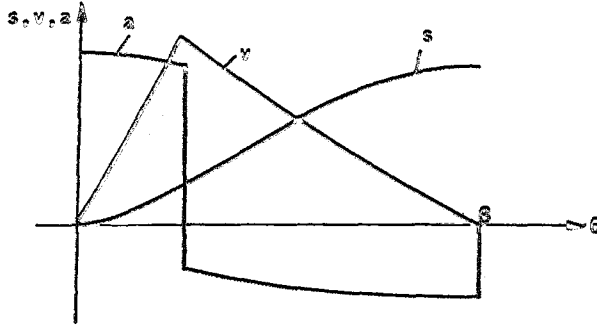
Şekil A.5. Teğetsel ve daire yaylı kamlar  
-a) Daire yaylı, b) Teğetsel kam

Teğetsel ve daire yaylı kamlarda yol, hız ve ivme eğrileri birbirine benzer özellikler taşır. Kam profili farklı eğrilerden müteşekkil olduğundan hız ve ivme eğrileri süreksizdir. Bu durum dinamik açıdan birçok olumsuzluklar doğurur, sert yay kullanımı gerektirir, titreşim ve gürültüye sebep olur. Bu nedenle yüksek hızlara uygun değildirler.

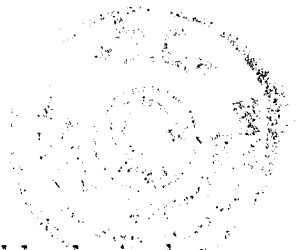
Teğetsel ve daire yaylı kamlar, toparlaklı olarak kullanıldıkları zaman kinematik açıdan bir krank biyel mekanizmasına eşdeğerdirler. Eşdeğer mekanizmanın boyutları yan yüzde ve uç kısımda farklıdır. Daire yaylı ve toparlaklı bir kamın yol, hız ve ivme diyagramları Şekil A.5 de görülmektedir. Tablalı bir daire yaylı kam kinematik açıdan harmonik hareket mekanizmasına eşdeğerdir. Böyle bir kamın hareket diyagramları da Şekil A.6'da görülmektedir.



Şekil A.6. Daire yaylı ve toparlaklı bir kamda yol, hız ve ivme eğrileri.



Şekil A.7. Tablalı ve daire yaylı bir kamda yol, hız ve ivme eğrileri.



Daire yaylı bir teğetsel kamların yol, hız ve ivme denklemleri de kalkış miktarı  $h$  bir çarpan olacak şekilde yazılabilir. Bir örnek olarak, daire yaylı ve toparlaklı bir kamin izleyicisinin yol, hız ve ivme ifadeleri şu şekildedir:

Yan Yüzde:

$$s = h [u_1(1-\cos\theta) - u_2(1-\cos\alpha)]$$

$$s' = h u_1 (\sin\theta - \cos\theta \operatorname{tg}\alpha)$$

$$s'' = h u_1 (\cos\theta - \frac{u_1}{u_2} \frac{\cos^2\theta}{\cos^3\alpha} + \sin\theta \operatorname{tg}\alpha)$$

Uç Kısımında:

$$s = h [u_3 \cos(\beta - \theta) + u_4 \cos\alpha + u_1 - u_2]$$

$$s' = h u_3 [\sin(\beta - \theta) + \cos(\beta - \theta) \operatorname{tg}\alpha]$$

$$s'' = h u_3 [-\cos(\beta - \theta) - \frac{u_3}{u_4} \frac{\cos^2(\beta - \theta)}{\cos^3\alpha} + \sin(\beta - \theta) \operatorname{tg}\alpha]$$

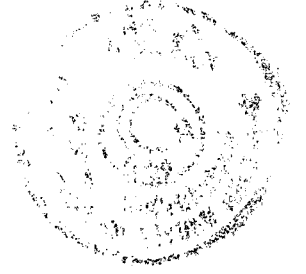
Burada:

$$\cos\alpha = \left[ 1 - \left( \frac{u_1}{u_2} \right)^2 \sin^2\theta \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$u_1 = \frac{e - R}{h}, \quad u_2 = \frac{e + r_f}{h}, \quad u_3 = \frac{h + R - r_1}{h}, \quad u_4 = \frac{r_1 + r_f}{h}$$

$e$  kavis yarıçapı,  $R$  temel daire yarıçapı,  $r_f$  toparlak yarıçapı,  $h$  kalkış miktarı,  $\beta$  kalkışın gerçekleştirildiği toplam kam açısı ve  $\theta$  kam dönme açısıdır.





## EK-B: BİLGİSAYAR PROGRAMLARI

### B.1. GİRİŞ

Tek ve çok kamlı kam millerinin nonlinear hareket denklemlerinin çözümü nümerik olarak Runge-Kutta-Nyström metodu ile yapılmıştır. Metodun tek kamlı miller için uygulanması kolay olmasına karşın, çok kamlı miller için daha karmaşık bir algoritma gerektirmektedir. Tek ve çok kamlı miller için kamların toparlaklı veya tablalı oluşu da dikkate alınarak hazırlanan bilgisayar programları BASIC dili ile ve bir mini bilgisayarda çalışabilecek şekilde yazılmıştır. Biri tek kamlı, diğer ikisi de çok kamlı miller için olmak üzere üç bilgisayar programı hazırlanmıştır.

### B.2. Bilgisayar Programları

Toparlaklı veya tablalı ve tek kamlı bir mildeki burulma titreşimleri ve bunun izleyici hareketi üzerindeki etkilerinin tespiti için TEKKAM programı hazırlanmıştır. Programda en çok kullanılan harmonik, sikloidal, parabolik ve 4-5-6-7 polinom hareket kanunları gözönüne alınmıştır. Giriş bilgisi olarak boyutsuz katsayılar atalet, frekans, enerji ve büyüklük oranları ile kam açısı girilir. Çıkış olarak mildeki kamın burulma titreşiminin genliği ile, bu titreşimin izleyici ivmesi ve radyal kuvvet bileşeni üzerindeki etkileri grafik olarak bilgisayar ekranında veya istenirse yazıcıdan alınır. Programa yapılacak basit ilavelerle başka hareket kanunlu kamların millerindeki titreşimlerin incelenmesi de mümkündür.

İkinci program COKKAMI birden fazla toparlaklı kamı haiz miller için hazırlanmıştır. Giriş bilgisi olarak önce kam açısı, kam sayısı ve kamların başlangıcının mil eksenine göre açısal konumları girilir. Bunun için milin tahrik tarafına en yakın olan kamın baş-

langıcı sıfır olarak alınır, diğerlerininki sırayla buna göre belirlenir. Daha sonra atalet oranı, frekans oranları ve enerji oranı girilir. Burada kamlar birbirinin aynı olarak düşünüldüğü için bu oranlar her kam için aynıdır. Farklı kamlar bulunması halinde bunlarla ilgili katsayılar farklı olarak girilebilir. Programdan çıkış olarak her kamın titreşim genliğinin yani girişe göre izafi dönme miktarının bir dönüşteki değişimi grafik olarak alınır. Kamlar arasındaki kesitlerdeki tork (burulma momenti) değişimleri de programa küçük bir ilave yaparak çıkış olarak alınabilir.

Üçüncü program COKKAM2 birden fazla tabialı kamı haiz miller için hazırlanmıştır. Programın girişi ve çıkışı COKKAM1 gibidir. Farklı olarak sadece büyük oranı da diğer giriş bilgileri ile birlikte girilmelidir.

Müteakip sayfadan itibaren verilen program metinlerinde standart BASIC deyimleri ve grafik işlemlerle ilgili bazı özel deyimler kullanılmıştır. Başta bilgi girişi ile ilgili deyimler vardır. Daha sonra nümerik yöntem programlanmıştır. Kam hareket kanunları ile ilgili hesaplar, programların sonunda bir altprogramda yapılmıştır. (Not: Metindeki ö karakteri üs alma(\*\*) işlemini ifade etmektedir.)



```

10 REM " TEKKAM PROGRAMI "
20 NODE 1:ORIGIN 0,200:GRAPHICS PEN 2:PRINT:PRINT
30 PRINT:PRINT"1 - Harmonik":PRINT"2 - Sikloidal":PRINT"3 - Parabolik"
40 PRINT"4 - 4-3-6-7 polinom":PRINT:INPUT" Seciminiz :":si
50 IF si<1 OR si>4 THEN PRINT CHR$(7):GOTO 20
60 PRINT:PRINT:PRINT"1-Toparlakli      2-Tablali":PRINT:INPUT" Seciminiz:":js
70 PRINT:INPUT"Kam acisi(der.)=":tt:tt=tt*PI/180:U=0.015:nb=50:GOTO 110
80 GRAPHICS PEN 3:PLOT -320,0:DRAW 640,0:PLOT 0,-200:DRAW 0,200
90 FOR k=0 TO 420 STEP 20:PLOT k,-180:DRAW k,180:NEXT
100 FOR k=-180 TO 180 STEP 20:PLOT 0,k:DRAW 420,k:NEXT:GRAPHICS PEN 2:RETURN
110 INPUT"M=":m2:INPUT"N21=":f21:INPUT"p=":pp:IF js=1 THEN 130
120 INPUT"ksi=":rn:pu=0.3*pp
130 PRINT:PRINT:PRINT"1 - Mildeki titresim "
140 PRINT"2 - izleyici ivmesindeki sapma"
150 PRINT"3 - Radyal kuvvet bilezeni uzerindeki etki"
160 PRINT:INPUT" Seciminiz :":jcv
170 CLS:GOSUB 80:ON si GOSUB 180,190,200,210:GOTO 220
180 sumx=PI/2/tt:suumx=PI/2/tt/2:RETURN
190 sumx=2/tt:suumx=PI/2/tt/2:RETURN
200 sumx=2/tt:suumx=4/tt/2:RETURN
210 sumx=2.1875/tt:suumx=7.313/tt/2:RETURN
220 a=m2/sumx/2:b=f21/2:c=m2/sumx/2:d=1.5*m2*suumx/sumx/2:e=pp/sumx
230 uu=0:sd=tt:sw=2*tt:sz=2*PI:sn=0:se=sz:sv=0:x2=0:x2u=0
240 m12=x2:k12=x2u:is=1:iu=0
250 ON js GOTO 260,270
260 GOSUB 280:GOSUB 300:GOSUB 320:GOSUB 340:GOTO 440
270 GOSUB 350:GOSUB 370:GOSUB 390:GOSUB 410:GOTO 440
280 hu=(uu-iu-m12-2*PI*sn)/tt:GOSUB 700:z1=d*S*ds+e*ds*(1-1.5*S):z2=c*ds*ds*(1-
k12/2):z3=b*m12:z4=1+a*ds/2:l12=(z1+z2-z3)/z4*U/2
290 m22=x2+u/2*(x2u+l12/2):k22=x2u+l12:RETURN
300 uu=uu+u/2:hu=(uu-iu-m22-2*PI*sn)/tt:GOSUB 700:z1=d*S*ds+e*ds*(1-1.5*S):z2=c*
ds*ds*(1-k22/2):z3=b*m22:z4=1+a*ds/2:l22=(z1+z2-z3)
/z4*U/2
310 m32=x2+u/2*(x2u+l12/2):k32=x2u+l12:RETURN
320 hu=(uu-iu-m32-2*PI*sn)/tt:GOSUB 700:z1=d*S*ds+e*ds*(1-1.5*S):z2=c*ds*ds*(1-
l32/2):z3=b*m32:z4=1+a*ds/2:l32=(z1+z2-z3)/z4*U/2
330 m42=x2+u*(x2u+l32):k42=x2u+2*l32:RETURN
340 uu=uu+u/2:hu=(uu-iu-m42-2*PI*sn)/tt:GOSUB 700:z1=d*S*ds+e*ds*(1-1.5*S):z2=c*
ds*ds*(1-k42/2):z3=b*m42:z4=1+a*ds/2:l42=(z1+z2-z3)
/z4*U/2:RETURN
350 hu=(uu-iu-m12-2*PI*sn)/tt:GOSUB 700:fi=ds+0.1*srn:z1=d*S*fi+e*fi*(1-1.5*S):
z2=c*fi*ds*(1-k12/2):z3=b*m12:z4=1+a*ds*fi:l12=(z1+
z2-z3)/z4*U/2
360 m22=x2+u/2*(x2u+l12/2):k22=x2u+l12:RETURN
370 uu=uu+u/2:hu=(uu-iu-m22-2*PI*sn)/tt:GOSUB 700:fi=ds+0.1*srn:z1=d*S*fi+e*fi*(
1-1.5*S):z2=c*fi*ds*(1-k22/2):z3=b*m22:z4=1+a*ds*fi
l122=(z1+z2-z3)/z4*U/2
380 m32=x2+u/2*(x2u+l12/2):k32=x2u+l12:RETURN
390 hu=(uu-iu-m32-2*PI*sn)/tt:GOSUB 700:fi=ds+0.1*srn:z1=d*S*fi+e*fi*(1-1.5*S):
z2=c*fi*ds*(1-k32/2):z3=b*m32:z4=1+a*ds*fi:l32=(z1+
z2-z3)/z4*U/2
400 m42=x2+u*(x2u+l32):k42=x2u+2*l32:RETURN
410 uu=uu+u/2:hu=(uu-iu-m42-2*PI*sn)/tt:GOSUB 700:fi=ds+0.1*srn:z1=d*S*fi+e*fi*(
1-1.5*S):z2=c*fi*ds*(1-k42/2):z3=b*m42:z4=1+a*ds*fi
l142=(z1+z2-z3)/z4*U/2:RETURN
420 x2=x2+u*(x2u+(l12+l22+l32)/3):x2u=x2u+(l12+2*l22+2*l32+l42)/3:ft=x2:fr=x2u
430 RETURN
440 GOSUB 420:GOSUB 500:IF uu-x2<sd THEN 240

```



```

450 m12=x2:k12=x2u:is=-1:iu=tt
460 ON js GOTO 470,480
470 GOSUB 280:GOSUB 300:GOSUB 320:GOSUB 340:GOTO 490
480 GOSUB 350:GOSUB 370:GOSUB 390:GOSUB 410
490 GOSUB 420:GOSUB 600:IF uu-x2<sw THEN 450
500 ON js GOTO 510,550
510 m12=x2:k12=x2u:l12=u/2*(-b+m12):m22=x2+u/2*(x2u+l12/2):k22=x2u+l12
520 uu=uu+u/2:l22=u/2*(-b*m22):m32=x2+u/2*(x2u+l12/2):k32=x2u+l22
530 l32=u/2*(-b*m32):m42=x2+u*(x2u+l32):k42=x2u+2*l32:uu=uu+u/2
540 l42=u/2*(-b*m42):GOTO 580
550 m12=x2:k12=x2u:l12=u/2*(-b*m12+pu):m22=x2+u/2*(x2u+l12/2):k22=x2u+l12
560 uu=uu+u/2:l22=u/2*(-b*m22+pu):m32=x2+u/2*(x2u+l12/2):k32=x2u+l22
570 l32=u/2*(-b*m32+pu):m42=x2+u*(x2u+l32):k42=x2u+2*l32:uu=uu+u/2:l42=u/2*(-b*m
42+pu)
580 GOSUB 420:GOSUB 600:IF uu-x2<se THEN 500
590 uv=uu:sn=sn+1:sv=0:sd=sd+sz:sw=sw+sz:se=se+sz:CLS:GOSUB 80:GOTO 240
600 ON cv GOSUB 510,520,520:RETURN
610 LOCATE 30,1:PRINT USING"###.###":ft*1000:j=(uu-uv)*nb:PLOT j,ft*15000:RETUR
N
620 hu=(uu-iu-x2-sz*sn)/tt:GOSUB 700:zi=d*s*ds+e*ds*(1-1.5*s):z2=c*ds*dss*(1-x2u
)ö2:z3=b*x2:z4=1+a*dsö2:x2uu=(z1+z2-z3)/z4:IF cv=3 T
HEN 670
630 j=(uu-uv)*nb:es=s:ev=(1-x2u)*ds:ea=(1-x2u)ö2*dss-x2uu*ds
640 hu=(uu-iu-sz*sn)/tt:GOSUB 700:fs=s-es:fv=ds-ev:fa=dss-ea
650 PLOT j,fa*20:RETURN
660 PLOT j,fv*100:RETURN
670 sc=m2*(dss*(1-x2u)ö2-ds*x2uu+1.5*suum*xs)+sumx*pp*(1-1.5*s)
680 j=(uu-UV)*nb:PLOT j,sc*4:RETURN
690 RETURN
700 ON si GOSUB 710,720,740,730:RETURN
710 ju=PI*hu:s=0.5*(1-is*cos(ju)):ds=is*sumx*SIN(ju):dss=is*suumx*cos(ju):RETURN
720 ju=2*PI*hu:s=is*(hu-1/2/PI*SIN(ju))+iu/tt:ds=is/tt*(1-COS(ju)):dss=is*2*PI/t
tö2*SIN(ju):RETURN
730 s=is*(35*huö4-64*huö5+70*huö6-20*huö7)+iu/tt:ds=is*140/tt*(huö3-3*huö4+3*huö
5-huö6):dss=is*420/ttö2*(huö2-4*huö3+5*huö4-2*huö5):
RETURN
740 uee=uu-x2-sz*sn:IF uee>1.5*tt THEN 780
750 IF uee>tt THEN 790
760 IF uee>0.5*tt THEN 800
770 s=2*huö2:ds=4/tt*hu:dss=4/ttö2:RETURN
780 s=2*(huö2-2*hu+1):ds=4/tt*(hu-1):dss=4/ttö2:RETURN
790 s=1-2*huö2:ds=-4/tt*hu:dss=-4/ttö2:RETURN
800 s=1-2*(1-hu)ö2:ds=4/tt*(1-hu):dss=-4/ttö2:RETURN
810 ju=PI*(uu-iu-x2-sz*sn)/tt:GOSUB 730:zi=d*s*ds+e*ds*(1-1.5*s):z2=c*ds*dss*(1-
x2u)ö2:z3=b*x2:z4=1+a*dsö2:x2uu=(z1+z2-z3)/z4
820 j=(uu-uv)*nb:es=s:ev=(1-x2u)*ds:ea=(1-x2u)ö2*dss-x2uu*ds
830 ju=PI*(uu-iu-sz*sn)/tt:GOSUB 730:fs=s-es:fv=ds-ev:fa=dss-ea:GOTO 850
840 PLOT j,fv*1500:RETURN
850 PLOT j,fa*130:RETURN
860 sc=m2*(dss*(1-x2u)ö2-ds*x2uu+1.5*suum*xs)+sumx*pp*(1-1.5*s)
870 j=(uu-UV)*nb:PLOT j,sc*4:RETURN

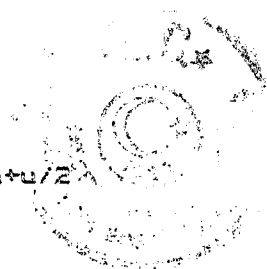
```



```

10 REM " CONKAMI PROGRAMI "
20 DIM ts(20),tr(20,2),ta(20,2):NODE 1:ORIGIN 0,200:GRAPHICS PEN 2
30 PRINT:PRINT"KAM TORK CEVABI ":PRINT:PRINT"1 - HARMONIK"
40 PRINT"2 - SIKLOIDAL"
50 PRINT"3 - PARABOLIK":PRINT"4 - 4-5-6-7 POLINOM"
60 PRINT:PRINT"Seciminiz:"
70 js=INKEY$:IF js="" THEN 70
80 js=VAL(js):IF js<1 OR js>4 THEN PRINT CHR$(7):GOTO 70
90 CLS:PRINT:INPUT"Kam acisi=":tt:PRINT
100 tt=tt*PI/180:U=0.015:ip=2*PI:UU=0
110 INPUT"Mildeki kam sayisi=":n:in=2*n+1:PRINT
120 DIM k(2*n),X(in),XU(in),sx(2*n),op(2*n),m1(in),m2(in),m3(in),m4(in),k1(in),k
2(in),k3(in),k4(in),l1(in),l2(in),l3(in),l4(in):GOTO
150
170 GRAPHICS PEN 3:PLOT -320,0:DRAW 640,0:FOR i=-9 TO 9:PLOT 0,i*20:DRAW 400,i*2
0:NEXT
180 FOR i=0 TO 20:PLOT i*20,-180:DRAW i*20,180:NEXT:GRAPHICS PEN 2:RETURN
190 FOR j=1 TO n:PRINT j:INPUT". kamin baslangic acisi=":te(j)
180 te(j)=te(j)*PI/180:tr(j,2)=te(j)+2*tt:tr(j,1)=te(j)+2*tt
170 IF tr(j,1)>ip THEN tr(j,1)=tr(j,1)-ip
180 ta(j,2)=te(j)+tt:ta(j,1)=te(j)+tt:IF ta(j,1)>ip THEN ta(j,1)=ta(j,1)-ip
190 NEXT j
200 ON js GOSUB 210,220,230,240:GOTO 250
210 sumx=PI/2/tt:suumx=PI/2/tt/2:RETURN
220 sumx=2/tt:suumx=PI/2/tt/2:RETURN
230 sumx=2/tt:suumx=4/tt/2:RETURN
240 sumx=2.1873/tt:suumx=7.513/tt/2:RETURN
250 PRINT:PRINT:INPUT"M=":m2:INPUT"N21=":f21:INPUT"N22=":f22
260 INPUT"N32=":f32:INPUT"N33=":f33:INPUT"p=":pp
270 a=m2/sumx/2:c=m2/sumx/2:d=1.5*m2*suumx/sumx/2:e=pp/sumx:sn=0:sz=ip:uv=0
280 b1=f22/2:b2=f21/2:b3=f32/2:b4=f33/2:nb=60
290 CLS:GOSUB 130:FOR il=2 TO in:x(il)=0:xu(il)=0:NEXT il
300 FOR ij=2 TO in:m1(ij)=x(ij):k1(ij)=xu(ij):NEXT ij
310 FOR jj=2 TO 2*n STEP 2:j=jj/2
320 IF ta(j,2)<ip AND k1(jj)>te(j) AND k1(jj)<ta(j,1) THEN op(jj)=te(j):GOTO 400
330 IF ta(j,2)>ip AND k1(jj)<ta(j,1) THEN op(jj)=(-ip+te(j)):GOTO 400
340 IF k1(jj)>te(j) AND ta(j,2)>ip THEN op(jj)=te(j):GOTO 400
350 IF k1(jj)>ta(j,1) AND ta(j,2)<ip AND k1(jj)<tr(j,1) AND tr(j,2)<ip THEN op(jj)
=te(j):GOTO 410
360 IF k1(jj)>ta(j,1) AND tr(j,2)>ip AND ta(j,2)<ip THEN op(jj)=te(j):GOTO 410
370 IF ta(j,2)>ip AND k1(jj)>ta(j,1) AND k1(jj)<tr(j,1) THEN op(jj)=-tt+ta(j,1):GO
TO 410
380 IF k1(jj)<tr(j,1) AND tr(j,2)>ip AND ta(j,2)<ip THEN op(jj)=(-ip+te(j)):GOTO
410
390 sx(jj)=3:GOTO 420
400 sx(jj)=1:GOTO 420
410 sx(jj)=2
420 NEXT jj
430 FOR i=2 TO in:dc=FIX(i/2)*2:IF dc=i THEN 450
440 IF i=in THEN l1(i)=u/2*b3*(m1(i-1)-m1(i)):GOTO 530
450 l1(i)=u/2*(b3*(m1(i-1)-m1(i))+b4*(m1(i+1)-m1(i))):GOTO 530
460 ON sx(i) GOTO 470,500,520
470 lu=0:ls=1:tb=op(i):nm=m1(i):hu=(lu-nm-tb-sz*sn)/tt
480 GOSUB 340:GOSUB 490:GOTO 530
490 z1=d*S*dS+e*dS*(1-1.3*S):z2=c*dS*dS*(1-k1(i))/2:z3=b1*(m1(i)-m1(i+1))+b2*(m
1(i)-m1(i-1)):z4=1+a*dS/2:l1(i)=(z1+z2-z3)/z4*u/2:RE
TURN
500 lu=tt:ls=-1:tb=op(i):nm=m1(i):hu=(lu-nm-tt-tb-sz*sn)/tt

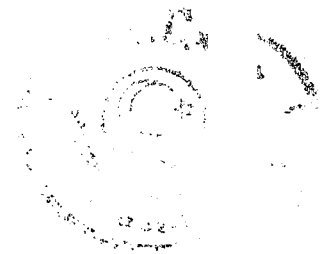
```



```

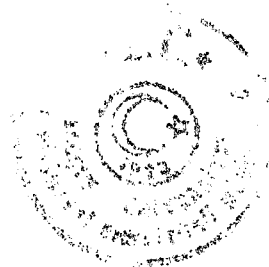
510 GOSUB 940:GOSUB 490:GOTO 530
520 l1(i)=u/2*(b1*(m1(i+1)-m1(i))+b2*(m1(i-1)-m1(i)))
530 m2(i)=x(i)+u/2*(xu(i)+l1(i)/2):k2(i)=xu(i)+l1(i):NEXT i:uu=uu+u/2
540 FOR i=2 TO in:dc=FIX(i/2)*2:IF dc=i THEN 570
550 IF i=in THEN l2(i)=u/2*b3*(m2(i-1)-m2(i)):GOTO 540
550 l2(i)=u/2*(b3*(m2(i-1)-m2(i))+b4*(m2(i+1)-m2(i))):GOTO 540
570 ON sx(i) GOTO 580,610,630
580 iu=0:is=1:tb=op(i):nm=m2(i):hu=(uu-nm-tb-sz*sn)/tt
590 GOSUB 940:GOTO 540
600 z1=d*S*ds+e*dS*(1-1.5*s):z2=c*dS*dss*(1-k2(i))^2:z3=b1*(m2(i)-m2(i+1))+b2*(m2(i)-m2(i-1)):z4=1+a*dS^2:l2(i)=(z1+z2-z3)/z4*u/2:RE
TURN
610 iu=tt:is=-1:tb=op(i):nm=m2(i):hu=(uu-nm-tt-tb-sz*sn)/tt
620 GOSUB 940:GOSUB 600:GOTO 540
630 l2(i)=u/2*(b1*(m2(i+1)-m2(i))+b2*(m2(i-1)-m2(i)))
640 m3(i)=x(i)+u/2*(xu(i)+l2(i)/2):k3(i)=xu(i)+l2(i):NEXT i
650 FOR i=2 TO in:dc=FIX(i/2)*2:IF dc=i THEN 680
660 IF i=in THEN l3(i)=u/2*b3*(m3(i-1)-m3(i)):GOTO 750
670 l3(i)=u/2*(b3*(m3(i-1)-m3(i))+b4*(m3(i+1)-m3(i))):GOTO 750
680 ON sx(i) GOTO 690,720,740
690 iu=0:is=1:tb=op(i):nm=m3(i):hu=(uu-nm-tb-sz*sn)/tt
700 GOSUB 940:GOSUB 710:GOTO 750
710 z1=d*S*ds+e*dS*(1-1.5*s):z2=c*dS*dss*(1-k3(i))^2:z3=b1*(m3(i)-m3(i+1))+b2*(m3(i)-m3(i-1)):z4=1+a*dS^2:l3(i)=(z1+z2-z3)/z4*u/2:RE
TURN
720 iu=tt:is=-1:tb=op(i):nm=m3(i):hu=(uu-nm-tt-tb-sz*sn)/tt
730 GOSUB 940:GOSUB 710:GOTO 750
740 l3(i)=u/2*(b1*(m3(i+1)-m3(i))+b2*(m3(i-1)-m3(i)))
750 m4(i)=x(i)+u*(xu(i)+l3(i)):k4(i)=xu(i)+l3(i)*2:NEXT i:uu=uu+u/2
760 FOR i=2 TO in:dc=FIX(i/2)*2:IF dc=i THEN 790
770 IF i=in THEN l4(i)=u/2*b3*(m4(i-1)-m4(i)):GOTO 860
780 l4(i)=u/2*(b3*(m4(i-1)-m4(i))+b4*(m4(i+1)-m4(i))):GOTO 860
790 ON sx(i) GOTO 800,830,850
800 iu=0:is=1:tb=op(i):nm=m4(i):hu=(uu-nm-tb-sz*sn)/tt
810 GOSUB 940:GOSUB 820:GOTO 860
820 z1=d*S*ds+e*dS*(1-1.5*s):z2=c*dS*dss*(1-k4(i))^2:z3=b1*(m4(i)-m4(i+1))+b2*(m4(i)-m4(i-1)):z4=1+a*dS^2:l4(i)=(z1+z2-z3)/z4*u/2:RE
TURN
830 iu=tt:is=-1:tb=op(i):nm=m4(i):hu=(uu-nm-tt-tb-sz*sn)/tt
840 GOSUB 940:GOSUB 820:GOTO 860
850 l4(i)=u/2*(b1*(m4(i+1)-m4(i))+b2*(m4(i-1)-m4(i)))
860 NEXT i
870 FOR I=2 TO IN:x(i)=x(i)+u*(xu(i)+(l1(i)+l2(i)+l3(i))/3)
880 xu(i)=xu(i)+(l1(i)+2*l2(i)+2*l3(i)+l4(i))/3:NEXT i
890 GOSUB 910:IF uu-x(2)-sz*sn<sz THEN 900 ELSE GOTO 930
900 FOR ik=2 TO 2*n STEP 2:k(ik)=uu-x(ik)-sz*sn:NEXT:GOTO 300
910 j=nb*(uu-uv):FOR i=2 TO 2*n STEP 2:PLOT j,x(i)*5000
920 NEXT I:RETURN
930 INPUT j*:uv=uu:sn=sn+1:CLS:GOSUB 130:GOTO 300
940 ON js GOSUB 950,970,990,1050:LOCATE 1,1:PRINT USING"##.###":js:RETURN
950 ju=hu*PI:s=0.5*(1-is*cos(ju)):ds=is*suumx*SIN(ju):dss=is*suumx*cos(ju)
960 RETURN
970 ju=hu*2*PI:s=is*(hu-1/2*PI*SIN(ju))+iu/tt:ds=is/tt*(1-COS(ju))
980 dss=is*suumx*SIN(ju):RETURN
990 IF uu-x(i)-tb-sz*sn>1.3*tt THEN 1030
1000 IF uu-x(i)-tb-sz*sn>tt THEN 1040

```



```
010 IF (u-x(i)-tb-sz*sn)>0.5*tt THEN 1050
020 s=2*hu02:ds=4/tt*hu:dss=4/tt02:RETURN
030 s=2*(hu02-2*hu+1):ds=4/tt*(hu-1):dss=4/tt02:RETURN
040 s=1-2*hu02:ds=-4/tt*hu:dss=-4/tt02:RETURN
050 s=1-2*(1-hu)02:ds=4/tt*(1-hu):dss=-4/tt02:RETURN
060 s=is*(35*hu04-84*hu05+70*hu06-20*hu07)+iu/tt:ds=is*140/tt*(hu03-3*hu04+3*hu
070 dss=is*420/tt02*(hu02-4*hu03+5*hu04-2*hu05):RETURN
```



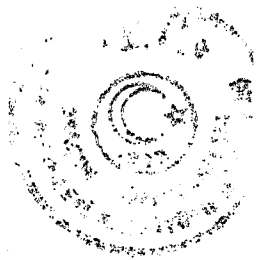


```

10 REM      "      COKKAM2  PROGRAMI      "
20 DIM te(20),tr(20,2),ta(20,2):MODE 1:ORIGIN 0,200:GRAPHICS PEN 2
30 PRINT PRINT"TABLALI KAM TORK CEVABI " :PRINT PRINT"1 - HARMONIK"
40 PRINT"2 - SIKLOIDAL"
50 PRINT"3 - PARABOLIK":PRINT"4 - 4-5-6-7 POLINOM"
60 PRINT PRINT"Seciminiz:":
70 js=INKEY$:IF js="" THEN 70
80 js=VAL(js):IF js<1 OR js>4 THEN PRINT CHR$(7):GOTO 70
90 CLS:PRINT INPUT"Kam acisi=": tt:PRINT
100 tt=tt*PI/180:U=0.012:ip=2*PI:UU=0
110 INPUT"Mildeki kam sayisi=":n:in=2*n+1:PRINT
120 DIM k(2*n),X(in),KU(in),sx(2*n),op(2*n),m1(in),m2(in),m3(in),m4(in),k1(in),k
2(in),k3(in),k4(in),l1(in),l2(in),l3(in),l4(in):GOTO
150
130 GRAPHICS PEN 3:PLOT 0,0:DRAW 640,0:FOR i=0 TO 20:PLOT i*20,-180:DRAW i*20,18
0 NEXT
140 FOR i=-9 TO 9:PLOT 0,i*20:DRAW 400,i*20:NEXT:GRAPHICS PEN 2:RETURN
150 FOR j=1 TO n:PRINT j:INPUT". kamın başlangıç acisi=":te(j)
160 te(j)=te(j)*PI/180:tr(j,2)=te(j)+2*tt:tr(j,1)=te(j)+2*tt
170 IF tr(j,1)>ip THEN tr(j,1)=tr(j,1)-ip
180 ta(j,2)=te(j)+tt:ta(j,1)=te(j)+tt:IF ta(j,1)>ip THEN ta(j,1)=ta(j,1)-ip
190 NEXT j
200 ON js GOSUB 210,220,230,240:GOTO 250
210 sumx=PI/2/tt:suumx=PI/2/tt/2:RETURN
220 sumx=2/tt:suumx=PI/2/tt/2:RETURN
230 sumx=2/tt:suumx=4/tt/2:RETURN
240 sumx=2.1875/tt:suumx=7.513/tt/2:RETURN
250 PRINT PRINT:INPUT"N=":m2:INPUT"N21=":f21:INPUT"N22=":f22
260 INPUT"N32=":f32:INPUT"N33=":f33:INPUT"p=":pp:INPUT"ksi=":rrn
270 a=m2/sumx/2:c=m2/sumx/2:d=1.5*m2*suumx/sumx/2:e=pp/sumx:sn=0:sz=ip:uv=0
280 b1=f22/2:b2=f21/2:b3=f32/2:b4=f33/2:nb=60:pu=0.3*pp
290 CLS:GOSUB 130:FOR il=2 TO in:x(il)=0:yu(il)=0:NEXT il
300 FOR ij=2 TO in:m1(ij)=x(ij):k1(ij)=yu(ij):NEXT ij
310 FOR jj=2 TO 2*n STEP 2:j=jj/2
320 IF ta(j,2)<ip AND k(jj)>te(j) AND k(jj)<ta(j,1) THEN op(jj)=te(j):GOTO 400
330 IF ta(j,2)>ip AND k(jj)<ta(j,1) THEN op(jj)=(-ip+te(j)):GOTO 400
340 IF k(jj)>te(j) AND ta(j,2)>ip THEN op(jj)=te(j):GOTO 400
350 IF k(jj)>ta(j,1) AND ta(j,2)<ip AND k(jj)<tr(j,1) AND tr(j,2)<ip THEN op(jj)
=te(j):GOTO 410
360 IF k(jj)>ta(j,1) AND tr(j,2)>ip AND ta(j,2)<ip THEN op(jj)=te(j):GOTO 410
370 IF ta(j,2)>ip AND k(jj)>ta(j,1) AND k(jj)<tr(j,1) THEN op(jj)=-tt+ta(j,1):G
O
410
380 IF k(jj)<tr(j,1) AND tr(j,2)>ip AND ta(j,2)<ip THEN op(jj)=(-ip+te(j)):GOTO
410
390 sx(jj)=3:GOTO 420
400 sx(jj)=1:GOTO 420
410 sx(jj)=2
420 NEXT jj
430 FOR i=2 TO in:dc=FIX(1/2)*2:IF dc=i THEN 460
440 IF i=in THEN l1(i)=u/2*b3*(m1(i-1)-m1(i)):GOTO 530
450 l1(i)=u/2*(b3*(m1(i-1)-m1(i))+b4*(m1(i+1)-m1(i))):GOTO 530
460 ON sx(i) GOTO 470,500,520
470 iu=0:is=1:tb=op(i):nm=m1(i):hu=(uu-nm-tb-sz*sn)/tt
480 GOSUB 940:GOSUB 490:GOTO 530
490 fi=ds+0.1*sn:zi=d*s*fi+e*fi*(i-1.5*s):z2=c*fi*dss*(i-k1(i))/2:z3=b1*(m1(i)
-m1(i+1))+b2*(m1(i)-m1(i-1)):z4=1+a*ds*fi:l1(i)=(zi+
z2-z3)/z4*u/2:RETURN
500 iu=tt:is=-1:tb=op(i):nm=m1(i):hu=(uu-nm-tt-tb-sz*sn)/tt

```





```

510 GOSUB 940 GOSUB 490 GOTO 530
520 l1(i)=u/2*(pu+b1*(m1(i+1)-m1(i))+b2*(m1(i-1)-m1(i)))
530 m2(i)=x(i)+u/2*(xu(i)+l1(i)/2):k2(i)=xu(i)+l1(i):NEXT i:uu=uu+u/2
540 FOR i=2 TO in:dc=FIX(i/2)*2:IF dc=i THEN 570
550 IF i=in THEN l2(i)=u/2*b3*(m2(i-1)-m2(i)):GOTO 640
560 l2(i)=u/2*(b3*(m2(i-1)-m2(i))+b4*(m2(i+1)-m2(i))):GOTO 640
570 ON sx(i) GOTO 580,610,630
580 iu=0:is=1:tb=op(i):nm=m2(i):hu=(uu-nm-tb-sz*sn)/tb
590 GOSUB 940 GOSUB 600 GOTO 640
600 fi=ds+0.1#s+rn:zi=d*S*fi+e*fi*(1-1.5*s):z2=c*fi*dss*(1-k2(i))/2:z3=b1*(m2(i)-m2(i+1))+b2*(m2(i)-m2(i-1)):z4=1+a*ds*fi:l2(i)=(zi+z2-z3)/z4*u/2:RETURN
610 iu=tb:is=-1:tb=op(i):nm=m2(i):hu=(uu-nm-tb-tb-sz*sn)/tb
620 GOSUB 940 GOSUB 600 GOTO 640
630 l2(i)=u/2*(pu+b1*(m2(i+1)-m2(i))+b2*(m2(i-1)-m2(i)))
640 m3(i)=x(i)+u/2*(xu(i)+l1(i)/2):k3(i)=xu(i)+l2(i):NEXT i
650 FOR i=2 TO in:dc=FIX(i/2)*2:IF dc=i THEN 680
660 IF i=in THEN l3(i)=u/2*b3*(m3(i-1)-m3(i)):GOTO 750
670 l3(i)=u/2*(b3*(m3(i-1)-m3(i))+b4*(m3(i+1)-m3(i))):GOTO 750
680 ON sx(i) GOTO 690,720,740
690 iu=0:is=1:tb=op(i):nm=m3(i):hu=(uu-nm-tb-sz*sn)/tb
700 GOSUB 940 GOSUB 710 GOTO 750
710 fi=ds+0.1#s+rn:zi=d*S*fi+e*fi*(1-1.5*s):z2=c*fi*dss*(1-k3(i))/2:z3=b1*(m3(i)-m3(i+1))+b2*(m3(i)-m3(i-1)):z4=1+a*ds*fi:l3(i)=(zi+z2-z3)/z4*u/2:RETURN
720 iu=tb:is=-1:tb=op(i):nm=m3(i):hu=(uu-nm-tb-tb-sz*sn)/tb
730 GOSUB 940 GOSUB 710 GOTO 750
740 l3(i)=u/2*(pu+b1*(m3(i+1)-m3(i))+b2*(m3(i-1)-m3(i)))
750 m4(i)=x(i)+u*(xu(i)+l3(i)):k4(i)=xu(i)+l3(i)*2:NEXT i:uu=uu+u/2
760 FOR i=2 TO in:dc=FIX(i/2)*2:IF dc=i THEN 790
770 IF i=in THEN l4(i)=u/2*b3*(m4(i-1)-m4(i)):GOTO 850
780 l4(i)=u/2*(b3*(m4(i-1)-m4(i))+b4*(m4(i+1)-m4(i))):GOTO 850
790 ON sx(i) GOTO 800,830,850
800 iu=0:is=1:tb=op(i):nm=m4(i):hu=(uu-nm-tb-sz*sn)/tb
810 GOSUB 940 GOSUB 820 GOTO 850
820 fi=ds+0.1#s+rn:zi=d*S*fi+e*fi*(1-1.5*s):z2=c*fi*dss*(1-k4(i))/2:z3=b1*(m4(i)-m4(i+1))+b2*(m4(i)-m4(i-1)):z4=1+a*ds*fi:l4(i)=(zi+z2-z3)/z4*u/2:RETURN
830 iu=tb:is=-1:tb=op(i):nm=m4(i):hu=(uu-nm-tb-tb-sz*sn)/tb
840 GOSUB 940 GOSUB 820 GOTO 850
850 l4(i)=u/2*(pu+b1*(m4(i+1)-m4(i))+b2*(m4(i-1)-m4(i)))
860 NEXT i
870 FOR i=2 TO in:x(i)=x(i)+u*(xu(i)+(l1(i)+l2(i)+l3(i))/3)
880 xu(i)=xu(i)+(l1(i)+2*l2(i)+2*l3(i)+l4(i))/3:NEXT i
890 GOSUB 910:IF uu-x(i)-sz*sn<sz THEN 900 ELSE GOTO 930
900 FOR ik=2 TO 2*n STEP 2:k(ik)=uu-x(ik)-sz*sn:NEXT ik
910 j=nb*(uu-uv) FOR i=2 TO 4 STEP 2:PLOT j,x(i)*4000:IF x(i)*180/PI>=0.4 THEN PLOT 0,x(i)*4000
920 NEXT i:RETURN
930 uv=uu:sn=sn+1:INPUT g$:CLS:GOSUB 130:GOTO 300
940 ON js GOSUB 950,970,990,1060:LOCATE 1,1:PRINT USING"###.###"js:RETURN
950 ju=hu*PI:s=0.5*(1-is*COS(ju)):ds=is*sumx*SIN(ju)
960 dss=is*sumx*COS(ju):RETURN
970 ju=hu*2*PI:s=is*(hu-1/2*PI*SIN(ju))+iu/tb:ds=is/tb*(1-COS(ju))
980 dss=is*sumx*SIN(ju):RETURN
990 IF uu-x(i)-tb-sz*sn>1.5*tt THEN 1030
1000 IF uu-x(i)-tb-sz*sn>tt THEN 1040

```



```
1010 IF uu-x(i)-tb-sz*sn>0.5*tt THEN 1050
1020 s=2*huö2:ds=4/tt*hu:dss=4/ttö2:RETURN
1030 s=2*(huö2-2*hu+1):ds=4/tt*(hu-1):dss=4/ttö2:RETURN
1040 s=1-2*huö2:ds=-4/tt*hu:dss=-4/ttö2:RETURN
1050 s=1-2*(1-hu)ö2:ds=4/tt*(1-hu):dss=-4/ttö2:RETURN
1060 s=is*(35*huö4-64*huö5+70*huö6-20*huö7)+iu/tt:ds=is*140/tt*(huö3-3*huö4+3*huö5-huö6)
1070 dss=is*420/ttö2*(huö3-4*huö3+5*huö4-2*huö5):RETURN
```



Y. G.  
Tükseköğretim Kurulu  
Bakım Hizmetleri Merkezi



## ÖZGEÇMİŞ

Ziya Şaka 1960 yılında Konya'ya bağlı Altınekin kasabasında doğdu. İlk öğretimini burada tamamladı. 1976 yılında, Konya Gazi Lisesinden mezun olarak, İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesinin Genel Makina Bölümüne girdi. 1981 yılında iyi derece ile bitirdiği buradaki öğrenimini takiben aynı fakültede yüksek lisans öğrenimine başladı. 1983 yılında Makina Yüksek Mühendisi olarak mezun olduktan sonra aynı Üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsünde doktora öğrenimine başladı. Burada bir sömestre öğrenim gördükten sonra Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne nakil yaptırdı.

1982 Temmuzunda o zaman Konya D.M.M. Akademisi olan şimdiki Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi'nin Makina Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Halen aynı yerde Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

T. C.  
Yükseköğretim Kurulu  
Dokümantasyon Merkezi