



# ***EEM435 Elektrik Tahrik Sistemleri*** ***- Sunum 1***

**Doç. Dr. Furkan Akar**

*Düzce Üniversitesi, Müh. Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği*

# Dersin Notlandırması ve Kaynaklar



- Vize: %40
- Final %60

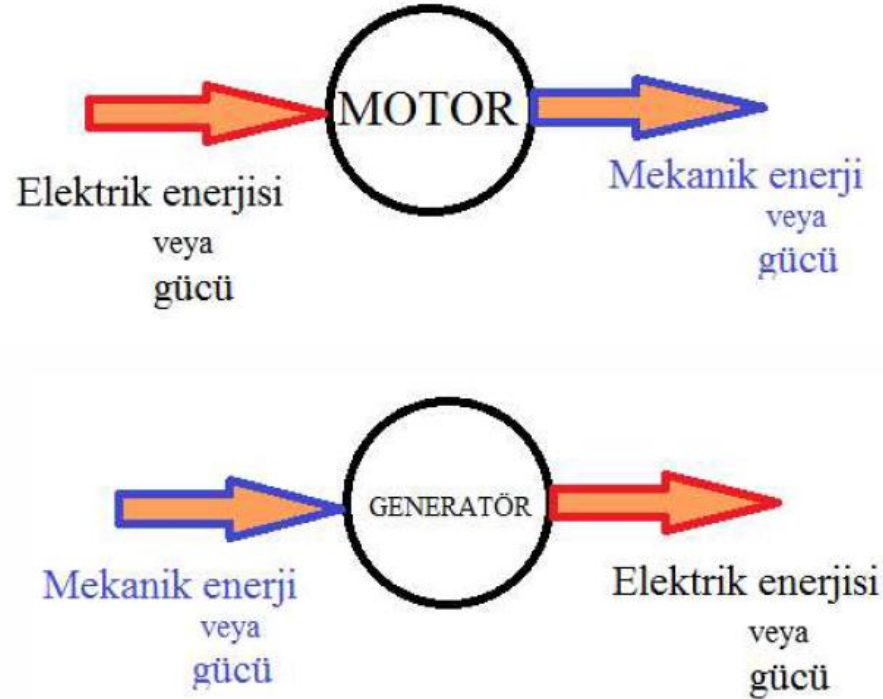
## KAYNAKLAR

- Ders Notları
- INDUSTRIAL MOTION CONTROL, Hakan GÜROCAK

# Makine İlkeleri

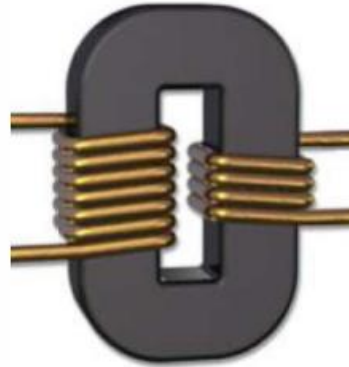


Elektrik Makinaları elektrik enerjisini mekanik enerjiye veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır.





Transformatorlar, alternatif akımda gerilim veya akım seviyesini yükseltmek veya düşürmek için kullanılırlar.

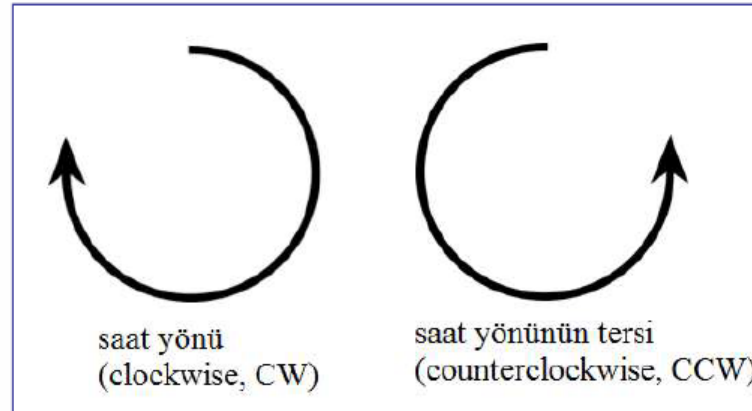


Transformatorlar, manyetik devre yapısı bakımından motor ve generatörlere benzediklerinden bu makinalar ile birlikte değerlendirilmektedirler.



## 1.1. Dairesel Hareketler

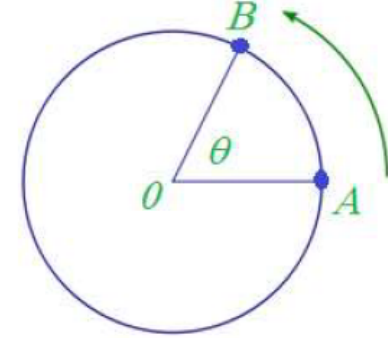
- Elektrik makinalarının büyük çoğunluğu bir eksen etrafında dönerler.
- Makinanın eksenine mil denir.
- Makinaların mil dönüş yönü saat yönü (CW) veya saat yönünün tersi (CCW) olarak ifade edilir.





## 1.1.1 Açısal Konum (Pozisyon) $\theta$

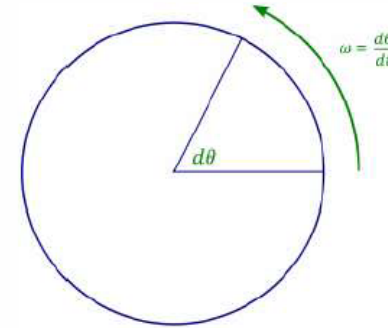
Bir nesnenin açısal konumu, nesnenin döndürülme açısıdır ve keyfi bir referans noktasına göre ölçülür. Açısal konum genellikle radyan veya derece olarak ölçülür,  $\theta$  sembolü ile gösterilir.



## 1.1.2 Açısal Hız $\omega$

Açısal hız (veya devir sayısı) açısal konumun zamana göre değişim oranıdır.

Dönüş yönü saat yönünün aksine doğru ise, hareket pozitif olarak kabul edilmektedir.



$$\text{Açısal hız } \omega = \frac{d\theta}{dt}$$

$$\text{Doğrusal hız } v = \frac{dr}{dt}$$



Genel elektrik makinalarında **hız** terimi çok **sık** kullanılır.

Hız radyan/saniye (rad/s) veya devir/dakika (d/d) olarak verilir.

## Hızla ilgili semboller:

$\omega_m$  açısal hız (radyan/saniye, rad/s)

$f_m$  açısal hız (devir/saniye, d/s)

$n_m$  açısal hız (devir/dakika, d/d)

Burada alt indis  $m$  mekanik büyüklükleri temsil etmektedir.

## Mil (şaft) hızı ve açısal hız arasındaki ilişkiler:

$$n_m = 60 f_m \quad f_m = \frac{\omega_m}{2\pi} \quad \omega_m = n_m \frac{2\pi}{60}$$



## 1.1.3 Açısal Hızlanma (İvme) $\alpha$

- Açısal hızlanma, zamana göre açısal hızdaki değişim oranıdır.
- Açısal hızlanma sayısal olarak artıyorsa pozitif kabul edilir ve bir hat üzerindeki hızlanmanın dairesel (döner) benzeridir.

- Doğrusal hızlanma  $a = \frac{dv}{dt}$

- Açısal hızlanma  $\alpha = \frac{d\omega}{dt}$

Açısal hızın birimi rad/s ise açısal hızlanmanın birimi rad/s<sup>2</sup> olur.



## 1.1.4 Moment $T$

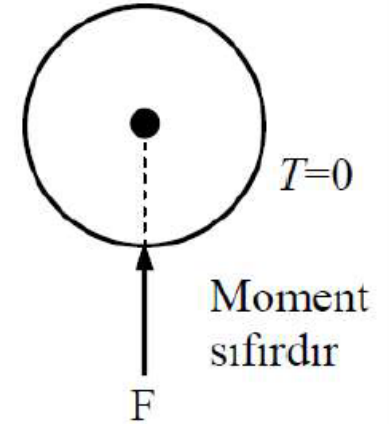
- Doğrusal bir hareket halindeki bir nesneye uygulanan kuvvet nesnenin hızını değiştirmesine neden olur.
- Nesne üzerinde net bir kuvvetin bulunmaması nesnenin hızını değiştirmez.
- Nesne üzerine uygulanacak kuvvet büyük olursa, nesne hızında da büyük artış olur.
- Dönme hareketinde de benzer durumlar vardır. Bir nesne dönerken üzerine bir moment uygulanmazsa, açısal hızı sabit kalır, değişmez.

# Makine İlkeleri



- Dönen nesne üzerine büyük bir moment (döndürme kuvveti) uygulanırsa, nesnenin açısal hızı da büyük bir oranda artar.
- Bir nesne üzerindeki **döndürme kuvvetine moment** veya **tork** denir.

Eksenini etrafında serbestçe dönebilen bir silindire ekseninden geçecek dik bir kuvvet uygulanırsa, silindir dönmeyecektir.



# Makine İlkeleri



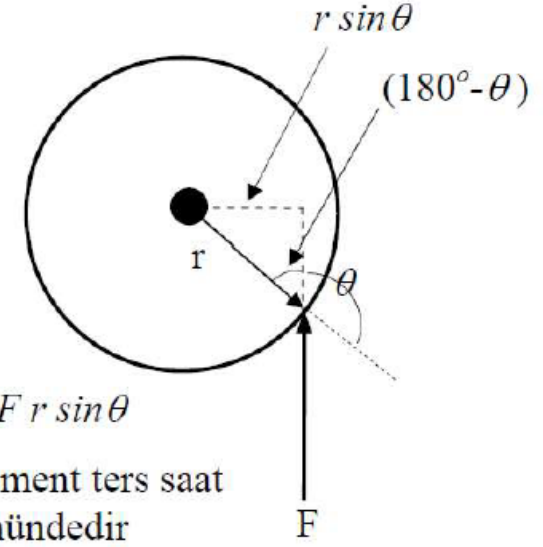
Kuvvet, silindir ekseninden kayık olarak silindirin sağ tarafından uygulanırsa, silindir ters saat yönünde dönecektir.

*T = (uygulanan kuvvet)(dikine uzaklık)*

$$T = (F)(r \sin \theta) \quad T = r F \sin \theta$$

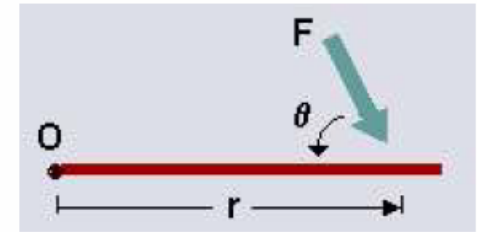
Burada  $\theta$  sembolü, F ve r vektörleri arasındaki açıyı temsil etmektedir.

Uluslararası standard birimine (SI) göre momentin birimi newton-metredir (Nm).



**Silindir üzerindeki moment veya döndürme kuvveti:**

- (1) Uygulanan kuvvetin genliğine
- (2) Dönme eksenini ile kuvvet hattı arasındaki mesafeye bağlıdır.





## 1.1.5 Newton Kanunu

Düz bir hat boyunca hareket eden nesne için Newton Kanunu, nesneye uygulanan kuvvet ve sonucunda meydana gelen hareket arasındaki ilişkiyi tanımlar.

$$F = ma$$

veya hızlanma

$$a = \frac{F}{m}$$

- $F$  nesneye uygulanan net kuvvet (N)
- $m$  nesnenin kütlesi (kg)
- $a$  oluşan hızlanma ( $m/s^2$ )

Benzer bir denklem, nesneye uygulanan moment ile sonucunda meydana gelen açısal hızlanma arasındaki ilişkiyi tanımlar. Bu ilişkiye dönme hareketi için Newton Kanunu denir :

$$T = J\alpha$$

- $T$  nesneye uygulanan moment (Nm)
- $J$  atalet momenti ( $kg.m^2$ )
- $\alpha$  oluşan hızlanma ( $m/s^2$ )



## 1.1.6 İş $W$

Doğrusal bir hareket için iş, bir mesafe boyunca uygulanan bir kuvvet olarak tanımlanır. Matematiksel olarak iş ifadesi:

$$W = \int F dr$$

Burada, uygulanan kuvvet hareket ile aynı yöndedir. Bu durumda iş denklemi:

$$W = F r$$

SI sisteminde işin birimi joule'dur.

Döner bir harekette ise iş, bir açı boyunca uygulanan momenttir.

$$W = \int T d\theta$$

Eğer uygulanan moment sabit ise iş:

$$W = T\theta$$



## 1.1.7 Güç $P$

Güç, birim zamanda yapılan iştir ve denklemi:

$$P = \frac{dW}{dt}$$

Güç genellikle joule/saniye (watt) veya beygir gücü olarak ölçülür.

Sabit kuvvete göre  
doğrusal hareket için güç:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt}(F r) = F \frac{dr}{dt}$$

$$P = F v$$

Sabit momente göre  
döner hareket için güç:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt}(T \theta) = T \frac{d\theta}{dt}$$

$$P = T \omega$$



Elektrik makinaları konusunda yapılan çalışmalarda

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt}(T\theta) = T \frac{d\theta}{dt}$$

$$P = T\omega$$

denklemini çok önemlidir. Çünkü bu denklem, motor veya generatör miline bağlı mekanik gücü tanımlar.

Güç watt, moment newton-metre, hız radyan/saniye olarak ölçülürse/verilirse, bu denklem ile güç, moment ve hız arasındaki ilişki doğru olarak tanımlanmış olur.



## PROBLEMLER

1. 3000 d/d ile dönen bir motorun açısal hızını rad/s olarak bulunuz?

**ÇÖZÜM:**  $f_m = n_m/60 = 3000/60 = 50$  d/s

$$\omega_m = 2\pi f_m = 2\pi 50 = 314.16 \text{ rad/s}$$

2. Bir motor 60 Nm yükü 1800 d/d hızla dönmektedir. Motor gücünü watt ve beygir gücü olarak bulunuz.

**ÇÖZÜM:**

$$P_1 = T \omega_m = T(n_m \cdot 2\pi/60) = 60(1800 \cdot 2\pi/60) = 11309.733 \text{ W}$$

$$P_2 = P_1/746 = 15.16 \text{ BG}$$



3.  $2\text{kgm}^2$  atalet momentine sahip volan başlangıçta durmaktadır. Volana aniden  $5\text{Nm}$  değerinde bir moment saat ibresinin tersi yönde uygulanırsa,  $5\text{s}$  sonra volanın hızı ne olur?

**ÇÖZÜM:**

$$\omega = \alpha t = \left( \frac{T}{J} \right) t$$

$$\omega = \frac{5 \text{ N} \cdot \text{m}}{2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2} (5 \text{ s}) = 12.5 \text{ rad/s}$$

$$n = (12.5 \text{ rad/s}) \left( \frac{1 \text{ devir}}{2\pi \text{ rad}} \right) \left( \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ dakika}} \right) = 119.4 \text{ d/d}$$



# ***EEM435 Elektrik Tahrik Sistemleri*** ***- Sunum 2***

**Doç. Dr. Furkan Akar**

*Düzce Üniversitesi, Müh. Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği*



- Hareket kontrolü, paketleme, montaj, tekstil, kağıt, baskı, gıda işleme, ağaç ürünleri, makine, elektronik ve yarı iletken üretimi dahil olmak üzere her türlü endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır.
- Hareket kontrolü, bir yükün mekanik hareketlerini kontrol etmeyi içerir.
  - Örneğin, bir mürekkep püskürtmeli yazıcının kartuşu bir yükür,
  - Kağıt dönüştürme makinesinde makineye yüklenen büyük ana kağıt rulosu bir yükür.



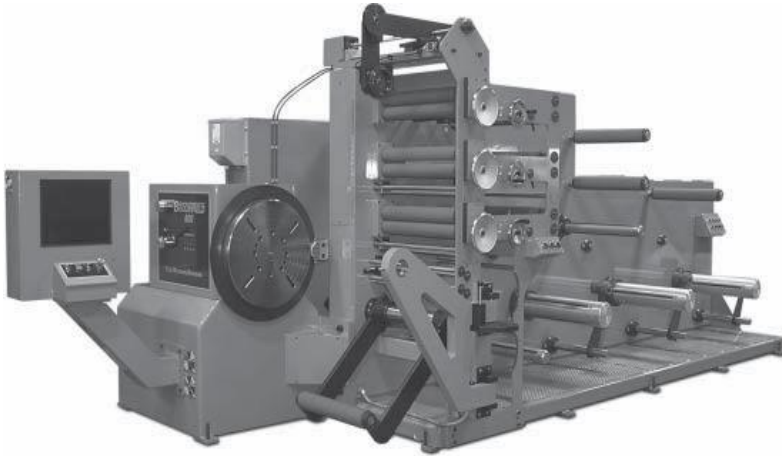
- Örneğin kağıt dönüştürme makinesinde, farklı motorlar makinenin mekanik bileşenlerinin bir bölümünü hareket ettirir.
- Motorla birlikte makinanın eksen adı verilen segmenti de hareket eder.
- Bir yazıcıda, yazıcı kartuşunun kayma hareketinde yer alan mekanik bileşenler ve bunları çalıştıran motor topluca makinenin bir eksenini oluşturur.
- Yazıcının diğer bir eksenini, tüm mekanik bileşenlerden ve yazıcıya kağıt besleyen motordan oluşur.
- Kağıt dönüştürme makinesi olması durumunda, kağıt rulosunu tutan mandrel, kasnaklar ve onu bağlayan kayışlar bir eksen oluşturur.



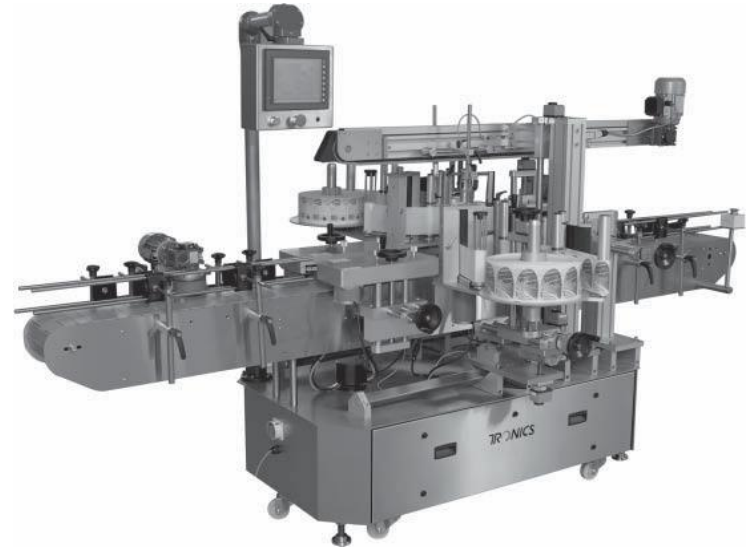
- **Tipik bir hareket kontrol sistemi, bir eksenin konumunu, hızını, torkunu ve ivmesini yönetir.**
- Genellikle makine, konumu ve/veya hızı senkronize bir şekilde kontrol edilmesi gereken birden fazla eksenenden oluşur.
- Örneğin, bir CNC makinesinin tablasının X eksenini ve Y ekseninin koordineli bir şekilde kontrol edilmesi gerekir, böylece makine iş parçasında yuvarlak bir köşe kesebilir.



- Çoklu eksenlerin karmaşık hareketlerini hassas bir şekilde kontrol etme ve koordine etme yeteneği, endüstriyel makinelerin tasarlanmasını sağlar.



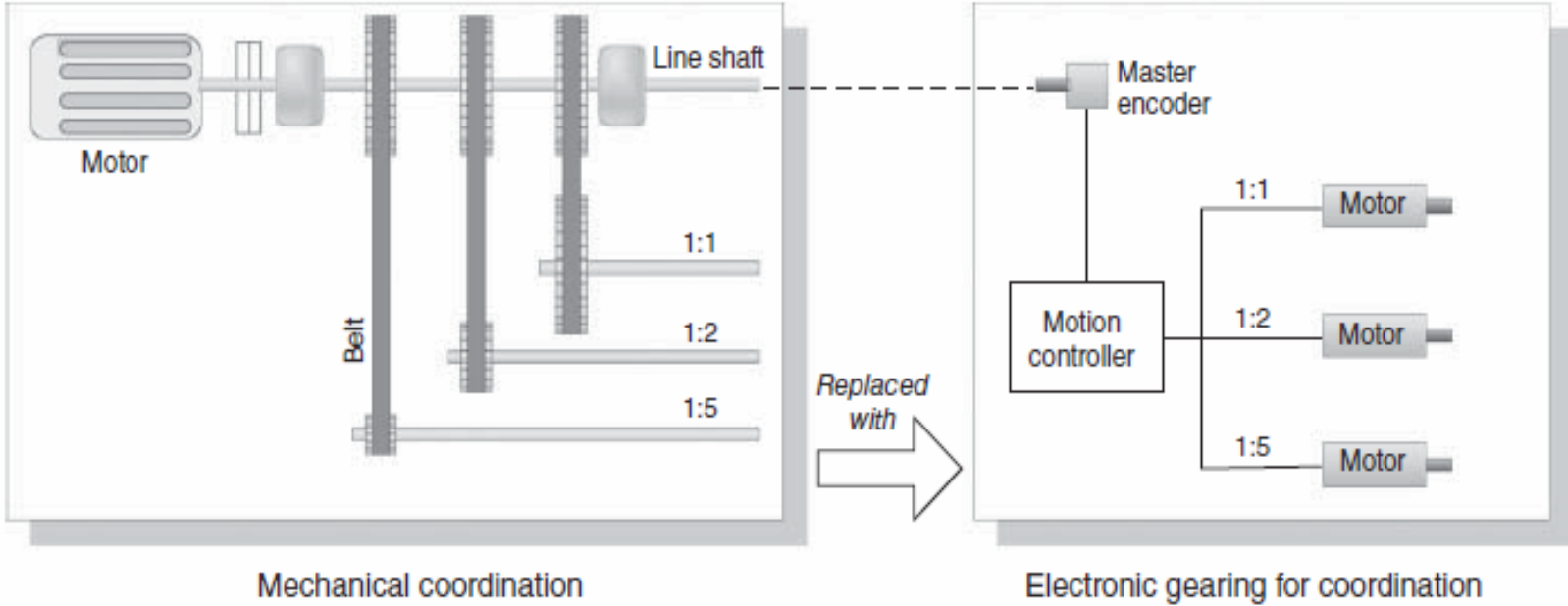
Folyo ve tel sarma makinesi



Basınca duyarlı etiketleme makinesi



- Programlanabilir hareket kontrolörlerinden önce koordinasyon mekanik yollarla sağlanıyordu.
- Büyük bir elektrik motoruna veya sabit hızda çalışan bir motora merkezi bir hat şaftı bağlanırdı.
- Bu hareket kaynağı daha sonra makinenin tüm eksenlerini kasnaklar, kayışlar, dişliler, kamlar ve bağlantılar aracılığıyla hat miline bağlayarak tahrik etmek için kullanılırdı.
- Ayrı eksenleri başlatmak veya durdurmak için debriyajlar ve frenler kullanılırdı.
- Hat mili ile tekil eksenler arasındaki dişli oranları, her eksenin hızını belirlerdi.

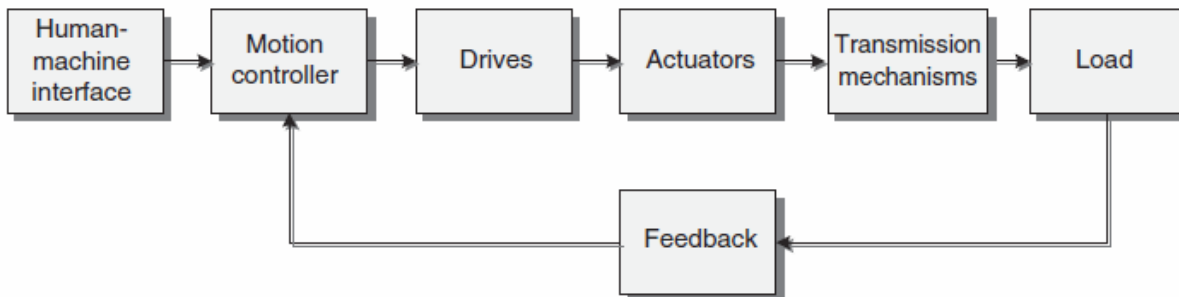


Çok eksenli koordinasyon

# Hareket Kontrol Sisteminin Bileşenleri



- Çok eksenli koordineli hareket için gereken karmaşık, yüksek hızlı, yüksek hassasiyetli kontrol, hareket kontrolörü adı verilen özel bir bilgisayar kullanılarak gerçekleştirilir.
- Bir hareket kontrol sisteminin bileşenleri:
  - İnsan-makine arayüzü (IMA), Hareket kontrolörü, Sürücüler, Aktüatörler (tahrik edici, harekete geçirici), Transmisyon mekanizmaları, Geri bildirim.



# Hareket Kontrol Sisteminin Bileşenleri



- **İnsan-makine arayüzü(İMA):** Hareket kontrolcüsü ile iletişim kurmak için kullanılır. İki ana fonksiyona hizmet eder:
  - Hareket kontrolörü tarafından kontrol edilen makineyi çalıştırma
  - Hareket kontrol cihazını programlama.
- Pilot ışıkları, basmalı düğmeleri, göstergeleri, dijital okumaları ve analog göstergeleri olan aşağıda gösterilen kontrol panelleri, makineyi çalıştırma amacına hizmet eden yaygın donanım tabanlı İMA'lardır.



# Hareket Kontrol Sisteminin Bileşenleri



- **Hareket Kontrolörü:** Sistemin beyni olup tüm eksenler için hareket profilleri oluşturur, G/Ç'yi izler ve geri besleme döngülerini kapatır.
- Her bir eksen motorundan geri bildirim olarak oluşturulan profil ile bir eksenin gerçek konumu veya hızını karşılaştırır ve sürücüye gönderilen düzeltme komutları üretir.
- Hareket kontrolörleri genelde iki çeşit form faktörüne sahiptir:
  - Entegre form faktörü (hareket kontrolörü veya sürücü): Bilgisayarı, eksenler için tahrik elektroniklerini ve makine G/Ç'sini tek bir ünite de birleştirir.
  - Modüler form faktörü: Bilgisayar, sürücüler ve makine G/Ç'si, bir tür iletişim bağlantısı aracılığıyla birbirine bağlı ayrı birimlerdir. Bu durumda sadece bilgisayara hareket kontrolörü denir.



Entegre form faktörü



Modüler form faktörü, motorlar ve sürücüler, kontrolör

# Hareket Kontrol Sisteminin Bileşenleri



Eksiksiz bir **hareket kontrolörü** aşağıdakilerden oluşur:

- **Bilgisayar:** Kullanıcı programlarının yorumlanması, yörünge oluşturma, servo döngülerinin kapatılması, sürücüler (amplifikatörler) için komut oluşturma, eksen limitlerini, güvenlik kilitlemelerini izleme, aşırı takip (konum) hatası gibi kesintileri ve hataları işleme gibi işlemleri yürütür.
- **Her eksen için G/Ç:** Motor güç çıkışı, amplifikatörlere komut çıkışı için Servo G/Ç, motordan veya diğer harici sensörlerden gelen geri besleme sinyalleri için giriş terminalleri, eksen sınırları, hedef arama sinyalleri ve kayıt gibi giriş çıkış sinyalleri ile ilgilenir.
- **Makine G/Ç:** Operatör düğmeleri ve yakınlık sensörleri gibi çeşitli sensörler için dijital giriş terminalleri, harici cihazları sürmek için dijital çıkış terminalleri (genellikle röleler aracılığıyla), basınç, kuvvet gibi analog sensörler için analog girişler (genellikle isteğe bağlı) ve analog cihazları sürmek için analog çıkışlar (genellikle isteğe bağlıdır) ile ilgilenir.
- **İletişim:** Çeşitli haberleşme protokolleri kullanan diğer çevresel cihazlar, ana bilgisayar ve/veya tesisin denetim sistemi ile ağ iletişimi, USB veya seri bağlantı noktası iletişimleriyle IMA ile haberleşme ile ilginir.

# Hareket Kontrol Sisteminin Bileşenleri



- **Sürücüler:** Kontrolör tarafından üretilen komut sinyallerini bir motoru çalıştırmak için gerekli olan yüksek güçlü voltaj ve akım seviyelerine yükseltir.
- Sürülecek motor tipine uygun olarak seçilmelidir.
- Motor geri beslemesini ele almaları ve yalnızca akımı değil, aynı zamanda **hız ve konum döngülerini** de kapatmaları beklenir.



Dijital servo sürücü



AC sürücü

# Hareket Kontrol Sisteminin Bileşenleri



- **Aktüatörler:** Bir yükü hareket ettirmek için enerji sağlayan cihazlardır. Hareket kontrol sistemleri, hidrolik, pnömatik veya elektromekanik (motor) teknolojiler kullanılarak oluşturulabilir. Bir hareket kontrol uygulaması için bir makine tasarlandığında, motorlar makinenin düzgün çalışması için dikkatlice seçilmelidir.



AC servo motorlar



AC endüksiyon motoru

# Hareket Kontrol Sisteminin Bileşenleri



- **Transmisyon (Aktarma) Mekanizmaları:** Yükü, bir ekseninde motora bağlamak için bir aktarma mekanizması kullanılır. Hareket profili gereksinimlerinin karşılanmasına yardımcı olur. Bir yük, bir aktarma mekanizması aracılığıyla bir motora bağlandığında, yük ataleti ve torku, mekanizma aracılığıyla motora yansıtılır.



Servo motorlar için sıralı redüktör (dişli takımı)



AC endüksiyon motorları için dik açılı redüktör

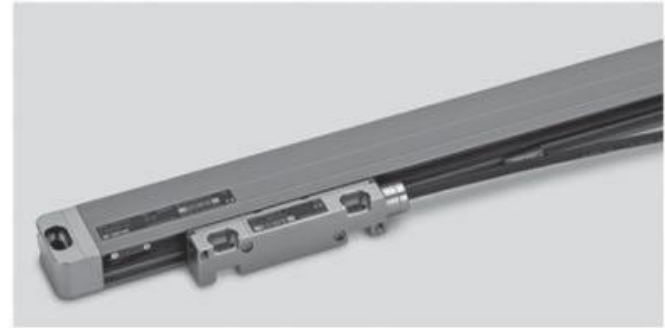
# Hareket Kontrol Sisteminin Bileşenleri



- **Geribildirim:** Geri besleme cihazları, yükün konumunu veya hızını ölçmek için kullanılır. Ayrıca sürücü ve kontrolör, motorun her fazına ne kadar akım uygulanması gerektiğini belirlemek için geri besleme kullanır. En yaygın geri besleme cihazları (resolvers) çözücüler, takometreler ve kodlayıcılardır (encoders).



Döner kodlayıcı



Doğrusal kodlayıcı

# Hareket Kontrol Sisteminin Bileşenleri



- Yakınlık anahtarları, limit anahtarları veya fotoelektrik sensörler gibi algılama sensörlerinden kontrolöre farklı türde bir geri bildirim sağlanır.
- Bu cihazlar bir nesnenin varlığını veya yokluğunu algılar.
- Örneğin, aşağıdaki gibi bir fotoelektrik sensör, bir ürünün bir konveyöre gelişini algılayabilir ve hareket kontrol cihazına konveyörü çalıştırmaya başlaması için sinyal verebilir.



Fotoelektrik sensör

# HAREKET PROFİLİ



- Hareket eden bir nesne bir yörüngeyi takip eder.
- Otomatik bir makinede hareket, düz bir çizgi boyunca hareket eden tek bir eksen içerebilir.
- Bir CNC freze makinesinin kesici takımının dairesel bir yol boyunca hareket ettirilmesi gibi daha karmaşık durumlarda, çoklu eksenlerin koordineli hareketi gereklidir.
- Makinenin bir ekseninin “A” noktasından “B” noktasına hareket etmesi gerektiğinde, bu noktaları birleştiren bir yörünge oluşturulmalıdır.
- Hareket kontrolünde, yörüngeye **hareket profili** de denir.

# HAREKET PROFİLİ



- Hareket profili, eksenin "A" noktasından sabit bir çalışma hızına düzgün hızlanmasını sağlamalıdır.
- Bir süre bu hızda hareket ettikten sonra eksenin "B" noktasında durabilmesi için yumuşak bir şekilde yavaşlaması gerekir.
- Hareket kontrolörü, her motorun servo kontrol sistemi için hız ve konum komutları oluşturmak için düzenli aralıklarla hareket profili oluşturur.
- Her servo kontrol sistemi daha sonra eksenini istenen profil boyunca hareket ettirmek için motor sinyallerini düzenler.



- Kinematik, hareketin incelenmesidir.
- Zaman, konum, hız ve ivme arasındaki ilişkileri yönetir.
- Bir makinenin kinematiğini incelemek, yalnızca hareket profili hesaplamaları için değil, aynı zamanda makinenin tasarımı sırasında eksenler için doğru motorları seçmek için de gereklidir.
- Bir eksen “A” noktasından “B” noktasına hareket ederken, yörünge boyunca konumu,  $s(t)$ , zamanın bir fonksiyonudur.



- Hız,  $v(t)$ , belirli bir zaman aralığında  $s(t)$  konumunun değişimi olarak tanımlanır.

$$v(t) = \frac{ds}{dt}$$

- Benzer şekilde, ivme,  $a(t)$ , belirli bir zaman aralığında  $v(t)$  hızındaki değişimdir:

$$a(t) = \frac{dv}{dt}$$



$$v(t) = \frac{ds}{dt}$$

$$a(t) = \frac{dv}{dt}$$



$$s = \int v(t) dt$$

$$v = \int a(t) dt$$

- Bir fonksiyonun integralinin, fonksiyonun eğrisi altındaki sonsuz küçük elemanların toplamı olduğunu hatırlayalım.
  - Yani, t zamanındaki konum, hız eğrisinin altındaki alana eşittir.
- Bir noktadaki eğrinin eğimi, türev hesaplaması ile bulunabilir.
  - Yani, ivme hız eğrisinin eğimidir.

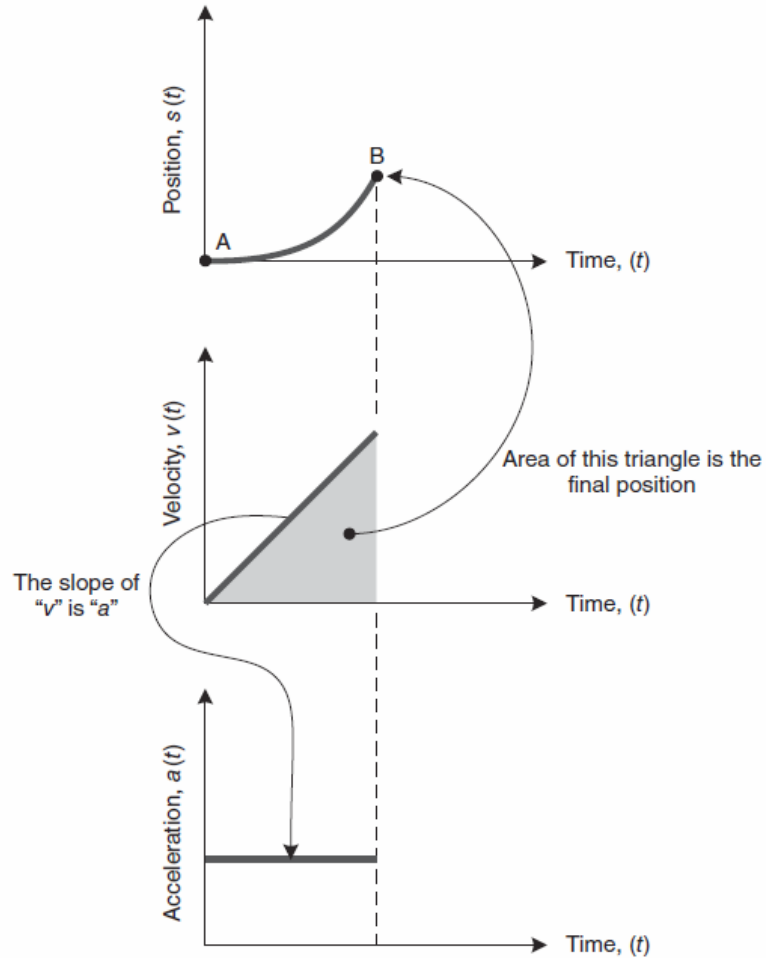


$$v(t) = \frac{ds}{dt}$$

$$a(t) = \frac{dv}{dt}$$

$$s = \int v(t) dt$$

$$v = \int a(t) dt$$



Konum, hız ve ivme arasındaki temel ilişkiler



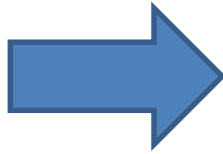
## Hareket Profili için Geometrik Kurallar

1.  $t$  zamanındaki konum, hız eğrisinin altındaki alana eşittir.
2. İvme, hız eğrisinin eğimidir.

Eğer ivmelenme ( $a$ ) sabit ise daha genel bir durum için aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$s = \int v(t) dt$$

$$v = v_0 + a(t - t_0)$$



$$v = \int a(t) dt$$

$$s = s_0 + v_0(t - t_0) + \frac{1}{2}a(t - t_0)^2$$

$t_0$ : Başlangıç zamanı,  $v_0$ : Başlangıç hızı,  $s_0$ : Başlangıç konumu.



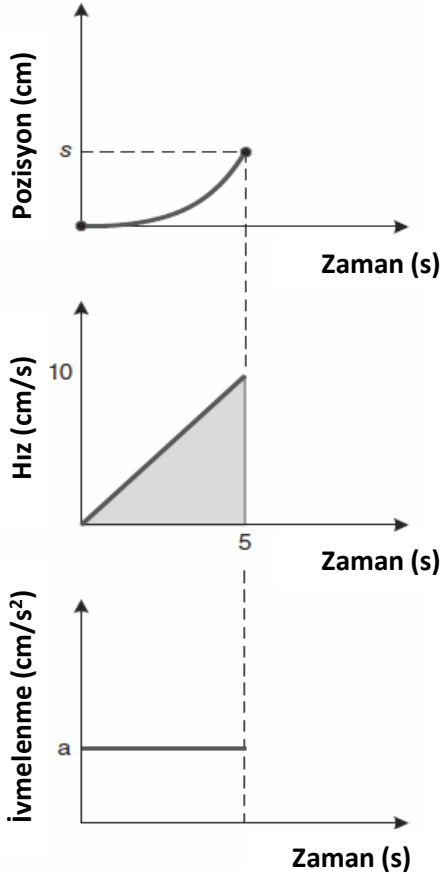
**ÖRNEK:** Şekildeki hız profili verildiğinde,  $t = 5$  s'deki konumu ve ivmeyi bulun.

Hız profilinin eğimi ivmedir. Öyleyse,

$$a = \frac{10}{5} = 2 \text{ cm/s}^2$$

$t = 5$  s'ye kadar hız eğrisinin altındaki üçgen alan,  $t = 5$  s'de ulaşılan konumdur. Buradan,

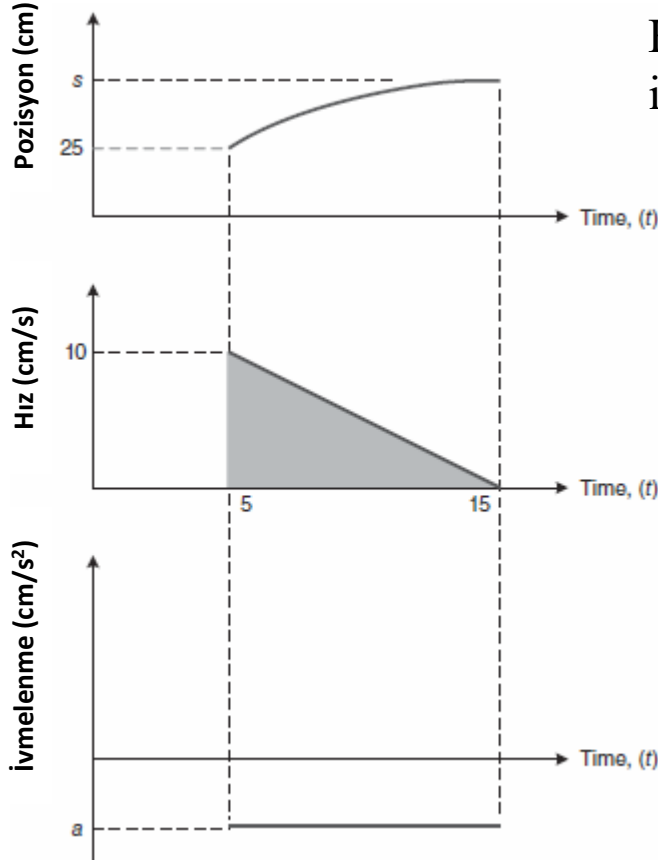
$$s = \frac{1}{2} (10 * 5) \\ = 25 \text{ cm}$$



# Kinematik: Temel Kavramlar



**Örnek:** Bir eksen 10 cm/s hızla hareket ediyor.  $t = 5$  s'de, Şekildeki hız profili ile yavaşlamaya başlıyor. Durduğunda eksen konumu nedir? Eksenin 25 cm'de yavaşlamaya başladığını varsayalım.



Hız profilinin eğimi ivmedir. Bu durumda eksen yavaşladığı için eğim negatiftir. Öyleyse,

$$a = -\frac{10}{10} = -1 \text{ cm/s}^2$$

Hız eğrisinin altındaki üçgen alan,  $t = 15$  s'de ulaşılan konumdur. Buradan,

$$\Delta s = \frac{1}{2} \cdot 10(15 - 5) = 50 \text{ in}$$

$$\Delta s = \frac{1}{2} 10(15 - 5) = 50 \text{ cm}$$

Eksen yavaşlarken 50cm hareket eder. Yavaşlamasına 25cm'de başladığı için durduğunda eksen  $s = 75$  cm olacaktır.



# ***EEM435 Elektrik Tahrik Sistemleri*** ***- Sunum 3***

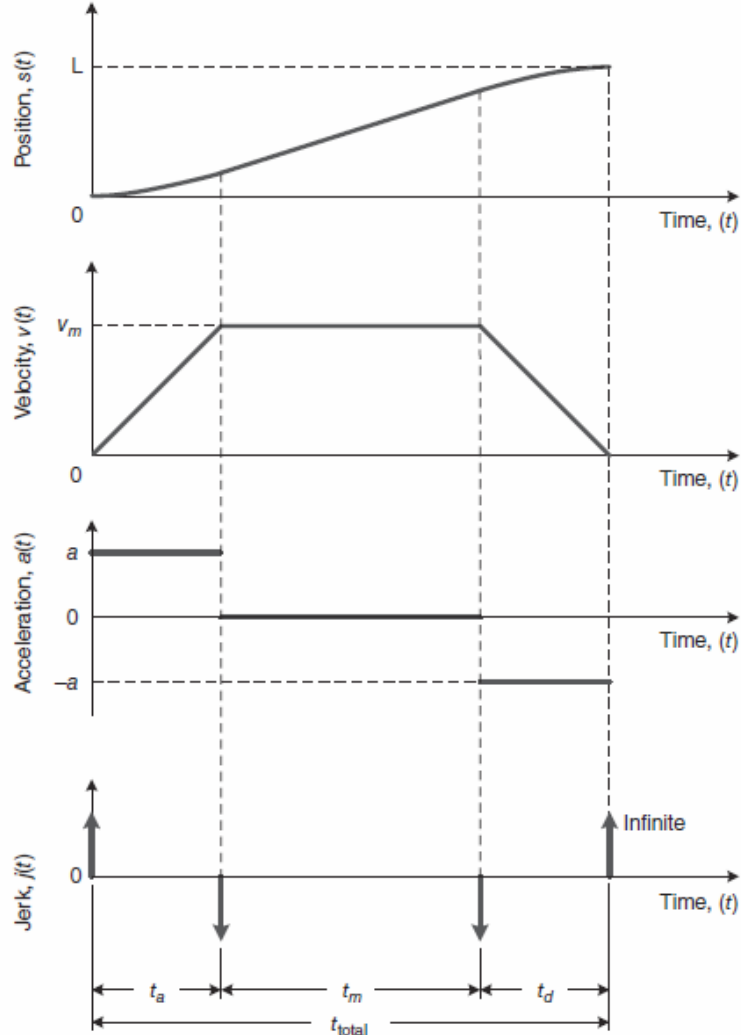
**Dr. Öğr. Ü. Furkan Akar**

*Düzce Üniversitesi, Müh. Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği*



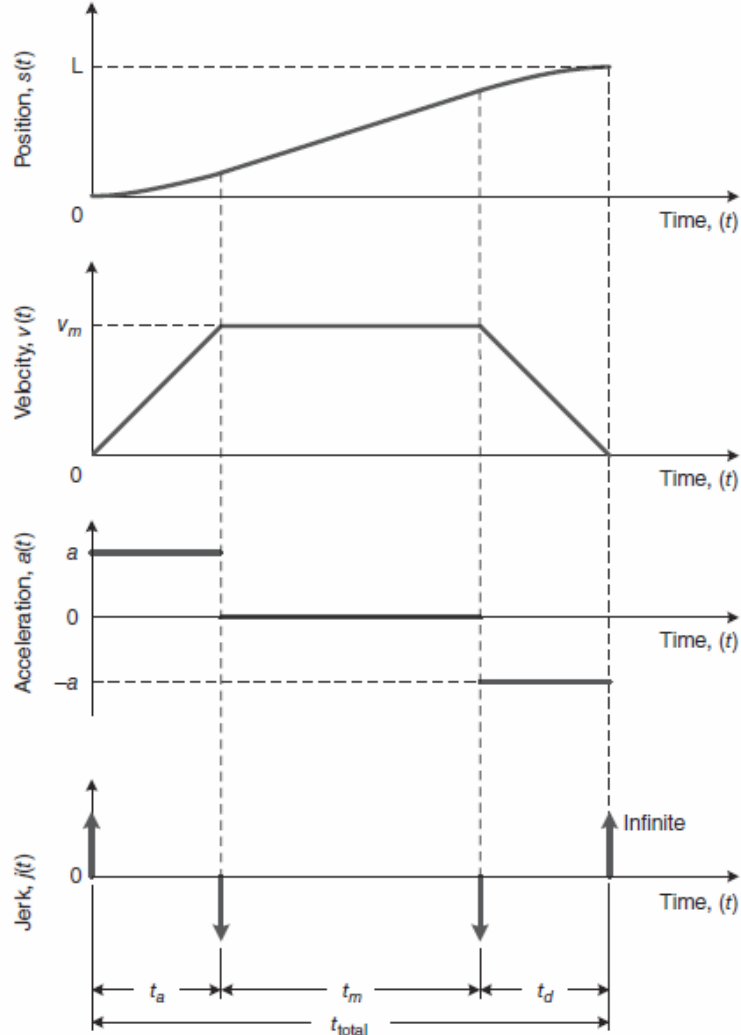
- Yaygın olarak kullanılan iki hareket profili vardır:
  - Trapez (yamuk) hız profili
  - S-eğrisi hız profili.
- Trapez hız profili, basitliği nedeniyle popülerdir.
- S-eğrisi hız profili daha yumuşak harekete yol açar.

# Trapez Hız Profili



- Yandaki şekil trapez hız profilini, ortaya çıkan ivmeyi ve konum profillerini göstermektedir.
- Ayrıca ivmenin türevi olan *sarsıntı (jerk, jolt)* da gösterilmektedir.
- Hız profillerinin köşelerinde ivmedeki süreksizlikler nedeniyle bu hareket profilinde dört noktada sarsıntı sonsuzdur.

# Trapez Hız Profili



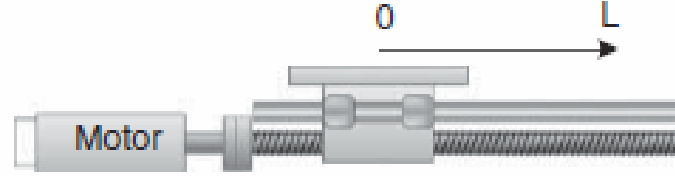
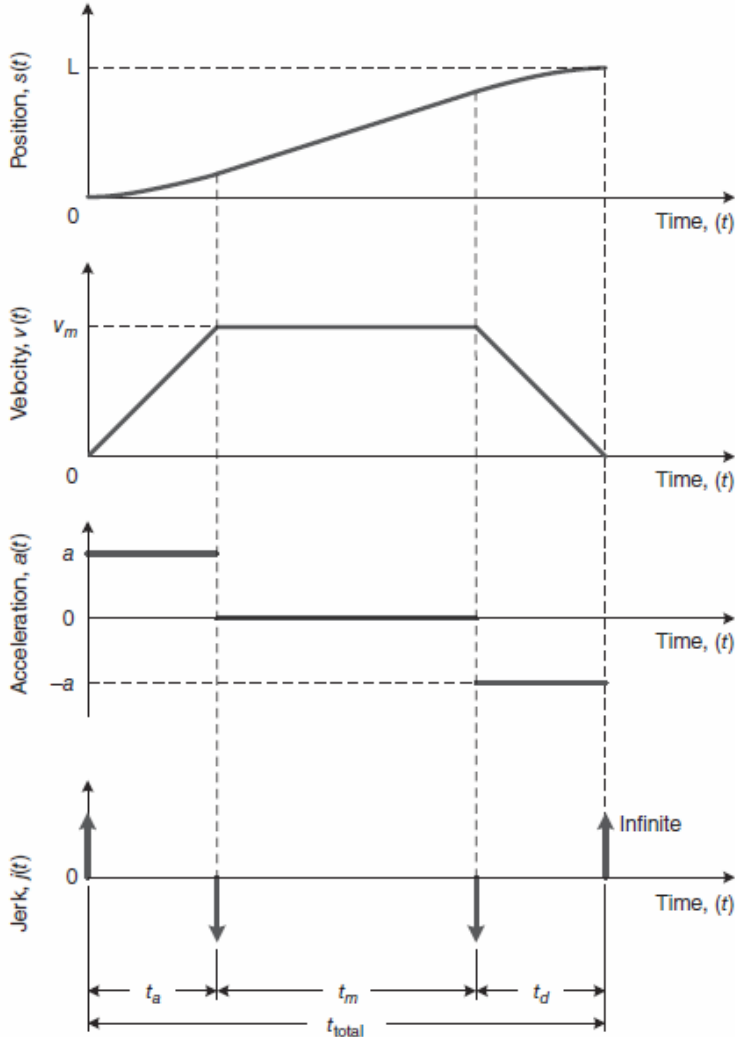
- Harekette üç farklı aşama vardır:
  - Hızlanma,
  - Sabit hız (sıfır hızlanma)
  - Yavaşlama.
- Makinenin bir eksenini hareket ettirmek için genellikle aşağıdaki istenen hareket parametreleri bilinir:
  - Hareket hızı,  $v_m$
  - Hızlanma,  $a$
  - Eksen tarafından kat edilecek mesafe,  $s$ .

# Trapez Hız Profili



- İstenen hareket profiline erişmek için hareket hızı ve hareket süresi belirtilerek «**Hareket Kontrolörü**» cihazı programlanabilir.
- Ardından program, eksene  $s$  mesafesi boyunca hareket etmesi için komut verir.

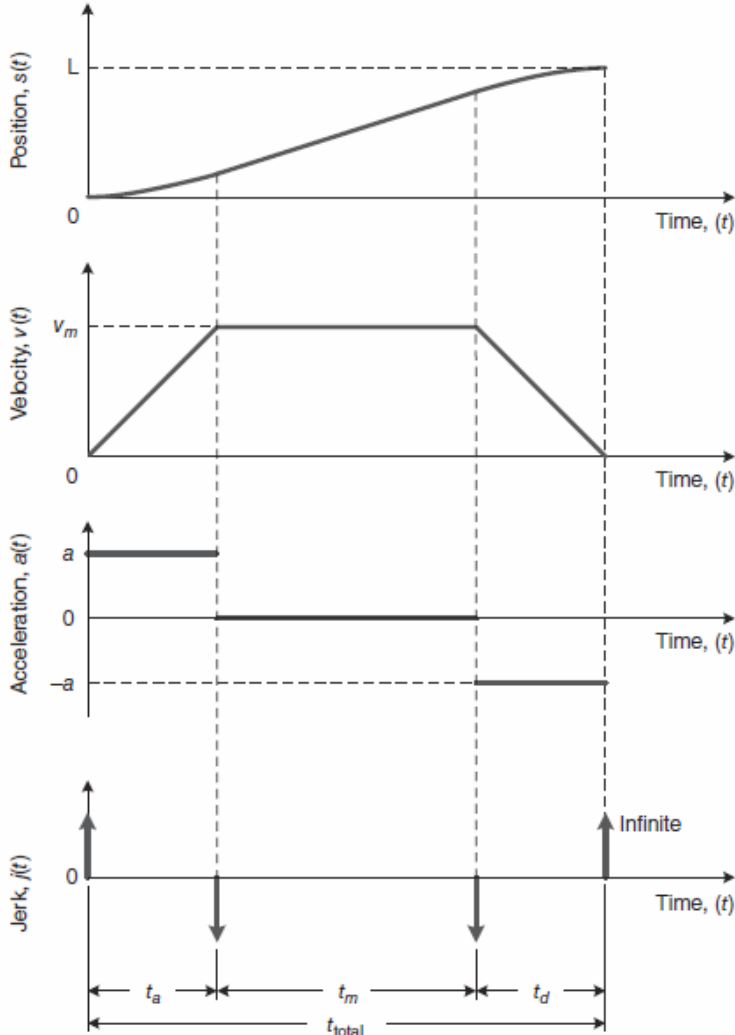
# Trapez Hız Profili



## 1. Geometrik Yaklaşım

- Hareket zamanlarını hesaplamak için, daha önce verilen şekle geometrik kuralları uygulayabiliriz.
- Hız eğrisinin eğimi  $a = v_m / t_a$   
– Ya da  $t_a = t_d = v_m / a$

# Trapez Hız Profili

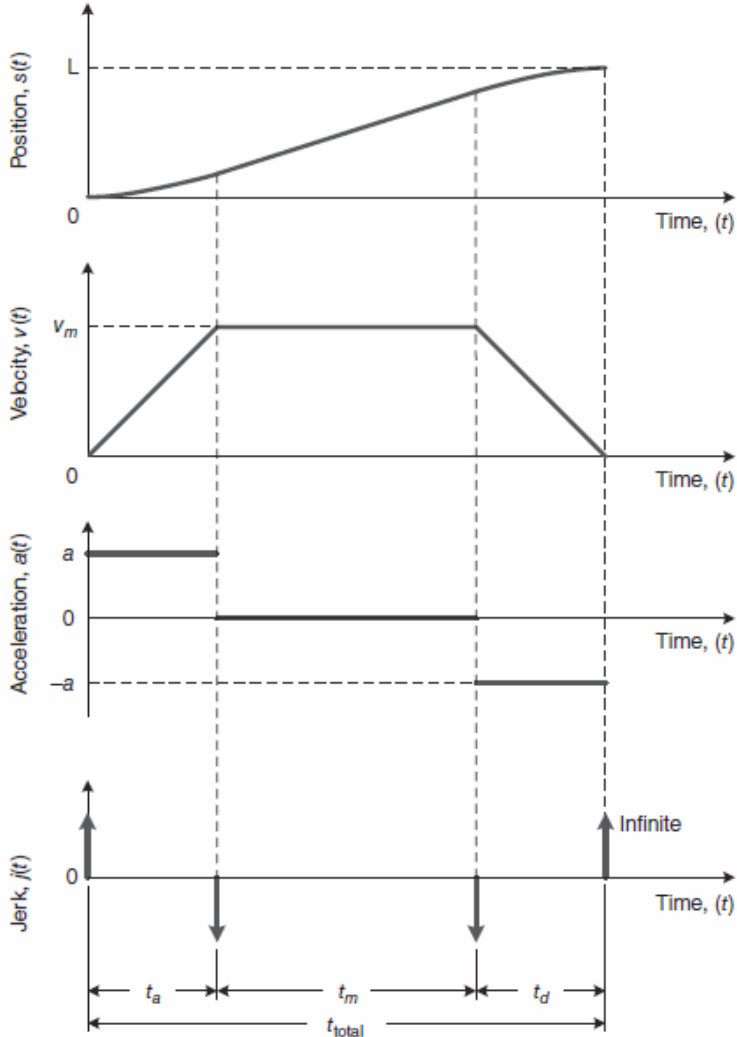


## 1. Geometrik Yaklaşım

- Hızlanma ve yavaşlama süreleri eşit olmak zorunda değildir, ancak bu genellikle böyledir. Böylelikle hareket süresi aşağıdaki gibidir:

$$t_{\text{total}} = t_a + t_m + t_d$$

# Trapez Hız Profili



## 1. Geometrik Yaklaşım

Geometrik kurallar kullanılarak eksenin kat ettiği toplam mesafe, iki üçgenin ve hız eğrisinin altındaki dikdörtgenin alanları ( $t_a = t_d$ ) toplanarak bulunabilir:

$$L = \frac{t_a v_m}{2} + t_m v_m + \frac{t_d v_m}{2}$$

$$= v_m (t_a + t_m)$$

$$t_m = \frac{L}{v_m} - t_a$$



## 2. Analitik Yaklaşım

- Hareket kontrolörü, daha önce bulunan ve aşağıda verilen denklem ile herhangi bir anda eksen konumunu hesaplayabilir.

$$s = s_0 + v_0(t - t_0) + \frac{1}{2}a(t - t_0)^2$$

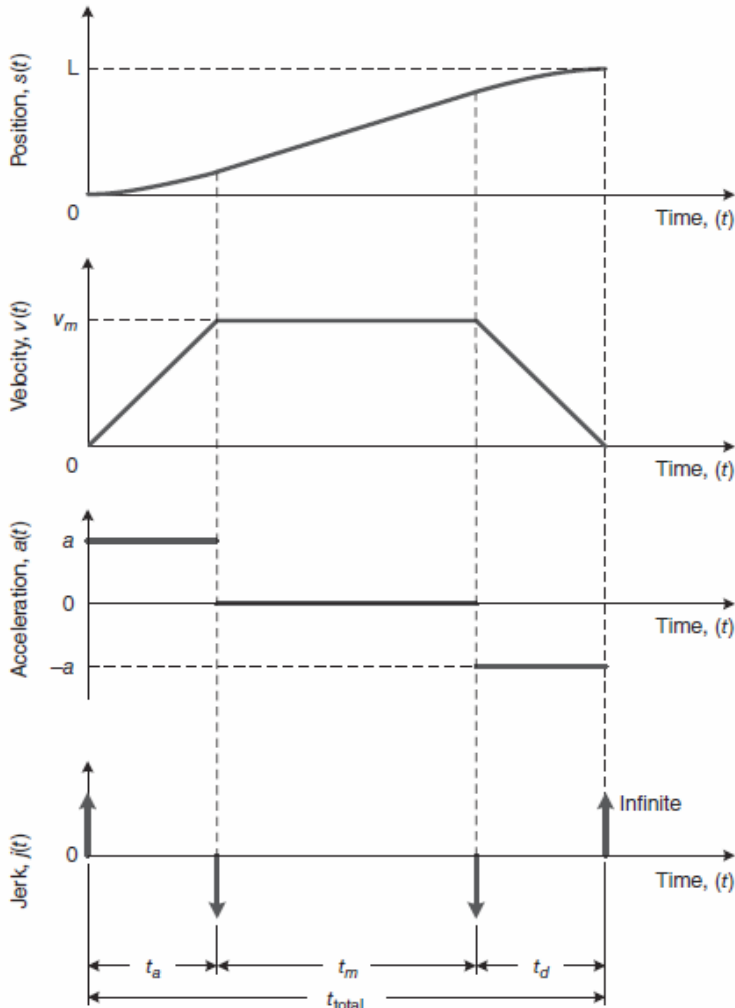
- Hareket üç fazdan oluştuğu için bu denklem hareketin her bir parçasında doğru sınır değerleri ( $t_0$ ,  $v_0$ ,  $s_0$ ) kullanılarak hesaplanmalıdır.
- Hareket zamanı öncelikle aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmalıdır.

$$t_a = t_d = \frac{v_m}{a}$$

$$t_m = \frac{L}{v_m} - t_a$$



## 2. Analitik Yaklaşım



For  $0 \leq t \leq t_a$

$$t_0 = 0, v_0 = 0, s_0 = 0$$

$$s(t) = \frac{1}{2}at^2$$

For  $t_a < t \leq (t_a + t_m)$

$$t_0 = t_a, v_0 = v_m, s_0 = s(t_a), a = 0$$

$$s(t_a) = \frac{1}{2}at_a^2$$

$$s(t) = s(t_a) + v_m(t - t_a)$$

For  $(t_a + t_m) < t \leq t_{\text{total}}$

$$t_0 = (t_a + t_m), v_0 = v_m, s_0 = s(t_a + t_m)$$

$$s(t) = s(t_a + t_m) + v_m[t - (t_a + t_m)] - \frac{1}{2}a[t - (t_a + t_m)]^2$$

$$s(t_a + t_m) = s(t_a) + v_m(t_m - t_a)$$



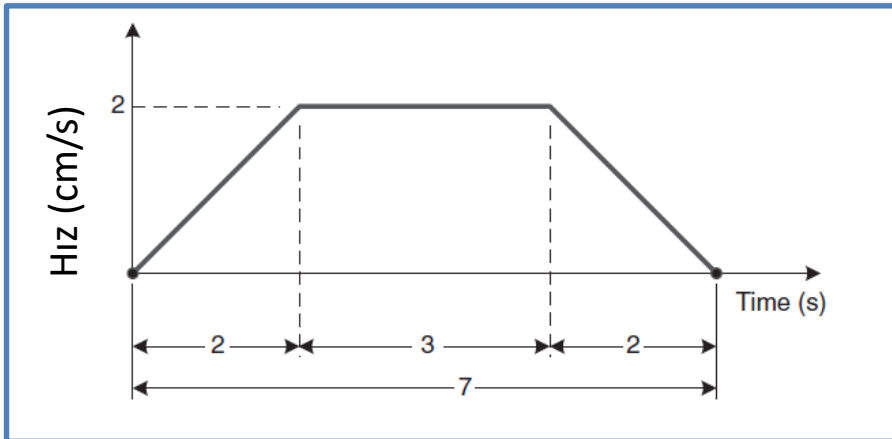
## Örnek

Bir portal robotun X eksenini trapez hız profili ile 10 cm hareket edecektir. Bu eksen için izin verilen maksimum ivme  $1 \text{ cm/s}^2$ 'dir. Eksenin maksimum  $2 \text{ cm/s}$  hızla hareket etmesi gerekiyorsa, bu hareketi tamamlaması ne kadar sürer?

$$t_a = t_d = \frac{v_m}{a} = \frac{2}{1} = 2 \text{ s}$$

$$t_m = \frac{L}{v_m} - t_a = \frac{10}{2} - 2 = 3 \text{ s}$$

$$t_{\text{total}} = t_a + t_m + t_d = 2 + 3 + 2 = 7 \text{ s}$$

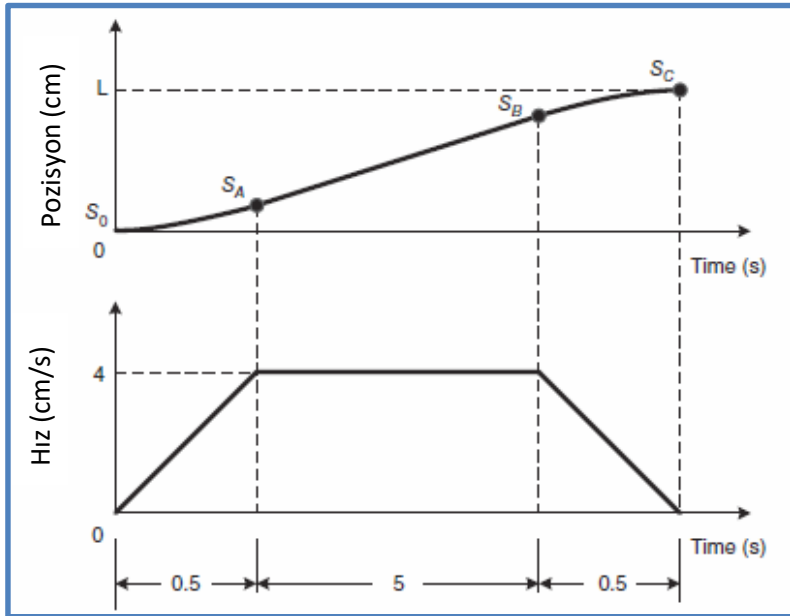


# Trapez Hız Profili



## Örnek

Şekildeki hız profiline göre, hareket profili için geometrik kuralları kullanarak  $s_A$ ,  $s_B$ ,  $s_C$ 'yi hesaplayınız.



- $s_A$ , üçgenin hız eğrisi altındaki alanından şu şekilde bulunabilir:

$$s_A = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 0.5$$

$$= 1 \text{ cm}$$

- $s_B$ , B noktasına kadar hız eğrisinin altındaki toplam alandır.

$$s_B = s_A + 4 \cdot 5$$

$$s_B = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 0.5 + 4 \cdot 5$$

$$= 21 \text{ cm}$$

- $s_C$ , C noktasına kadar hız eğrisinin altındaki toplam alandır.

$$s_C = 2 \left( \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 0.5 \right) + 4 \cdot 5$$

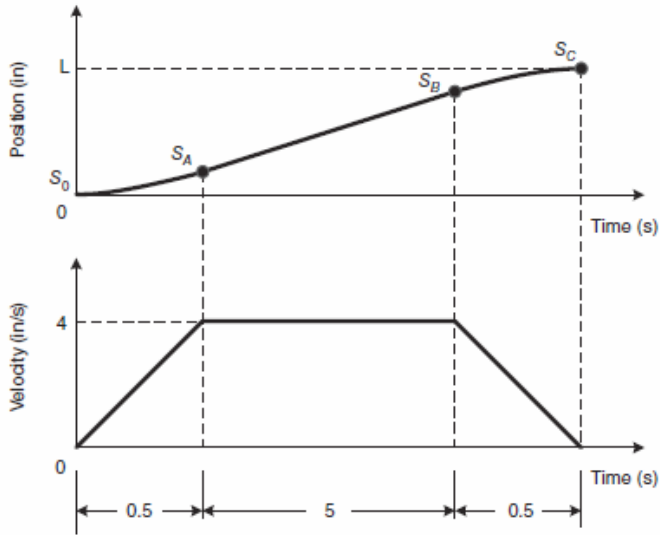
$$= 22 \text{ cm}$$

# Trapez Hız Profili



## Örnek

Şekildeki hız profiline göre, hareket profili için analitik yaklaşım ile  $s_A$ ,  $s_B$ ,  $s_C$ 'yi hesaplayınız.



- Hız profilinden ivme  $a = 4/0,5 = 8 \text{ cm/s}^2$

- Hızlanma aşaması ( $0 \leq t \leq 0.5$ ):**  $t_0 = 0$ ,  $s_0 = 0$ ,  $v_0 = 0$ ,  $a = 8$ .

$$s(t) = \frac{1}{2}a(t - t_0)^2$$

$$s_A = \frac{1}{2} \cdot 8 \cdot 0.5^2$$

$$= 1 \text{ cm}$$

- Sabit hız aşaması ( $0.5 < t \leq 5.5$ ):**  $t_0 = 0.5$ ,  $s_0 = s_A$ ,  $v_0 = v_A$ ,  $a = 0$ .

$$s(t) = s_A + v_A(t - t_0) + \frac{1}{2}a(t - t_0)^2$$

$$= 1 + 4(t - 0.5) + \frac{1}{2}0(t - 0.5)^2$$

$$s_B = 1 + 4(5.5 - 0.5)$$

$$= 21 \text{ cm}$$

- Yavaşlama aşaması ( $5.5 < t \leq 6$ ):**  
 $t_0 = 5.5$ ,  $s_0 = s_B$ ,  $v_0 = v_B$ ,  $a = -8$ .

$$s(t) = s_B + v_B(t - t_0) + \frac{1}{2}a(t - t_0)^2$$

$$= 21 + 4(t - 5.5) - \frac{1}{2}8(t - 5.5)^2$$

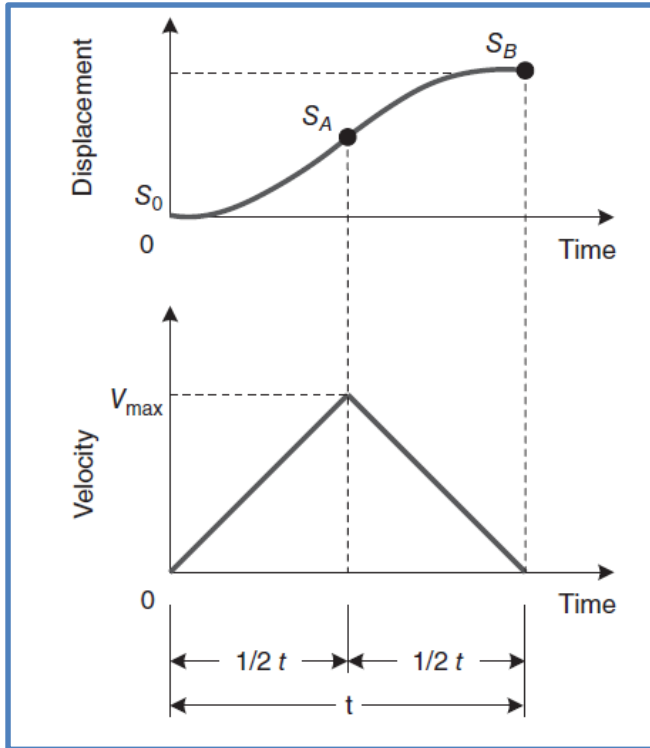
$$s_C = 21 + 4(6 - 5.5) - \frac{1}{2}8(6 - 5.5)^2$$

$$= 22 \text{ cm}$$

# Trapez Hız Profili



- Şekildeki gibi simetrik üçgen hız profili verildiğinde, maksimum hız ve ivmeyi hesaplayınız.



- Geometriyi kullanarak (hız eğrisinin altındaki alan), kat edilen toplam mesafeyi şu şekilde hesaplayabiliriz:

$$s_B = \frac{1}{2} v_{max} \frac{t}{2} + \frac{1}{2} v_{max} \frac{t}{2}$$

$$= \frac{1}{2} v_{max} t$$

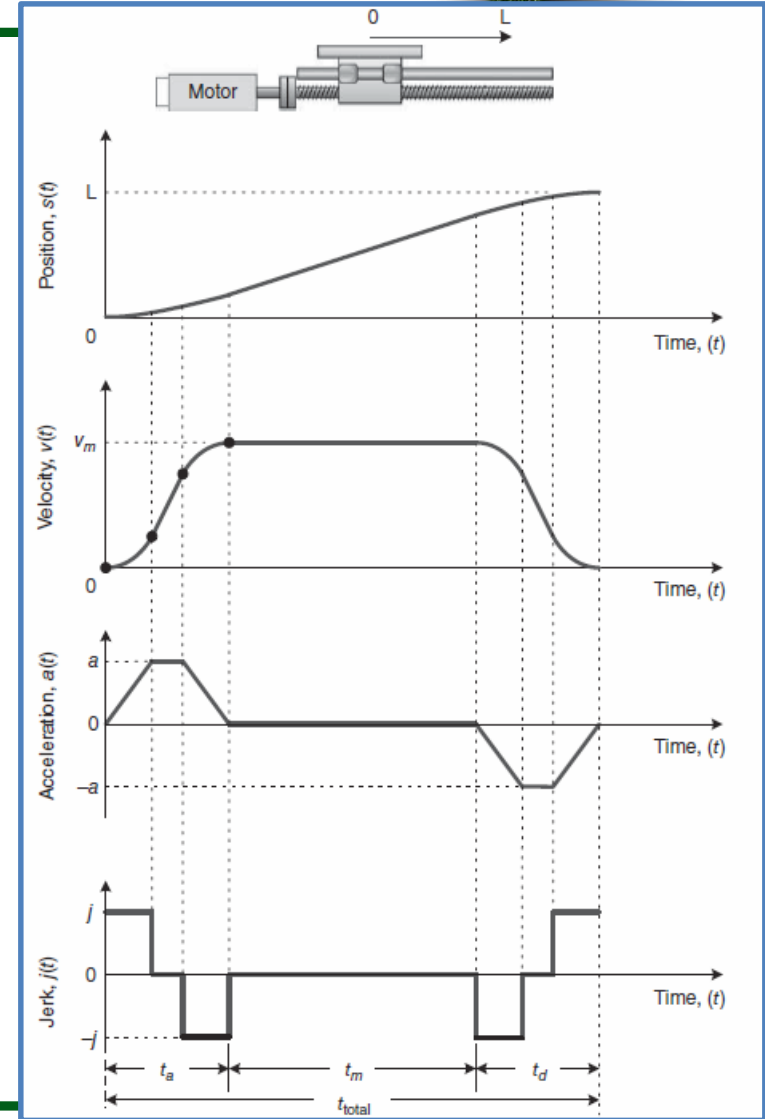
$$v_{max} = \frac{2s_B}{t}$$

$$a = \frac{2v_{max}}{t}$$

# S-Eğrisi Hız Profili



- Yamuk (Trapez) hız profilinin hesaplanması basittir ancak büyük bir dezavantajı vardır.
  - Yamuğun keskin köşeleri, ivmede süreksizliklere neden olur ve bu da sistemde sonsuz (veya pratikte büyük) sarsıntılara yol açar.
- İvmeyi yumuşatmak için S-eğrisi hız profili kullanılır.



# S-Eğrisi Hız Profili

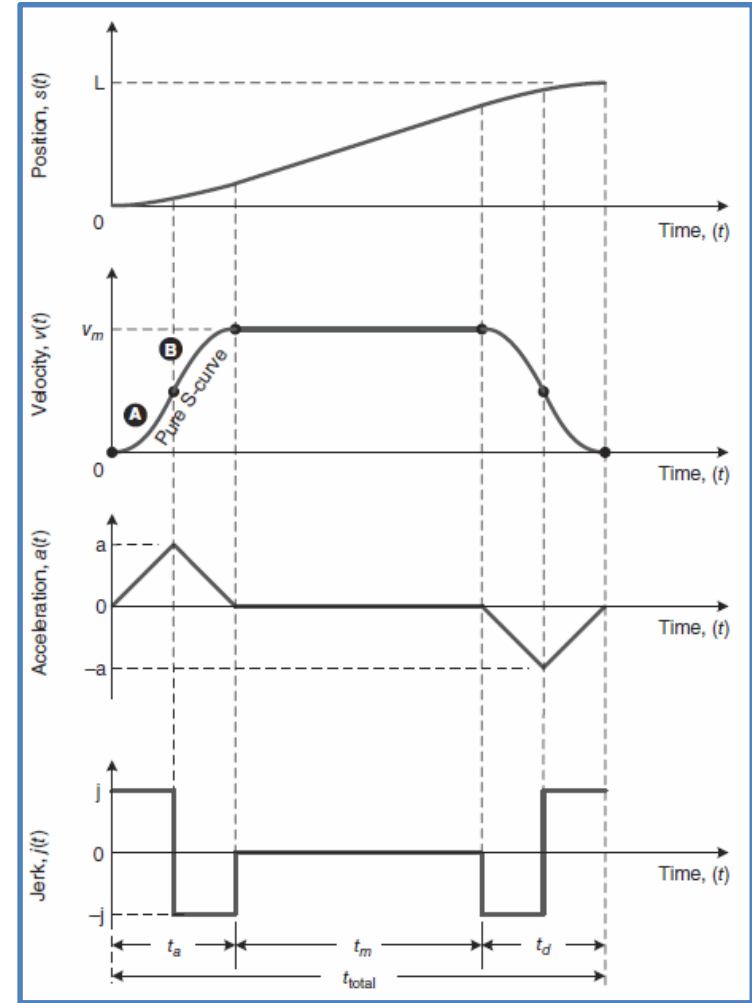


- Yuvarlatılmış köşeler, ikinci dereceden polinomlardan oluşur.
- Hız profilinin yeniden şekillendirilmesi, pozitif, sıfır ve negatif ivme fazları arasındaki geçişleri yumuşatır.
- Yamuk hız profilinden farklı olarak ivmenin sabit olmadığına dikkat ediniz.
- Ayrıca, yamuk hız profilinden farklı olarak, sarsıntı sonsuz değildir.
- Sarsıntı sonlu olduğu sürece, düzgün çevrim çalışmasını bozacak ani şok yükleri olmayacaktır.
- Motor üzerindeki kuvvet/tork ve akım taleplerindeki anlık değişimler ortadan kaldırılır.
- Ek olarak, yüksek frekanslı salınım hareketleri azaltılır.
- S-eğrisi hareket profili kullanılarak motorun uzun ömürlülüğü ve sistemin doğruluğu artırılır.

# S-Eğrisi Hız Profili



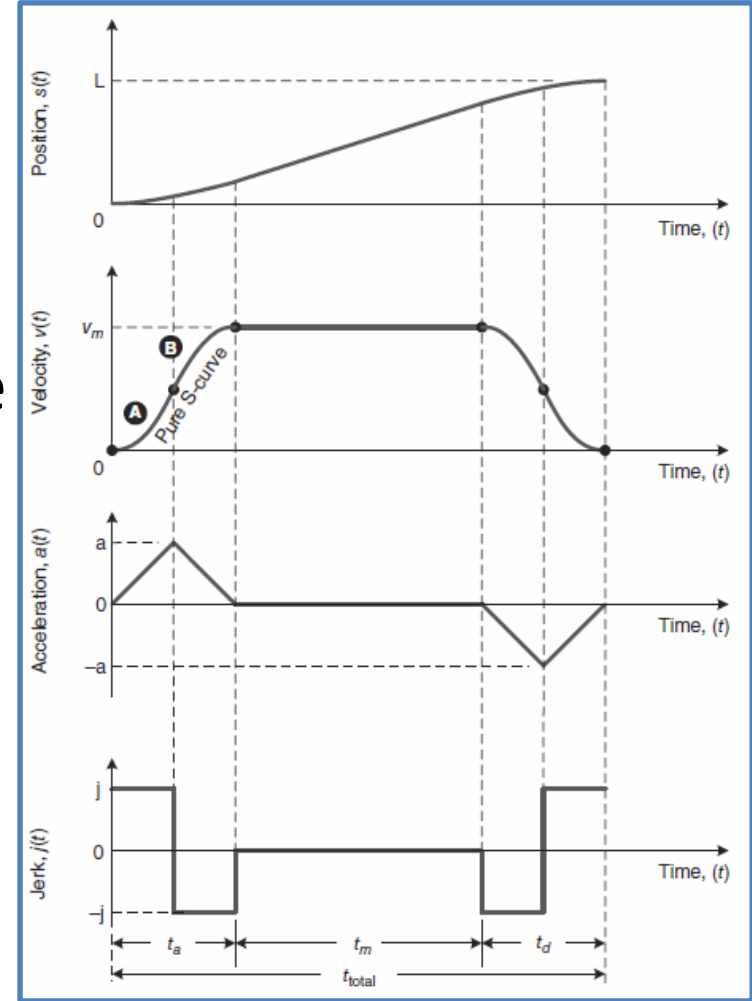
- Bu hız profilinde temsil edilen yedi farklı faz vardır.
- Profilin dört eğri parçası, ikinci dereceden denklemler kullanılarak uygulanır.
- Kalan üç parça pozitif, sıfır ve negatif eğimli düz çizgilerdir.
- Doğrusal segmentler elimine edilirse, yanda gösterilen saf S-eğrisi hız profili elde edilir.



# S-Eğrisi Hız Profili



- Saf S-eğrisi, “A” ve “B” olarak adlandırılan iki adet ikinci dereceden eğriden oluşur.
  - Her parça aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir:
    - $v(t) = C_1 t^2 + C_2 t + C_3$ 
      - $C_1, C_2$  ve  $C_3$ : Sınır koşulları ile belirlenecek katsayılar



# S-Eğrisi Hız Profili



- $v(t) = C_1 t^2 + C_2 t + C_3$
- Eğri A: Bu segment için aşağıdaki sınır koşullarını tanımlayabiliriz:

$$v(0) = 0, a(0) = \frac{dv}{dt} = 0, v\left(\frac{t_a}{2}\right) = \frac{v_m}{2},$$

$$a\left(\frac{t_a}{2}\right) = a$$

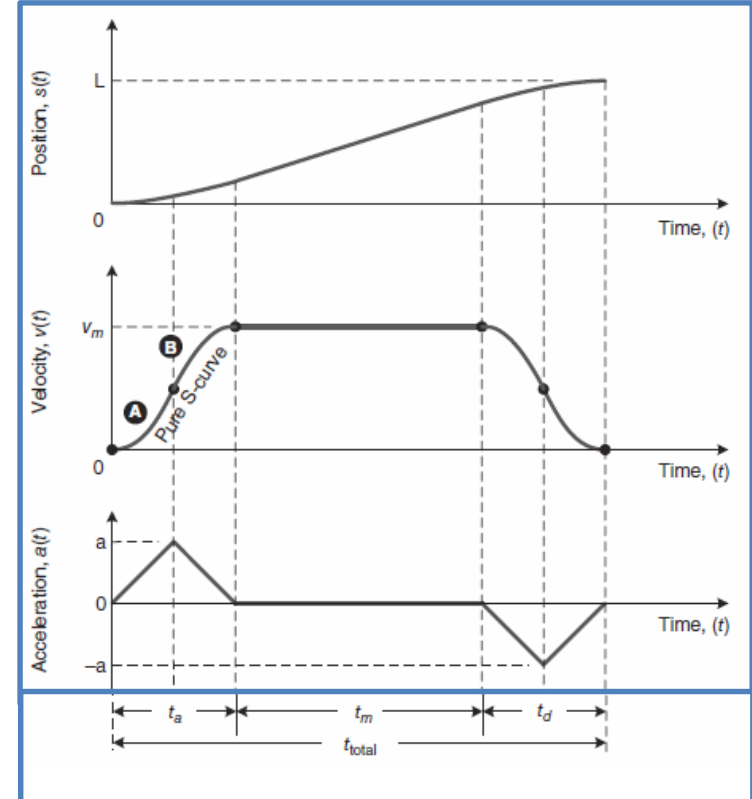
$$\rightarrow C_3 = 0 \quad \rightarrow \frac{dv}{dt} = 2tC_1 + C_2 = 0 \quad \rightarrow C_2 = 0$$

$$\rightarrow v(t) = C_1 t^2 \quad \rightarrow v_m = \frac{1}{2} C_1 t_a^2$$

$$C_1 = \frac{2v_m}{t_a^2}$$

$$\frac{dv}{dt} = 2tC_1 = a \quad \rightarrow a = C_1 t_a \quad \rightarrow C_1 = \frac{a^2}{2v_m} \quad \rightarrow v(t) = \frac{a^2}{2v_m} t^2 \quad \rightarrow s_A(t) = \frac{a^2 t^3}{6v_m}$$

$$a = C_1 t_a \quad \rightarrow C_1 = \frac{a^2}{2v_m} \quad \rightarrow t_a = \frac{2v_m}{a}$$



# S-Eğrisi Hız Profili



- Eğri B: A segmentinin sonundaki hız  $v_A$  olmak üzere buna  $t$  zamanındaki mevcut hızı  $v(t)$  eklersek,  $t = t_a$  olduğunda sonuçta  $v_m$ 'ye ulaşmalıyız. Yani;

$$v_m = v_A + v(t)$$

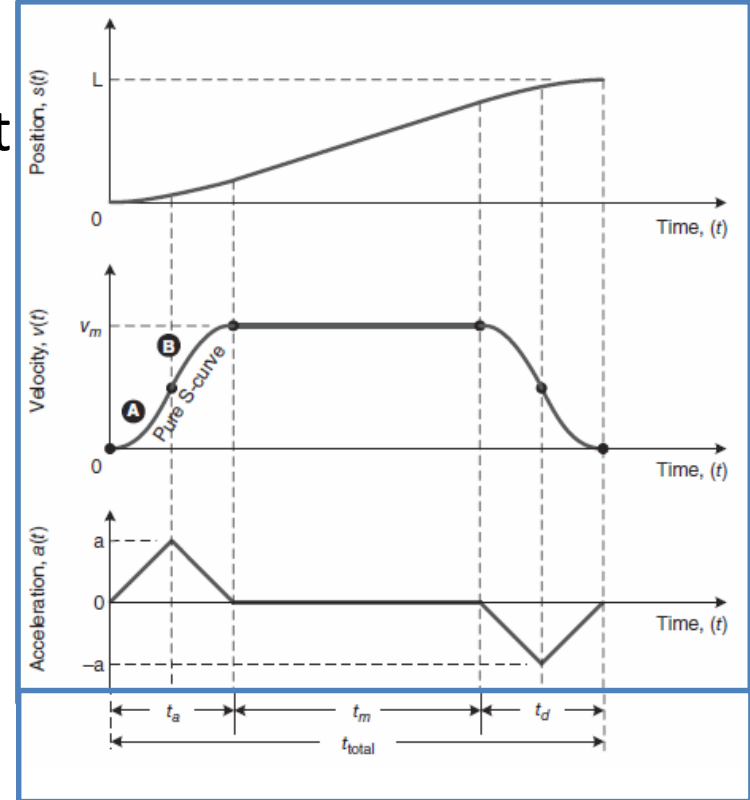
$$v_m = \frac{a^2}{2v_m}(t_a - t)^2 + v(t)$$

$$v(t) = v_m - \frac{a^2}{2v_m}(t_a - t)^2$$

$$s_B(t) = s_A(t)|_0^{t_a/2} + \int_{t_a/2}^{t_a} (v_m - C_1(t^2 - 2t_a t + t_a^2))dt$$

$$s_A(t) = \frac{a^2 t^3}{6v_m}$$

$$C_1 = \frac{a^2}{2v_m}$$



# S-Eğrisi Hız Profili



## ÖZET:

$$t_a = \frac{2v_m}{a}$$

$$C_1 = \frac{a^2}{2v_m}$$

**Curve A**  
 $0 \leq t \leq \frac{t_a}{2}$

$$s_A(t) = C_1 \frac{t^3}{3}$$

$$v_A(t) = C_1 t^2$$

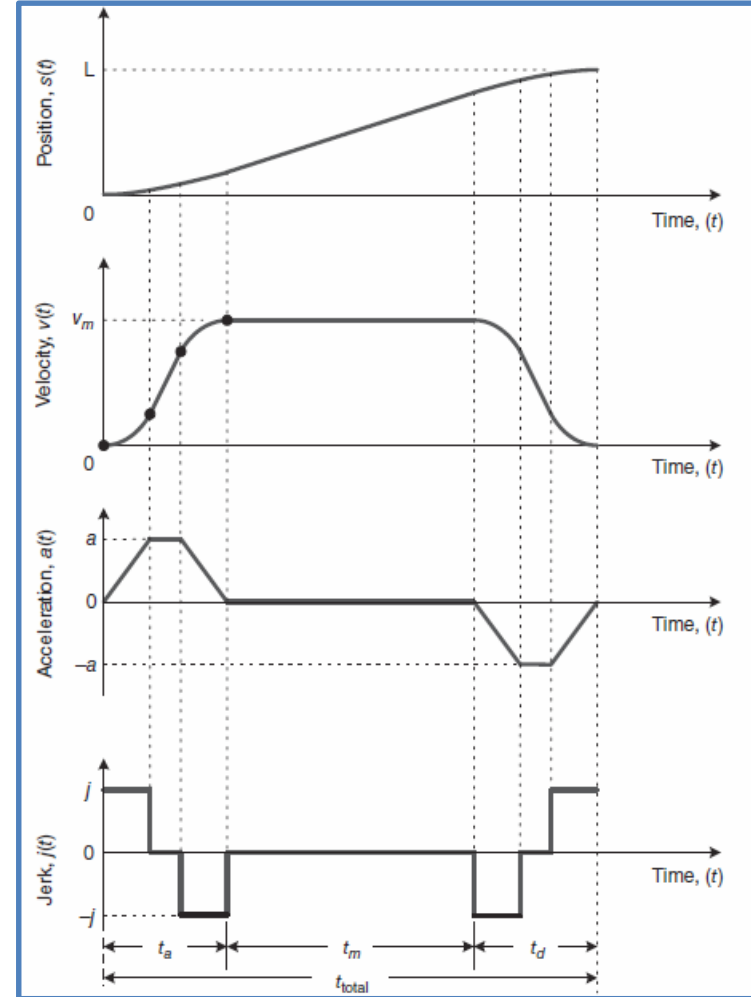
$$a_A(t) = 2C_1 t$$

**Curve B**  
 $\frac{t_a}{2} < t \leq t_a$

$$s_B(t) = C_1 \frac{t_a^3}{24} + v_m \left( t - \frac{t_a}{2} \right) - C_1 \cdot \left\{ t_a^2 \left( t - \frac{t_a}{2} \right) - t_a \left( t^2 - \left( \frac{t_a}{2} \right)^2 \right) + \frac{1}{3} \left( t^3 - \left( \frac{t_a}{2} \right)^3 \right) \right\}$$

$$v_B(t) = v_m - C_1 (t_a - t)^2$$

$$a_B(t) = 2C_1 (t_a - t)$$



# S-Eğrisi Hız Profili



**ÖRNEK:** Bir makinenin eksenini, saf bir S-eğrisi hız profili ile hareket ettirilecektir. İstenen hareket hızı,  $v_m = 10 \text{ cm/s}$  ve ivme  $a = 5 \text{ cm/s}^2$  verildiğinde, S-eğrisi hız profilinin A eğrisi ve B eğrisi sırasında hız ve ivme için denklemler nelerdir?

- Hızlanma süresini hesaplayarak başlayalım:

$$t_a = 2 \frac{v_m}{a} = \frac{2 \cdot 10}{5} = 4 \text{ s}$$

- $0 \leq t \leq t_a/2$  için A eğrisinden hızın hesaplanması:

$$v(t) = \frac{a^2}{2v_m} t^2 \rightarrow = \frac{5^2}{2 \cdot 10} t^2 = 1.25t^2$$

- Hızın türevi ivme olduğundan:  $a(t) = 2 \cdot (1.25t) = 2.5t$

- $t_a/2 \leq t \leq t_a$  için B eğrisinden hızın hesaplanması:

$$v(t) = v_m - \frac{a^2}{2v_m} (t_a - t)^2$$

- Hızın türevi ivme olduğundan:

$$a(t) = 1.25(8 - 2t)$$

$$\begin{aligned} v(t) &= v_m - \frac{a^2}{2v_m} (t_a - t)^2 \\ &= 10 - \frac{5^2}{2 \cdot 10} (t^2 - 8t + 16) \\ &= 10 - 1.25(t^2 - 8t + 16) \end{aligned}$$

# S-Eğrisi Hız Profili



ÖRNEK: Bir makinenin eksenini, saf bir S-eğrisi hız profili ile hareket ettirilecektir. İstenen hareket hızı,  $v_m = 10 \text{ cm/s}$  ve ivme  $a = 5 \text{ cm/s}^2$  verildiğinde, S-eğrisi hız profilinin A eğrisi ve B eğrisi sırasında hız ve ivme için denklemler nelerdir?

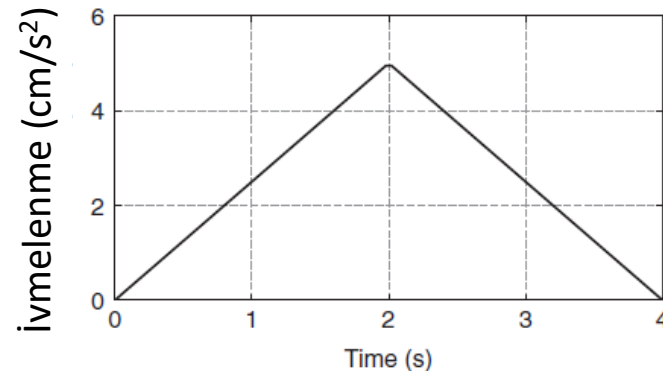
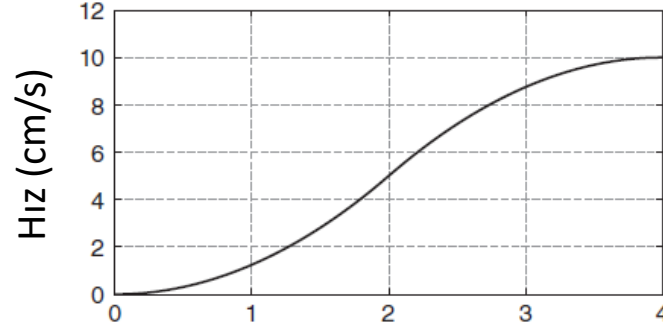
$$t_a = 2 \frac{v_m}{a} = \frac{2 \cdot 10}{5} = 4 \text{ s}$$

$$v(t) = \frac{a^2}{2v_m} t^2 = \frac{5^2}{2 \cdot 10} t^2 = 1.25t^2$$

$$a(t) = 2 \cdot (1.25t) = 2.5t$$

$$\begin{aligned} v(t) &= v_m - \frac{a^2}{2v_m} (t_a - t)^2 \\ &= 10 - \frac{5^2}{2 \cdot 10} (t^2 - 8t + 16) \\ &= 10 - 1.25(t^2 - 8t + 16) \end{aligned}$$

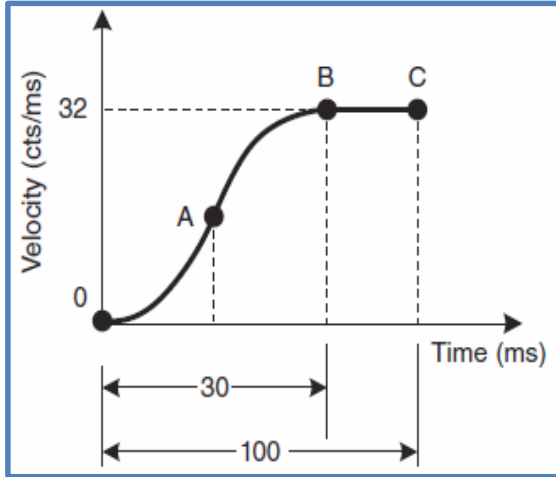
$$a(t) = 1.25(8 - 2t)$$



# S-Eğrisi Hız Profili



ÖRNEK: Genellikle eksen konumu, eksen hareket ettikçe darbeler üreten bir kodlayıcı kullanılarak ölçülür. Darbe sayısı, eksenin yer değiştirmesiyle orantılıdır. Bu darbeler, eksen konumunu takip etmek için hareket kontrolörü tarafından sayılır. Bu nedenle, hareket profilleri genellikle sayımlar (counts:cts) olarak programlanır. Şekildeki S-eğrisi hız profili verildiğinde,  $t = 100$  ms'de eksen konumu nedir?



$$t_a = \frac{2v_m}{a} \rightarrow a = \frac{2 \cdot 32}{30} = 2.133 \text{ cts/ms}^2$$

- $0 \leq t \leq t_a/2$  sırasında kat edilen mesafe :

$$s_{0A} = C_1 \frac{t^3}{3} \rightarrow C_1 = a^2 / (2v_m) \rightarrow s_{0A} = 80 \text{ cts}$$

$$C_1 = 0.071$$

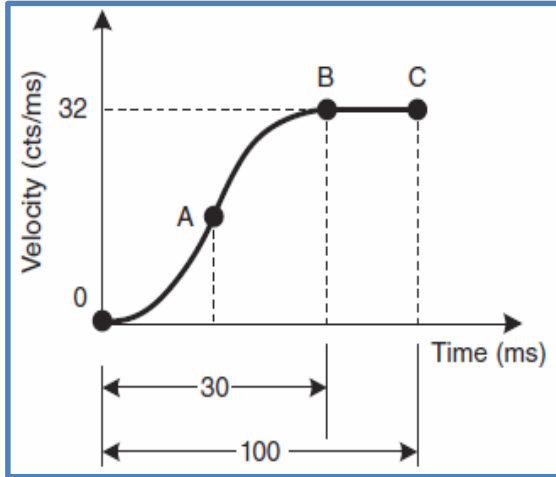
- $t_a/2 < t \leq t_a$  sırasında kat edilen mesafe:

$$s_{0B} = C_1 \frac{t_a^3}{24} + v_m \left( t - \frac{t_a}{2} \right) - C_1 \cdot \left\{ t_a^2 \left( t - \frac{t_a}{2} \right) - t_a \left( t^2 - \left( \frac{t_a}{2} \right)^2 \right) + \frac{1}{3} \left( t^3 - \left( \frac{t_a}{2} \right)^3 \right) \right\} \rightarrow s_{0B} = 480 \text{ cts.}$$

# S-Eğrisi Hız Profili



ÖRNEK: Genellikle eksen konumu, eksen hareket ettikçe darbeler üreten bir kodlayıcı kullanılarak ölçülür. Darbe sayısı, eksenin yer değiştirmesiyle orantılıdır. Bu darbeler, eksen konumunu takip etmek için hareket kontrolörü tarafından sayılır. Bu nedenle, hareket profilleri genellikle sayımlar (counts:cts) olarak programlanır. Şekildeki S-eğrisi hız profili verildiğinde,  $t = 100$  ms'de eksen konumu nedir?



$$s_{0A} = 80 \text{ cts}$$

$$s_{0B} = 480 \text{ cts.}$$

- B ve C noktaları arasında kat edilen mesafe, hız profili altındaki dikdörtgenin alanından şu şekilde bulunabilir:

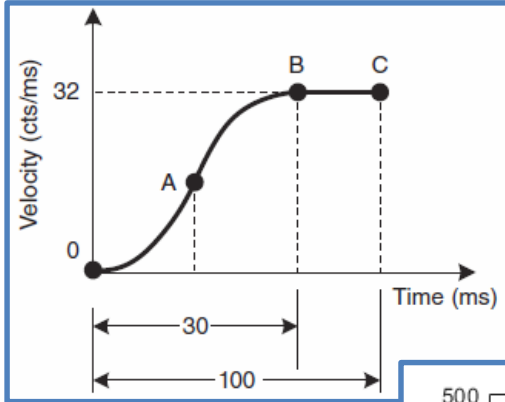
$$s_{BC} = 32 \cdot (100 - 30) = 2240 \text{ cts}$$

- Son olarak, 0 noktasından C noktasına kat edilen toplam mesafe:

$$s_{0C} = 480 + 2240 = 2720 \text{ cts}$$



**ÖRNEK:** Genellikle eksen konumu, eksen hareket ettikçe darbeler üreten bir kodlayıcı kullanılarak ölçülür. Darbe sayısı, eksenin yer değiştirmesiyle orantılıdır. Bu darbeler, eksen konumunu takip etmek için hareket kontrolörü tarafından sayılır. Bu nedenle, hareket profilleri genellikle sayımlar (counts:cts) olarak programlanır. Şekildeki S-eğrisi hız profili verildiğinde,  $t = 100$  ms'de eksen konumu nedir?

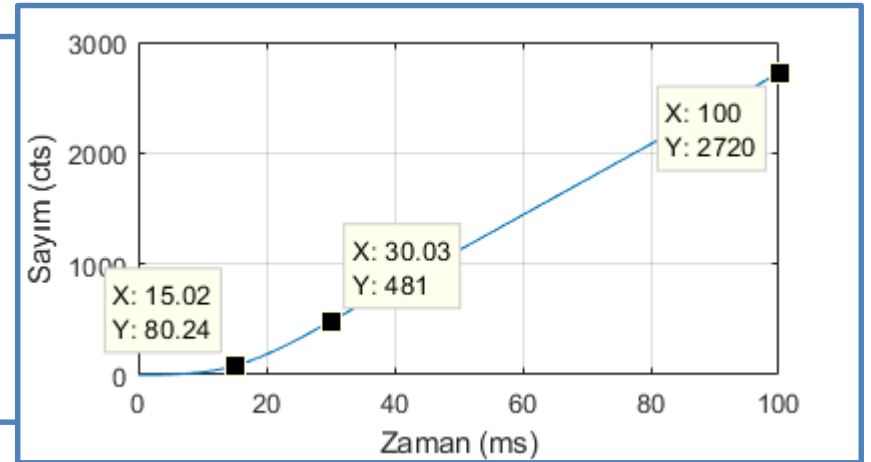
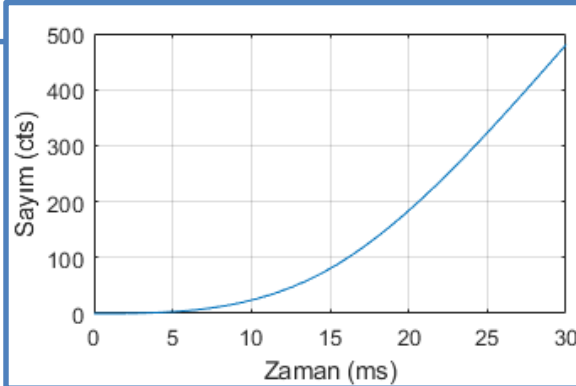


$$s_{0A} = 80 \text{ cts}$$

$$s_{0B} = 480 \text{ cts.}$$

$$s_{0C} = 480 + 2240 = 2720 \text{ cts}$$

## Matlab ile konum grafiğinin çizilmesi..



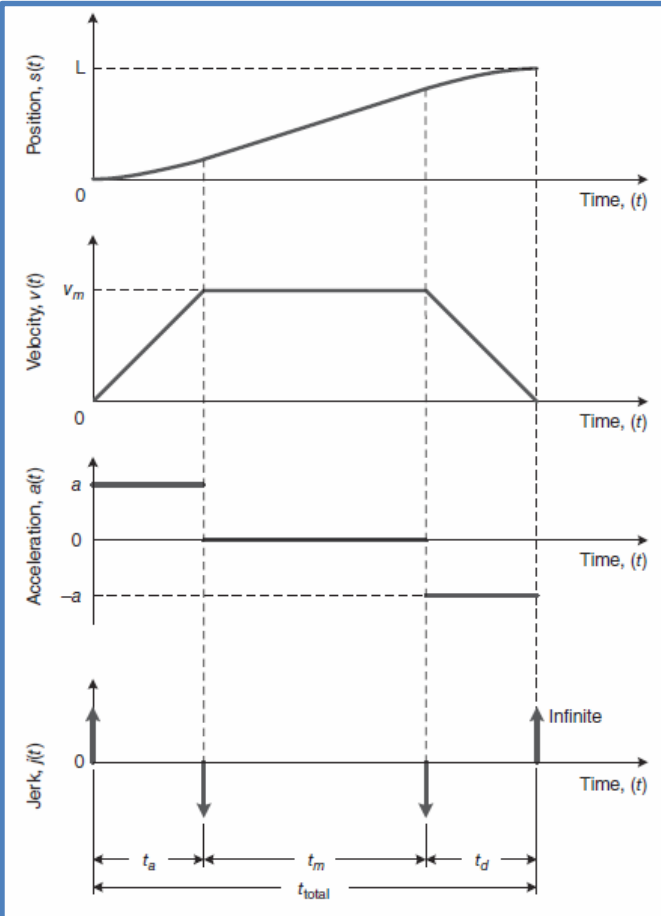


# ***EEM435 Elektrik Tahrik Sistemleri*** ***- Sunum 4***

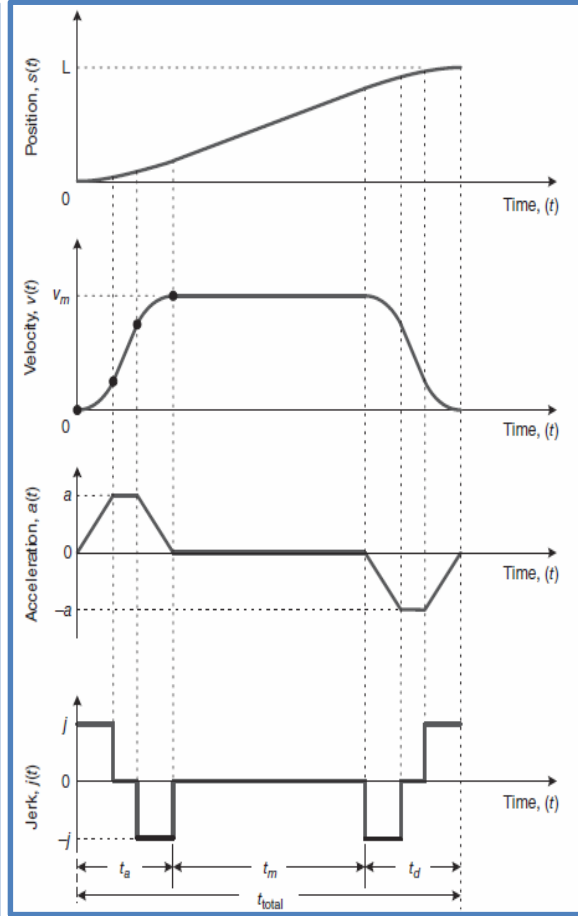
**Doç. Dr. Furkan Akar**

*Düzce Üniversitesi, Müh. Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği*

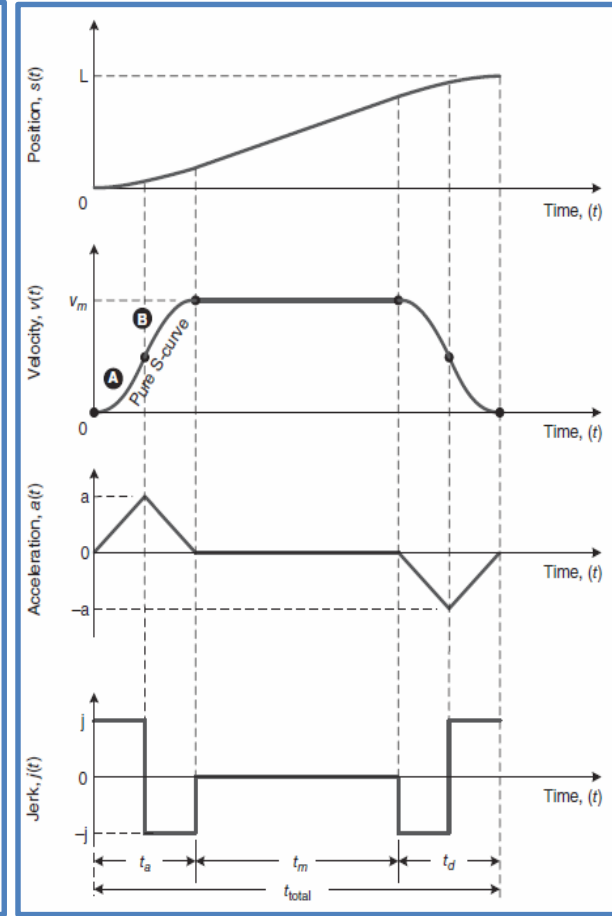
# Hız Profilleri



Trapez



S-eğrisi



Saf S-eğrisi

# ÇOK EKSENLİ HAREKET



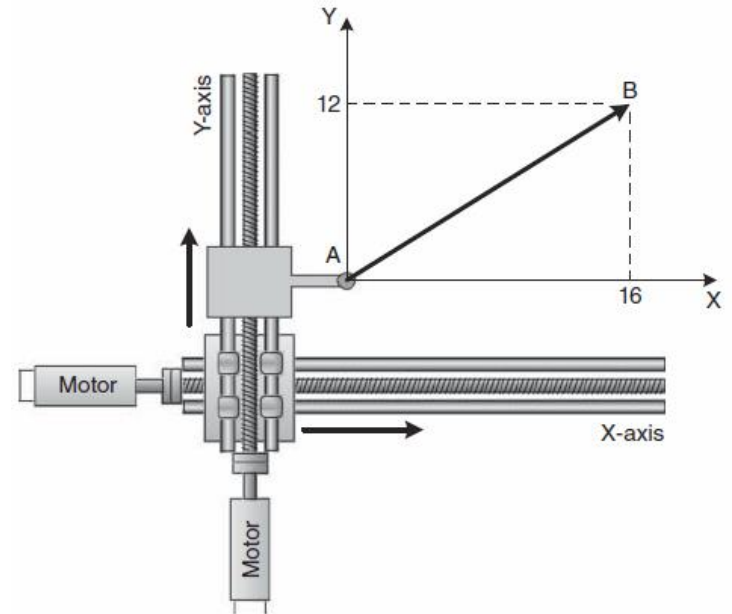
- Çok eksenli makineler, bir görevi tamamlamak için ayrı eksenlerin hareketinin koordinasyonunu gerektirir.
- İki eksenli tablalı ve eğirme kesicili dikey Z eksenli bir CNC freze makinesi düşünün.
  - Tablonun iki eksenini koordine ederek bir parçada dairesel kesimler oluşturabiliriz.
  - Üç eksenini de koordine etmek, karmaşık 3D kesimleri mümkün kılar.
- Makinenin eksenlerini hareket ettirmek için alabileceğimiz üç temel yaklaşım vardır:
  - 1. Her seferinde bir eksen hareket ettirin,
  - 2. Tüm eksenleri aynı anda hareket ettirmeye başlayın (dönüş hareketi=slew motion) ve
  - 3. Eksenlerin hareketini, hepsi aynı anda başlayıp bitecek şekilde ayarlayın (enterpolasyonlu hareket=interpolated motion).

# Dönme Hareketi



- Dönme hareketinde tüm eksenler aynı hızda ve aynı anda hareket etmeye başlar ancak her eksen hareketini farklı bir zamanda tamamlar.

**ÖRNEK:** Şekilde gösterilen makineyi düşünün. Her iki eksen de  $t_a = 0,2$  s olan yamuk hız profili kullanılarak 4 cm/s hızında hareket ediyorsa, her bir eksenin hareketini tamamlaması ne kadar sürer?



# Dönme Hareketi



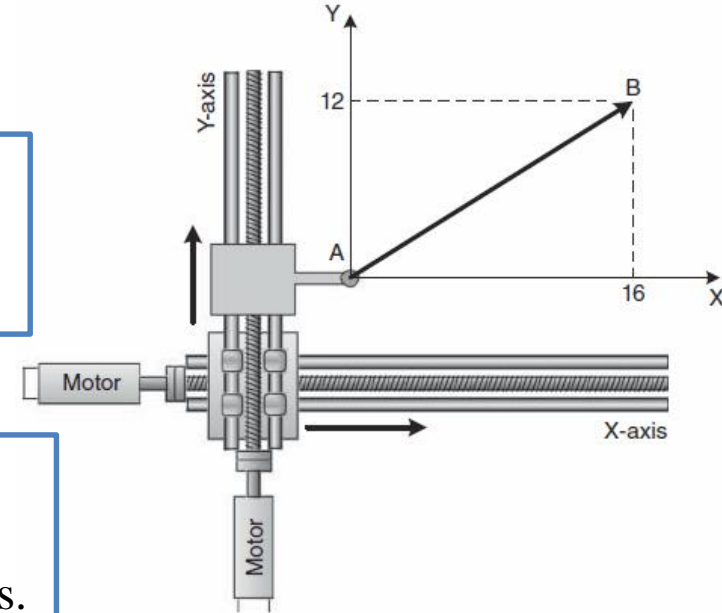
- **Çözüm:** X eksenini hareket parametreleri  $t_a = 0.2$  s,  $L = 16$  cm ve  $v_x = 4$  cm/s'dir ve Y eksenini hareket parametreleri  $t_a = 0.2$  s,  $L = 12$  cm ve  $v_y = 4$  cm/s'dir.

$$\begin{aligned} t_m^x &= \frac{L}{v_m} - t_a \\ &= \frac{16}{4} - 0.2 \\ &= 3.8 \text{ s} \end{aligned}$$

X eksenini hareketini tamamlaması için geçen toplam süre  $t_{toplam}^x = t_m^x + 2t_a$  yani 4.2 s.

$$\begin{aligned} t_m^y &= \frac{L}{v_m} - t_a \\ &= \frac{12}{4} - 0.2 \\ &= 2.8 \text{ s} \end{aligned}$$

Y eksenini hareketini tamamlaması için geçen toplam süre  $t_{toplam}^y = t_m^y + 2t_a$  yani 3.2 s.



Dolayısıyla, her iki eksen de aynı anda harekete başlasa bile, Y eksenini hareketini X ekseninden 1 s önce bitirir. Sonuç olarak, takım ucu Şekilde gösterilen düz çizgiyi takip etmeyecektir.

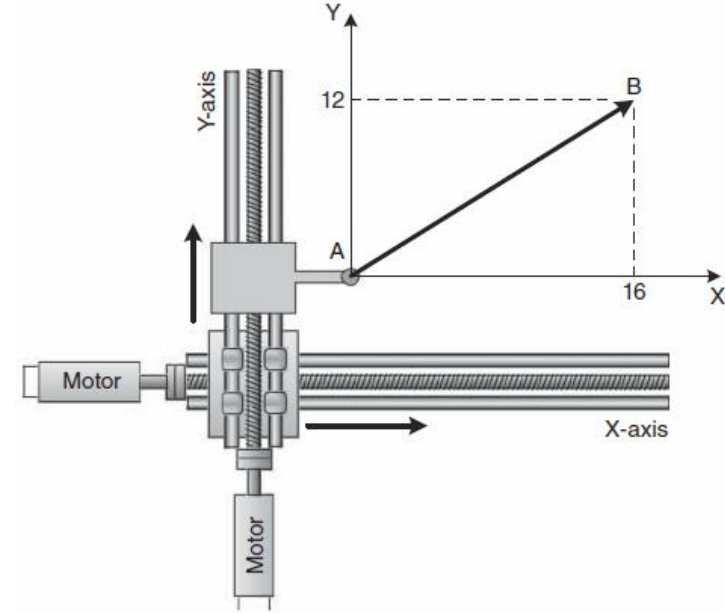


- Bu modda eksenlerin hareketleri kontrolör tarafından koordine edilir.
- Doğrusal ve dairesel enterpolasyon, iki motorun hareketini bir 2B düzlemde koordine ederek sırasıyla çizgiler ve dairesel parçalar üretebilir.
- Konturlama adı verilen üçüncü bir enterpolasyonlu hareket türü, motor sayısını veya hareket profillerini sınırlamaz.
  - 3B uzayda herhangi bir keyfi yörünge oluşturulmasına izin verir.
- Enterpolasyonlu harekette, daha hızlı eksenler kontrolör tarafından yavaşlatılır, böylece eksen hareketleri aynı anda tamamlanır.
- Bunu başarmak için iki yaklaşım vardır:
  - 1. Hızlanma süresini,  $t_a$ , hareketini tamamlaması en uzun süreyi alan eksenle aynı tutarken, daha hızlı olan eksenleri yavaşlatın.
  - 2. Hızlanmayı,  $a$ , hareketini tamamlaması en uzun süreyi alan eksenle aynı tutarken, daha hızlı olan eksenleri yavaşlatın.



## ÖRNEK:

- Yandaki şekilde takım ucunu “A” ve “B” noktaları arasındaki düz çizgiyi takip etmek için kontrolöre hareketi enterpolasyon yapmasını söyleyebiliriz.
- Bu durumda, X eksini hareketini programladığı gibi yürüyütür.
  - Çünkü daha uzun süre alıyor.
- Y eksenini ise yavaşlatılır.
  - Böylece ikisi de aynı anda hareketlerini bitirir.



$v_x = 4 \text{ cm/s}$  ve  $t_a = 0,2 \text{ s}$  verildiğinde, her iki eksenin de hareketlerini aynı anda bitirmesi için Y ekseninin yeni hızı  $v_y$  ne olmalıdır? Her iki eksen için de  $t_a$ 'yı aynı tutunuz.

# Enterpolasyonlu Hareket



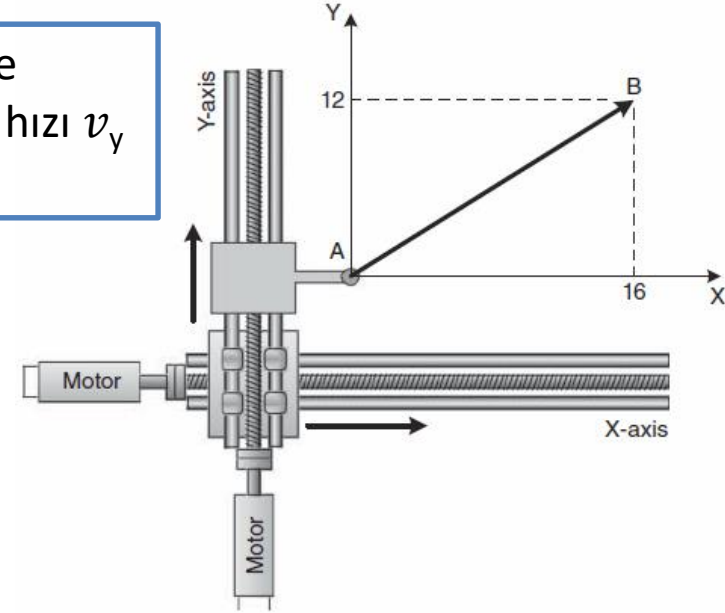
$v_x = 4 \text{ cm/s}$  ve  $t_a = 0,2 \text{ s}$  verildiğinde, her iki eksenin de hareketlerini aynı anda bitirmesi için Y ekseninin yeni hızı  $v_y$  ne olmalıdır? Her iki eksen için de  $t_a$ 'yı aynı tutunuz.

## Çözüm:

- Bir önceki örnekte, X ekseninin hareketini tamamlamasının 4.2 s süreceğini bulmuştuk.
- Bu nedenle, Y eksenini için toplam hareket süresi de  $t_{toplam}^y = 4.2 \text{ s}$  olacaktır.
- $t_{toplam}^y = t_m^y + 2t_a$  olduğunu göre,
  - $t_m^y = 3.8 \text{ s}$  olmalı.
- Bu durumda;

$$\begin{aligned} v_y &= \frac{L}{(t_m + t_a)} \\ &= \frac{12}{3.8 + 0.2} \\ &= 3 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

$t_a$  küçük tutulduğundan, düz çizgi yörüngesinden sapma "A" ve "B" noktaları arasında çok küçük olacaktır.

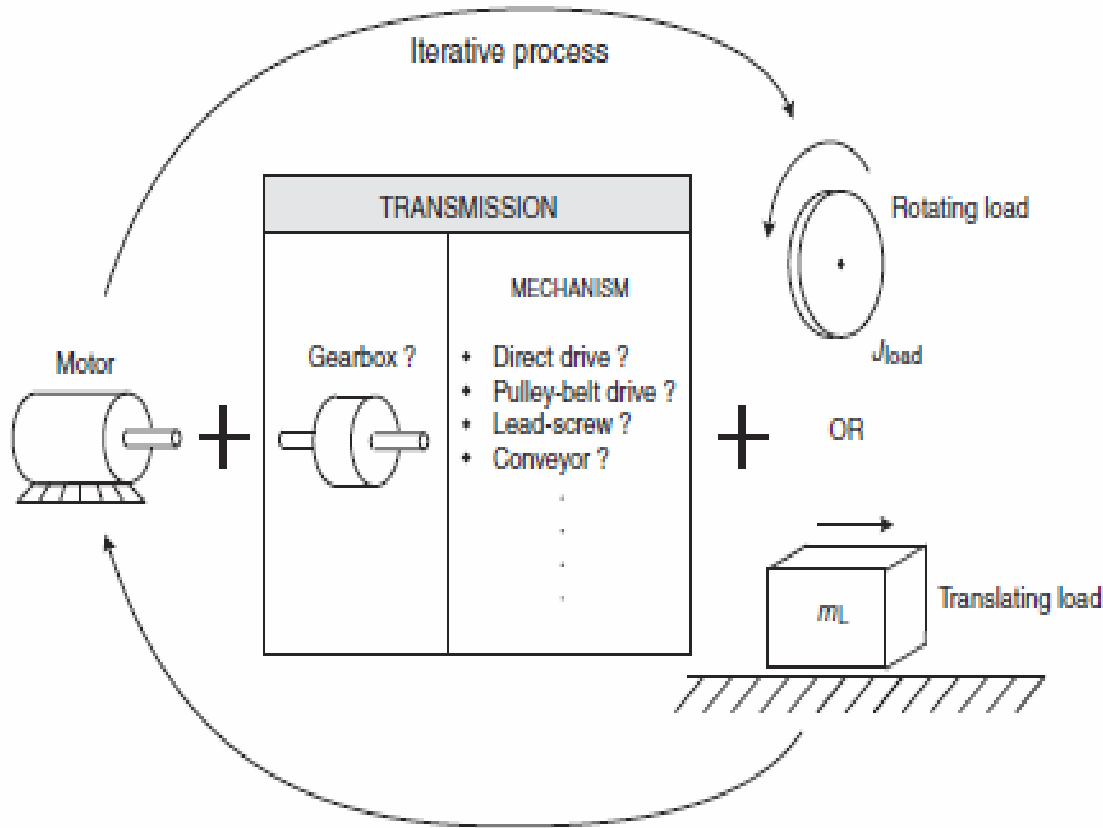


# BÖLÜM-3: TAHRİK SİSTEMİ TASARIMI



- Hareket kontrol sistemleri, hareketi aktüatörden yüke (veya alete) ileten mekanik bileşenler kullanılarak oluşturulur.
- Tasarım problemi tipik olarak, yük için istenen hareket profilinin elde edilebilmesi için uygun bir motor ve şanzıman (kayışlı tahrik veya dişli kutusu gibi) seçilmesini gerektirir.
- Çözüm, yinelemeli bir sürecin sonunda bulunur.
- Motor ve şanzıman kombinasyonuna genellikle aktarma organları denir .

# BÖLÜM-3: TAHRİK SİSTEMİ TASARIMI



Yinelemeli aktarma organları tasarım süreci



- Aşağıda listelendiği gibi karşılaşılabileceğimiz dört tip tasarım problemi vardır.

Tip	Verilen	Bulunan/boyut
1	İstenen yük hareketi	Şanzıman ve motor
2	Mevcut motor ve şanzıman	Ortaya çıkan yük hareketi
3	Mevcut motor, istenen yük hareketi	İletim
4	İstenen yük hareketi, şanzıman	Motor

- Ancak en yaygın olanı, istenen yük hareketinin belirtildiği ve motor ve şanzımanın seçilmesi gereken ilk tiptir.
- Tasarım sürecinin ana hedefleri:
  - 1. Motordan elde edilen torkun (maksimum yük hızında), bir güvenlik payı ile uygulamanın gerektirdiği torktan daha büyük olması,
  - 2. Motor ve yük arasında uygun atalet ilişkisinin karşılanması,
  - 3. Herhangi bir ek kriterinin (maliyet, sertlik, çevrim süresi, vb.) karşılanması.

# Motor Seçimi



- Motor seçimi, hareket kontrol endüstrisinde genellikle motor boyutlandırma olarak adlandırılır.
- Motor boyutu, bir motorun torkunu ve gücünü ifade eder.
- Bir motorun büyük bir farkla fazla büyütülmesi, sistemin maliyetini artırır ve enerjinin çoğu motor ataletini hızlandırmak için harcanacağından daha yavaş sistem yanıtına yol açar.
- Küçük boyutlu bir motor gerekli yük hareketini sağlayamaz. Bazı durumlarda, yük hareketi gereksinimlerini zar zor karşılasa bile, aşırı ısınma nedeniyle büyük olasılıkla kısa bir ömre sahip olacaktır.



- Kütle eylemsizlik momenti  $J$ , bir nesnenin özelliğidir.
  - Nesnenin kütlesini ve şeklini tek bir nicelikte birleştirir.
  - Burada atalet terimi kısaca kütle atalet momentini belirtmek için kullanılmıştır.
- Eylemsizlik, bir cismin dönme eksenini etrafındaki açısal hızındaki değişime karşı direncini tanımlar.
  - Atalet hareketteki değişime karşıdır.



- Dönme dinamiğinde Newton'un ikinci yasası

şöyledir:

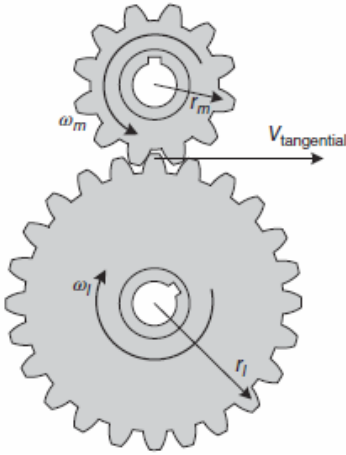
$$\sum T = J\alpha$$

T: tork

$\alpha$ : açısal ivme.

- Şanzıman oranı şöyle tanımlanır;

$$N_{GB} = \frac{\text{motor speed}}{\text{load speed}}$$



Dişlilerin birleşmesi

- Dişli kutusu oranını belirtmek için genellikle 5:1 gibi bir gösterim kullanılır.
- Bu, motor hızının yük hızından 5 kat daha hızlı olduğu  $N_{GB} = 5$  anlamına gelir.
- Şaft hızları dışındaki parametreler de dişli kutusu oranını tanımlamak için kullanılabilir.

# Atalet ve Tork Yansıması



**Teğetsel (Yüzeysel) Hız:** Dişliler arasındaki birleşme noktasındaki teğetsel hız:

$$V_{\text{tangential}} = \omega_m r_m = \omega_l r_l$$

$\omega_m$  (rad/s): motor dişlisinin (veya milinin) hızı  
 $\omega_l$  (rad/s): yük dişlisinin (veya milin) hızı,  
 $r_m$  ve  $r_l$ : motor ve yük dişlilerinin yarıçapları.

$$\frac{\omega_m}{\omega_l} = \frac{r_l}{r_m}$$



$$N_{\text{GB}} = \frac{\text{motor speed}}{\text{load speed}}$$



$$N_{\text{GB}} = \frac{\omega_m}{\omega_l} = \frac{r_l}{r_m}$$

**Dişli Diş Sayısı :** Bir dişlideki diş sayısı, büyüklüğü (çap veya yarıçap) ile doğru orantılıdır.

$$N_{\text{GB}} = \frac{\omega_m}{\omega_l} = \frac{r_l}{r_m} = \frac{n_l}{n_m}$$



- **Tork:** Dişli oranını tanımlamanın başka bir yolu, dişli tahrikinin giriş ve çıkış millerindeki torkları kullanmaktır.
  - %100 verimlilik varsayıldığında, dişli tahrik yoluyla iletilen güç (P) sabit kalır.

$$P = T_m \omega_m = T_l \omega_l$$

$$\frac{\omega_m}{\omega_l} = \frac{T_l}{T_m}$$

$T_l$  : yük dişlisi (veya mili) üzerindeki tork  
 $T_m$  : motor dişlisi (veya mili) üzerindeki tork

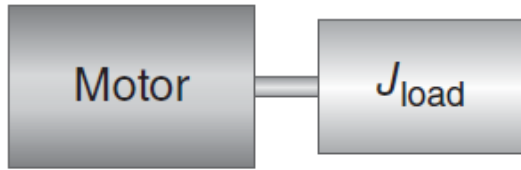
$$N_{GB} = \frac{\omega_m}{\omega_l} = \frac{r_l}{r_m} = \frac{n_l}{n_m}$$

$$N_{GB} = \frac{\omega_m}{\omega_l} = \frac{r_l}{r_m} = \frac{n_l}{n_m} = \frac{T_l}{T_m}$$

# Yansıyan Atalet

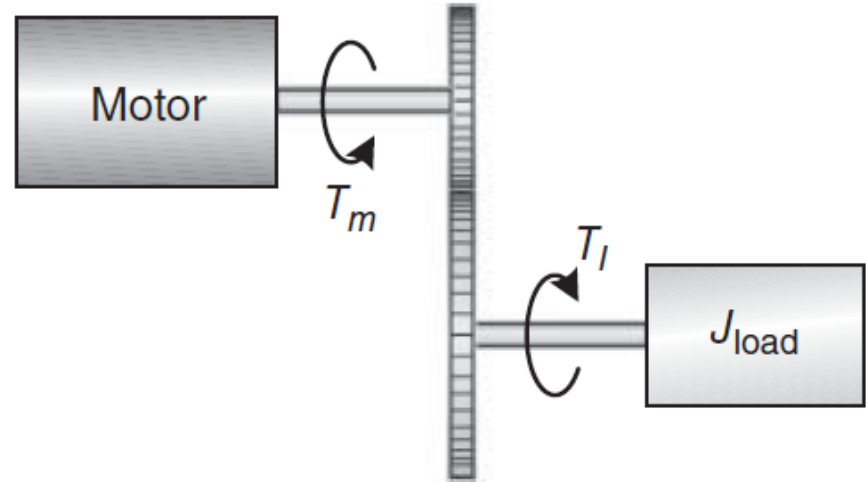


- Motor tarafından görülen (veya hissedilen) atalet, yük doğrudan kuplaj yerine bir dişli kutusu aracılığıyla motora bağlandığında değişir.



(a)

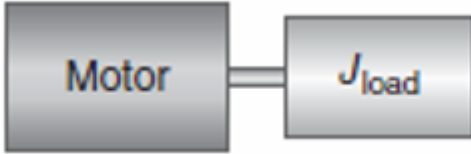
Doğrudan motora bağlı yük



(b)

Motora dişliler aracılığıyla bağlanan yük

# Yansıyan Atalet



Doğrudan bağlı yük için hareket denklemi:

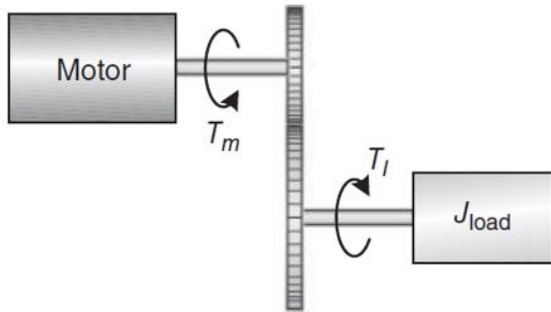
$$T_m = J_{load} \ddot{\theta}_m$$

Açısal hız  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$

Açısal hızlanma  $\alpha = \frac{d\omega}{dt}$

$$T = J\alpha$$

$T$  nesneye uygulanan moment (Nm)  
 $J$  atalet momenti (kg.m<sup>2</sup>)  
 $a$  oluşan hızlanma (m/s<sup>2</sup>)



Dişli kutusu ile bağlı yük için hareket denklemi:

$$T_l = J_{load} \ddot{\theta}_l$$

# Yansıyan Atalet



$$T_m = J_{\text{load}} \ddot{\theta}_m$$

$$T_l = J_{\text{load}} \ddot{\theta}_l$$

$$N_{\text{GB}} = \frac{\omega_m}{\omega_l} = \frac{r_l}{r_m} = \frac{n_l}{n_m} = \frac{T_l}{T_m}$$



$$\frac{r_l}{r_m} T_m = J_{\text{load}} \ddot{\theta}_l$$

Dişliler döndüğünde, her bir dişlinin çevresi boyunca kat edilen mesafe aynıdır:

$$r_l \theta_l = r_m \theta_m$$



$$r_l \ddot{\theta}_l = r_m \ddot{\theta}_m$$

$$r_l \ddot{\theta}_l = r_m \ddot{\theta}_m$$



$$\frac{r_l}{r_m} T_m = J_{\text{load}} \frac{r_m}{r_l} \ddot{\theta}_m$$



$$\begin{aligned} T_m &= J_{\text{load}} \left( \frac{r_m}{r_l} \right)^2 \ddot{\theta}_m \\ &= J_{\text{load}} \frac{1}{N_{\text{GB}}^2} \ddot{\theta}_m \end{aligned}$$

# Yansıyan Atalet



$$T_m = J_{\text{load}} \left( \frac{r_m}{r_l} \right)^2 \ddot{\theta}_m$$
$$= J_{\text{load}} \frac{1}{N_{\text{GB}}^2} \ddot{\theta}_m$$

$$\sum T = J\alpha$$

$$J_{\text{ref}} = \frac{J_{\text{load}}}{N_{\text{GB}}^2}$$

Dişliler vasıtasıyla motora yansıyan yük ataleti

Dişliler veya kasnaklar gibi hızı değiştiren elemanlar, motor tarafından görülen yük ataletini değiştirmek için bu ilişkiyi takip eder.

# Yansıyan Tork



$$P = T_m \omega_m = T_l \omega_l$$

$$\frac{\omega_m}{\omega_l} = \frac{T_l}{T_m}$$



$$T_m = \frac{\omega_l}{\omega_m} T_l$$
$$= \frac{T_l}{N_{GB}}$$

- Atalet yansımasından farklı olarak, bu denklemde  $N_{GB}$  dişli oranının karesi olmadığına dikkat ediniz.
- Hızı değiştiren elemanlar ayrıca motora yansıtılan torku da değiştirir.



**%100 verim varsayımında**

$$T_m = J_{\text{load}} \left( \frac{r_m}{r_l} \right)^2 \ddot{\theta}_m$$

$$= J_{\text{load}} \frac{1}{N_{\text{GB}}^2} \ddot{\theta}_m$$

$$T_m = \frac{\omega_l}{\omega_m} T_l$$

$$= \frac{T_l}{N_{\text{GB}}}$$

- Gerçek bir dişli tahrikinde, sürtünme ve ısınma nedeniyle şanzıman yoluyla giriş gücünün bir kısmı kaybolduğundan verimlilik her zaman %100'den azdır.
- Bir iletimin verimliliği,  $\eta$ , çıkış gücünün giriş gücüne oranı olarak tanımlanır.

$$\eta = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}}$$

$$T_l \omega_l = \eta T_m \omega_m$$

$$T_m = \frac{T_l}{\eta N_{\text{GB}}}$$

$$J_{\text{ref}} = \frac{J_{\text{load}}}{\eta N_{\text{GB}}^2}$$

# Toplam Atalet



- Bir eksenin tasarımında bir dişli kutusu veya transmisyon mekanizması (kasnak-kayış gibi) kullanılıyorsa, ataletlerin bir kısmı motor milinde, bir kısmı da yük milinde olacaktır.
- Ayrıca  $J_m$  (rotor ataleti) motorun ataleti de vardır.
- Sistemdeki tüm ataleti uygun şekilde hesaba katmanın uygun bir yolu, tüm ataleti motor miline yansıtmasıdır.

Motor şaftındaki toplam atalet:

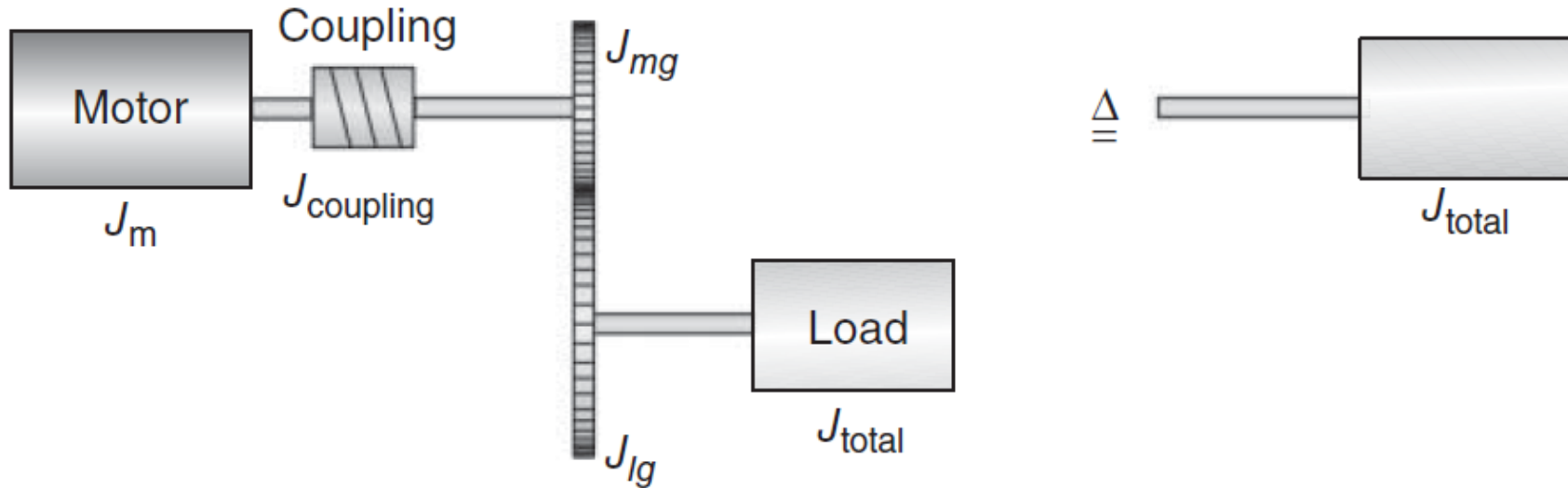
$$J_{\text{total}} = J_m + J_{\text{on motor shaft}} + J_{\text{ref}}$$

$J_{\text{on motor shaft}}$  : motor şaftındaki toplam dış atalet  
 $J_{\text{ref}}$  : motor miline yansıyan toplam atalet

# Örnek



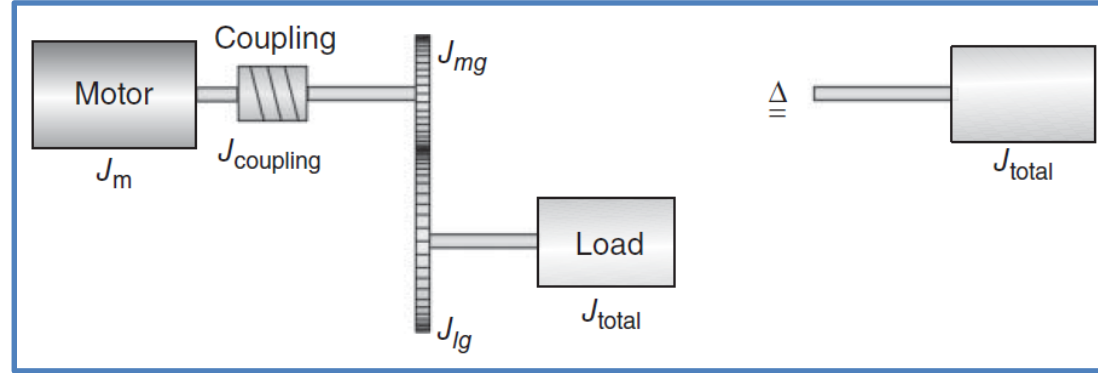
- Aşağıdaki sistem verildiğinde, motor mili üzerindeki eşdeğer toplam ataleti ( $J_{\text{toplam}}$ ) bulunuz.



# Örnek



$$J_{\text{total}} = J_m + J_{\text{on motor shaft}} + J_{\text{ref}}$$



Kaplin (coupling) ataleti ve motor dişli ataleti motor mili üzerindedir:

$$J_{\text{on motor shaft}} = J_{\text{coupling}} + J_{mg}$$

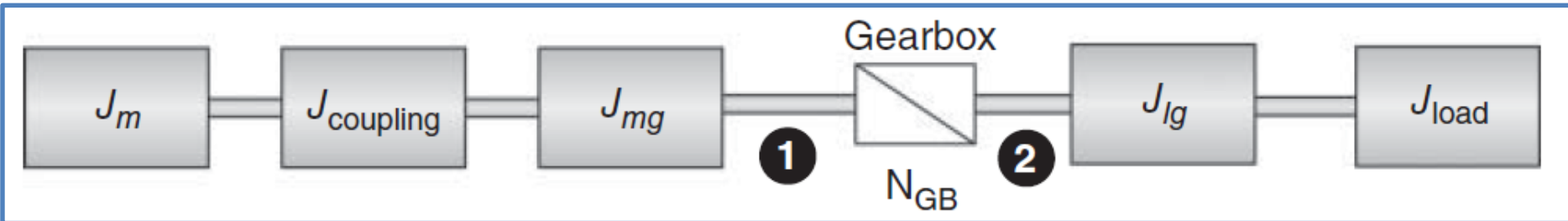
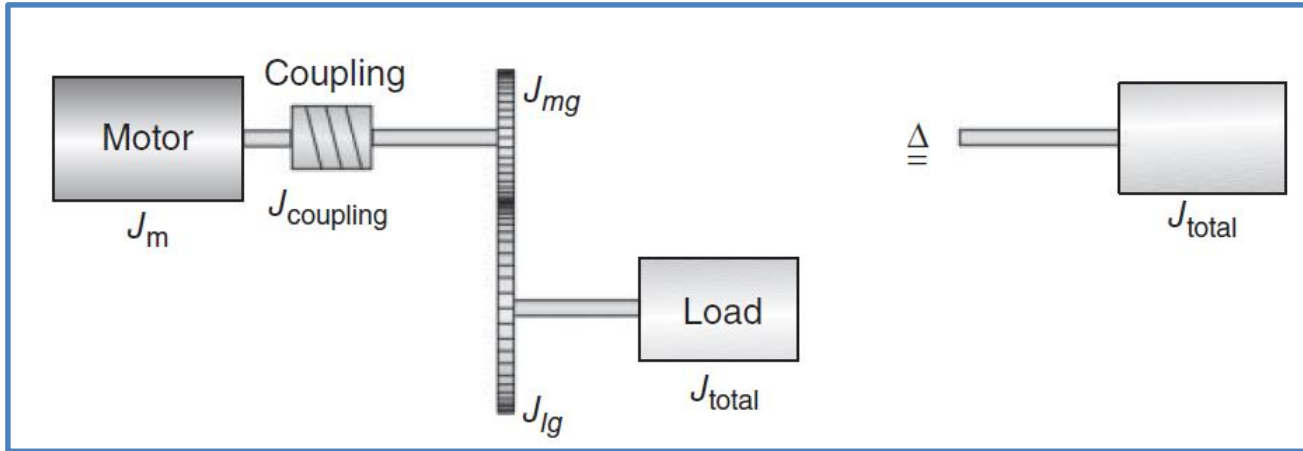
Yük ataleti ve yük dişli ataleti yük mili üzerindedir. Bu nedenle, geri kalan atalet eklenmeden motor miline yansıtılmaları gerekir.

$$J_{\text{ref}} = \frac{1}{\eta N_{GB}^2} [J_{lg} + J_{\text{load}}]$$

$$J_{\text{total}} = J_m + J_{\text{coupling}} + J_{mg} + \frac{1}{\eta N_{GB}^2} [J_{lg} + J_{\text{load}}]$$

Bu örnekte, şaft ataletini göz ardı edildi; gerekirse bu hesaplama dahil edilebilir.

# Örnek



$$J_{total} = J_m + J_{coupling} + J_{mg} + \frac{1}{\eta N_{GB}^2} [J_{lg} + J_{load}]$$

# Atalet Oranı



$$J_R = \frac{J_{\text{on motor shaft}} + J_{\text{ref}}}{J_m}$$

Atalet oranı

$\frac{\text{Motorun dışındaki tüm ataletlerin toplamı}}{\text{Motorun kendi ataleti}}$

$$J_R = \frac{J_{\text{on motor shaft}} + J_{\text{load} \rightarrow M} + J_{\text{GB} \rightarrow M}}{J_m}$$

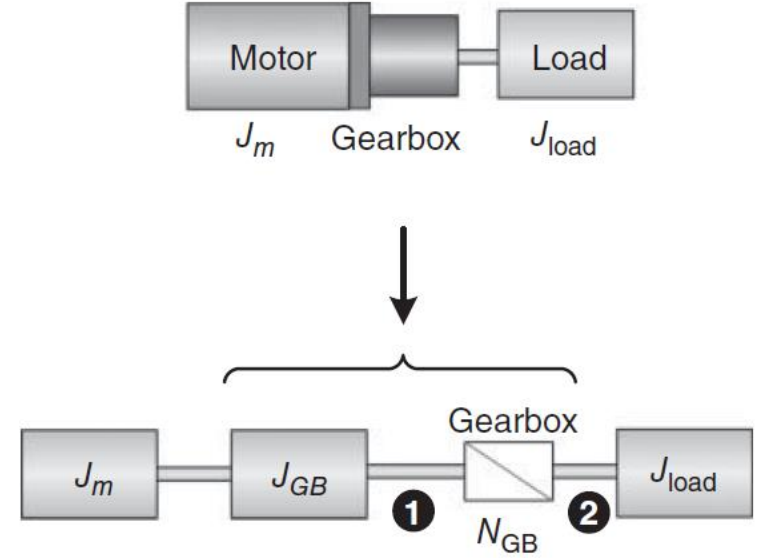
$J_{\text{GB} \rightarrow M}$ : Motor şaftına yansıyan dişli kutusunun eylemsizliği

$J_{\text{load} \rightarrow M}$ : Motor şaftına yansıyan yük eylemsizliği.

# Örnek



- Yandaki sistem Apex Dynamics, Inc. firmasına ait PN023 dişli kutusu kullanmaktadır.
  - 5:1 dişli oranına, giriş tarafına yansıyan  $0.15 \text{ kg-cm}^2$  atalete ve
  - %97 verimliliğe sahiptir.
- Motor, Allied Motion Technologies, Inc. tarafından üretilen bir Quantum QB02301 NEMA boyut 23 servo motordur.
  - $1,5 \times 10^{-5} \text{ kg-m}^2$  rotor ataletine sahiptir.



Yük ataleti  $10 \times 10^{-4} \text{ kg-m}^2$  ise, atalet oranını bulunuz?

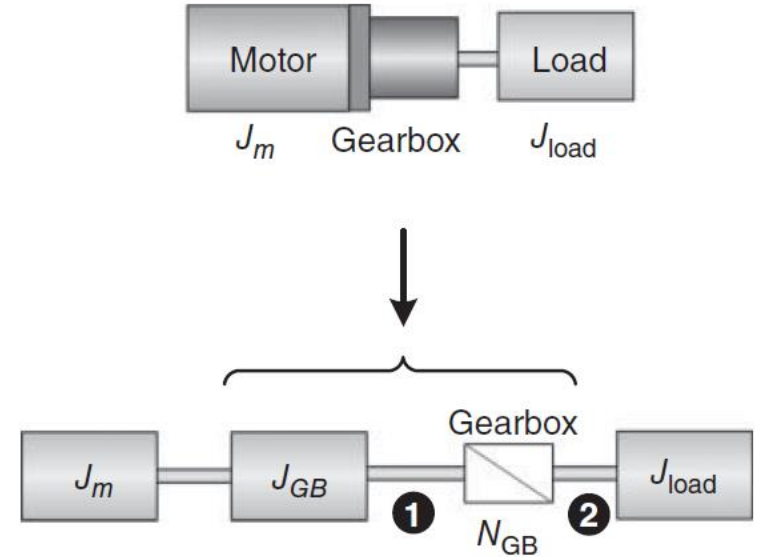
# Örnek



$$J_{\text{load} \rightarrow M} = \frac{J_{\text{load}}}{\eta N_{\text{GB}}^2}$$

$$= \frac{10 \times 10^{-4}}{0.97 \cdot 5^2}$$

$$= 4.124 \times 10^{-5} \text{ kg-m}^2$$



$$J_R = \frac{J_{\text{on motor shaft}} + J_{\text{load} \rightarrow M} + J_{\text{GB} \rightarrow M}}{J_m}$$

$$= \frac{4.124 \times 10^{-5} + 0.15 \times 10^{-4}}{1.5 \times 10^{-5}}$$

$$= 3.75$$

$J_{\text{on motor shaft}} = 0$  çünkü motor shaftında başka bir atalet yoktur. (shaft ihmal ediliyor.)

# Hedeflenen Pratik Atalet Oranı



- Tasarım hedefi, uygulama için gereken hız ve torku üretebilen en küçük motoru bulmaktır. Pratik amaçlar için, atalet oranı şöyle olmalıdır.

$$J_R \leq 5$$

- Atalet oranı düştükçe performans yükselme eğilimindedir. Makinenin hızlı hareketler ve sık kalkış ve duruşlarda çevik olması gerekiyorsa, 2 veya 1'e kadar atalet oranları kullanılabilir.
- Ancak, yüksek performans ve hızlı dinamikler kritik değilse, 10'luk atalet oranı yaygındır ve 100 veya daha fazlası mümkündür.

# Hedeflenen Pratik Atalet Oranı



- Bununla birlikte, atalet oranı çok düşükse, motor aşırı boyutlandırılabilir ve bu nedenle genel makine performansında fazla bir gelişme olmaksızın pahalı ve hacimli olabilir.
- Atalet oranının seçimi ayrıca sistemin sertliğine de bağlıdır.
  - Bir sistem, yük altında eğilmezse, esnemez veya bükülmezse rijit olarak kabul edilir.
  - Yüke uygun şekilde bağlanmış motor ve dişli kutusuna sahip bir sistem rijit olarak kabul edilir.
  - Sert bir sistem için atalet oranı 5-10 olabilir.
  - Öte yandan kayış kasnak kullanan sistemler yük altında kayışın gerilmesi nedeniyle esneyebilir. Bu nedenle, atalet oranı küçük tutulmalıdır.



# ***EEM435 Elektrik Tahrik Sistemleri*** ***- Sunum 5***

**Doç. Dr.Furkan Akar**

*Düzce Üniversitesi, Müh. Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği*

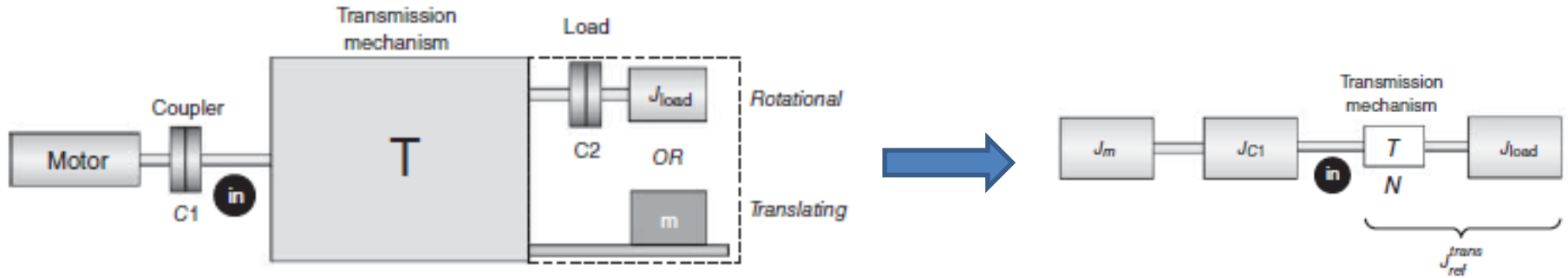


- Çoğu mekanik sistem, yük ile motor arasındaki aktarım mekanizmalarından oluşur.
- Bir aktarım mekanizması, yükü motora bağlar ve hareket profili gereksinimlerinin karşılanmasına yardımcı olur.
- İletim mekanizmaları:
  - Kasnak ve kayış
  - Kılavuz vida ve bilyalı vida
  - Kremayer ve pinyon
  - Doğrusal hareket için kayış tahriki
  - Konveyör.
- Kasnak ve kayış hariç, diğer tüm mekanizmalar dönme hareketini doğrusal harekete dönüştürür.

# İletim Mekanizmaları Yoluyla Yük ve Atalet Yansıması



- Dişli kutuları gibi hız değiştiren elemanların motor tarafından görülen ataleti ve torku değiştirdiğini gördük.
- Tıpkı dişli kutuları gibi, iletim (şanzıman) mekanizmaları da motorun gördüğü ataleti ve torku değiştirir.
- Her şanzıman mekanizmasının,  $N_{GB}$  şanzıman oranına benzer bir şanzıman oranı "N" vardır.

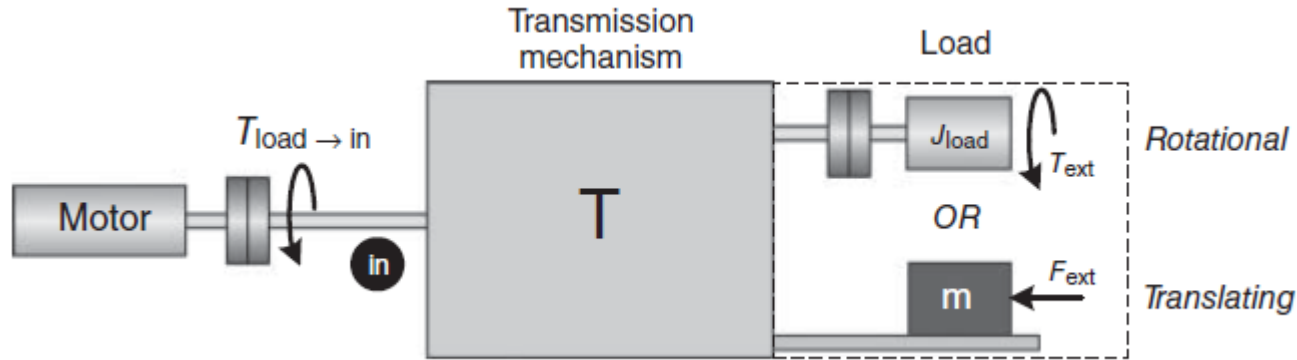


$$J_{total} = J_m + J_{C1} + J_{ref}^{trans}$$

# İletim Mekanizmaları Yoluyla Yük ve Atalet Yansıması



- Yüke etki eden dış torklar veya kuvvetler, motordan tork talebi,  $T_{load \rightarrow in}$  olarak iletim mekanizmasının giriş miline yansıtılır.



- Her transmisyon mekanizması, kinematiğine dayalı olarak yük torku talebini giriş miline belirli bir şekilde yansıtır.

# Kasnak ve Kayış



- Bir kasnak ve kayış iletimi, iki kasnak ve bunları birbirine bağlayan bir kayıştan oluşur.
- Hareket kontrol sistemlerinde şekilde gösterildiği gibi dişli kayışlar (triger kayışları) kullanılmaktadır.
  - Bu, kayışın kayması olmadan yükün daha doğru konumlandırılmasını sağlar.
  - Triger kayışlarınının kasnaklarına zincir dişlisi denir.



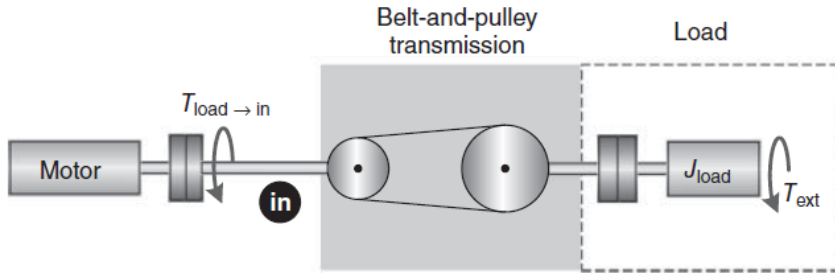
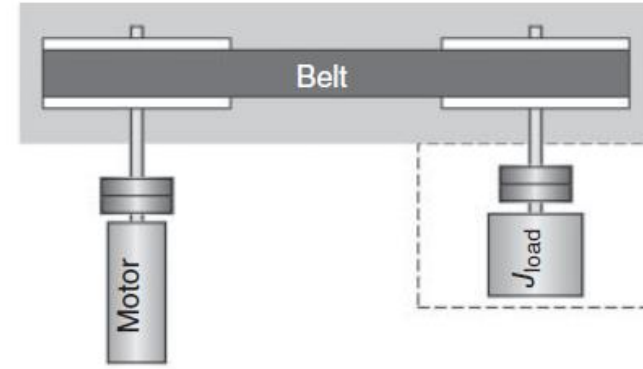
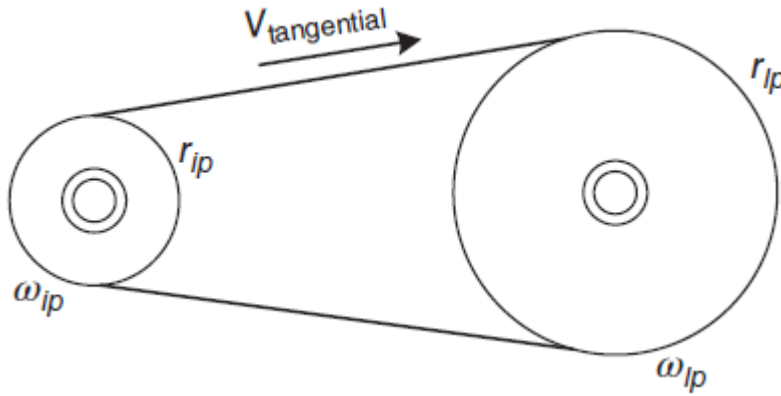
# Kasnak ve Kayış



- İletim Oranı:

$$V_{\text{tangential}} = \omega_{ip} \cdot r_{ip} = \omega_{lp} \cdot r_{lp}$$

$$N_{BP} = \frac{\omega_{ip}}{\omega_{lp}} = \frac{r_{lp}}{r_{ip}}$$



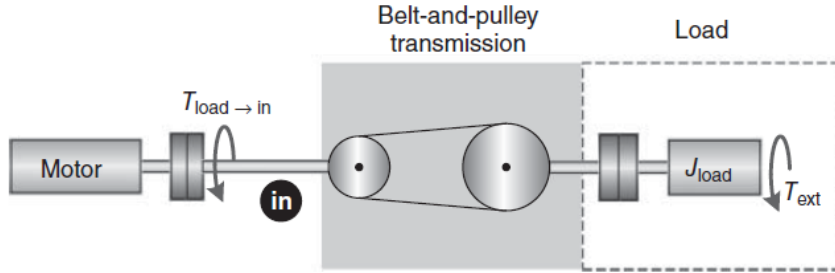
- Yansıtılan Atalet:

$$J_{\text{ref}}^{\text{trans}} = J_{IP} + J_{\text{belt} \rightarrow \text{in}} + J_{LP \rightarrow \text{in}} + J_{\text{load} \rightarrow \text{in}} + J_{C2 \rightarrow \text{in}}$$

$J_{IP}$  : giriş kasnağının ataleti,  
 $J_{LP}$  : yük kasnağının ataleti,

$J_{\text{load}}$  : yükün ataleti,  
 $J_{C2}$  : yük kuplörünün ataleti.

# Kasnak ve Kayış



- Yansıtılan Atalet:

$$J_{ref}^{trans} = J_{IP} + J_{belt \rightarrow in} + J_{LP \rightarrow in} + J_{load \rightarrow in} + J_{C2 \rightarrow in}$$

$J_{IP}$  : giriş kasnağının ataleti,

$J_{LP}$  : yük kasnağının ataleti,

$J_{load}$  : yükün ataleti,

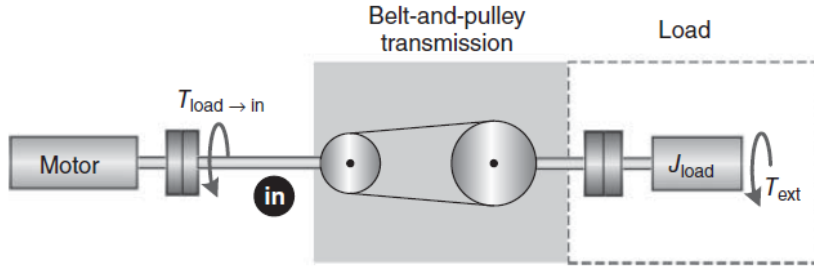
$J_{C2}$  : yük kuplörünün ataleti.

- $J_{belt \rightarrow in}$  terimi, kayışı, ataleti  $m$  ile verilen bir dönen kütle olarak modeller.

$$J = mr^2 \quad m = W_{belt}/g \quad r = r_{ip}$$

$$J_{ref}^{trans} = J_{IP} + \left( \frac{W_{belt}}{g \cdot \eta} \right) \cdot r_{ip}^2 + \frac{1}{\eta N_{BP}^2} (J_{LP} + J_{load} + J_{C2})$$

# Kasnak ve Kayış



$$T_m = \frac{T_l}{\eta N_{GB}} \quad \text{olarak bulmuştuk.}$$

$$N_{BP} = \frac{\omega_{ip}}{\omega_{lp}} = \frac{r_{lp}}{r_{ip}}$$

$$T_{load \to in} = \frac{T_{ext}}{\eta N_{BP}}$$

## • Yük Torqu:

- Yandaki şekil yüke etki eden toplam harici tork ( $T_{ext}$ ) ve kayış-kasnak iletimi yoluyla yansıtılan motordan elde edilen tork talebi  $T_{load \to in}$ 'i gösterir.

Burada  $T_{ext}$ , daha sonra detaylı bir şekilde irdelenecek olan verilen yüke etki eden tüm harici torkların toplamıdır.

# Kılavuz Vida



- Kılavuz vidalar, döner hareketi doğrusal harekete dönüştürmek için yaygın olarak kullanılır.



ACME vida



Bilyalı vida

- ACME vidasının geri sürülmesi zordur.
  - Motor yükü sürebilir ancak yük motoru çalıştıramaz .
- ACME vidaları büyük kuvvetleri iletebilir ve bu nedenle genellikle güç vidaları olarak adlandırılır.
- Bir ACME vidasının verimliliği %35-85 aralığında olabilir.

# Kılavuz Vida



ACME vida



Bilyalı vida

- Bilyalı vida, bir oluk içinde yer alan bilyalı rulmanlar kullanır.
- Vida ve somun birbirine değmez.
  - Vida (veya somun) döndükçe vida ve somun arasındaki oluklardaki bilyalı rulmanlar devirdaim yapar.
  - Bilyeler somunun arka ucuna ulaştığında, bir geri dönüş borusu tarafından somunun ön ucuna geri yönlendirilir ve devirdaim etmeye devam eder.
  - Azaltılmış boşluk ve sürtünme, bilyalı vidaları hareket kontrol uygulamalarında oldukça popüler hale getirmiştir.
  - Verimi %85-95 aralığındadır.



**İletim Oranı :** Kılavuz vidanın iletim oranı, «adım» (pitch) tanımından hesaplanabilir.

**Adım (dev/inç):** Somunun 1 inç (veya SI birimlerinde dev/m) hareket etmesi için gereken vida devri sayısı.

**Kılavuz (inç/dev):** Vidanın bir devrinde somunun kat ettiği mesafe (SI birimlerinde m/dev).

**Adımı** bir denklem ile ifade edebiliriz.

$\Delta\theta$ : giriş milinin (rad) konumu,

$p$ : adım

$\Delta x$ : somunun lineer yer değiştirmesi (inç veya m)

$$\Delta\theta = 2\pi p \Delta x$$

$$N_{GB} = \frac{\text{motor speed}}{\text{load speed}}$$

$$\frac{\text{input speed}}{\text{load speed}} = \frac{\dot{\theta}}{\dot{x}} = 2\pi p$$

Kılavuz vida mekanizması için aktarım oranı

$$N_S = 2\pi p$$



## Yansıyan Atalet

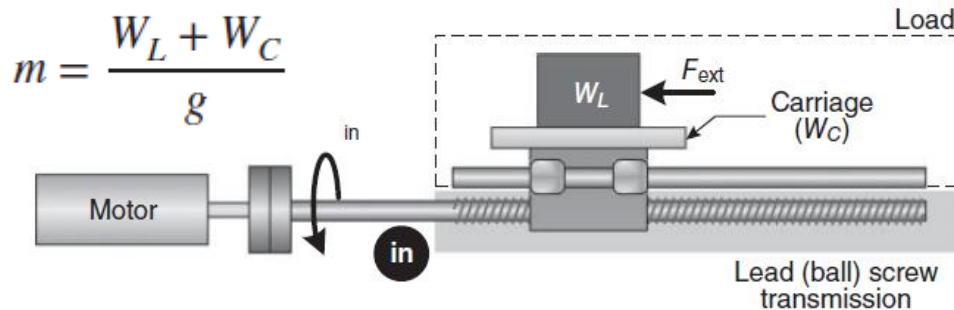
Öncelikle hareket ettirilen kütle için atalet ile yansıyan atalet arasındaki ilişkiyi türetmemiz gerekir. Lineer harekette toplam kütle  $m$ 'nin kinetik enerjisi

$$KE = \frac{1}{2}m\dot{x}^2$$

$$\frac{\text{input speed}}{\text{load speed}} = \frac{\dot{\theta}}{\dot{x}} = 2\pi p \quad \longrightarrow \quad KE = \frac{1}{2}m \frac{1}{(2\pi p)^2} \dot{\theta}^2$$

Hız şimdi açısal hız olarak ifade edildiğinden, önündeki terim yansıyan eylemsizliğe eşit olmalıdır.

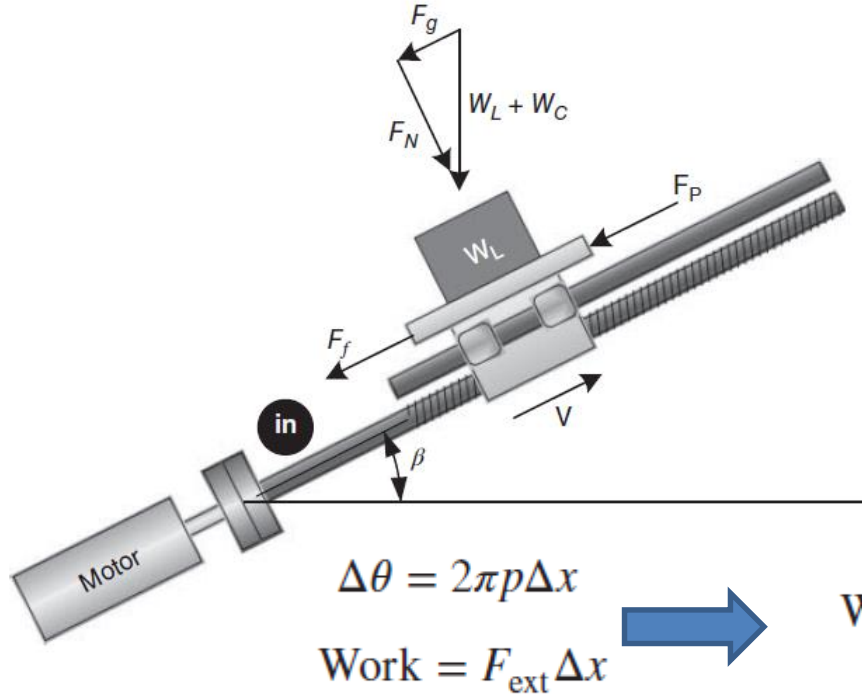
$$KE_{\text{rotational}} = \frac{1}{2}J\omega^2 = \frac{1}{2}J\dot{\theta}^2 \quad \longrightarrow \quad J_{\text{ref}} = m \frac{1}{(2\pi p)^2} \quad N_S = 2\pi p \quad \longrightarrow \quad J_{\text{ref}} = \frac{m}{N_S^2}$$



$$\begin{aligned} J_{\text{ref}}^{\text{trans}} &= J_{\text{screw}} + J_{\text{load} \rightarrow \text{in}} + J_{\text{carriage} \rightarrow \text{in}} \\ &= J_{\text{screw}} + \frac{1}{\eta N_S^2} \left( \frac{W_L + W_C}{g} \right) \end{aligned}$$



# Kılavuz Vida



$$F_{\text{ext}} = F_p + (W_L + W_C)(\sin \beta + \mu \cos \beta)$$

Motor tarafından görülen yük torku, yapılan iş dikkate alınarak hesaplanabilir:

$$\text{Work} = F_{\text{ext}} \Delta x$$

$\Delta x$ : yükün kat ettiği doğrusal mesafe

$$\text{Work} = F_{\text{ext}} \frac{1}{(2\pi p)} \Delta\theta$$

Aynı zamanda giriş tarafında:  $\text{Work} = T_{\text{load} \rightarrow \text{in}} \Delta\theta$

$$N_s = 2\pi p \quad \longrightarrow \quad T_{\text{load} \rightarrow \text{in}} = \frac{F_{\text{ext}}}{N_s}$$

# ÖRNEK



- 0,1 kg'lık bir yük, 280 kg/m<sup>3</sup> yoğunluk, 0,375 cm çap, 36 cm uzunluk, 0,75 cm/dev kılavuz ve %90 verimliliğe sahip bir çelik bilyalı vida kullanılarak konumlandırılacaktır. Taşıyıcı 1 gr ağırlığındadır. Şanzımanın giriş miline yansıttığı ataleti hesaplayınız.

$$W = m \cdot g$$

- Çözüm:  $J_{ref}^{trans} = J_{screw} + J_{load \rightarrow in} + J_{carriage \rightarrow in}$   

$$= J_{screw} + \frac{1}{\eta N_s^2} \left( \frac{W_L + W_C}{g} \right)$$

W: Ağırlık: Newton (kg m/s<sup>2</sup>)

$m_L = 100$  gr,  
 $m_C = 1$  gr  
 $g = 9,806$  m/s<sup>2</sup>

m: kütle: kg

g: yer ç. ivmesi: m/s<sup>2</sup>

Bilyalı vidanın iletim oranı  $N_s = 2\pi p$  ile verilir; burada  $p$ , vidanın adımıdır ve problemde belirtilen kılavuzun tersine eşittir.

Vida ataleti  $J_{screw}$ , vidayı uzun, ince bir katı silindir olarak düşünülerek hesaplanabilir.

D : adım çapı

L: vidanın uzunluğu.

$$N_s = 2\pi p = 2\pi \frac{1}{0,75 \times 10^{-2}} = 837,75$$

$$J_{screw} = \frac{\pi L \rho D^4}{32}$$

$$= \frac{\pi * (36 \times 10^{-2}) * 280 * (0,375 \times 10^{-2})^4}{32}$$

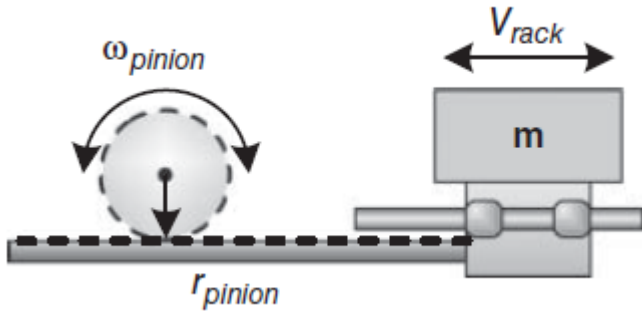
$$= 0,19 \times 10^{-8} \text{ kg.m}^2$$

# ÖRNEK



- Şanzımanın giriş miline yansıttığı atalet şu şekilde hesaplanır:

$$\begin{aligned} J_{\text{ref}}^{\text{trans}} &= J_{\text{screw}} + \frac{1}{\eta N_S^2} \left( \frac{W_L + W_C}{g} \right) \\ &= 0,19 \times 10^{-8} + \frac{(0,1 + 0,001)}{837,75^2} \\ &= 0,19 \times 10^{-8} + 14,39 \times 10^{-8} \\ &= 16,18 \times 10^{-8} \text{ kg.m}^2 \end{aligned}$$



## İletim Oranı

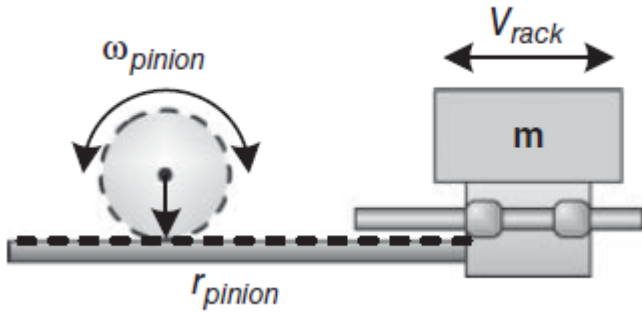
Yükün lineer hareketi ile küçük çarkın dönme hareketi arasındaki aktarım oranı aşağıdaki ilişkiden hesaplanabilir.

$$V_{\text{rack}} = r_{\text{pinion}} \omega_{\text{pinion}}$$

**Kremayer dişlisi için şanzıman oranı:**

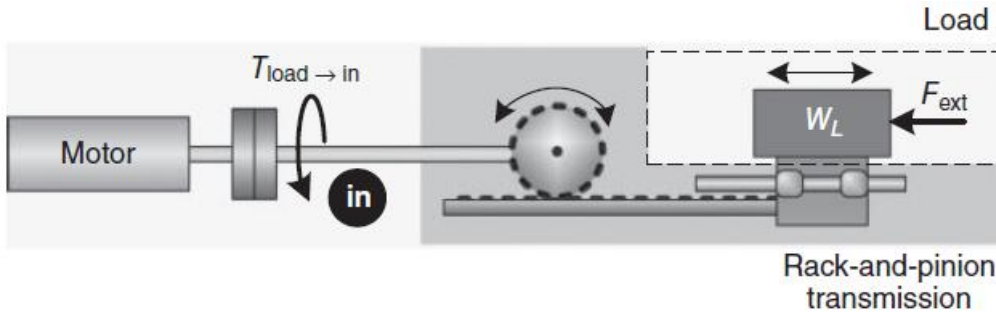
$$N_{\text{GB}} = \frac{\text{motor speed}}{\text{load speed}} \quad \rightarrow \quad N_{\text{RP}} = \frac{1}{r_{\text{pinion}}}$$

NOT: Bu denklem, küçük çarkın (pinion) açısal hızı rad/s ise geçerlidir



$$V_{\text{rack}} = r_{\text{pinion}} \omega_{\text{in}}_{\text{in}}$$

$$N_{\text{RP}} = \frac{1}{r_{\text{pinion}}}$$

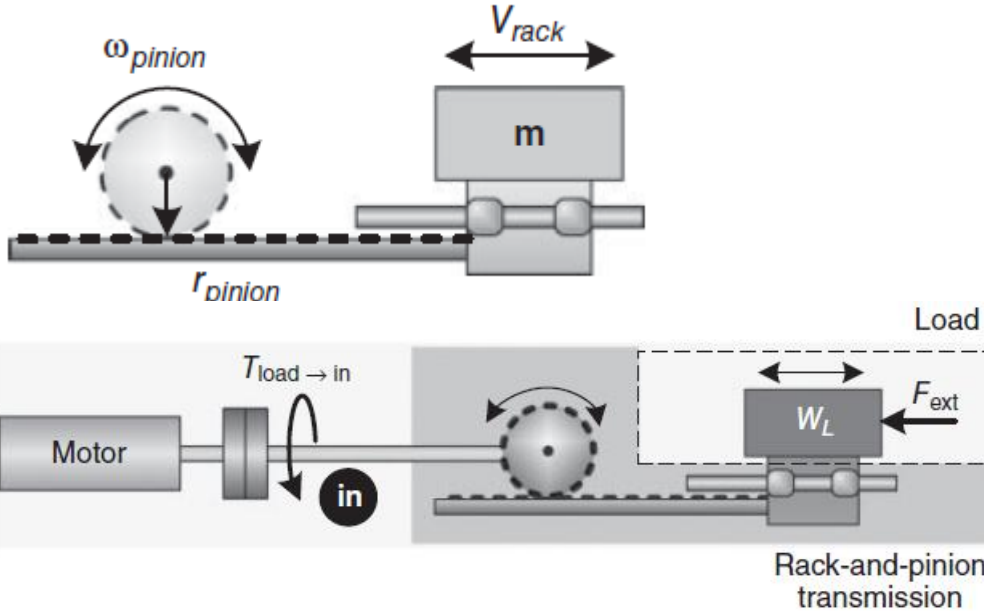


## Yansıyan Atalet:

Mekanizmanın giriş miline yansıttığı atalet

$$J_{\text{ref}}^{\text{trans}} = J_{\text{pinion}} + J_{\text{load} \rightarrow \text{in}} + J_{\text{carriage} \rightarrow \text{in}}$$

$$= J_{\text{pinion}} + \frac{1}{\eta N_{\text{RP}}^2} \left( \frac{W_L + W_C}{g} \right)$$



$$V_{rack} = r_{pinion} \omega_{pinion}$$

$$N_{RP} = \frac{1}{r_{pinion}}$$

$$J_{ref}^{trans} = J_{pinion} + \frac{1}{\eta N_{RP}^2} \left( \frac{W_L + W_C}{g} \right)$$

**Yük Torku:** Tıpkı kllavuz vidalı iletimde olduğu gibi, yükün hareket yönü boyunca mekanizmaya etkileyen toplam dış kuvvet aşağıdaki denklem ile bulunabilir.

$$F_{ext} = F_p + (W_L + W_C)(\sin \beta + \mu \cos \beta)$$

Küçük çarkın (pinyon) giriş miline yansıyan tork talebi:

$$T_{load \rightarrow in} = \frac{F_{ext}}{\eta N_{RP}}$$



# ***EEM435 Elektrik Tahrik Sistemleri*** ***- Sunum 6***

**Doç. Dr. Furkan Akar**

*Düzce Üniversitesi, Müh. Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği*

# Kılavuz Vida

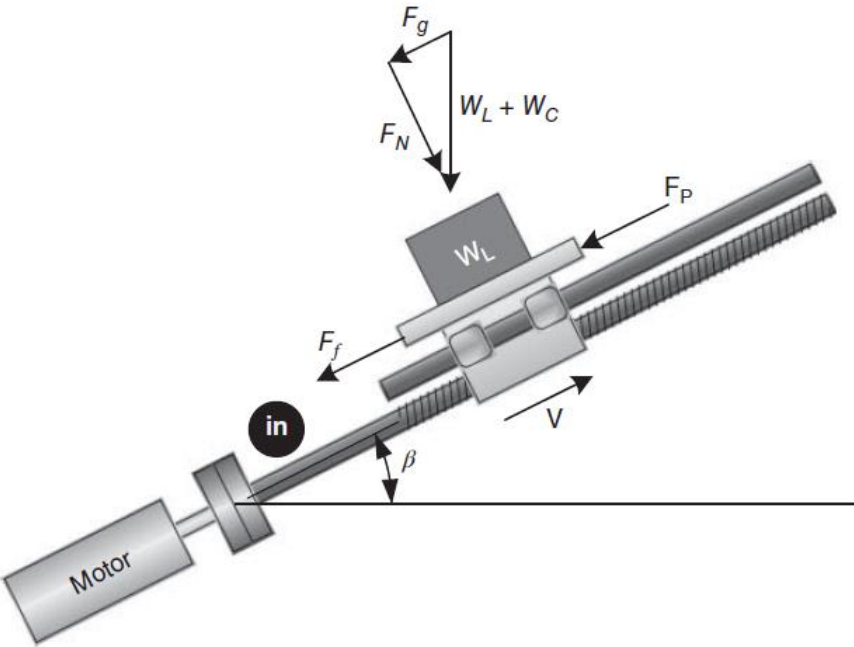


$$F_{\text{ext}} = F_f + F_g + F_p$$

$F_f$ : sürtünme kuvveti,

$F_g$ : vida eksenini boyunca yerçekimi kuvveti bileşeni

$F_p$ : mekanizmanın çevre ile etkileşiminden dolayı taşıyıcıya etki eden bir dış kuvvet (montaj sırasında bir makinenin parçası üzerindeki kuvvetler gibi).



$$F_f = \mu (W_L + W_C) \cos \beta$$

$\mu$ : vidanın sürtünme katsayısı.

$$F_g = (W_L + W_C) \sin \beta$$

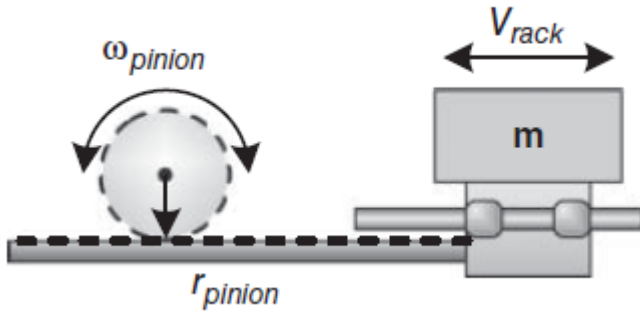
$$F_{\text{ext}} = F_p + (W_L + W_C)(\sin \beta + \mu \cos \beta)$$

Mekanizma yatay olduğunda ( $\beta = 0$ ), yerçekimi kuvveti bileşeni  $F_g$  sıfır olur.

# İletim Mekanizmaları



- Çoğu mekanik sistem, yük ile motor arasındaki aktarım mekanizmalarından oluşur.
- Bir aktarım mekanizması, yükü motora bağlar ve hareket profili gereksinimlerinin karşılanmasına yardımcı olur.
- İletim mekanizmaları:
  - Kasnak ve kayış
  - Kılavuz vida ve bilyalı vida
  - Kremayer ve pinyon
  - Doğrusal hareket için kayış tahriki
  - Konveyör.
- Kasnak ve kayış hariç, diğer tüm mekanizmalar dönme hareketini doğrusal harekete dönüştürür.



## İletim Oranı

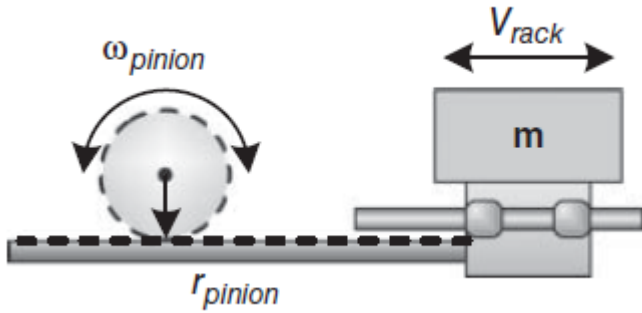
Yükün lineer hareketi ile küçük çarkın dönme hareketi arasındaki aktarım oranı aşağıdaki ilişkiden hesaplanabilir.

$$V_{\text{rack}} = r_{\text{pinion}} \omega_{\text{pinion}}$$

**Kremayer dişlisi için şanzıman oranı:**

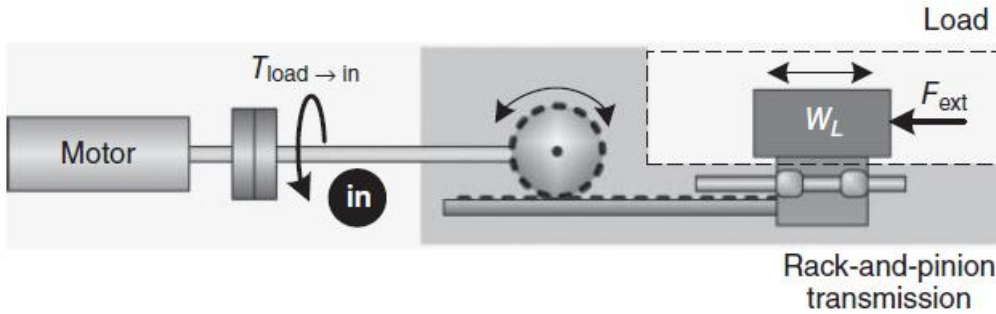
$$N_{\text{GB}} = \frac{\text{motor speed}}{\text{load speed}} \quad \rightarrow \quad N_{\text{RP}} = \frac{1}{r_{\text{pinion}}}$$

NOT: Bu denklem, küçük çarkın (pinion) açısal hızı rad/s ise geçerlidir



$$V_{\text{rack}} = r_{\text{pinion}} \omega_{\text{in}}_{\text{ion}}$$

$$N_{\text{RP}} = \frac{1}{r_{\text{pinion}}}$$

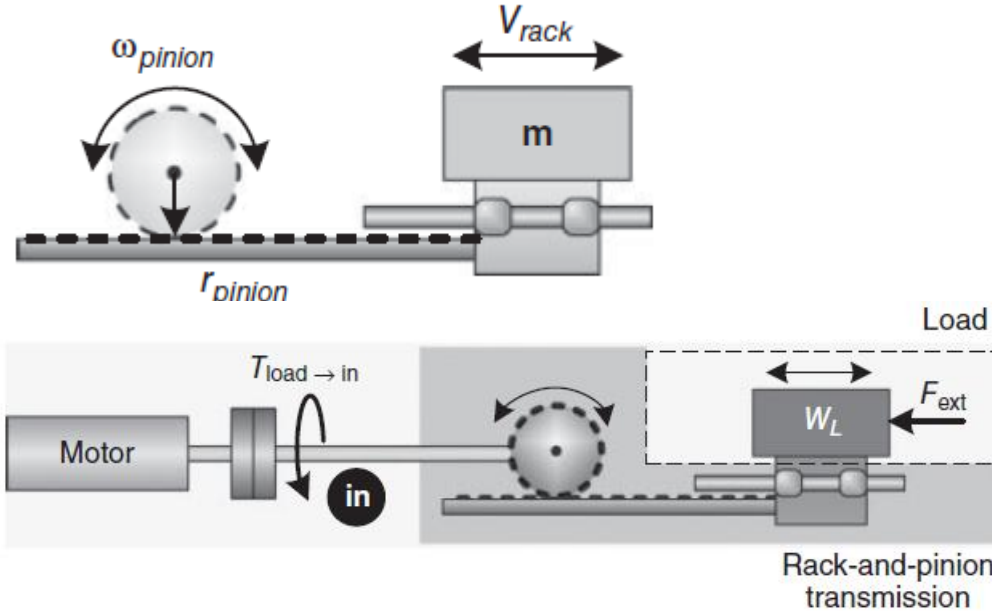


## Yansıyan Atalet:

Mekanizmanın giriş miline yansıttığı atalet

$$J_{\text{ref}}^{\text{trans}} = J_{\text{pinion}} + J_{\text{load} \rightarrow \text{in}} + J_{\text{carriage} \rightarrow \text{in}}$$

$$= J_{\text{pinion}} + \frac{1}{\eta N_{\text{RP}}^2} \left( \frac{W_L + W_C}{g} \right)$$



$$V_{rack} = r_{pinion} \omega_{in}ion$$

$$N_{RP} = \frac{1}{r_{pinion}}$$

$$J_{ref}^{trans} = J_{pinion} + \frac{1}{\eta N_{RP}^2} \left( \frac{W_L + W_C}{g} \right)$$

**Yük Torku:** Tıpkı kllavuz vidalı iletimde olduğu gibi, yükün hareket yönü boyunca mekanizmaya etkileyen toplam dış kuvvet aşağıdaki denklem ile bulunabilir.

$$F_{ext} = F_p + (W_L + W_C)(\sin \beta + \mu \cos \beta)$$

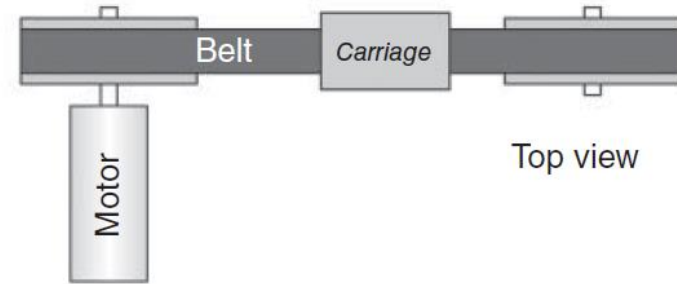
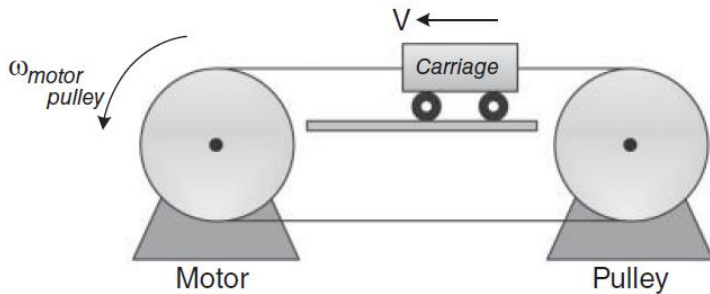
Küçük çarkın (pinyon) giriş miline yansıyan tork talebi:

$$T_{load \rightarrow in} = \frac{F_{ext}}{\eta N_{RP}}$$

# Lineer Hareket için Kayış Tahriki



- Yük aşağıda gösterildiği gibi bir kayışa ve iki özdeş kasmağa bağlıysa, motorun dönme hareketi yükün doğrusal hareketine dönüştürülebilir.
- Bu sistem, düşük ataletli ve düşük yüklü hareket kontrol uygulamalarında sıklıkla kullanılır.



# Lineer Hareket için Kayış Tahriki

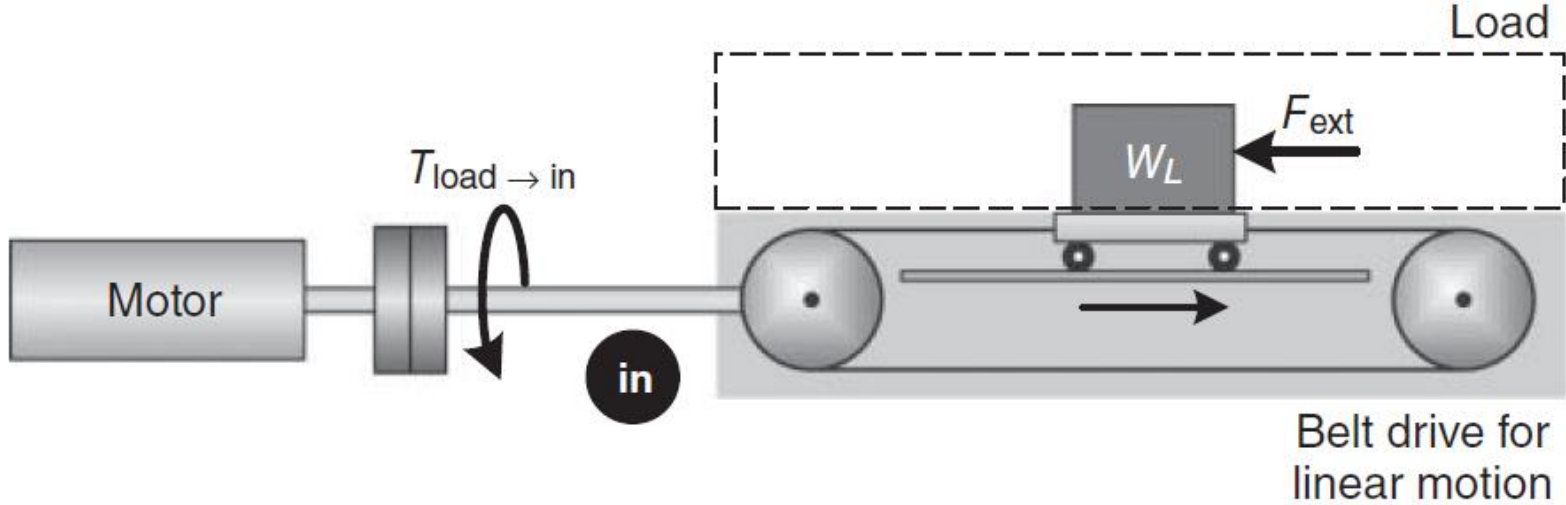


- Yükün doğrusal hareketi ile kayış tahrikinin giriş milinin dönme hareketi arasındaki aktarım oranı, kremayer dişlideki ile aynı yaklaşım kullanılarak elde edilebilir.

$$N_{BD} = \frac{1}{r_{ip}}$$

- Bu denklem, motor kasnaklarının açısal hızı rad/s cinsinden ise geçerlidir.

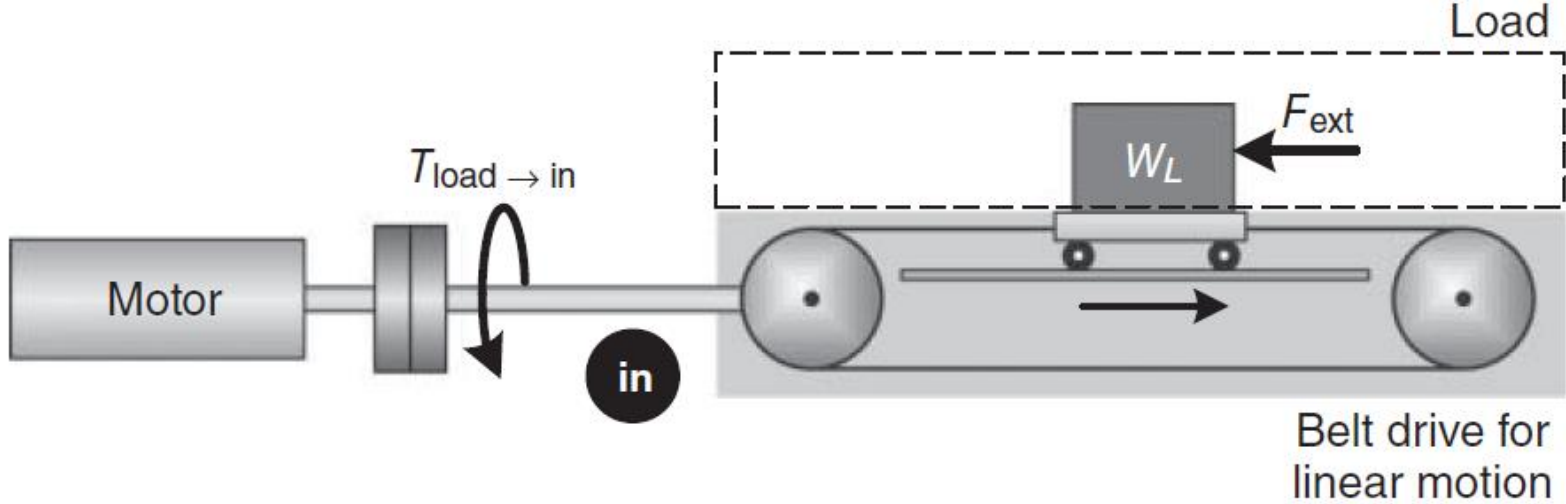
# Lineer Hareket için Kayış Tahriki



- Yukarıdaki şekle göre, mekanizmanın giriş miline yansıttığı atalet:

$$\begin{aligned}
 J_{ref}^{trans} &= J_{IP} + J_{load \rightarrow in} + J_{carriage \rightarrow in} + J_{belt \rightarrow in} + J_{LP} \\
 &= 2J_P + \frac{1}{\eta N_{BD}^2} \left( \frac{W_L + W_C + W_{belt}}{g} \right) \quad J_P = J_{IP} = J_{LP}
 \end{aligned}$$

# Lineer Hareket için Kayış Tahriki



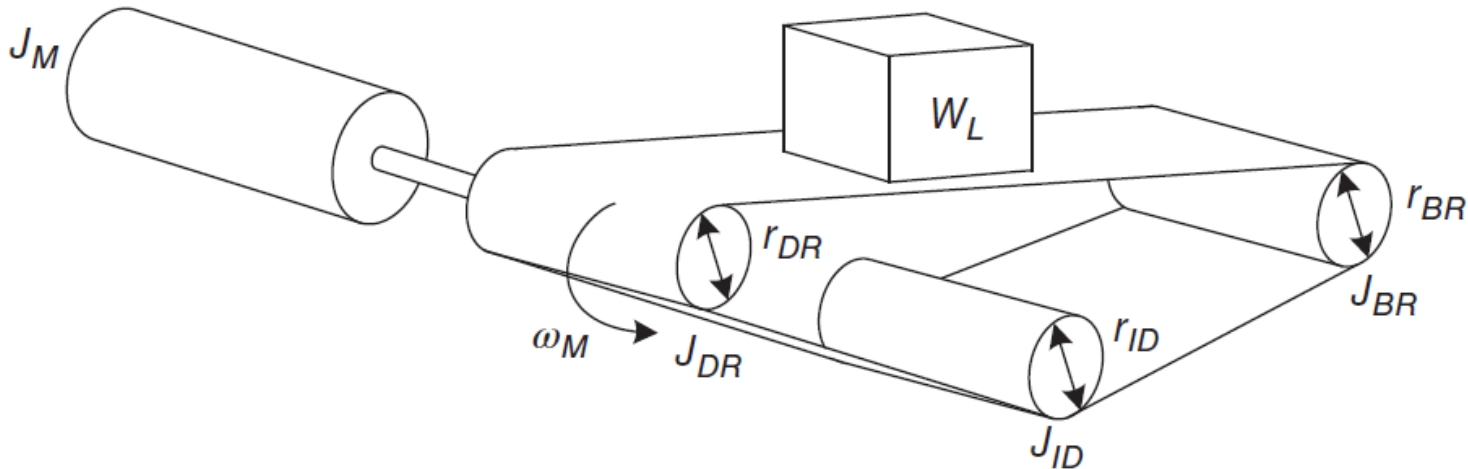
- Kılavuz vidalı şanzıman gibi, yükün hareket yönü boyunca sürtünme kuvveti ve yerçekimi kuvveti bileşeni dikkate alınarak giriş kasnağına yansıyan tork talebi şu şekilde bulunur:

$$T_{\text{load} \rightarrow \text{in}} = \frac{F_{\text{ext}}}{\eta N_{\text{BD}}}$$

# Konveyör



- Bir konveyör aşağıda gösterildiği gibi bir veya daha fazla makaraya sahip olabilir.
- Bu, daha uzun kayışların kullanılmasını ve daha ağır yüklerin taşınmasını sağlar.

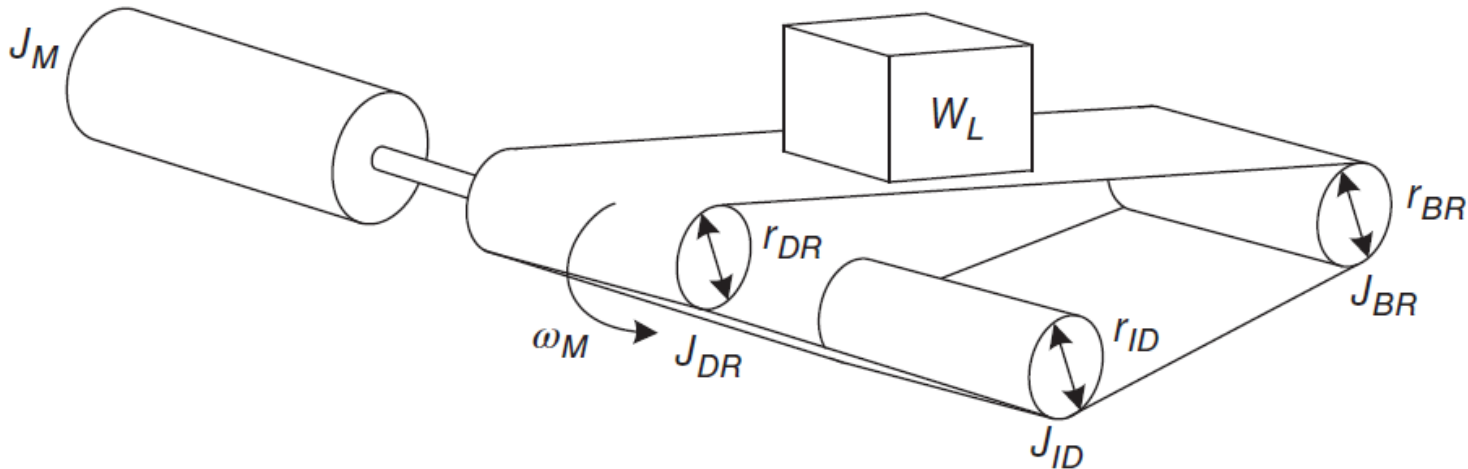


# Konveyör

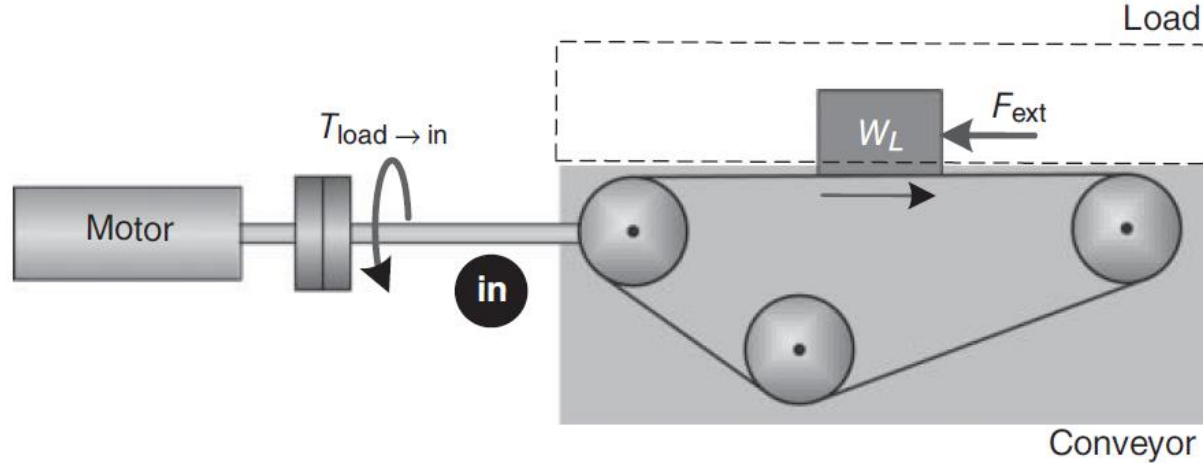


- Bant üzerindeki yükün doğrusal hareketi ile konveyörün tahrik makarasının (DR) dönme hareketi arasındaki aktarım oranı aşağıdaki ilişkiden hesaplanabilir:

$$N_{CV} = \frac{1}{r_{DR}}$$



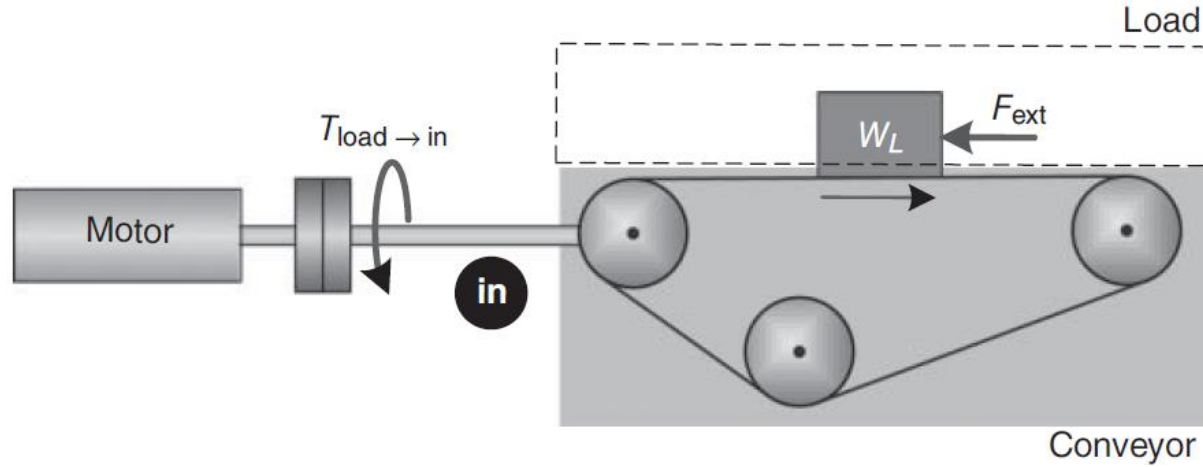
# Konveyör



- Yukarıdaki şemaya göre mekanizmanın giriş miline yansıttığı atalet:

$$\begin{aligned}
 J_{\text{ref}}^{\text{trans}} &= J_{\text{DR}} + J_{\text{load} \rightarrow \text{in}} + J_{\text{belt} \rightarrow \text{in}} + J_{\text{ID} \rightarrow \text{in}} + J_{\text{BR} \rightarrow \text{in}} \\
 &= J_{\text{DR}} + \frac{1}{\eta N_{\text{CV}}^2} \left( \frac{W_L + W_{\text{belt}}}{g} \right) + \frac{J_{\text{ID}}}{\eta \left( \frac{r_{\text{ID}}}{r_{\text{DR}}} \right)^2} + \frac{J_{\text{BR}}}{\eta \left( \frac{r_{\text{BR}}}{r_{\text{DR}}} \right)^2}
 \end{aligned}$$

# Konveyör

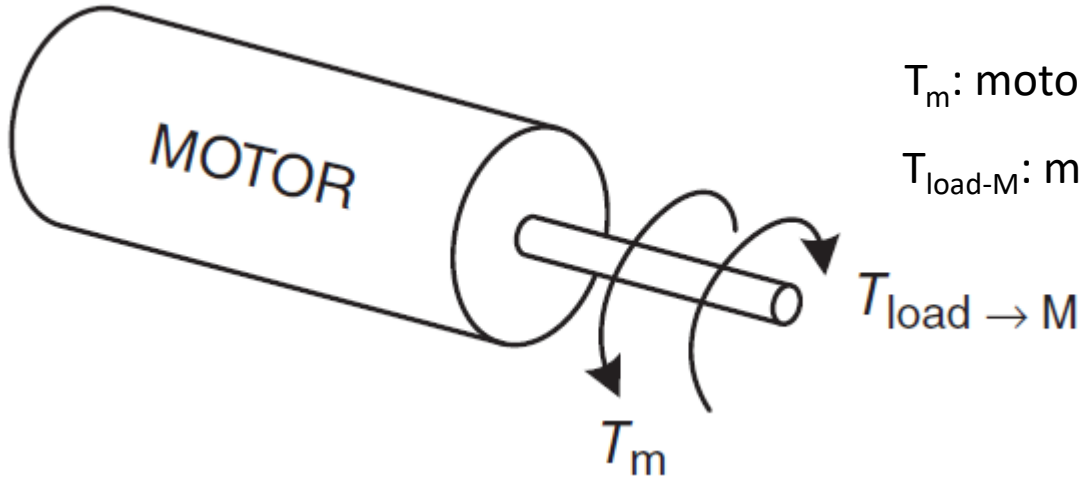


- Kayış kasknakları dönerken yük ötelendiğinden, kılavuz vida durumundakiyle aynı denklem burada da geçerlidir.
- Konveyör bandının üst kısmının  $\beta$  açısına sahip olduğu genel bir durum göz önüne alındığında;

$$T_{\text{load} \rightarrow \text{in}} = \frac{F_{\text{ext}}}{\eta N_{\text{CV}}}$$

$$F_{\text{ext}} = F_p + (W_L + W_{\text{belt}})(\sin \beta + \mu \cos \beta)$$

# Hareket için Gerekli Tork



$T_m$ : motor tarafından uygulanan tork

$T_{load-M}$ : motora yansıyan yük torku

- Newton'ın ikinci yasasına göre:  $\sum T = J_{total} \ddot{\theta}_m$

$$T_m - T_{load \rightarrow M} = J_{total} \ddot{\theta}_m \quad \longrightarrow \quad T_m = J_{total} \ddot{\theta}_m + T_{load \rightarrow M}$$

$$T_{ext} = T_f + T_g + T_{process} \quad \longrightarrow \quad T_{load \rightarrow M} = T_{ext}$$

Sürtünme

Yer çekimi

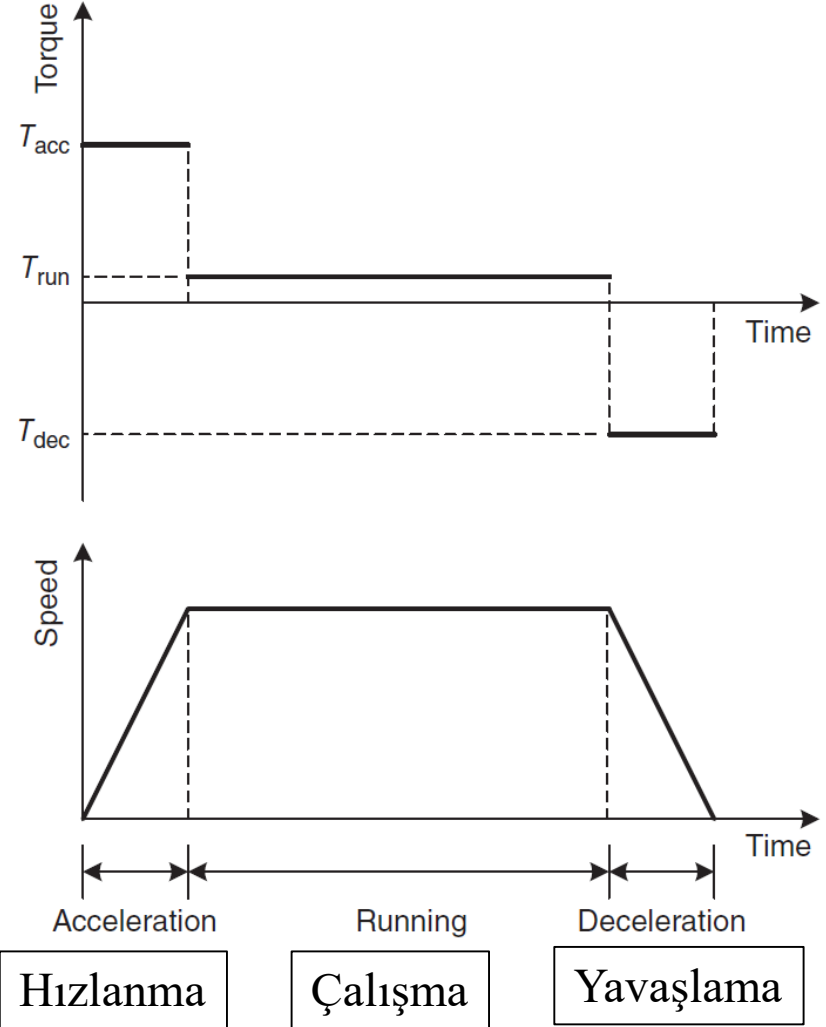
Süreç torkları

Yük doğrudan motora bağlı ise

# Hareket için Gerekli Tork



- Hareket profilini elde etmek için gereken motor torku  $T_m$ , hareketin fazına (hızlanma, çalışma ve yavaşlama) bağlıdır.



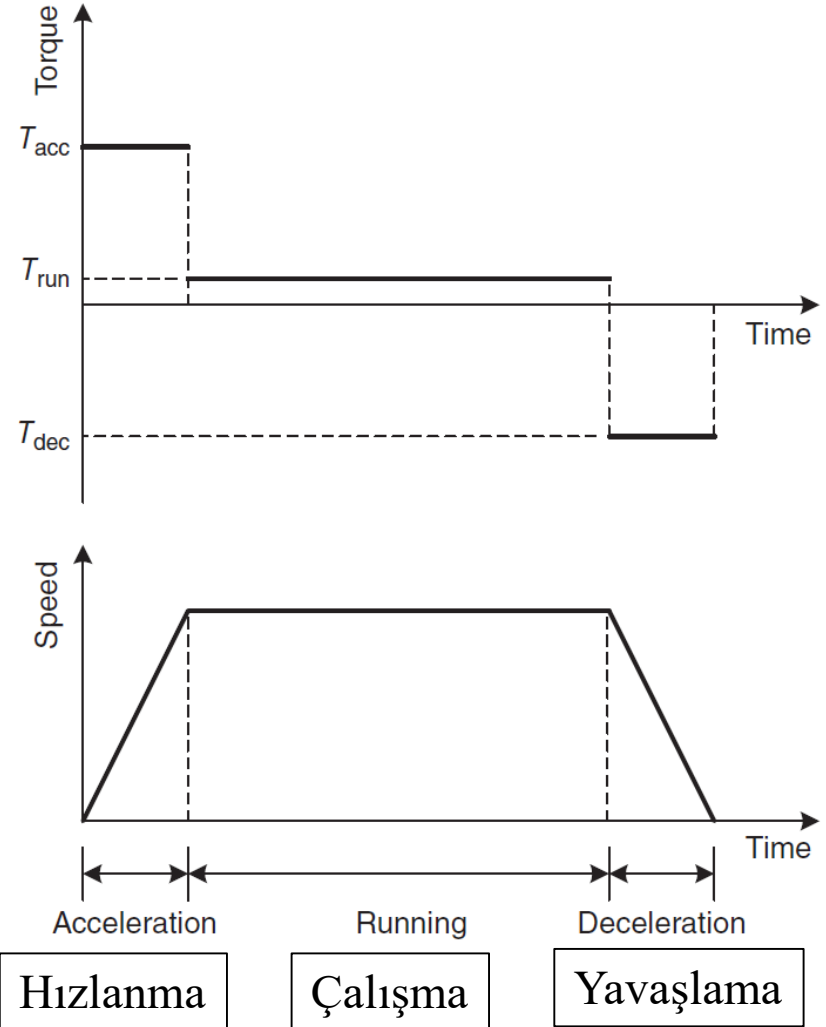
# Hareket için Gerekli Tork



- **Hızlanma fazında:**

$$T_{acc} = J_{total} \ddot{\theta}_m + T_{load \rightarrow M}$$

- Bu aşamada motor en yüksek tork değerinde çalışır. Bu yüzden hızlanma torkuna tepe tork (peak torque,  $T_{peak}$ ) da denir.



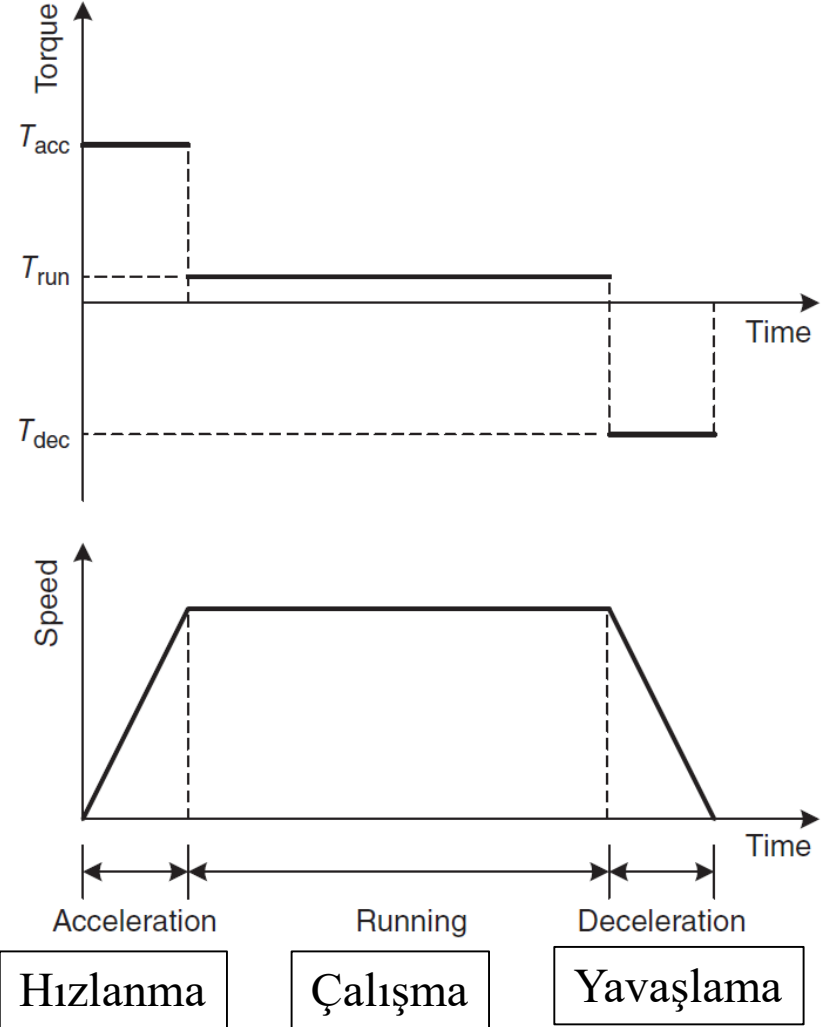
# Hareket için Gerekli Tork



- **Çalışma** fazında, yük sabit bir çalışma hızında hareket ettiğinden ivme sıfıra eşittir ve motor sistem ataletine karşı çalışmaz.

$$T_m - T_{\text{load} \rightarrow M} = 0$$

$$T_{\text{run}} = T_{\text{load} \rightarrow M}$$



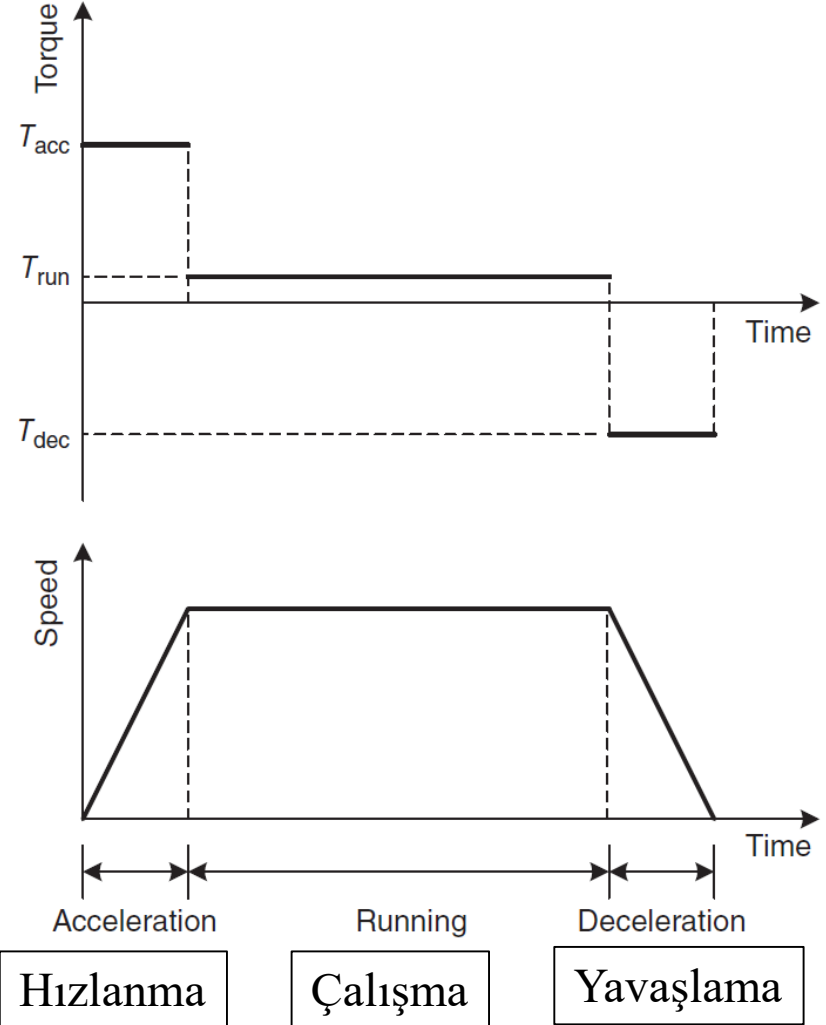
# Hareket için Gerekli Tork



- **Yavaşlama** fazında, tork  $T_{load \rightarrow M}$ 'den azdır (Negatif de olabilir).

$$T_{dec} - T_{load \rightarrow M} = -J_{total} \ddot{\theta}_m$$

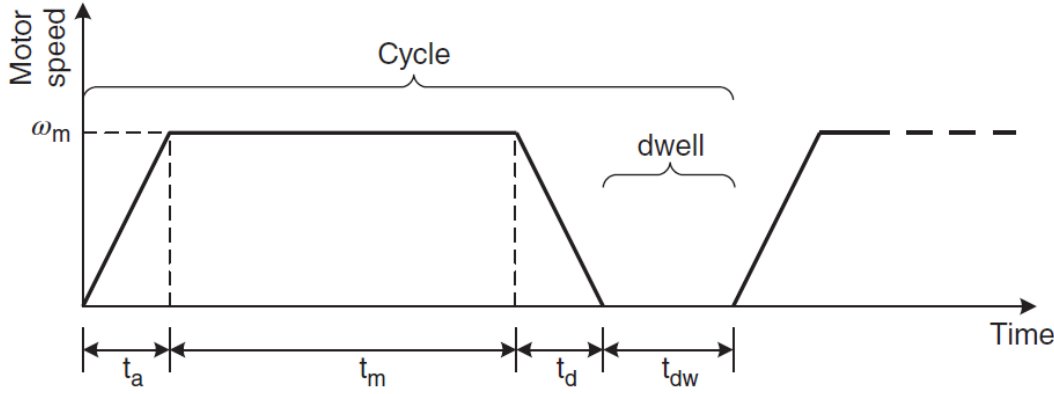
$$T_{dec} = T_{load \rightarrow M} - J_{total} \ddot{\theta}_m$$



# Sürekli (RMS) Tork



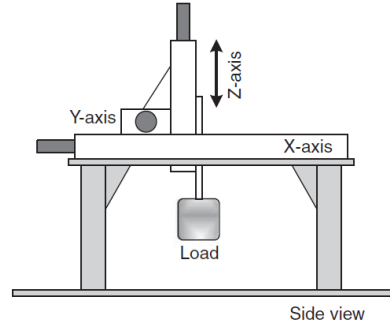
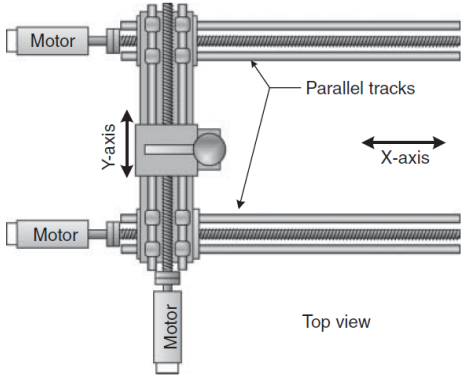
- Tork gereksinimi, hareketin aşamasına bağlı olarak değiştiğinden, RMS tork değeri hesaplanabilir.



Daha genelleştirilmiş bir hareket profilinde, yükün döngüsünde aşağıda gösterildiği gibi bazı dinlenme periyotları (dwell) olabilir.

$$T_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{T_{\text{acc}}^2 \cdot t_a + T_{\text{run}}^2 \cdot t_m + T_{\text{dec}}^2 \cdot t_d + T_{\text{dw}}^2 \cdot t_{\text{dw}}}{t_a + t_m + t_d + t_{\text{dw}}}}$$

# !!ÖRNEK!!



- Yanda verilen portal (kızak) makine 20kg yük taşımaktadır.
- Sistemde kullanılan motorların ağırlıkları 0.67kg olup, ataletleri  $5.2 \times 10^{-6} \text{ kg-m}^2$  olarak verilmektedir.

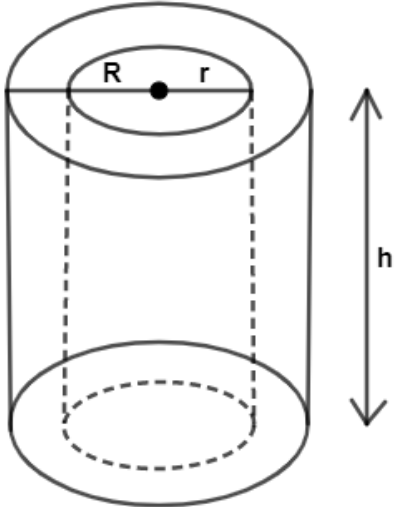
- Motorlara bağlı kaplinler alüminyum ( $\rho=2810 \text{ kg/m}^3$ ) silindirik olup, dış çapları 1.42cm, iç çapları 0.47cm ve uzunlukları 3.8cm olarak verilmektedir.
- X ekseninde 10mm/dev kılavuz oranına sahip, çapı 13mm, uzunluğu 535mm, verimi %90 ve sürtünme katsayısı  $\mu=0.01$  olan çelik ( $\rho=7800 \text{ kg/m}^3$ ) kılavuz vidalar aktarma organı olarak kullanılmaktadır.
- Y-ekseni ağırlığı 3.55 kg, Z-ekseni ağırlığı 1.81 kg ve X-ekseni taşıyıcı ağırlığı 0.495 kg olarak verilmektedir.
- X-ekseninin hızı 31.25 dev/saniye ve hızlanma süresi  $t_a=50\text{ms}$  olarak verildiğine göre hızlanma, çalışma, yavaşlama torklarını ve  $T_{dw}=0$  ve  $T_m=1\text{s}$  için RMS torku hesaplayınız.

# !!ÖRNEK!!



- Motor tarafından görülen atalet:  $J_{toplam} = J_{motor} + J_{kaplin} + J_{ref}^{trans}$
- Motor ataleti veriliyor:  $J_{motor} = 5.2 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- Kaplin ataletini hesaplamak gerekiyor:

Motorlara bağlı kaplinler alüminyum ( $\rho=2810 \text{ kg/m}^3$ ) silindirik olup, dış çapları 1.42cm, iç çapları 0.47cm ve uzunlukları 3.8cm olarak verilmektedir.



$$\begin{aligned}
 J_{kaplin} &= \frac{\pi L \rho}{2} (R^4 - r^4) = \frac{\pi L \rho}{2} (R^4 - r^4) \\
 &= \frac{\pi (3.8 \times 10^{-2}) 2810}{2} \left( \left( \frac{1.42 \times 10^{-2}}{2} \right)^4 - \left( \frac{0.47 \times 10^{-2}}{2} \right)^4 \right) \\
 J_{kaplin} &= 6.92 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2
 \end{aligned}$$



# !!ÖRNEK!!



- Motor tarafından görülen atalet:  $J_{toplam} = J_{motor} + J_{kaplin} + J_{ref}^{trans}$
- Motor miline yansıyan atalet:  $J_{ref}^{trans} = J_{kılavuz} + J_{yük \rightarrow motor}$

X ekseninde 10mm/dev kılavuz oranına sahip, çapı 13mm, uzunluğu 535mm ve verimi %90 olan çelik ( $\rho=7800 \text{ kg/m}^3$ ) kılavuz vidalar aktarma organı olarak kullanılmaktadır.

- Kılavuz vida bir silindir olarak düşünülürse;

$$J_{kılavuz} = \frac{\pi L \rho}{2} R^4 = \frac{\pi(0.535)7800}{2} (0.013/2)^4 = 1.17 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

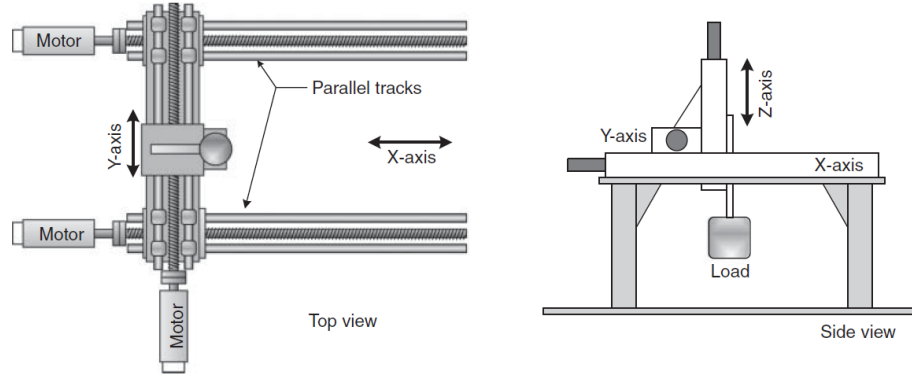
- Kılavuz vidanın aktarma oranı:  $N_S = 2\pi p$

$$p = \text{adım} = \frac{1}{\text{kılavuz}} = \frac{1}{10 \times 10^{-3}} = 100 \text{ dev/m}$$

$$N_S = 2\pi 100 = 628.31$$



# !!ÖRNEK!!



- X ekseninin her bir yolu tarafından taşınan toplam ağırlık, Y eksenini, Z eksenini ve yükün ağırlığından oluşur.
- X eksenini iki paralel yoldan oluştuğu için toplam ağırlık aralarında dağıtılacaktır.
- Yük ve Z eksenini ortada olduğunda, toplam ağırlık X ekseninin iki yolu arasında eşit olarak bölünür.
- Ancak Z eksenini ve yük, Y ekseninin bir ucuna kadar hareket ettirilirse, bu uca yakın X eksenini yolu, yükün ve Z ekseninin neredeyse tüm ağırlığını taşımak zorunda kalacaktır.

# !!ÖRNEK!!



- En kötü durum senaryosu tork hesaplamaları için, X ekseninin her bir yolu tarafından taşınan yük olarak toplam ağırlığı dikkate almak gerekir:

Y-ekseni ağırlığı 3.55 kg, Z-ekseni ağırlığı 1.81 kg ve X-ekseni taşıyıcı ağırlığı 0.495 kg olarak verilmektedir.

Yanda verilen portal (kızak) makine 20kg yük taşımaktadır.

Sistemde kullanılan motorların ağırlıkları 0.67kg olup...

$$W_L = W_{y-ekseni} + W_{z-ekseni} + W_{yük} = (3.55 + 1.81 + 2 * 0.67 + 20)(9.81) = 261.93N$$

$$W_C = 0.495 * 9.81 = 4.856N$$

$$J_{yük \rightarrow motor} = \left( \frac{1}{\eta N_s^2} \right) \frac{W_L + W_C}{g} = \left( \frac{1}{0.9 * 628.31^2} \right) \frac{261.93 + 4.856}{9.81} = 7.654 \times 10^{-5} kg \cdot m^2$$

$$J_{ref}^{trans} = J_{kılavuz} + J_{yük \rightarrow motor} = 1.17 \times 10^{-5} kg \cdot m^2 + 7.64 \times 10^{-5} kg \cdot m^2 = 8.824 \times 10^{-5} kg \cdot m^2$$

# !!ÖRNEK!!



- Artık toplam atalet hesaplanabilir:

$$\begin{aligned} J_{\text{toplam}} &= J_{\text{motor}} + J_{\text{kaplin}} + J_{\text{ref}}^{\text{trans}} \\ &= 5.2 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 + 6.92 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 + 8.824 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ &= 1.004 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

- Kılavuz vida tarafından motora yansıtılan tork, sürtünme, yer çekimi ve süreç güçlerine bağlıdır.

$$\begin{aligned} F_f &= \mu \cdot (W_L + W_C) \cos(\beta) & F_g &= (W_L + W_C) \sin(\beta) & F_p &= 0. \\ &= 0.01 \cdot (261.93 + 4.856) & &= 0 \text{ N} & & \\ &= 2.67 \text{ N} & & & & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{\text{ext}} &= F_f + F_g + F_p \\ &= 2.67 \text{ N} \end{aligned}$$

$$T_{\text{yük} \rightarrow \text{motor}} = \frac{F_{\text{ext}}}{\eta N_s} = \frac{2.67}{0.90 \times 628.31} = 0.0047 \text{ Nm}$$

# !!ÖRNEK!!



- Hızlanma, çalışma ve yavaşlama torkları: torku :

$$T_{\text{acc}} = J_{\text{total}} \cdot \ddot{\theta}_{\text{motor}} + T_{\text{load} \rightarrow \text{in}} \quad T_{\text{run}} = T_{\text{load} \rightarrow \text{in}}$$

$$T_{\text{dec}} = T_{\text{load} \rightarrow \text{in}} - J_{\text{total}} \cdot \ddot{\theta}_{\text{motor}}$$

- Önce motorun açısal ivmelenmesini bulalım.  $a_m = \frac{\omega_m}{t_a}$

- Açısal hızı bulmak için verilen hız değerini kullanabiliriz:  $v_m = 31.25 \text{ dev/s}$

$$\omega_m = 2\pi(31.25) = 196.35 \text{ rad/s} \quad \rightarrow \quad \ddot{\theta}_{\text{motor}} = a_m = \frac{\omega_m}{t_a} = \frac{196.35 \text{ rad/s}}{50 \text{ ms}} = 3927 \text{ rad/s}^2$$

$$\begin{aligned} T_{\text{acc}} &= J_{\text{total}} \cdot \ddot{\theta}_{\text{motor}} + T_{\text{load} \rightarrow \text{in}} \\ &= 1.004 \times 10^{-4} \cdot 3927 + 0.0047 \\ &= 0.3988 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$$T_{\text{run}} = T_{\text{load} \rightarrow \text{in}} = 0.0047 \text{ Nm}$$

$$\begin{aligned} T_{\text{dec}} &= T_{\text{load} \rightarrow \text{in}} - J_{\text{total}} \cdot \ddot{\theta}_{\text{motor}} \\ &= 0.0047 - 1.004 \times 10^{-4} \cdot 3927 \\ &= -0.3894 \text{ Nm} \end{aligned}$$

# !!ÖRNEK!!



- RMS Tork:

$$T_{RMS} = \sqrt{\frac{T_{acc}^2 t_a + T_{run}^2 t_m + T_{dec}^2 t_d + T_{dw}^2 t_{dw}}{t_a + t_m + t_d + t_{dw}}}$$

$$T_{RMS} = \sqrt{\frac{0.3988^2 * 0.05 + 0.047^2 * 1 + 0.3988^2 * 0.05 + 0}{0.05 + 1 + 0.05}}$$

$$T_{RMS} = 0.119 \text{ Nm}$$



# ***EEM435 Elektrik Tahrik Sistemleri*** ***- Sunum 7***

**Doç. Dr. Furkan Akar**

*Düzce Üniversitesi, Müh. Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği*

# Motor Tork-Hız Eğrileri



- Çoğu endüstriyel hareket kontrol sistemi, üç fazlı AC servo motorlar ve/veya vektör kontrollü AC endüksiyon motorları kullanır.
- Yandaki tablo, AC sürücülerle endüstriyel hareket kontrolünde kullanılan tipik üç fazlı (3 $\phi$ ) motorların bir karşılaştırmasını göstermektedir.

	Vektör kontrollü Üç fazlı asenkron motor	Üç fazlı AC servo motor
Tipik Güç @460V <sub>AC</sub> (HP)	0,25–30	1–16
Sürekli tork (Nm)	1–1300	1–85
Maksimum hız (rpm)	2× temel hız	5000
Minimum hız (tam yükte)	0	0
Motor ataleti	Orta	Düşük
Motor boyutu	Orta	Küçük
Geri Besleme	Kodlayıcı	Kodlayıcı
Hız ayarı (tam yükte)	1000:1	10 000:1
Özellikler	Sıfır hızda tam tork; daha yavaş hızlanma; tipik uygulamalarda baskı silindirleri içerir, sarıçılar, konumlandırma konveyörleri bulunur	Yumuşak geçiş; hızlı hızlanma; hareket kontrolünde en popüler olan; mükemmel dinamik performans; tipik uygulamaları, al ve yerleştir, indeksleme, yüksek hızlı malzeme taşımayı içerir.

# Motor Tork-Hız Eğrileri

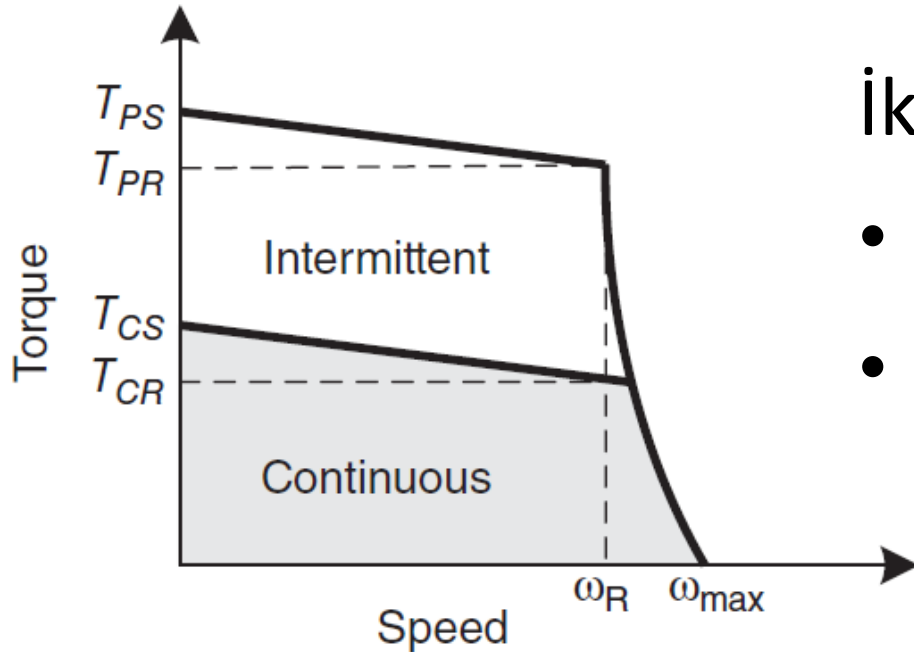


- Motor tipleri arasında karakteristikler ve güç aralıkları açısından önemli bir örtüşme olduğuna dikkat edilmelidir.
- Ayrıca, 0,01 HP (10 W) aralığına kadar küçük AC servo motorlar mevcuttur.
- Motor katalogları, kapsamlı elektrik ve mekanik verileri içeren tablolarla birlikte her motor için tork-hız eğrilerini içerir.
- Tork-hız eğrileri ve veriler, belirli bir motor voltajı, uygulama için ortam sıcaklığı ve motor+sürücü kombinasyonu için sunulur.
- Bir motor seçerken, bu koşullara ve eldeki belirli uygulamanın gereksinimlerine ne kadar iyi uyduklarına dikkat edilmelidir.

# AC Servo Motorlar için Tork-Hız Eğrileri



- Aşağıda bir elektrikli sürücünün kapalı çevrim kontrolü altındaki bir AC servo motor için tipik bir tork-hız eğrisini gösterilmektedir.



İki bölge vardır:

- Sürekli çalışma bölgesi
- Aralıklı çalışma bölgesi

# AC Servo Motorlar için Tork-Hız Eğrileri

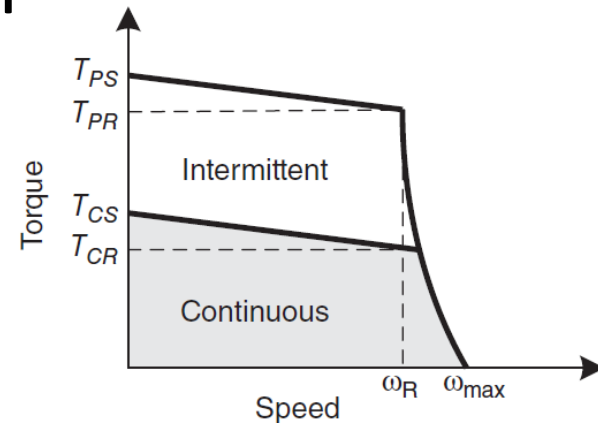


- **Sürekli çalışma bölgesi**, motorun uzun süreler boyunca güvenli çalışması için çeşitli hızlarda mevcut olan torku gösterir.
- **Aralıklı çalışma bölgesi**, motorun çok kısa sürelerde sunabileceği çok daha yüksek tork seviyeleri gösterir.
  - Örneğin, kesintili çalışma, tepe torkunun gerekli olduğu hareketin hızlanma aşaması sırasında yaklaşık 30 s'ye kadar olabilir.
  - Motor daha uzun süre bu kadar yüksek tork seviyelerinde çalıştırılırsa, sargılar aşırı ısınarak motorda kalıcı hasara neden olur.

# AC Servo Motorlar için Tork-Hız Eğrileri



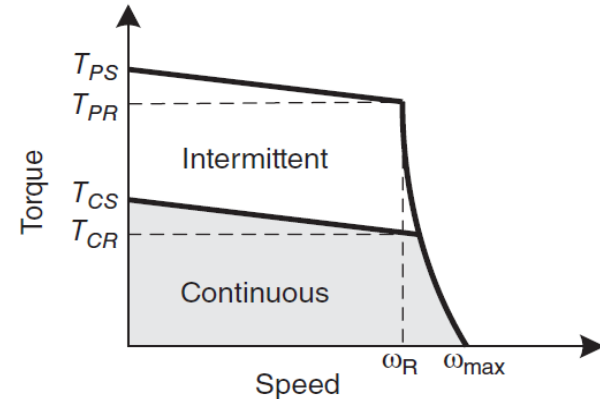
- Maksimum hız  $\omega_{\max}$ , motorun tam besleme voltajındaki ve yüksüz hızıdır.
  - Bir servo motor için bu 5000–6000 rpm olabilir.
- Tepe durma torku  $T_{PS}$ , motorun durduğunda kısa bir süre için sağlayabileceği maksimum torktur.
- Sürekli durma torku  $T_{CS}$ , motorun dururken nispeten daha uzun süreler için sağlayabileceği maksimum torktur.



# AC Servo Motorlar için Tork-Hız Eğrileri



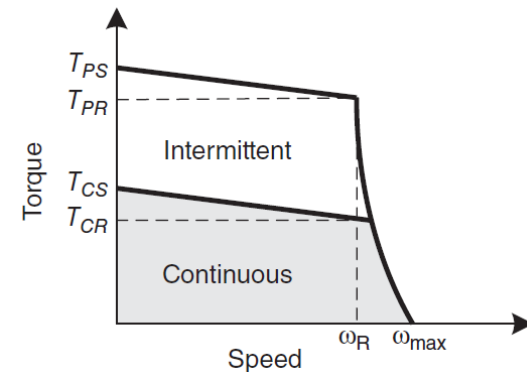
- Çoğu motor üreticisi nominal hız  $\omega_R$ , nominal tepe tork  $T_{PR}$ 'sini ve nominal sürekli tork  $T_{CR}$ 'sini listeler.
- Nominal değerler, üreticinin sağladığı uygun referans noktalarıdır.
- Nominal hıza ulaşıldığını doğrulamak için üretici, motoru bir nominal voltaj kullanarak test eder ve nominal bir torkla çalıştırır.



# AC Servo Motorlar için Tork-Hız Eğrileri



- Hemen hemen tüm motor üreticileri, motorlar için tork-hız eğrilerini sağlar.
- Bu eğriler mevcutsa, motor seçim sürecinde kullanılmalıdır.
  - Ancak, bazı veri sayfaları motor verilerini yalnızca bir tablo olarak sağlar.
  - Bu durumda, bu tablolar kullanılarak şekilde gösterildiği gibi yaklaşık olarak çizilebilirler.



# AC Endüksiyon Motorları için Tork-Hız Eğrileri



- Üç fazlı AC endüksiyon (sincap kafesli) motorlar endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır.
- Standart bir asenkron motor üç fazlı şebeke kaynağına doğrudan bağlandığında sabit hızda çalışacak şekilde tasarlanmıştır.
- Hareket kontrol uygulamalarında hız ve tork değişkendir.
- Son yıllarda mikroişlemci teknolojisindeki, güç elektroniği cihazlarındaki ve alan odaklı kontrol (veya vektör kontrolü) gibi modern kontrol şemalarındaki gelişmeler, asenkron motorların değişken hızlı uygulamalarda kullanılmasını mümkün kılmıştır.

# AC Endüksiyon Motorları için Tork-Hız Eğrileri



- Standart bir asenkron motor, arkasına monte edilmiş bir fan ile tamamen kapatılmıştır.
- Motor sabit nominal hızında çalışırken, fan aşırı ısınmayı önlemek için motorun dış kasasındaki kanatçıklar boyunca yeterli hava akışı oluşturur.
  - Böyle bir motor düşük hızlarda çalıştırılırsa motor aşırı ısınır.
  - Bu nedenle, değişken hızlı uygulamalarda invertör görevli (inverter duty) veya vektör görevli (vector duty) olarak adlandırılan özel bir asenkron motor tipi kullanılmalıdır.

# AC Endüksiyon Motorları için Tork-Hız Eğrileri



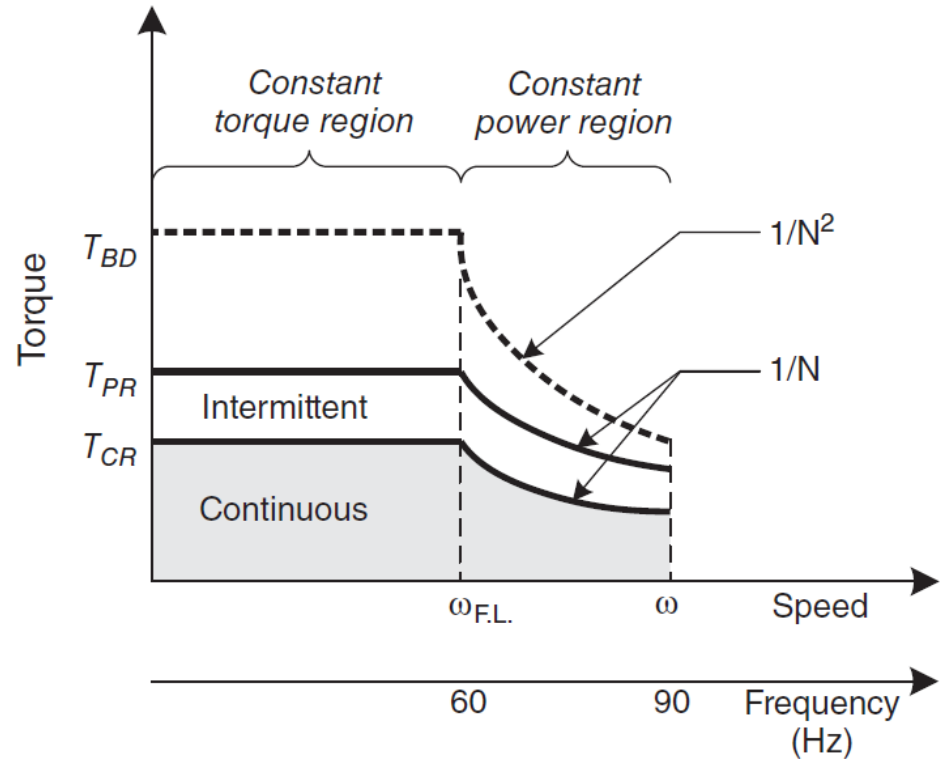
- İvertör görevli motorların sargılarında özel bir yalıtım vardır ve sürücüdeki güç elektroniği ile çalışmak üzere özel olarak tasarlanmıştır.
- Bu motorlardan bazıları, bir vektör kontrol sürücüsü ile kapalı çevrim kontrolde kullanılmalarını sağlayan bir kodlayıcı ile birlikte gelir.



# AC Endüksiyon Motorları için Tork-Hız Eğrileri



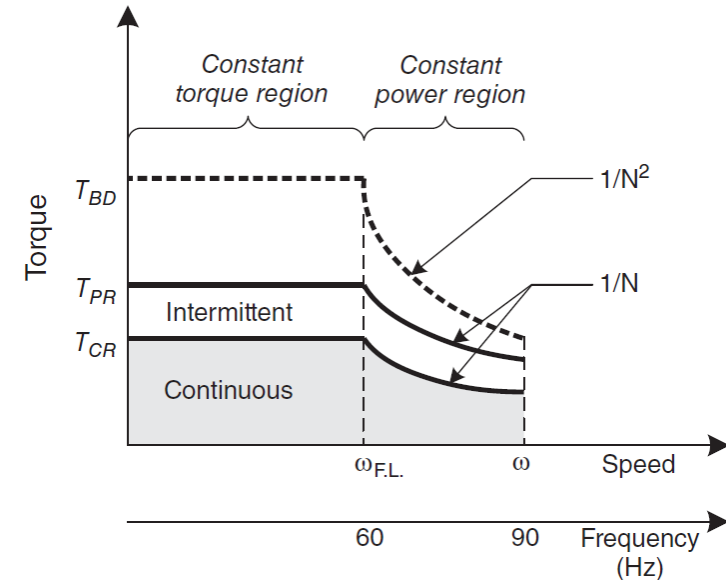
- İvertör görevli bir motor için veriler, üretici kataloglarında tablolar şeklinde sağlanır.
- Veriler, yandaki gibi vektör sürücü kontrolü altında bir asenkron motor için tork-hız eğrilerini çizmek için kullanılabilir.



# AC Endüksiyon Motorları için Tork-Hız Eğrileri



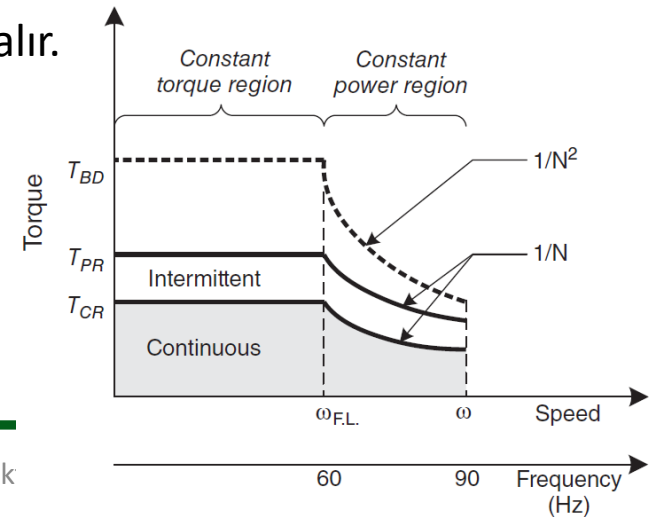
- *Tam yük hızı (full-load speed)*, motorun tam yük durumundaki hızıdır.
  - Bu hız, baz frekansı olarak adlandırılan 50Hz veya 60 Hz'de giriş gerilimi uygulandığında elde edilen hızdır.
- *Tam yük torku (full-load torque)*, motorun nominal beygir gücünü tam yük hızında üretmek için sağladığı torktur.
- *Arıza torku (breakdown torque)*, motorun dönerken nominal voltaj ve hızda geliştireceği maksimum torktur.
  - Herhangi bir nedenle yük torku kırılma torkunu aşarsa, motor durur.



# AC Endüksiyon Motorları için Tork-Hız Eğrileri



- Vektör kontrollü bir asenkron motor, sıfırdan nominal hıza kadar herhangi bir hızda sabit tork üretebilir.
  - Bu nedenle, tork-hız eğrisinin bu kısmına sabit tork bölgesi denir.
  - Sürücü bunu, giriş voltajını ve frekansını, oranları (V/f) sabit kalacak şekilde ayarlayarak gerçekleştirir.
- Motorun anma gerilimi temel frekansta uygulanır.
  - Giriş frekansı temel frekansın (60 Hz) üzerine çıkarsa, voltaj sabit kalır.
  - Sonuç olarak, V/f frekansla ters orantılı olarak azalır.
- Temel frekansın ötesindeki bölge, sabit güç bölgesi veya alan zayıflatma bölgesi olarak adlandırılır.



# AC Endüksiyon Motorları için Tork-Hız Eğrileri



Motor tarafından üretilen güç:

$$P = T_{FL} \cdot \omega_{FL}$$

$T_{FL}$ : tam yük torku.

$\omega_{FL}$ : tam yük hızı.

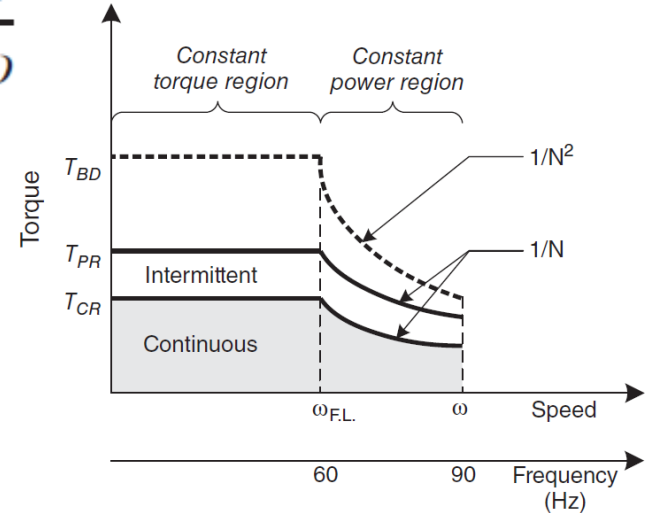
Nominal hızın üzerindeki  $\omega$  hızında, gücün sabit kalması için tork  $T$  düşmelidir.

$$P = T_{FL} \cdot \omega_{FL} = T \cdot \omega \Rightarrow T = (T_{FL} \omega_{FL}) \cdot \frac{1}{\omega}$$

$\omega_{FL}$  (tam yük hızı) baz frekansı ( $N_b$ ) uygulandığında elde edilen hız olduğundan

$$T = (T_{FL} N_b) \cdot \frac{1}{N}$$

$N$ : temel frekansın ötesindeki bir frekans değeri



# AC Endüksiyon Motorları için Tork-Hız Eğrileri

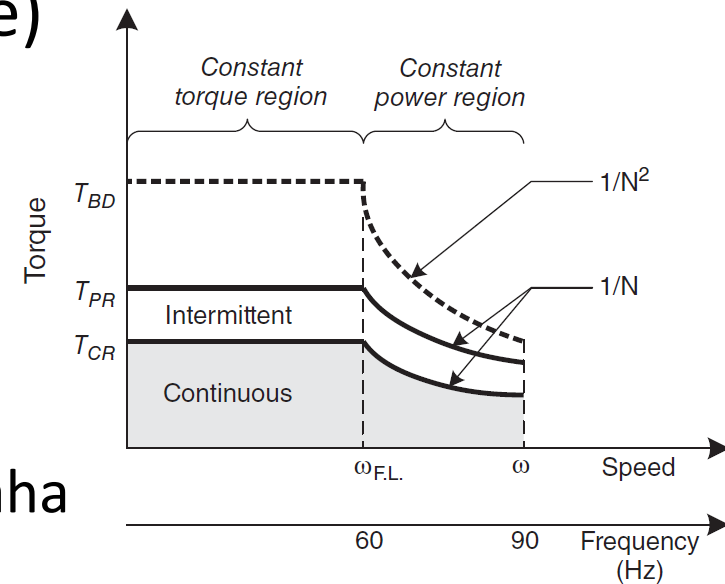


- Çoğu asenkron motor, sabit güç bölgesinde temel hızın 1,5 katına kadar güç sağlayabilir.
  - Bazı motorlar, temel hızın iki katına kadar sunmak için bu sınırı aşabilir.
  - Yataklar, yağlama, rotor balansı, çerçeve yapısı ve yük bağlantısı gibi faktörler motora maksimum güvenli mekanik hız limitleri getirir.
- Sürücü, motoru ve sürücüdeki güç elektroniği cihazlarını korumak için motora akım limitleri uygulamak üzere tasarlanmıştır.
  - Sonuç olarak, sürücü ve motor kombinasyonu, bir hareket uygulaması için mevcut olan sürekli ve tepe torku belirleyecektir.

# AC Endüksiyon Motorları için Tork-Hız Eğrileri



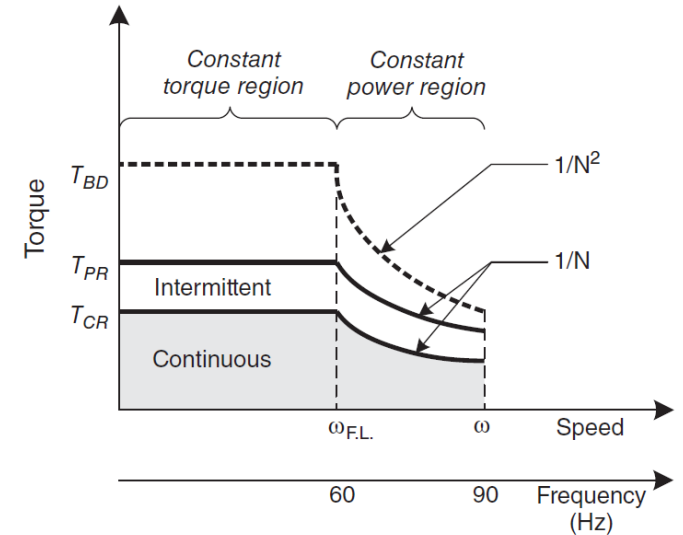
- Sürekli nominal (continuous rated) tork  $T_{CR}$ :
  - Motorun tam yük torkundan daha küçük olacak şekilde veya
  - Sürücünün sürekli akım limiti dikkate alınarak sürücü ve motor kombinasyonu tarafından üretilen sürekli torktan daha küçük olacak belirlenmelidir.
- Tepe anma torku (peak rated torque)  $T_{PR}$ :
  - Motorun arıza torkundan daha küçük veya
  - Sürücünün tepe akım limiti nedeniyle sürücü ve motor kombinasyonu tarafından üretilen tepe torkundan daha küçük olarak belirlenmelidir.



# AC Endüksiyon Motorları için Tork-Hız Eğrileri



- Sürücü motorun arıza torkunu aşmamalıdır, aksi takdirde motor duracaktır.
  - Bu nedenle, arıza torku, bir motorun aşırı ısınma olmadan kısa süreler için sunabileceği mutlak bir maksimum limit oluşturur.
  - Ayrıca, temel frekansın ötesinde, arıza torku  $T_{BD}$ ,  $1/N^2$  ile orantılı olarak düşer.



# Örnek



- 60 Hz temel frekansta 460 VAC besleme gerilimine sahip 5 beygir gücündeki bir vektör görev motoru 1765 rpm tam yük hız, 7A tam yük akım, 20.2 Nm tam yük tork ve 94.9 Nm arıza torkuna sahiptir. Motor, 5A sürekli ve 10A tepe akımı olan bir sürücüyeye bağlıysa, bu sürücü ve motor kombinasyonu için tork-hız eğrilerini çiziniz.

- **Çözüm:**

- Motor tam yükte 20.2 Nm tork değeri sağlarken 7A çekiyor.
  - Sürücü ise 5A sürekli akım sağlayabiliyor.
  - Bu durumda tork değeri düşecektir. (5A<7A)
- Bir doğrusal ölçekleme faktörü belirlersek:

$$K_t = \frac{20.2 \text{ Nm}}{7} = 2.88 \text{ Nm/A}$$

# Örnek



- 60 Hz temel frekansta 460 VAC besleme gerilimine sahip 5 beygir gücündeki bir vektör görev motoru 1765 rpm tam yük hız, 7A tam yük akım, 20.2 Nm tam yük tork ve 94.9 Nm arıza torkuna sahiptir. Motor, 5A sürekli ve 10A tepe akımı olan bir sürücüyeye bağlıysa, bu sürücü ve motor kombinasyonu için tork-hız eğrilerini çiziniz.

- **Çözüm:**  $K_t = \frac{20.2 \text{ Nm}}{7} = 2.88 \text{ Nm/A}$

- Bu durumda motor 5A akım çekerken üretilen tork:

$$T = 5K_t = 5 * 2.88 = 14.4 \text{ Nm}$$

- 14.4 Nm < 20.2 Nm olduğundan,  $T_{CR}=14.4 \text{ Nm}$  olur.
  - Eğer sürücüsünün sürekli akım değeri 7A'den fazla olsaydı, motoru korumak için sürücünün sürekli akım değeri 7A'de sınırlandırılmalıydı. Bu durumda,  $T_{CR}=20.2 \text{ Nm}$  olurdu.

- 90Hz'de sürekli tork değeri 1/N ile orantılı olarak düşer.

$$T = (T_{FL} N_B) \frac{1}{N} = (14.4 * 60) \frac{1}{90} = 9.6 \text{ Nm}$$



- 60 Hz temel frekansta 460 VAC besleme gerilimine sahip 5 beygir gücündeki bir vektör görev motoru 1765 rpm tam yük hız, 7A tam yük akım, 20.2 Nm tam yük tork ve 94.9 Nm arıza torkuna sahiptir. Motor, 5A sürekli ve 10A tepe akımı olan bir sürücüye bağlıysa, bu sürücü ve motor kombinasyonu için tork-hız eğrilerini çiziniz.

- **Çözüm:**  $K_t = \frac{20.2 \text{ Nm}}{7} = 2.88 \text{ Nm/A}$

- Benzer şekilde motor 10A akım çekerken üretilen tork

$$T = 10K_t = 10 * 2.88 = 28.8 \text{ Nm}$$

- 28.8 Nm < 94.9 Nm olduğundan,  $T_{PR}=28.8 \text{ Nm}$  olur.
  - Eğer sürücü arıza torkundan daha fazla torka neden olabilecek bir tepe akım değerine sahip olsaydı, motoru korumak için sürücünün tepe akım değeri uygun bir şekilde sınırlandırılmalıydı. Bu durumda  $T_{PR}=94.9 \text{ Nm}$  olurdu.

- 90Hz'de sürekli tork değeri 1/N ile orantılı olarak düşer.

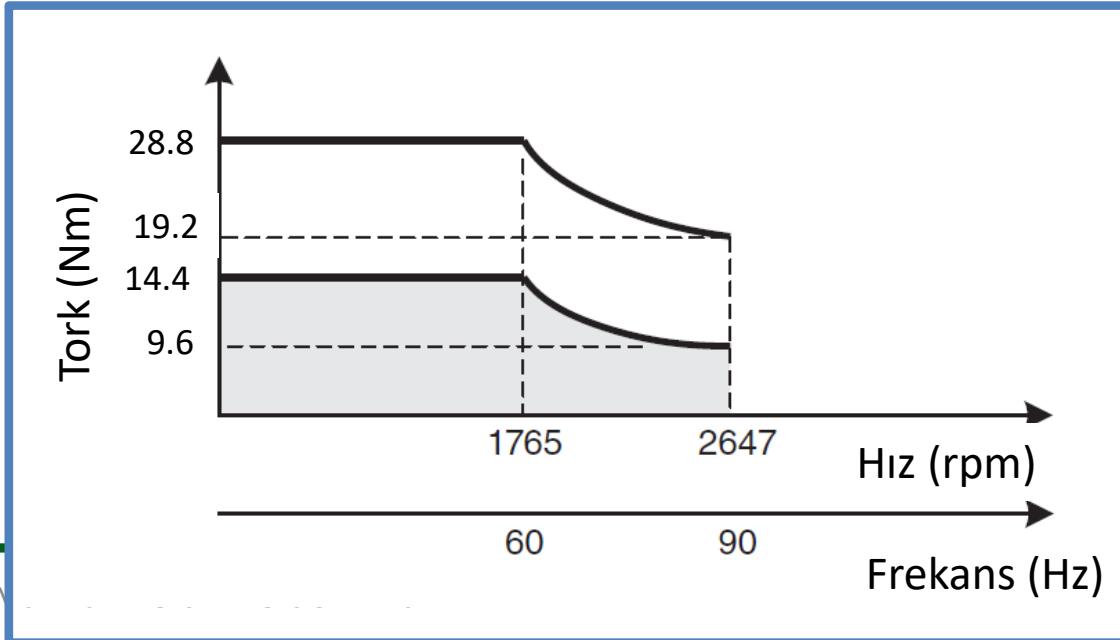
$$T = (T_{FL} N_B) \frac{1}{N} = (28.8 * 60) \frac{1}{90} = 19.2 \text{ Nm}$$

# Örnek



- 60 Hz temel frekansta 460 VAC besleme gerilimine sahip 5 beygir gücündeki bir vektör görev motoru 1765 rpm tam yük hız, 7A tam yük akım, 20.2 Nm tam yük tork ve 94.9 Nm arıza torkuna sahiptir. Motor, 5A sürekli ve 10A tepe akımı olan bir sürücüyeye bağlıysa, bu sürücü ve motor kombinasyonu için tork-hız eğrilerini çiziniz.

- Çözüm:**  $T_{CR} = 14.4 Nm$        $T_C(90Hz) = 9.6 Nm$   
 $T_{PR} = 28.8 Nm$        $T_P(90Hz) = 19.2 Nm$





# ***EEM435 Elektrik Tahrik Sistemleri*** ***- Sunum 8***

**Doç. Dr. Furkan Akar**

*Düzce Üniversitesi, Müh. Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği*

# Motor Boyutlandırma Süreci



- Motor boyutlandırma, bir hareket kontrol uygulaması için en iyi motoru seçme işlemidir.
- Hareket profili ve sistem ataleti, motor hızının, ivmenin ve gerekli torklarını belirlediğini göstermiştik.
- Maliyet, motorun fiziksel boyutu ve sürücü gücü gereksinimleri gibi diğer faktörler de dikkate alınmalıdır.
- Motor boyutlandırmada dört ana faktör dikkate alınır:
  - 1. Atalet oranı ( $J_R$ )
  - 2. Motor hızı ( $\omega_m$ )
  - 3. Motor hızında tepe torku ( $T_{peak}$ )
  - 4. Motor hızında RMS torku ( $T_{RMS}$ )

# Motor Boyutlandırma Süreci

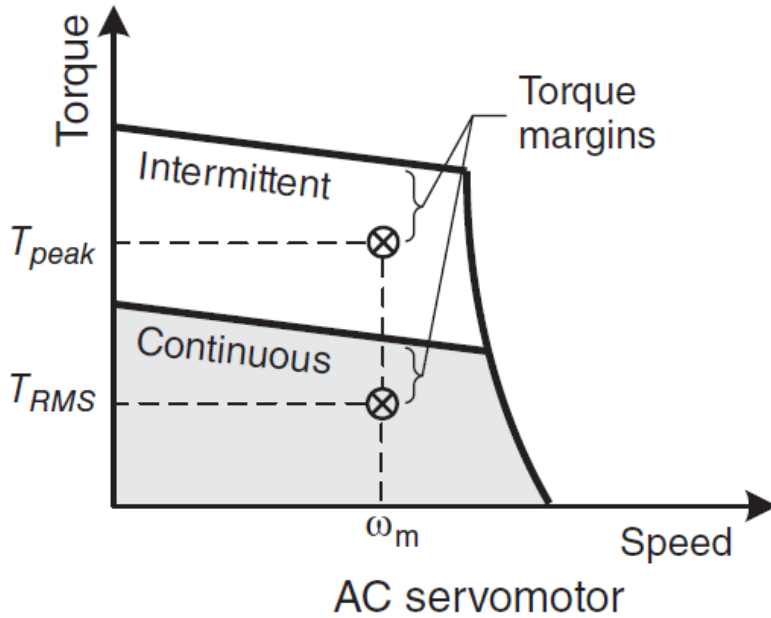


- Amaç hareket için gerekli hız ve torkları üretebilen en küçük motoru bulmaktır.
- Eksen için istenen hareket profili dikkate alınarak eksenin çalışma hızına ulaşmak için gereken motor hızının bulunmasıyla boyutlandırma süreci başlar.
- Hareket için tepe ve RMS torklarının hesaplanmasından sonra bu tork değerleriyle başa çıkabilecek bir motor seçilmelidir.
- Son olarak, seçilen motor tarafından atalet oranı kriterinin karşılandığından da emin olunmalıdır (tork-hız eğrileri!)

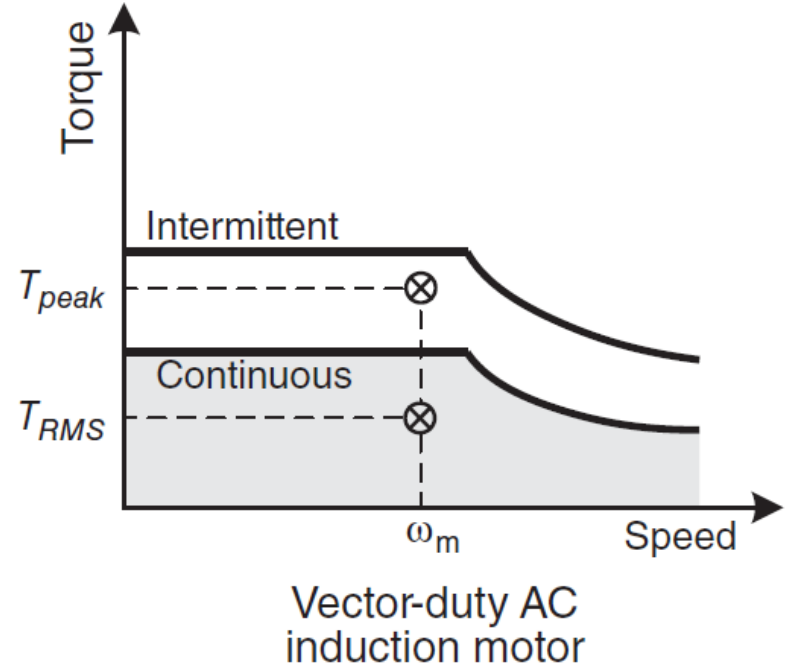
# Motor Boyutlandırma Süreci



Hareket için tepe ve RMS torklarının hesaplanmasından sonra bu tork değerleriyle başa çıkabilecek bir motor seçilmelidir.



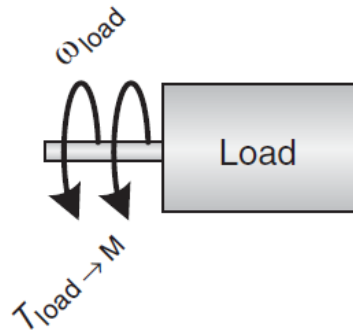
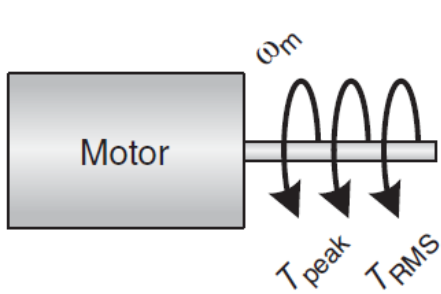
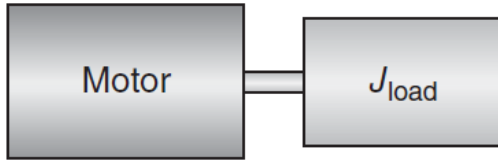
OR



# Doğrudan Tahrik için Motor Seçimi



- Doğrudan tahrikli sistemlerde motor aşağıda gösterildiği gibi doğrudan yüke doğrudan bağlıdır. Motor seçimi, yükün hareket profilini takip etmesi için gereken tepe torku ( $T_{peak}$ ) ve sürekli torku ( $T_{RMS}$ ) sağlayabilen bir motor bulmayı içerir.



- Daha önce yük için belirli bir hareket profili için gereken tepe ve sürekli (RMS) torkların nasıl hesaplanacağını açıklanmıştı. Hız profilinden motorun  $T_{peak}$ ,  $T_{RMS}$  ve çalışma hızı  $\dot{\theta}_m$  (veya  $\omega_m$ ) kullanarak, bu torkları çalışma hızında sağlayabilen bir motor seçebiliriz.

# Doğrudan Tahrik için Motor Seçimi



- Prosedür:
  - 1. Yük için istenen hareket profilinden motorun çalışma hızı  $\omega_m$  bulunur. Motorun sağlaması gereken  $T_{peak}$  ve  $T_{RMS}$  hesaplanır. Bu noktada motor bilinmediği için tork hesaplamalarında şimdilik  $J_m = 0$  kullanılır.
  - 2. Bir motor kataloğundan, motorun  $\omega_m$  çalışma hızında bu torkları sağlayabilen mümkün olan en küçük motor seçilir.

$$T_{peak} \leq T_{PR} \text{ and } T_{RMS} \leq T_{CR}$$

- Motoru tepe ve sürekli torklarda çalıştırmak için gerekli akımları sağlayabilecek uygun bir sürücü seçilmelidir.
- Sürücü, tork seviyelerinin gerektirdiğinden daha az akıma sahipse, sürücü akımı, dolayısıyla motor torklarını sınırlayacağından motor  $T_{PR}$  ve  $T_{CR}$ 'nin değeri lineer olarak düşürülmelidir (ölçek küçültülür).

# Doğrudan Tahrik için Motor Seçimi

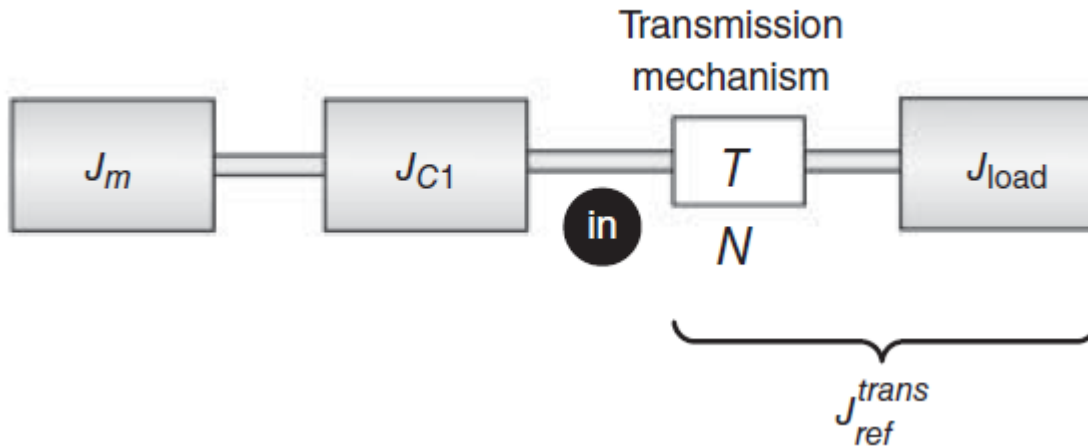


- Prosedür:
  - 3. Yeni seçilen motorun eylemsizliği ( $J_m$ ) ile  $T_{peak}$  ve  $T_{RMS}$ 'yi yeniden hesaplanır.
  - 4. Motorun bir miktar marjla beklenen performansı sunabildiğinden emin olmak için Adım 2'deki seçim kriteri kontrol edilir. Uygulamada  $T_{RMS}$  için %30 ve  $T_{peak}$  için %50 marj yaygındır. Makinenin devreye alınması sırasında koşullar değişirse, ayarlamalar için bir miktar marj (ekstra tork kapasitesi) olması arzu edilir.
  - 5. Eylemsizlik oranı  $J_R$  hesaplanır ve istenen kriteri karşıladığından emin olunur. Tipik olarak,  $J_R \leq 5$  kullanılır, ancak bu aynı zamanda istenen sistem performansına da bağlıdır. Kriter karşılanmazsa, daha büyük ataletli (daha büyük motor) bir motor seçilir veya yük ataleti azaltılır ve 3–5 arasındaki adımlar tekrarlanır.

# Motor ve Şanzıman Seçimi

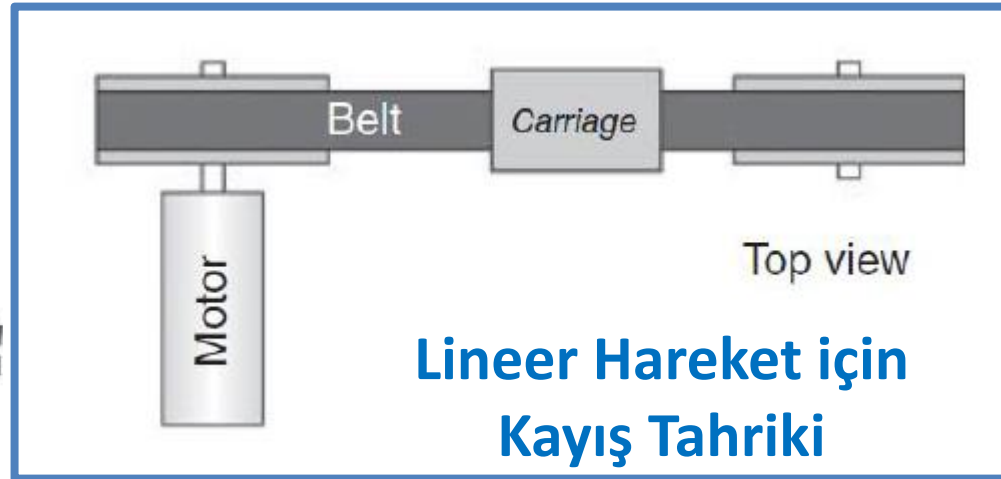
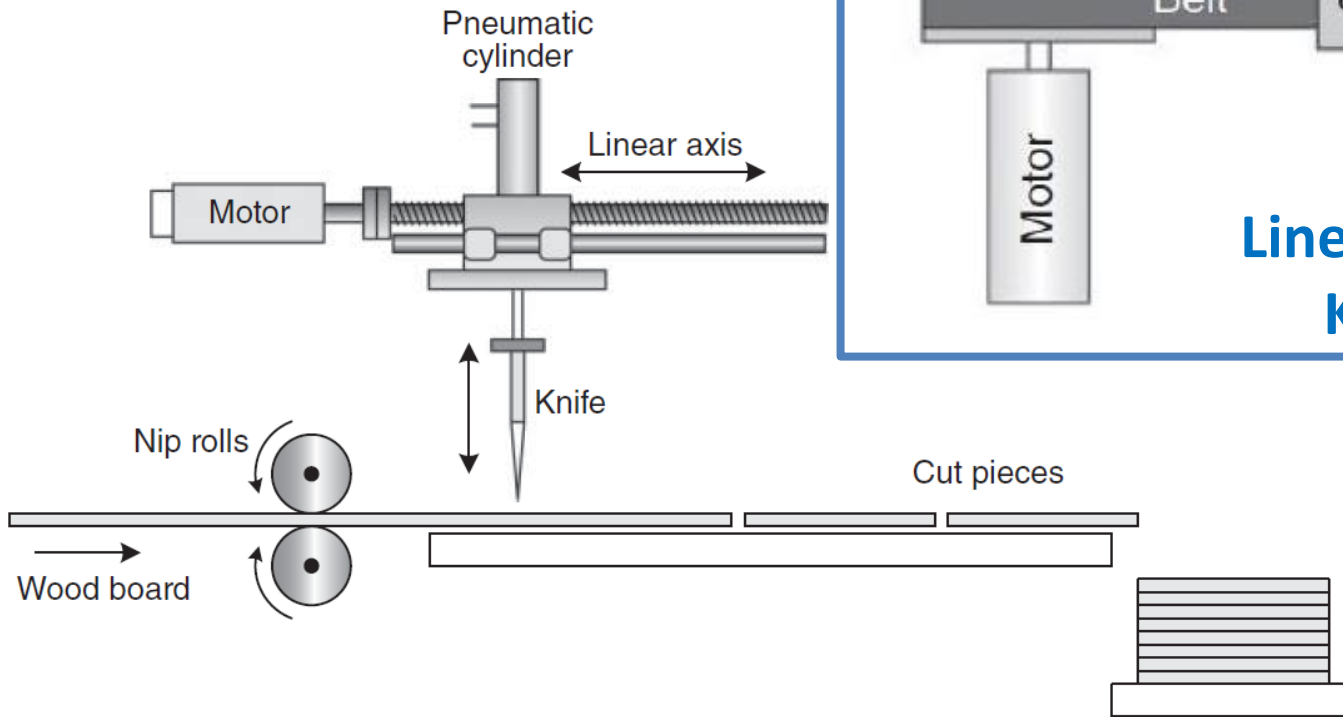


- Yük, bir aktarma mekanizması aracılığıyla motora bağlanır. Mekanizma, daha önce detaylıca tartışıldığı gibi yük torkunu, ataletini ve hareketini giriş miline (motor) yansıtır.
- Gerekli tepe ve RMS torkları daha önce açıklandığı gibi hesaplanabilir.





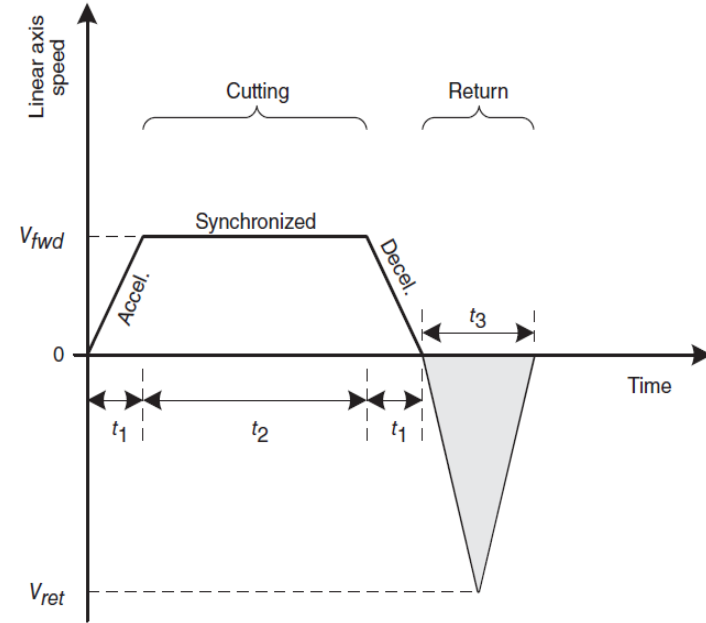
- Aşağıda gösterilen hareketli kesme makinesi, kılavuz vida yerine kayış tahrikli bir aktüatör kullanacak şekilde yeniden tasarlanacaktır.



# Örnek



- Tasarımcı, kılavuz vidalı aktüatörü değiştirmek için bir ERV5 milsiz aktüatör (lineer hareket için kayışlı tahrik, kayış ağırlığı=1.35 kg, girişe yansıyan atalet  $38.55 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2$ ,  $r_{ip}=1.6\text{cm}$ ,  $\eta=0.95$ ,  $\mu=0.1$ ) kullanmayı planlıyor.
- Kesici takım tertibatı 16.8kg ağırlığındadır.
- Kesici, malzemeyi keserken ahşap levha ile senkronize olarak  $V_{fwd} = 41\text{cm/s}$  hızında hareket etmelidir.
- Şekildeki yamuk hareket profili  $t_1 = 500 \text{ ms}$  ve  $t_2 = 2.5 \text{ s}$ 'dir. Geri dönüş hareketi  $t_3 = 2 \text{ s}$ 'de tamamlanır.
- BE Serisi servo motor katalogundan eksen için bir AC servo motor seçiniz.



# Çözüm



- Motor, doğrudan kayış tahrikine bağlı olduğundan, motorun ileri hareketteki çalışma hızı,  $V_{fwd}$  ekseninin doğrusal hızının, milsiz aktüatör içindeki kasnağın yarıçapına bölünmesiyle bulunabilir.

$$\omega_{m,fwd} = \frac{41 \text{ cm/s}}{1.6 \text{ cm}} = 25.625 \text{ rad/s}$$

- Aktarma mekanizmasının iletim oranı:  $N_{BD} = \frac{1}{r_{ip}} = \frac{1}{1.6 \text{ cm}} = 62.5 \text{ m}^{-1}$
- Motora yansıyan atalet:

$$J_{ref}^{trans} = J_{BeltDrive \rightarrow in} + \frac{1}{\eta N_{BD}^2} \left( \frac{W_L}{g} \right) = 38.55 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 + \frac{1}{0.95 * (62.5)^2} \frac{16.8 * g}{g}$$

$$= 491.26 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

- Eksen,  $t_1 = 500 \text{ ms}$ 'de  $V_{fwd}$  hızına hızlanır. Bu nedenle motorun ileri hareketteki açısal ivmesi:

$$a_{m,fwd} = \frac{\omega_{m,fwd}}{t_1} = \frac{25.625 \text{ rad/s}}{0.5 \text{ s}} = 51.25 \text{ rad/s}^2$$



- Artık motora yansıyan tork hesaplanabilir:

$$T_{\text{load} \rightarrow \text{in}} = \frac{F_{\text{ext}}}{\eta N_{\text{BD}}} \quad F_{\text{ext}} = F_p + (W_L + W_{\text{belt}})(\sin \beta + \mu \cos \beta)$$

$$F_{\text{ext}} = 0 + (16.8 + 1.35) * 9.81 * (\sin(0) + 0.1 \cos(0)) = 17.80 \text{ N}$$

$$T_{\text{load-in}} = \frac{17.80}{0.95 * 62.5} = 0.299 \text{ N} \cdot \text{m}$$

- Motor bilinmediğinden  $J_m = 0$  olarak kabul edilirse,

$$T_{\text{acc}} = J_{\text{total}} \ddot{\theta}_m + T_{\text{load} \rightarrow \text{M}} \Rightarrow T_{\text{peak, fwd}} = (491.26 \times 10^{-5})(51.25) + 0.299 = 0.550 \text{ Nm}$$

$$T_{\text{dec, fwd}} = 0.299 - (491.26 \times 10^{-5})(51.25) = 0.047 \text{ Nm}$$

$$T_{\text{run}} = 0.299 \text{ Nm}$$

# Çözüm



- Ayrıca, bir sonraki kesim için başlangıç konumuna geri döndürmek için kesici takım tertibatını ters yönde hızlandırmak için gereken tepe torku da hesaplamamız gerekir. Aynı denklemi kullanabiliriz, ancak önce motorun dönüş hareketindeki açısal ivmesini bulmalıyız

$$a_{m,ret} = \frac{\omega_{m,ret}}{t_3/2} = \frac{V_{ret}/r_{ip}}{t_3/2}$$

- Kesici takım kesim yaptıktan sonra aynı başlangıç konumuna dönmek zorunda olduğundan ileri harekette aldığı mesafe dönüş mesafesine eşit olmalıdır. Bu nedenle, yamuk hız profilinin altındaki alanı üçgen dönüş hız profilinin altındaki alana eşitleyerek dönüş hızını şu şekilde bulabiliriz.

$$v_{ret} = 2V_{fwd} \frac{t_1 + t_2}{t_3} = 2 * 0.41 \frac{0.5 + 2.5}{2} = 1.23 \text{ m/s}$$



$$a_{m,ret} = \frac{\omega_{m,ret}}{t_3/2} = \frac{1.23/0.016}{2/2}$$
$$a_{m,ret} = 76.875 \text{ rad/s}^2$$



- Ardından, geri dönüş hareketi için tepe torku

$$T_{acc} = J_{total} \ddot{\theta}_m + T_{load \rightarrow M} \rightarrow \begin{aligned} T_{peak,ret} &= (491.26 \times 10^{-5})(76.875) + 0.299 = 0.676 \text{ Nm} \\ T_{dec,ret} &= 0.299 - (491.26 \times 10^{-5})(76.875) = -0.0786 \text{ Nm} \end{aligned}$$

- Kesici tertibatını daha kısa sürede hızla hızlandırmak ve başlangıç konumuna döndürmek için daha fazla tepe torku gerektirdiğine dikkat edin.
- Sonunda ileri, geri ve tüm hareket için RMS torku kullanılarak hesaplanabilir.

$$T_{RMS.fwd} = \sqrt{\frac{T_{peak.fwd}^2 \cdot t_1 + T_{run}^2 \cdot t_2 + T_{dec.fwd}^2 \cdot t_1}{t_1 + t_2 + t_1}} = 0.328 \text{ Nm}$$

$$T_{RMS.ret} = \sqrt{\frac{T_{peak.ret}^2 \cdot t_3/2 + T_{dec.ret}^2 \cdot t_3/2}{t_3}} = 0.481 \text{ Nm}$$

$$T_{RMS} = \sqrt{\frac{T_{RMS.fwd}^2 \cdot (t_1 + t_2 + t_1) + T_{RMS.ret}^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_1 + t_3}} = 0.390 \text{ Nm}$$

$$T_{run} = T_{load \rightarrow M}$$

$$T_{dec} = T_{load \rightarrow M} - J_{total} \ddot{\theta}_m$$

# Çözüm



- BE Serisi servo motor kataloğundan bu torkları sağlayabilen en küçük motoru seçmemiz gerekiyor. NEMA boyutu 23 BE232F motor,  $T_{PR} = 3.2 \text{ Nm}$  ve  $T_{CR} = 0.96 \text{ Nm}$  değerine sahiptir. Bu değerlerin her ikisi de hesaplanan torklardan daha büyük olduğundan, bu motor seçilir.
- Seçilen motorun ataleti  $J_m = 1.7 \times 10^{-5} \text{ kg m}^2$ 'dir. Tekrardan tepe ve RMS torkları hesaplanmalıdır.

# Çözüm



$$T_{peak, fwd}' = (491.26 \times 10^{-5} + 1.7 \times 10^{-5})(51.25) + 0.299 = 0.551 \text{ Nm}$$

$$T_{dec, fwd}' = 0.299 - (491.26 \times 10^{-5} + 1.7 \times 10^{-5})(51.25) = 0.046 \text{ Nm}$$

$$T_{run} = 0.2994 \text{ Nm}$$

$$T_{peak, ret}' = (491.26 \times 10^{-5} + 1.7 \times 10^{-5})(76.875) + 0.229 = 0.677 \text{ Nm}$$

$$T_{dec, ret}' = 0.299 - (491.26 \times 10^{-5} + 1.7 \times 10^{-5})(76.875) = -0.079 \text{ Nm}$$

$T_{RMS}$  de neredeyse hiç değişmez.  $T_{RMS} = 0.390 \text{ Nm}$

- Yeniden hesaplanan değerler, seçilen motorun tepe ve devam eden torklarından hala daha azdır. Bu nedenle, motor seçimi uygundur.



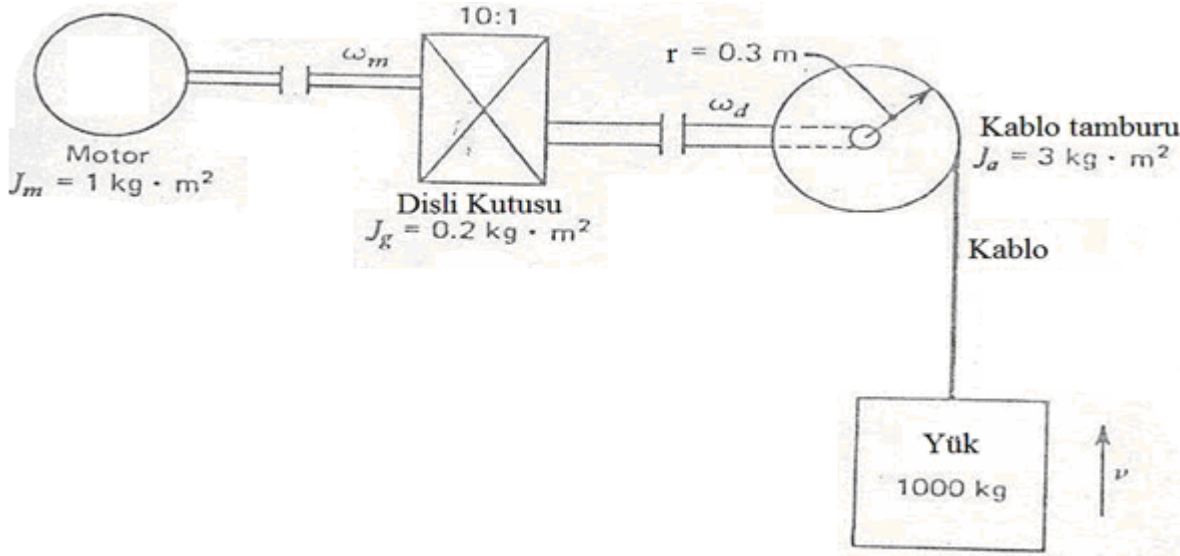
- Tork marjları şu şekilde hesaplanır:

$$\text{Tepe tork marjı} = \frac{T_{peak}^m - T_{peak,ret}^{hesaplanan}}{T_{peak}^m} = \frac{3.2 - 0.676}{3.2} = \%79$$

$$\text{RMS tork marjı} = \frac{T_{RMS}^m - T_{RMS}^{hesaplanan}}{T_{RMS}^m} = \frac{0.96 - 0.390}{0.96} = \%59.3$$

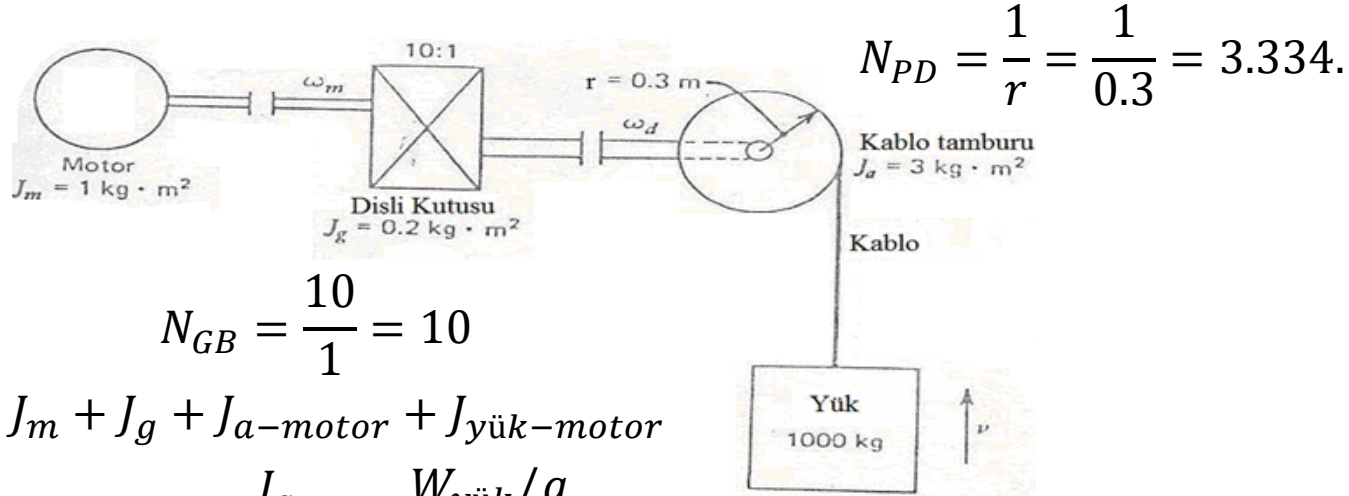
- Hem tepe hem de RMS tork marjları, sırasıyla pratik %50 ve %30'dan fazladır. Bu nedenle seçilen motor istenilen hareketi kolaylıkla gerçekleştirebilir.

# Örnek-1



Şekildeki sistemde millerin ve kablonun elastik olmadıklarını ve verimin yüzde yüz olduğunu kabul ederek, motor miline indirgenmiş eşdeğer ataleti ve torku bulunuz.

# Örnek-1: Çözüm



$$N_{GB} = \frac{10}{1} = 10$$

$$J_{\text{toplam}} = J_m + J_g + J_{a\text{-motor}} + J_{\text{yük-motor}}$$

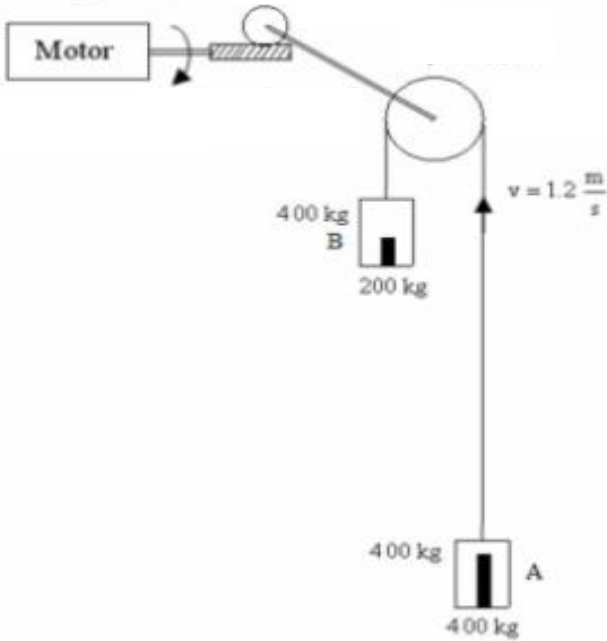
$$= J_m + J_g + \frac{J_a}{N_{GB}^2} + \frac{W_{\text{yük}}/g}{N_{GB}^2 N_{PD}^2}$$

$$= 1 + 0.2 + \frac{3}{10^2} + \frac{1000 * g/g}{10^2 * 3.334^2} = 2.13 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$T_{\text{yük-motor}} = \frac{F_{\text{ext}}}{N_{PD} N_{GB}} = \frac{F_p + (W_{\text{yük}} + W_c)(\sin\beta + \mu\cos\beta)}{N_{PD} N_{GB}} = \frac{0 + (1000 * 9.81 + 0)(1 + \mu_0)}{3.334 * 10}$$

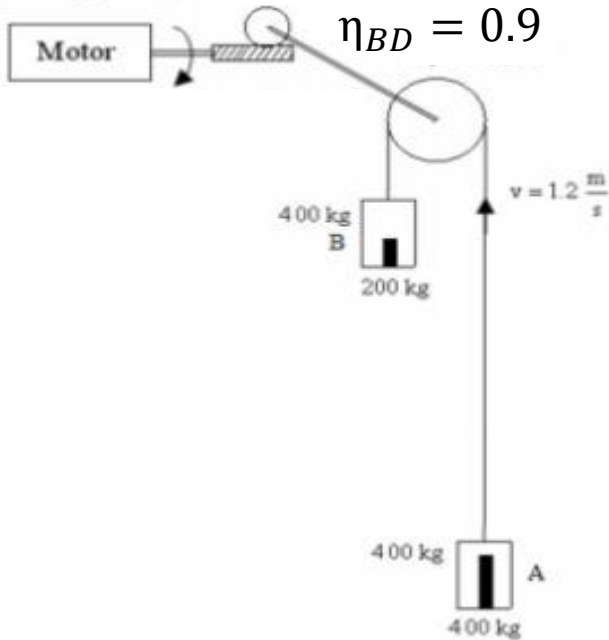
$$= 294.24 \text{ N} \cdot \text{m}$$

# Örnek-2



Şekildeki tahrik sisteminde, A kabini yukarı çıkarken, B kabini de aynı hızda aşağı inecek şekilde yapılandırılmıştır. Kayış tahrikli sistemin verimi %90 olarak verilmektedir. Buna göre bu sistemdeki tahrik gücünü bulunuz. (Şekilde kabin ağırlıkları 400kg verilmiştir.)

# Örnek-2:Çözüm



$$F_{ext} = F_p + (W_{yük} + W_c)(\sin\beta + \mu\cos\beta)$$

$$= 0 + ([400 + 400 - 400 - 200] * 9.81)(1)$$

$$= 1962 \text{ N}$$

Sabit kuvvete göre  
doğrusal hareket için güç:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt}(F r) = F \frac{dr}{dt}$$

$$P = F v$$

$$P_{ext} = F_{ext} v = 1962 * 1.2 = 2354 \text{ N} \cdot \frac{m}{s} = 2354 \text{ W}$$

$$P_{motor} = \frac{P_{ext}}{\eta_{BD}} = \frac{2354}{0.9} = 2615,55 \text{ W} = 3.5 \text{ HP}$$



# ***EEM435 Elektrik Tahrik Sistemleri*** ***- Sunum 9***

**Dr. Öğr. Ü. Furkan Akar**

*Düzce Üniversitesi, Müh. Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği*

# Dişli Kutuları (Redüktörler)

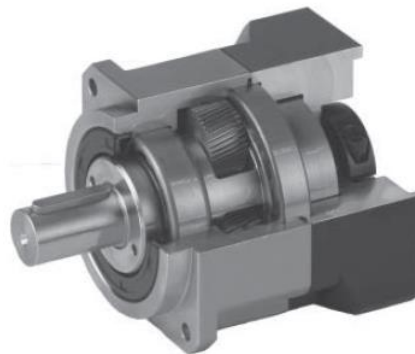


- Hızı azaltmak ve torku arttırmak için motorlara dişli kutuları bağlanır.
  - Sonuç olarak, daha küçük motorlar daha büyük yükleri taşıyabilir.
- Bir dişli kutusu aynı zamanda makine tasarımcısının atalet oranını ayarlamasına da olanak tanır.
  - Atalet oranı, toplam yük ataletinin motorun ataletine oranıdır.
  - Bir tasarımda dişli kutusu kullanıldığında, yansıtılan yük ataleti dişli kutusu oranının karesi kadar azaltılır.
- Genellikle bir motor ve dişli kutusu kullanmak, doğrudan tahrik için bir büyük motor kullanmaktan daha ucuzdur.
- Hareket kontrol uygulamalarında kullanılan en yaygın dişli kutuları
  - (1) Planet servo dişli kutuları
  - (2) Sonsuz dişli hız düşürücüleri

# Planet Servo Dişli Kutuları



- Planet dişli kutuları genellikle servo motorlarda kullanılır.
  - Servo motorlara kolay montaj için standart boyutlarda mevcuttur.
  - Planet dişli kutuları daha yüksek çıkış torkları ve daha küçük boyutlar sunar ancak maliyeti daha yüksektir.
  - 3:1 ila 100:1 dişli oranlarına sahip düz ve dik açılı modelleri mevcuttur.



# Planet Servo Dişli Kutuları

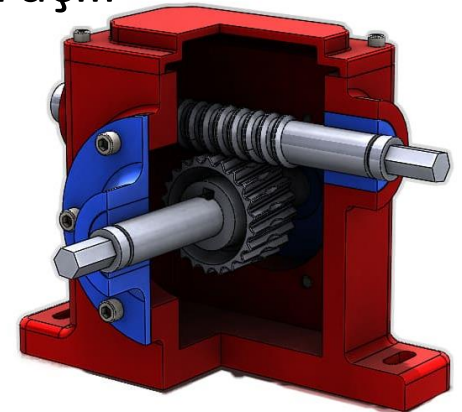
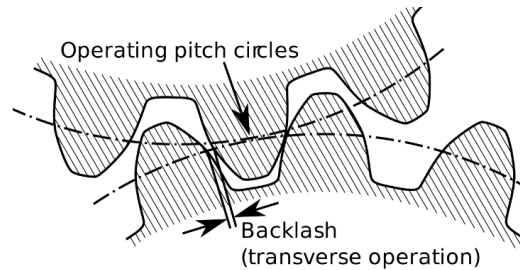


- Bir dişli kutusu seçerken aşağıdaki temel faktörlerin dikkate alınması gerekir:
  - 1. Çalışma modu (sürekli veya dögüsel)
  - 2. Dişli oranı ( $N_{GB}$ )
  - 3. Nominal ve maksimum hızlanma çıkış torkları ( $T_{2N}$ ,  $T_{2B}$ )
  - 4. Nominal ve maksimum giriş hızları ( $\omega_{1N}$ ,  $\omega_{1B}$ )
  - 5. Motorla mekanik uyumluluk (mil çapı, civata modelleri, vb.)

# Sonsuz Dişli Hız Düşürücüleri



- Sonsuz dişli hız düşürücüleri özellikle AC endüksiyon motorlarında kullanılır.
- Motorlara kolay montaj için standart boyutlarda mevcuttur.
- Sonsuz dişli redüktörler standart ve düşük boşluklu (backlash) modellere sahiptir.
- Yüksek şok yüklerini tolere edebilirler ancak diğer dişli türlerine göre daha az verimlidirler (%60-95 verim).
- Tek kademeli olarak 5:1–60:1 dişli oranına sahip dik açılı konfigürasyonda mevcuttur.



# Sonsuz Dişli Hız Düşürücüleri



- Sonsuz dişli hız düşürücü seçiminde aşağıdaki temel faktörlerin dikkate alınması gerekir:
  - 1. Dişli oranı ( $N_{GB}$ )
  - 2. Kasa boyutu
  - 3. Hassasiyet düzeyi (düşük veya standart boşluk)
  - 4. Nominal giriş hızı ( $\omega_{GB.nom}$ )
  - 5. Giriş beygir gücü veya çıkış torku
  - 6. Aşırı-asılı yük ( $F_{OHL}$ ): Güç aktarım organları tarafından iletilen tork nedeniyle shaftta uygulanan bükülme kuvveti, radyal kuvvet.
  - 7. Hizmet Faktörleri ( $S_f$ )
  - 8. Mekanik uyumluluk

# Sonsuz Dişli Hız Düşürücüleri

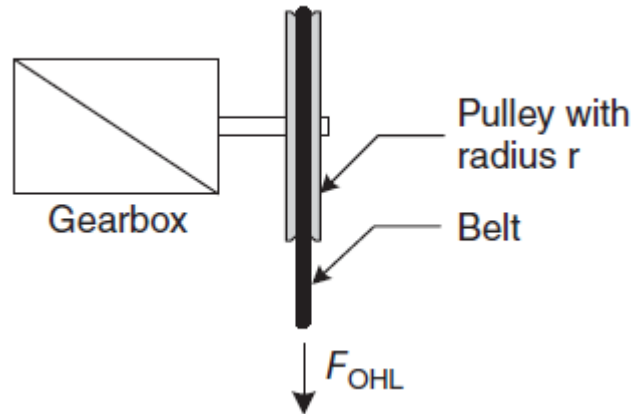


- Uygulama için gerekli tork, hareket profilinin ve aktarma organlarının analiz edilmesiyle elde edilir.
- Servis faktörleri, döngüsel çalışma, yük özellikleri ve termal koşullar gibi çeşitli operasyonel faktörleri dikkate alır.
  - Bu tür koşullar redüktörün performansını ve ömrünü olumsuz etkilediğinden servis faktörleri, hesaplanan değerlerle çarpılarak uygulama için gerekli torkları ve beygir güçlerini arttırmak veya düşürmek için kullanılır.
  - Ayarlanan değerler vites kutusu seçim sürecinin geri kalanında kullanıldığından, bu ayarlanan değerlere bazen "tasarım" beygir gücü/tork adı verilir.

# Sonsuz Dişli Hız Düşürücüleri



- Önemli bir husus, dişli kutusunun motora ve tahrik edilen yüke nasıl monte edildiğidir.
- Seçenekler arasında dişliler, kasknaklar, esnek kaplinler ve doğrudan tahrik için içi boş delikli çıkış mili yer alır.
- Yük bir dişli veya makaraya bağlandığında, aşağıda gösterildiği gibi zincir veya kayışın çekilmesiyle dişli kutusu miline radyal bir kuvvet uygulanır. Bu genellikle radyal yük ( $F_{OHL}$ ) olarak adlandırılan bir bükülme kuvvetidir.

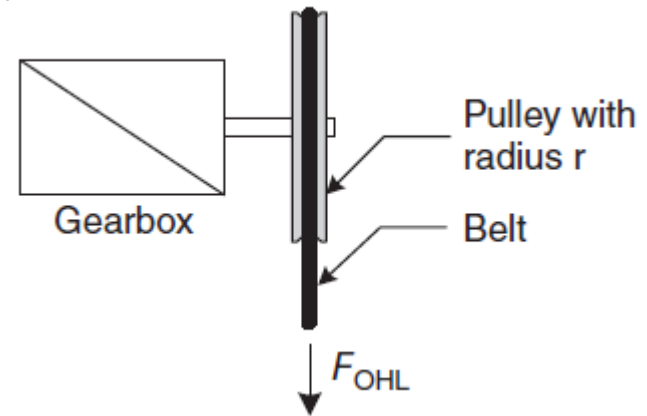


# Sonsuz Dişli Hız Düşürücüleri



- Radyal yük şu şekilde hesaplanır: 
$$F_{OHL} = \frac{T \cdot K_{LF}}{r}$$

T: Şaft üzerindeki tork  
r: Kasnağın/dişlinin yarıçapı  
 $K_{LF}$ : Dişli kutusu kataloğunda yükleme koşulu için belirtilen radyal yük faktörü
- Redüktör milinin yük miliyle yanlış hizalanması, herhangi bir kasnak veya dişli olmadan bile aşırı yüklenmeye neden olabilir.
- Kataloglar, her dişli kutusu ailesi için izin verilen maksimum asılı yükü belirtir.
- Radyal yük, çapın arttırılmasıyla, kasnağı redüktör kasasına daha yakın monte ederek ve esnek kaplinler kullanarak azaltılabilir.



# Sonsuz Dişli Hız Düşürücüleri



- Dişli kutusu katalogları beygir gücü (HP) değerlerini verir. Giriş ve çıkış beygir güçleri şu şekilde hesaplanabilir:

$$HP_{in} = \frac{T_{in}\omega_w}{63\,000}$$

$$HP_{out} = \frac{T_{out}\omega_{out}}{63\,000}$$

$T_{in}$  ve  $T_{out}$  : lb-inç cinsinden giriş ve çıkış torku  
 $\omega_w$  ve  $\omega_{out}$  : rpm cinsinden giriş ve çıkış hızı  
63 000: birim dönüşümleri için sabit

- Bazı kataloglarda  $HP_{in}$  ve  $HP_{out}$  belirtilir ancak dişli kutusunun verimliliği  $\eta_{GB}$  belirtilmez. Bu durumda verimlilik şuradan bulunabilir:

$$\eta_{GB} = \frac{HP_{out}}{HP_{in}}$$

- Son olarak dişli kutusunun giriş ve çıkış torkları şu şekilde ilişkilidir:

$$T_{out} = \eta_{GB} T_{in} N_{GB}$$

# Ödev:



- Ders notları ve başka kaynaklardan yararlanarak «Planet Dişli Kutuları» ve «Sonsuz Dişli Hız Düşürücüleri» hakkında bir sunum hazırlayınız.
- Bu sunumu sunarak kayıt altına alınız ve Youtube'a yükleyip 18.12.2024'e kadar <https://forms.gle/oN6wXiBZhKQtiyLP9> ile bana iletiniz.
- Sunumun 20-30dk olması beklenmektedir.
- Genel sunum kurallarına dikkat ediniz.