

Mühendisler için Mekanik

Cilt II

DİNAMİK

Yazarlar:

Prof. FERDİNAND P. BEER
Lehigh Üniversitesi,
Mekanik Bölümü Başkanı

Prof. E. RUSSELL JOHNSTON, JR.
Worcester Politeknik Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Çevirenler:

Prof. S. SACİT TAMEROĞLU
İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi

Doç. TEKİN ÖZBEK
İ.T.Ü. M. M. Fakültesi

Baskı-Cilt

Vesta Ofset Matbaa Ltd. Şti
Devekaldırımı Cad. Gelincik Sk. No: 6/4 Bağcılar - İst.

ÖNSÖZ

İlk okutulan mekanik dersinin başlıca amacı, mühendislik öğrencisinde herhangi bir problemi basit ve mantıklı bir tarzda çözmek ve iyi anlaşılabilir az sayıda, temel ilkeyi problemin çözümüne uygulamak yeteneğini geliştirmek olmalıdır. Ümit ederiz ki, bu kitap ve bunun birinci cildi olan *Mühendisler İçin Mekanik: Statik* kitabı, öğretmene bu amaçta ulaşmakta yardımcı olacaktır.

Vektör cebri birinci cildin başında ortaya konmuş ve statik temel ilkelerinin tanıtılmasında olduğu kadar, bir çok problemlerin, özellikle üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılmıştı. Benzer şekilde, vektörel türetme kavramı bu cildin başlarında ortaya konacak ve vektör analizi dinamiğin öğretilmesinde baştan sona kadar kullanılacaktır. Bu yol, temel ilkelerin daha kısa çıkarılmasını sağlamakta ve aynı zamanda kinematik ve kinetikte normal skaler yöntemlerle çözülemeyen bir çok problemlerin çözümlenmesi olanağını vermektedir. Bununla birlikte, bu kitapta en fazla önem verilen nokta, mekaniğin ilkelerinin doğru anlaşılması ve bunların mühendislik problemlerinin çözümüne uygulanması olup vektör analizi yararlı bir araç olarak kullanılmıştır.

Bu iki ciltte kullanılan yolun özelliklerinden biri, *maddesel noktaların mekaniğinin rijit cisimlerin mekaniğinden* açık bir şekilde ayrılmış olmasıdır. Bu yol, basit pratik uygulamaları için başında göz önüne alıp daha güç kavramların tanıtılmasını ileriye ertelemek olanağını verir. Statikte ait ciltte, maddesel noktaların statik önce anlatılmış ve denge ilkesi, yalnız bir noktada kesişen kuvvetlerin bulunduğu pratik hallere hemen uygulanmıştır. Rijit cisimlerin statik sonradan, iki vektörün vektörel ve skaler çarpımları ile aynı

MÜHENDİSLER İÇİN MEKANİK DİNAMİK

ISBN : 975-511-048-8

KOD NO : Y.0029

McGraw-Hill Book Co. Inc. tarafından 1962 yılında yayınlanan *Vector Mechanics for Engineers: Dynamics* adlı eserden dilimize çevrilmiştir. Metrik sisteme dönüştürme çevirenler tarafından yapılan özgün bir çalışmadır.

McGraw-Hill Book Co. Inc. tarafından 1962 yılında yayınlanan *Vector Mechanics for Engineers: Dynamics* adlı eserden dilimize çevrilmiştir. Metrik sisteme dönüştürme çevirenler tarafından yapılan özgün bir çalışmadır.

zamanda göz önüne alınmış ve bir kuvvetin bir noktaya ve bir eksenle göre momentini tanımlamakta kullanılmıştır. Bu ciltte de aynı bölümlere görülmektedir. Kuvvet, kütle ve ivme, iş ve enerji, impuls ve momentum gibi temel kavramlar anlatılmış ve bunlar, önce sadece maddesel noktalarla ilgili problemlere uygulanmıştır. Böylece öğrenci, rijit cisimlerin hareketi ile ilgili güçlüklerle karşı karşıya gelmeden önce, dinamikte kullanılan üç temel yöntemi kendini alıştırmalı ve bunların birbirine göre üstünlüklerini öğrenebilir.

Bu kitap ilk okutulan dinamik dersi için düzenlenmiş olduğundan, yeni kavramlar basit bir şekilde sunulmuş ve her adım ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Öte yandan, göz önüne alınan problemlerin daha geniş yönlerini tartışarak ve uygulanma bakımından genel olan yöntemlerin üzerinde durarak belirli bir anlatım olgunluğu başarılmıştır. Örneğin, potansiyel enerji kavramı, konservatif kuvvet genel halinde incelenmiştir. Aynı şekilde, rijit cisimlerin düzlemsel hareketi bunların uzaydaki genel hareketlerine doğal olarak geçilecek şekilde düzenlenmiştir. Kinetikte de durum kinematığının aynıdır; kinetikte dinamik denge yerine, dış kuvvetler ile efektif kuvvetlerin eşdeğerliliği ilkesi, düzlemsel hareketin çözümlenmesine doğrudan doğruya uygulanmış ve böylece üç boyutlu hareketin incelenmesine geçiş kolaylaştırılmıştır.

Kitapta, seçime bağlı birçok kısımlar bulunmaktadır. Bu kısımlar yıldızla işaretlenerek, bunların temel dinamik dersinin çekirdeğini teşkil eden kısımlardan kolayca ayrılması sağlanmıştır. Bunların terkedilmesi kitabın geri kalan kısımlarının anlaşılması bakımından bir sakınca doğurmaz. Bu ek kısımlarda işlenen konular, doğrusal hareket problemlerinin çözümünde grafik yöntemler, merkezsel kuvvet etkisinde hareket ve bunun gök mekaniğine uygulanması, sıvı akımlarının sapmaları, jet ve roketle tahrik problemleri, Coriolis ivmesi, rijit cisimlerin üç boyutlu kinetiği, sönümlü mekanik titreşimler ve elektrik benzeşimi içine almaktadır. Bu konular, dinamiğin üçüncü yılda okutulması halinde özellikle ilgi çekici olabilir.

Mekaniğin esas olarak, birkaç temel ilkeye dayanan *tümdengelimli* bir bilim olması gerçeği üzerinde ısrarla durulmuştur. Türetmeler, mantıkî sıraları içinde ve bu kitap düzeyinde sağlanabilecek bütün kesinlikle sunulmuştur. Ancak, öğrenme işleminin daha çok *tümevarıcı* olması bakımından önce basit uygulamalar göz önüne alınmıştır. Bu

nedenle maddesel noktaların dinamiği, rijit cisimlerin dinamiğinden önce gelmektedir; rijit cisimlerin dinamiğinde, kinetiğin temel ilkeleri önce, öğrencilerin daha kolay canlandırabilecekleri iki boyutlu problemlerin çözümüne uygulanmış (Böl. 6 ve 7), üç boyutlu problemler ise Böl. 8 e kadar ertelenerek vektör analizinin daha güçlü yöntemleri kullanılmıştır.

Serbest cisim diyagramlarını statığın başlarında anlatılmıştır. Bunlar yalnız denge problemlerinin çözümünde değil, iki kuvvet sisteminin veya daha genel olarak iki vektör sisteminin eşdeğerliliğini ifade etmekte de kullanılmıştır. Bu yolun üstünlüğü, rijit cisimlerin dinamiğini incelerken kendini gösterir. Hareketin normal cebrik denklemlerini yazacak yerde "serbest cisim diyagramlarının eşitliği" üzerinde durmakla dinamiğin temel ilkelerinin daha bilinçli ve daha tam anlaşılması sağlanabilir.

Bu ciltte sunulan bilgi ve problemlerin pek çoğu, cebir, trigonometri, elemanter analiz ve statik cildinin 2 ve 3 cü bölümlerinde anlatılan vektör cebirinin elemanlarından ¹⁾ öteye, matematik ön bilgiyi gerektirmez. Ancak, daha ileri analiz bilgisinden yararlanan özel problemler ve Kıs. 9.8 ve 9.9 daki sönümlü titreşimlerde olduğu gibi, öğrencinin belirli bir matematik temele sahip olması halinde okutulabilecek kısımlar da kitaba katılmıştır.

Kitap birimlere bölünmüştür; her birim, bir veya birkaç metin kısmı, bir veya birkaç örnek problem ve çok sayıda ödev olarak çözülecek problemlerden oluşmaktadır. Her birim, belirli bir konuya karşı gelmektedir ve genellikle bir derste işlenebilir. Ancak bazı hallerde öğretmen, verilen bir konuya birden fazla saat ayırmayı daha uygun görebilir. Örnek problemler, öğrencilerin ödev olarak yapacakları problemleri çözmekte kullanmaları istenen formda düzenlenmiştir. Böylece örnek problemler, hem metni genişletmek, hem de öğrencinin kendi çözümlerinde alışması beklenen açık ve düzenli çalışma tipini göstermek gibi iki amaca hizmet etmektedir. Ödev olarak verilecek problemlerin pek çoğu pratikten alınmış olup, mühendislik öğrencilerini ilgilendirmektedir. Bununla birlikte öncelikle, kitapta sunulan bilgiyi açıklamak ve öğrencinin, mekaniğin temel ilkelerini anlamasına yardımcı olmak için düzenlenmiştir. Problemler,

1) Vektör cebirinin bazı faydalı tanım ve özellikleri okuyucuya kolaylık sağlamak için bu cildin sonunda özetlenmiştir.

açıklama getirecekleri bilgilere göre gruplanmış ve artan güçlüğü göre sıralanmıştır. Özel dikkati gerektiren problemler yıldızla işaretlenmiştir. Çift numaralı problemlerin cevapları, kitabın sonunda verilmiştir.

Yazarlar, *Mühendisler için Mekanik* kitabının ilk kısmını kullananların yaptıkları yararlı eleştirileri ve tavsiyelere şükranlarını bildirirler.

FERDİNAND P. BEER
E. RUSSELL JOHNSTON, JR.

İÇİNDEKİLER

Önsöz	III
Semboller listesi	XI
Bölüm 1 Maddesel noktaların kinematığı . . .	3
1.1 Dinamiğe giriş	3
MADDESEL NOKTALARIN DOĞRUSAL HAREKETİ	4
1.2 Yer, hız ve ivme	4
1.3 Maddesel noktanın hareketinin belirtilmesi	8
1.4 Düzgün doğrusal hareket	15
1.5 Düzgün değişen doğrusal hareket	16
1.6 Çok sayıda maddesel noktanın hareketi	17
*1.7 Doğrusal hareket problemlerinin grafik çözümü	23
*1.8 Başka grafik yöntemler	25
MADDESEL NOKTALARIN EĞRİSEL HAREKETİ	31
1.9 Yer vektörü, hız ve ivme	31
1.10 Vektör fonksiyonlarının türevleri	33
1.11 Hız ve ivmenin dik bileşenleri	36
1.12 Ötelenme yapan bir takıma göre bağlı hareket	37
1.13 Teğetsel ve normal bileşenler	46
1.14 Kutupsal koordinatlarda bileşenler	49
Bölüm 2 Maddesel noktaların kinetiği: kuvvet, kütle ve ivme	58
2.1 Newton'un ikinci hareket kanunu	58
2.2 Birim sistemleri	59
2.3 Hareket denklemleri. Dinamik denge	62
2.4 Maddesel noktalar sistemi. D'Alembert ilkesi	64
2.5 Bir maddesel noktalar sisteminin kütle merkezinin hareketi	65
2.6 Maddesel noktaların doğrusal hareketi	66
2.7 Maddesel noktanın eğrisel hareketi	74
*2.8 Maddesel noktanın eğrisel hareketi. Kutupsal koordinatlarda bileşenler	80
*2.9 Merkezsel bir kuvvet etkisi altında hareket	81
2.10 Newton'un çekim kanunu	82
*2.11 Gök mekaniğine uygulama	83
*2.12 Gezegenlerin hareketleri için Kepler kanunları	87

Bölüm 3 Maddesel noktaların kinetiği: İş ve enerji	94
3.1 Giriş	94
3.2 Bir kuvvetin işi	94
3.3 Maddesel noktanın kinetik enerjisi. İş ve enerji ilkesi	98
3.4 İş ve enerji ilkesinin uygulamaları	100
3.5 Maddesel noktalar sistemi	101
3.6 Potansiyel enerji	110
3.7 Enerjinin korunumu	114
3.8 Güç ve verim	121
Bölüm 4 Maddesel noktaların kinetiği: İmpuls ve momentum	128
4.1 İmpuls ve momentum ilkesi	128
4.2 Maddesel noktalar sistemi	130
4.3 İmpulsif kuvvetler	134
4.4 Momentumun korunumu	135
4.5 Çarpışma	140
4.6 Doğru merkezsel çarpışma	141
4.7 Eğik merkezsel çarpışma	144
4.8 Enerji ve momentumla ilgili problemler	145
4.9 Bir maddesel noktanın açısal momentumu	154
4.10 Bir maddesel noktalar sisteminin açısal momentumu	155
4.11 Genelleştirilmiş impuls ve momentum ilkesi	157
4.12 Açısal momentumun korunumu	158
4.13 Gök mekaniğine uygulama	159
*4.14 Değişken maddesel nokta sistemleri	167
*4.15 Devamlı maddesel nokta akımı	167
*4.16 Kütle kazanan veya kaybeden sistemler	170
Bölüm 5 Rijit cisimlerin kinematığı	182
5.1 Giriş	182
5.2 Ötelenme	183
5.3 Sabit bir eksen etrafında dönme	184
5.4 Bir rijit cismin sabit bir eksen etrafında dönmesini tanımlayan denklemler	187
5.5 Genel düzlemsel hareket	192
5.6 Düzlemsel harekette salt ve bağıl hız	193
5.7 Düzlemsel harekette anı dönme merkezi	201
5.8 Düzlemsel harekette salt ve bağıl ivme	205
*5.9 Düzlemsel hareketin bir parametre cinsinden çözümlenmesi	208
5.10 Sabit bir nokta etrafında hareket	215
5.11 Genel hareket	218
*5.12 Dönen bir takıma göre bir vektörün değişiminin hızı	225
*5.13 Bir maddesel noktanın dönen bir takıma göre hareketi. Coriolis ivmesi	227
*5.14 Genel harekette karşılaştırma takımı	230

Bölüm 6 Rijit cisimlerin düzlemsel hareketi: Kuvvetler ve ivmeler	240
6.1 Giriş	240
6.2 Rijit bir cismin düzlemsel hareketi	240
6.3 Rijit bir cismin düzlemsel hareketi ile ilgili problemler	244
6.4 Rijit cisimlerden meydana gelen sistemler	245
6.5 Bağlı düzlemsel hareket	259
Bölüm 7 Rijit cisimlerin düzlemsel hareketi: Enerji ve momentum yöntemleri	279
7.1 Rijit bir cisim için iş ve enerji ilkesi	279
7.2 Rijit bir cisim üzerine etkiyen kuvvetlerin işi	280
7.3 Düzlemsel harekette rijit bir cismin kinetik enerjisi	282
7.4 Rijit cisim sistemleri	283
7.5 Enerjinin korunumu	283
7.6 Güç	285
7.7 Rijit bir cisim için impuls ve momentum ilkesi	296
7.8 Düzlemsel hareket yapan rijit bir cismin momentumu	297
7.9 Rijit bir cismin düzlemsel hareketinin çözümlenmesine impuls ve momentum ilkesinin uygulaması	299
7.10 Rijit cisim sistemleri	300
7.11 Açısal momentumun korunumu	307
7.12 Merkezsel olmayan çarpışma	308
Bölüm 8 Rijit cisimlerin üç boyutlu kinetiği	320
*8.1 Giriş	320
*8.2 Rijit bir cismin uç boyuttaki açısal momentumu	322
*8.3 Atalet elipsoidi	324
*8.4 Rijit bir cismin üç boyuttaki kinetik enerjisi	327
*8.5 Rijit bir cismin sabit bir nokta veya kendi kütle merkezi etrafındaki hareket denklemleri	332
*8.6 Rijit bir cismin sabit bir eksen etrafında dönmesi. Şaftların dengelenmesi	334
*8.7 Bir jiroskobun hareketi. Euler açıları	340
*8.8 Bir jiroskobun devamlı presesyonu	342
*8.9 Kendisine kuvvet etkimeyen eksenel simetrik bir cismin hareketi	343
Bölüm 9 Mekanik titreşimler	356
9.1 Giriş	356
SÖNÜMSÜZ TİTREŞİMLER	
9.2 Maddesel noktaların serbest titreşimleri. Basit harmonik hareket	357
9.3 Basit sarkaç (yaklaşık çözüm)	361
*9.4 Basit sarkaç (kesin çözüm)	361
9.5 Rijit cisimlerin serbest titreşimleri	367
9.6 Enerjinin korunumu ilkesinin uygulanması	374
9.7 Zorlanmış titreşimler	379

SÖNÜMLÜ TİTREŞİMLER	385
*9.8 Sönümlü serbest titreşimler	385
*9.9 Sönümlü zorlanmış titreşimler	387
*9.10 Elektrik benzeşimler (Analoglar).	389
Ek. Vektör cebirinin bazı faydalı tanım ve özellikleri	XIII
A.1 Vektörlerin toplamı	XIII
A.2 Bir vektörün bir skaler ile çarpımı	XIII
A.3 Birim vektör. Bir vektörün dik bileşenlerine ayrılması	XIV
A.4 İki vektörün vektörel çarpımı	XIV
A.5 Bir kuvvetin bir noktaya göre momenti	XV
A.6 İki vektörün skaler çarpımı	XVI
A.7 Üç vektörün karışık üçlü çarpımı	XVI
A.8 Bir kuvvetin verilen bir eksene göre momenti	XVII
Çift numaralı problemlerin cevapları	XVIII
Dizin	XXVII

SEMBOLLER LİSTESİ

a, a	İvme
a	Sabit; yarıçap; uzaklık; elipsin büyük ekseninin yarısı
\bar{a}, \bar{a}	Kütle merkezinin ivmesi
$a_{B/A}$	Ötelenme yapan A takımına göre B nin bağıl ivmesi
a_c	Coriolis ivmesi
A, B, C, ...	Mesnetler ve bağlardaki reaksiyonlar
A, B, C, ...	Noktalar
A	Alan
b	Genişlik; uzaklık; elipsin küçük ekseninin yarısı
c	Sabit; viskoz sönüm katsayısı
C	Ağırlık merkezi; ani dönme merkezi; kapasite
d	Uzaklık
e	Çarpışma katsayısı; tabii logaritmanın tabanı
E	Gerilim
f	Frekans; skaler fonksiyon
F	Kuvvet; sürtünme kuvveti
g	Yerçekimi ivmesi
G	Ağırlık merkezi; kütle merkezi; çekim sabiti
h	Yükseklik
h_0	O ya göre açısal momentum
i, j, k	Koordinat eksenleri doğrultusundaki birim vektörler
i_n, i_t	Normal ve teğet doğrultusundaki birim vektörler
i_r, i_θ	Radyal ve radyale dik doğrultudaki birim vektörler
i	Akım
I, I_z, \dots	Atalet momenti
\bar{I}	Ağırlık merkezinden geçen eksenlere göre atalet momenti
J	Kutupsal atalet momenti
k	Yay katsayısı
k_r, k_θ, k_0	Atalet yarıçapı
\bar{k}	Ağırlık merkezinden geçen eksenlere göre atalet yarıçapı
l	Boy; uzunluk
L	Boy; uzunluk; öz indüktans
m	Kütle
M	Kuvvet çifti; moment
M_0	O noktasına göre moment
M_0^R	O noktasına göre bileşke moment
M	Bir çiftin veya momentin şiddeti; dünyanın kütlesi
M_{OL}	OL eksenine göre moment
n	Normal doğrultu
N	Reaksiyonun normal bileşeni
O	Koordinat başlangıcı

p	Basınç; dairesel frekans
P	Kuvvet; vektör
P_{xy}, \dots	Çarpım atalet momenti
q	Elektrik yükü
Q	Kuvvet; vektör
r	Yer vektörü
r	Yarıçap; uzaklık; kutupsal koordinat
R	Bileşke kuvvet; bileşke vektör; reaksiyon
R	Dünyanın yarıçapı; direnç
s	Yer vektörü
s	Uzaklık; yay boyu
S	Kuvvet; vektör
t	Zaman; kalınlık; teğetsel doğrultu
T	Kuvvet
T	İp kuvveti; kinetik enerji
u	Hız
u	Dik koordinat; değişken
U	İş
v, v	Hız
v	Hızın şiddeti; dik koordinat
\bar{v}, \bar{v}	Kütle merkezinin hızı
$v_{B/A}$	Ötelenme yapan A takımına göre B nin bağıl hızı
V	Vektörel çarpım; kesme kuvveti
V	Hacim; potansiyel enerji
w	Birim boya gelen yük
W, W	Ağırlık; yük
x, y, z	Dik koordinatlar; uzaklık
$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$	Ağırlık veya kütle merkezinin dik koordinatları
α, α	Açısal ivme
α, β, γ	Açılar
γ	Özgül ağırlık
δ	Uzama
δr	Virtüel yer değiştirme
δU	Virtüel iş
ϵ	Bir koniğin veya bir yörünge'nin eksantrikliği
λ	Bir doğru boyunca birim vektör
η	Verim
θ	Açısal koordinat; Euler açıları; açı; kutupsal koordinat
μ	Sürtünme katsayısı
ρ	Yoğunluk; eğrilik yarıçapı
τ	Periyot
ϕ	Sürtünme açısı; Euler açısı; faz açısı; açı
φ	Faz farkı
ψ	Euler açısı
ω, ω	Açısal hız
ω	Zorlanmış titreşimin dairesel frekansı
Ω	Karşılaştırma takımının açısal hızı
ξ, η, ζ	Dik koordinatlar

DİNAMİK