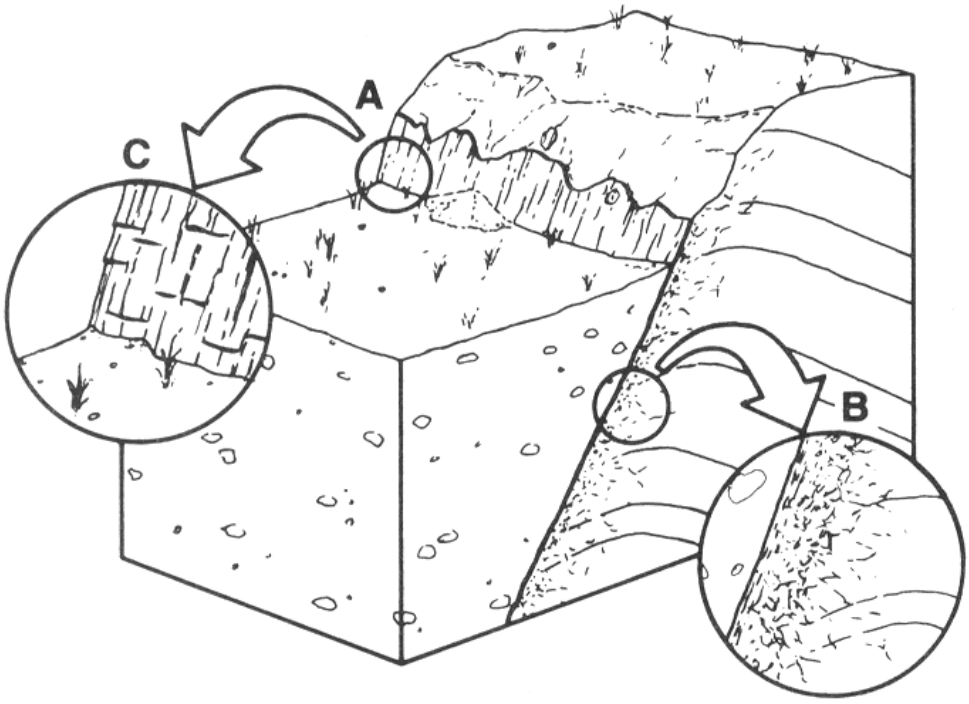
YAPISAL JEOLOJİ

DERS NOTLARI



Doç.Dr.Kadir Dirik

HÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü

2006

KURS TANIMI

Dersin Adı:	Kodu:	Sömestrisi :
Yapısal Jeoloji	**JEO263**	**3. Yarıyıl**
Türü: **T: 3; P: 2**	Saat/Hafta/GS/BS	Kredisi
Lisans dersi, zorunlu	**5 s/GS**	**4**

Ders Sorumlusu : Doç. Dr. Kadir DİRİK

Fakülte/Bölüm : Hacettepe Universitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü 06532, Beytepe, Ankara, Telephone: +90.312.297 77 33, Fax: +90.312.299 20 34
e-mail: kdirik@hacettepe.edu.tr

Eğitim Programındaki Konumu:
Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Eğitim-Öğretim Programının Zorunlu dersi

Kurs Tanımı:
Yapısal Jeolojinin tanımı ve esasları. Kinematik analizler (deformasyon süresince kayaçların konumlarında şekillerinde ve boyutlarındaki değişimlerin gelişimi). Dinamik analizler (deformasyona neden olan gerilimlerin değerlendirilmesi ve kayaçların davranışları ile deformasyon mekanizması), Deskriptif analizler (jeolojik haritalar, primer ve sekonder yapıların tanımı, çeşitli yapıları içeren jeolojik haritalar üzerinde değişik yöntemlerle yapıların analizi ve jeolojik kesit çizimi, Çatlak ve makaslama kırıkları, faylar, kıvrımlar, klivaj, foliasyon ve ilkeleri, plaka/levha kavramı, plaka sınırları ve özellikleri ve bu sınırlar boyunca gelişen jeolojik olaylar, hareket mekanizması

Dersin Amacı:
Öğrenciye yapısal jeolojideki adlandırmalar konusunda bilgi sahibi yapmak, jeolojik olaylar ve bunlarla ilişkili yapıları ve jeolojik haritaların yorumu konusunda gerekli teorik ve pratik bilgileri öğrenciye kazandırmak. Öğrencilerin 3 boyutlu düşünme kabiliyetini arttırmak.

Öğretim Dili : Türkçe

Öğretim Yöntemi:
Asetat ve slayt yardımıyla ders anlatımı. Uygulamada konu ile ilgili problemlerin çözümü ve öğrencinin pratiğini arttırmak için verilen ödevler.

Ön Koşul : Yok

Yardımcı Araçlar : Öğretim üyesince verilen ders notları, kaynak kitap listesi.

Sınav Metodu : Yazılı Sınav (toplam %10 luk ödev, %40'lik 2 ara sınav ve %50'lik final sınavı)

Derse Kayıt : Bilgisayar ortamında kayıt ofisince dönem başında kayıt

Açıklamalar : Bu ders Yerbilimleri ile ilişkili tüm öğrenciler için uygundur

Kısaltmalar:
GS: Güz Sömestrisi
BS: Bahar Sömestrisi
T: Teorik
P: Pratik

Sayfa No

I. GİRİŞ
I. 1. Terimler ve Tanımlar
I. 2. Yapısal Jeoloji ve Tektoniğin diğer yer bilimleri ile ilişkisi

II. GERİLME (STRESS)
II. 1. Gerilme tipleri
II. 1. 1. Çekme gerilmesi (tansiyon: tensile stress)
II. 1. 2. Basınç gerilmesi (kompresif gerilme: compressive stress)
II. 1. 3. Makaslama gerilmesi (shearing stress, shear)
II. 1. 4. Burulma gerilmesi (torsiyon: torsion)
II. 2. Bir noktadaki gerilme ve gerilme bileşenleri
II. 2. 1. Birincil gerilme eksenleri
II. 2. 2. Gerilme elipsoidi (strain elipsoid)
II. 2. 3. Gerilme alanı ve gerilme yolları (Strain field and strain trajectories)

III. DEFORMASYON (STRAIN)
III. 1. Homojen ve inhomojen deformasyon
III. 2. Deformasyonun ölçülmesi
III. 2. 1. Uzama (extension)
III. 2. 2. Makaslama deformasyonu (yamulması) (shear strain)
III. 3. Birincil deformasyon eksenleri ve deformasyon elipsoidi
III. 4. Saf makaslama (pure shear) ve basit makaslama (simple shear)

IV. KAYALARIN MEKANİK DAVRANIŞLARI
IV. 1. Kayaların davranış şekilleri
IV. 1.1. Elastik davranış ve elastik cisim
IV. 1.2. Plastik davranış ve plastik cisim
IV. 1.3. Viskoz davranış ve viskoz cisim
IV. 2. Cisimlerin davranışlarını kontrol eden faktörler
IV. 2. 1. Çevresel basınç (Confining Pressure) ve yükleme hızı
IV. 2. 2. Sıcaklık
IV. 2. 3. Solüsyonların etkisi
IV. 2. 4. Zaman
IV. 2. 5. Boşluk basıncı
IV. 2. 6. Anizotropi ve İnhomojenite

V. TEKTONİK OLMAYAN YAPI ŞEKİLLERİ
V. 1. Primer Yapılar (Primary structures)
V. 1. 1. Sedimanter Primer yapılar
V. 1. 2. Plutonik Primer yapılar
V. 1. 3. Tabakaların alt ve üst yüzeylerinin saptanması
V. 2. Uyumsuzluk
V. 2. 1. Diskonformiti
V. 2. 2. Açısal uyumsuzluk
V. 2. 3. Nonkonformiti

VI. KIVRIMLAR (FOLDS)
VI. 1. Tanım ve genel bilgiler
VI. 2. Kıvrımların Sınıflandırılması
VI.2.1. Kıvrım eksen düzleminin ve kıvrım kanatlarının konumuna göre
VI.2.2. Fleuty Sınıflandırması
VI.2.3. Şekle ve Yapıya göre sınıflandırma
VI.2.4. İzogonal Sınıflandırma
VI.2.5. Kıvrımların yatay ile olan ilişkilerine göre sınıflandırma
VI.3. Kıvrımların oluşum mekanizması
VI.3.1. Fleksür (Konsantrik) kıvrımlanma (Flexure folding)
VI.3.2. Kesme (Shear) kıvrımlanma (Shear folding)
VI.3.3. Akma kıvrımları (Flow folding)

VII. EKLEMLER (JOINTS)
VII.1. Tanım ve Eklemlerin önemi
VII.2. Eklemlerin Sınıflandırılması
VII.2.1. Tektonik kökenli eklemler
VII.2.2. Kökeni tektonik olmayan eklemler

VIII. FAYLAR (FAULTS)
VIII. 1. Tanım ve genel bilgiler
VIII. 2. Fayların arazide tanınma kriterleri
VIII. 2. 1. Tabakaların tekrarlanması veya kaybolması
VIII. 2. 2. Fasiyeslerin ani değişmeleri
VIII. 2. 3. Yapıların devamsızlığı
VIII. 2. 4. Sondajlarda ayrılma veya bindirme sahalarının saptanması
VIII. 2. 5. Fay düzlemi üzerindeki karakteristik yapılar
VIII. 2. 6. Fay breşi ve milonit oluşumu
VIII. 2. 7. Silisleşme ve mineralizasyon
VIII. 2. 8. Fay düzlemiyle temas halinde bulunan tabaka uçlarının kıvrılması
VIII. 2. 9. Sıcak, soğuk su kaynaklarının çizgisel sıralanışı
VIII. 2. 10. Çizgisel bitki anomalisi
VIII. 2. 11. Fizyografik kriterler
VIII. 3. Fayların Sınıflandırılması
VIII. 3.2. Geometrik Sınıflandırma (Atım yönlerine göre sınıflandırma)
VIII. 3.3. Tabakalara göre sınıflandırma
VIII. 3.4. Kıvrımlara göre sınıflandırma
VIII. 3.5. Mostra görünümlerine göre sınıflandırma
VIII. 4. Normal Faylar
VIII. 4. 1. Listrik faylar
VIII. 4. 2. Horst ve Grabenler
VIII. 5. Ters ve Bindirme Fayları
VIII. 6. Doğrultu Atımlı Faylar
VIII. 6.1. Doğrultu atımlı fay sistemlerinin geometrisi
VIII. 6.2. Doğrultu atımlı fayların dallanması ve örgülenmesi
VIII. 6.3. Çek-ayır (Pull-apart) havzalarının oluşumu
VIII. 6.4. Doğrultu atımlı fay zonlarında oluşan başlıca yapısal deformasyonlar

IX. KLİVAJ (KAYAÇ DİLİNİMİ) (CLEAVAGE)
IX. 1. Tanımlar
IX. 2. Klivajların Sınıflandırılması
IX. 2.1. Şisti klivaj veya şistozite
IX. 2.2. Kırılma klivajı (Fracture cleavage)
IX. 2.3. Kesme (makaslama) klivajı (Shear cleavage)
IX. 2.4. Buruşma klivajı (Crenulation cleavage)
IX. 2.5. Tabakalanma klivajı
IX. 2.6. Eksen-düzlemi klivajı (Axial-plane cleavage)

X. LİNEASYON (LINEATION)
X. 1. Tanımlar
X. 2. Lineasyonların Sınıflandırılması
X. 2.1. Uzamış çakıl ve fosillerin oluşturdukları lineasyon
X. 2.2. Mağmatik kayaçlarda birincil akış sırasında oluşan lineasyon
X. 2.3. Mineral büyümesi nedeniyle oluşan lineasyon
X. 2.4. Bir eksen etrafında bükülme suretiyle oluşan lineasyon
X. 2.5. Kayma nedeniyle oluşan lineasyon
X. 2.6. Düzlemsel yapıların kesişmesi ile oluşan lineasyon

KAYNAK VE YARDIMCI KİTAPLAR

Badgley,P.C., 1965, “Structural and Tectonic Principles”, Harper & Row, and John Weatherhill Inc.

Billings, M.P., 1972, “Structural Geology”, Prentice Hall.

Davis, G.H., 1984, “Structural Geology of Rocks and Regions”, Wiley.

Hamblin, W.K. and Howard, J.D., 1982, “Exercises in Physical Geology”, BurgessPublishing.

Hatcher, R.D., 1995, “Structural Geology”, Prentice Hall.

Ketin, İ. ve Canıtez N., 1972, “Yapısal Jeoloji”, İTÜ yayını, sayı: 869.

Marshak, S. and Mitra, G., 1998. “Basic Methods of Structural Geology”. Prentice Hall.

Price. N.J. and Cosgrove, J.W, 1991, “Analysis of Geological Structures”, Cambridge.

Ragan, D.M., 1985. “Structural Geology: An Introduction to Geometrical Techniques”, John Wiley & Sons.

Ramsay, J.G., 1967, “Folding and Fracturing of Rocks”, McGraw Hill.

I. GİRİŞ

I.1. Terimler ve Tanımlar

Yapısal Jeoloji: Değişik türde fay, kıvrım, sil, dayk gibi jeolojik yapıların etkin olduğu dünya kabuğu'nun yapısını inceler, küçük ölçekli yapıların orijini, oluşumu, sınıflandırılması, yayılımı ve birbirleriyle olan ilişkilerle ilgilenir.

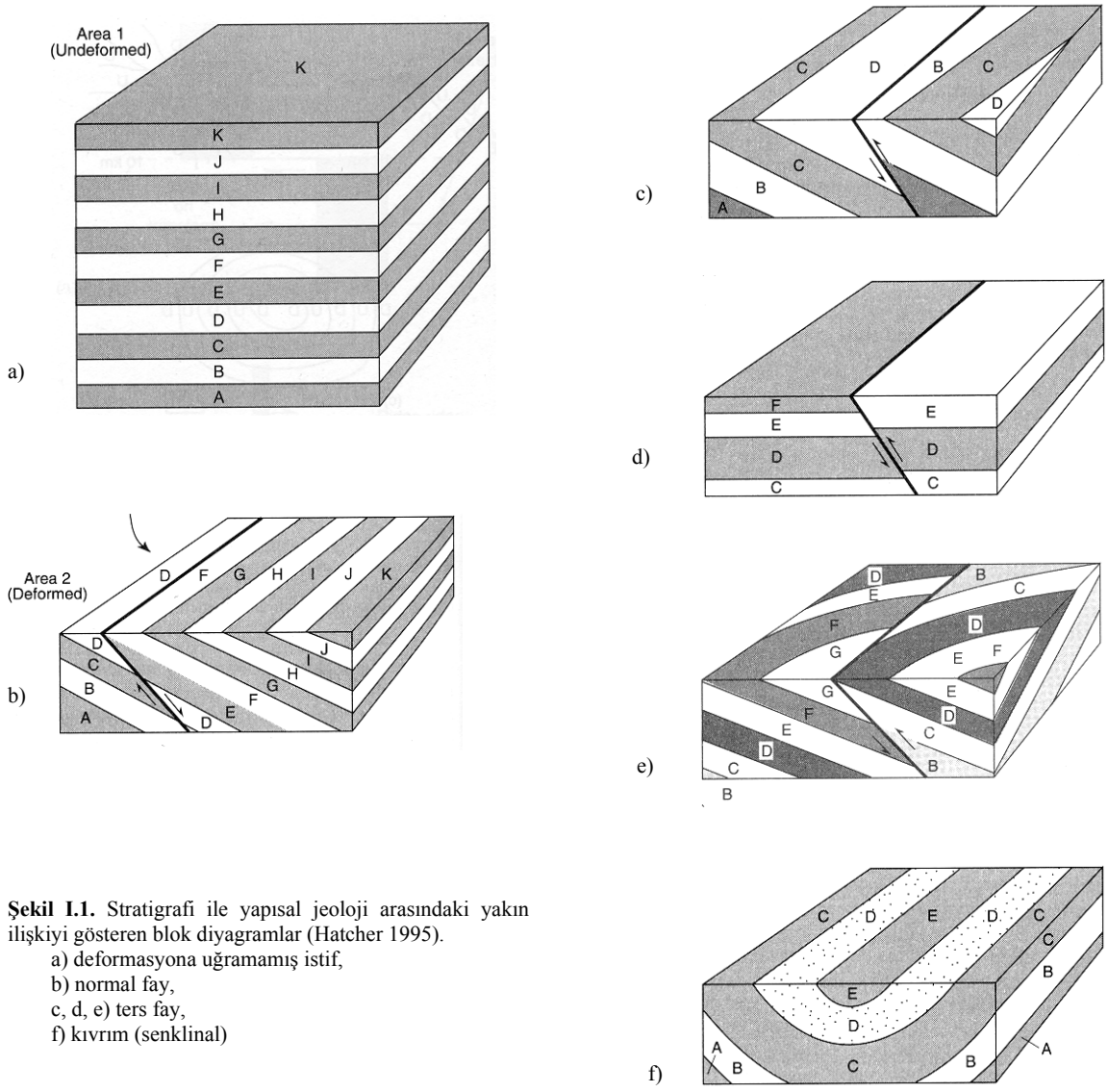
Tektonik ise dünya çapındaki yapılarla ilgilenen bir bilim dalıdır.

Mikro-tektonik mikroskopik ölçekteki tanelerin yapı ve deformasyonunu inceler. **Yapısal petroloji** veya **petrofabrik** (doku analizi) de denir.

I.2. Yapısal jeoloji ve tektoniğin diğer yer bilimleri ile ilişkisi

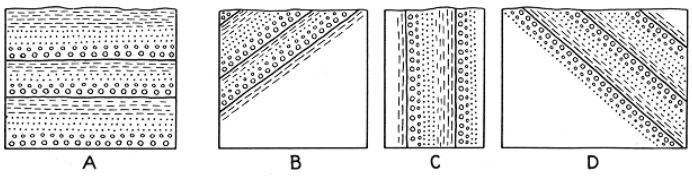
Yapısal jeolojinin **stratigrafi, sedimantoloji, petroloji, jeomorfoloji, ekonomik jeoloji, jeofizik** gibi diğer yerbilimleri ile ilişkisi vardır.

Stratigrafi: jeolojik olayların sırası-düzeni ve dizilimi ile ilgilenir. Bir bölgenin stratigrafisi hakkında yeterli bilgi toplanmadan o bölgenin yapısal jeolojisi-tektoniği hakkında bir sentez yapılamaz (Şekil I.1). Jeolojik problemler çözülürken her iki araştırmanın da beraber yapılması gerekir.

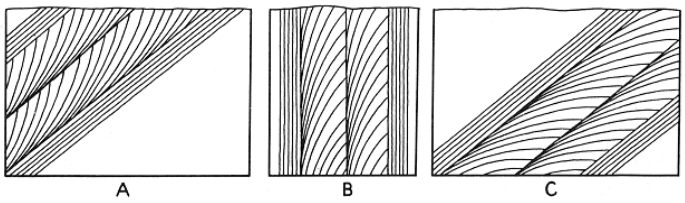


Şekil I.1. Stratigrafi ile yapısal jeoloji arasındaki yakın ilişkiyi gösteren blok diyagramlar (Hatcher 1995).
a) deformasyona uğramamış istif,
b) normal fay,
c, d, e) ters fay,
f) kıvrım (senklinal)

Sedimantoloji: Sedimantasyon ve tortul kayaçları inceler, havzaların dolması ve onun tektonik gelişmesi hakkında bize doğru bilgiler verir. Sedimanter yapılar bize tabakaların alt ve üstünü tanımamıza yardımcı olur (Şekil I.2, 3).



Şekil I.2. A) Dereceli tabaka, B) Eğimli tabaka, C) Dik tabaka, D) Devrik tabaka (Billings 1972)



Şekil I.3. A) Eğimli çapraz tabaka, B) Dik tabaka, C) Devrik tabaka (Billings 1972)

Yapısal jeolojinin **Ekonomik jeoloji** ile de yakın ilişkisi vardır. Bir kömür damarının veya ona benzer diğer tortul maden yataklarının dağılımı ve o bölgenin tektonik durumu ile ilgilidir.

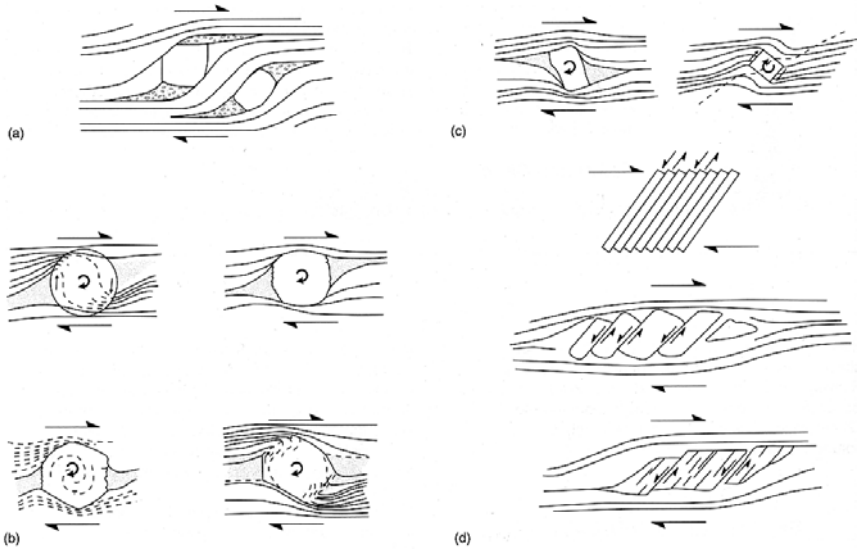
Petrol jeolojisinde yapıya bağımlılık daha fazladır.

Magmatik maden yataklarının oluşumu orojenik hareketlere bağlıdır.

Mineralizasyon kayaları etkileyen gerilme sonucu oluşan çatlak zonlarında görülür.

Sismoloji ve Jeofizik sayesinde dünyanın derinliklerindeki yapıları, deprem hatlarını tespit etmek mümkündür.

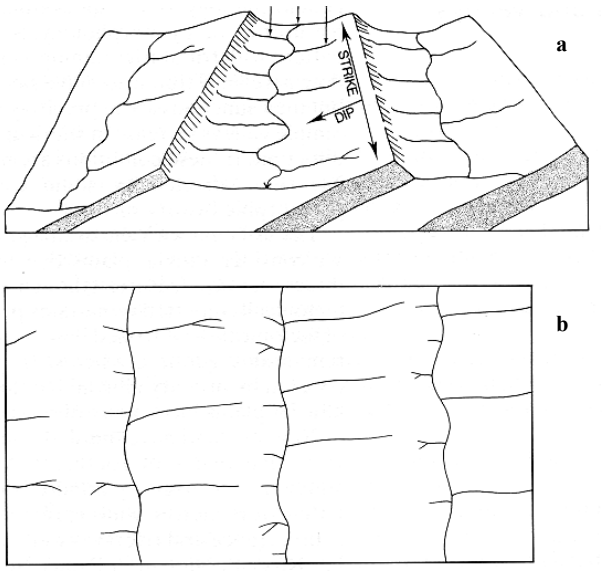
Yapısal jeoloji ile **petroloji** arasında sıkı bir ilişki vardır. Bir kayacın yapı ve dokusu belirli bir gerilme etkisi altında kayacın maruz kaldığı deformasyonun cinsini ve şeklini açıklayabilmektedir. Petrofabrik analiz asal gerilme yönlerinin tayinine imkan verir (Şekil I.4).



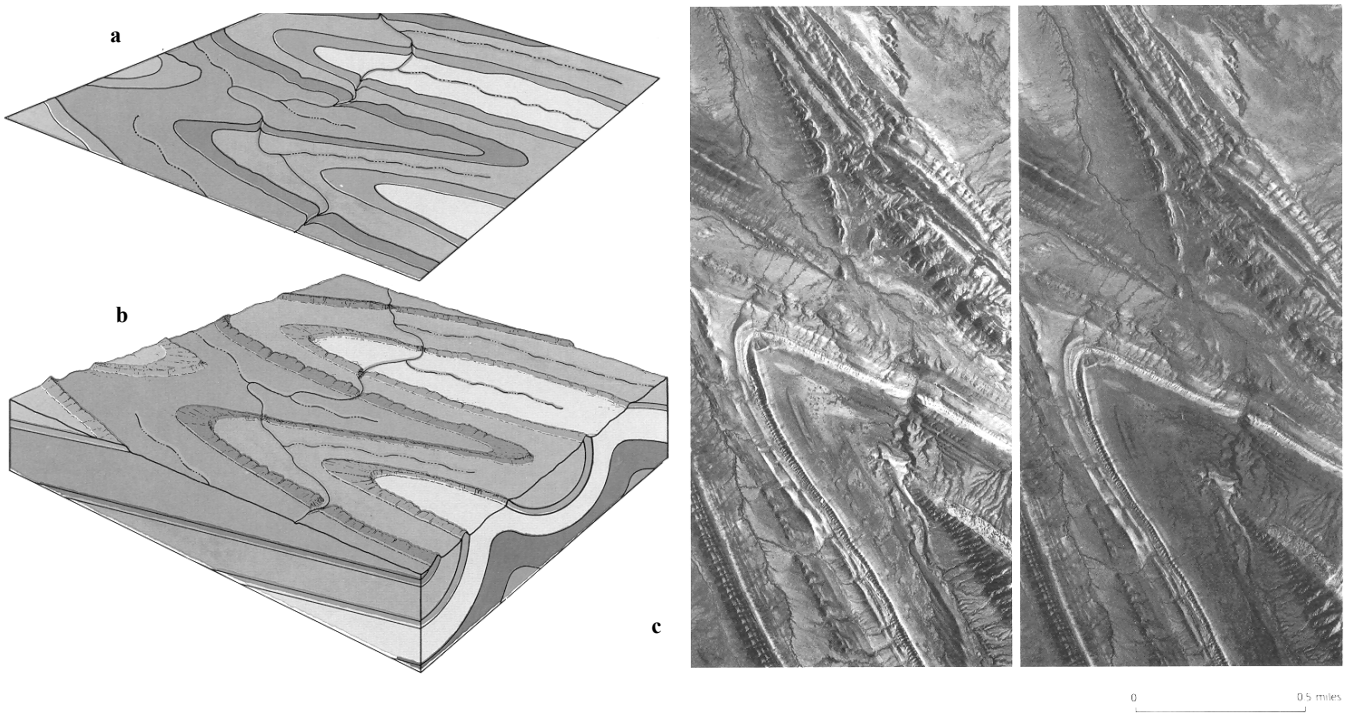
Şekil I.4. Makaslamayla gelişmiş ve makaslama yönünün (sense of shear) saptanmasında kullanılan yapılar (Hatcher 1995).

Jeomorfoloji: Yeryüzü şekillerini ve onları etkileyen olayları-faktörleri inceler. Genel olarak jeolojik yapı ile yüzey şekilleri birbiriyle ilişkilidir.

Hava fotoğrafları yardımıyla yeryüzü şekilleri ve birçok jeolojik yapı kolaylıkla tespit edilebilir.



Şekil. I.5. Aşınmaya dayanımlı ve dayanımsız birim ardalanmasından oluşan ve orta dereceli eğimli tabakaların oluşturduğu tipik yüzey şekli (a) ve aynı bölgenin drenaj haritası (b)



Şekil I.6. Dalımlı kıvrımların harita (a), blok diyagram (b) ve hava fotoğrafı üzerindeki (c) görünümü (Hamblin and Howard 1986)

Yapısal Jeoloji çalışmalarında, yapısal jeologlar çalışmalarını detay **yapısal analizlere** yoğunlaştırırlar. Bu yapısal analizler şunlardır;

a) Deskriptif (tanımlayıcı) analizler, b) Kinematik (hareket) analizler, c) Dinamik analizler.

a. Deskriptif analizler: Bu analizlerle yapıların tarifi, konumlarının ölçümü, yapıların fiziksel ve geometrik bileşenlerini tanımlar, ortografik ve stereografik izdüşüm metodlarını kullanarak değişik problemleri çözeriz. Deskriptif analizlerin uygulama alanı çok geniş olup bu analizlerle ilgili çalışmalar, direkt arazi gözlemleri şeklinde ve laboratuarlarda deneysel kayaç deformasyonu çalışmaları ile arazide gözlenen yapıların ilişkisinin incelenmesiyle, değişik jeolojik yöntemlerle (yeraltı çalışmaları) yapıların incelenmesi çalışmalarıdır. Bu çalışmaların en önemlileri:

- ✓ Kayaç veya yapıların jeolojik haritalanması
- ✓ İnce kesit çalışmalarıyla deforme olmuş kayacın mineral oryantasyonlarının incelenmesi
- ✓ Uydu görüntüleri üzerinde kırıklı yapı şekillerinin fotojeolojik özelliklerinin incelenmesi ve bu çalışmaların sonuçlarının yorumlanmasıdır.

b. Kinematik analizler: Detaylı deskriptif analizlerle elde edilmiş olan verilere bağlıdır. Kinematik analizlerin amacı/hedefi kayaç kütlelerinin yerini, konumunu, boyut ve şeklini değiştiren translasyon, rotasyon, dilatasyon ve distorsiyon hareketlerinin yorumunu yapmaktır. Translasyon ve rotasyon hareketlerinde kayaç kütlelerinin boyut veya şeklinde değişme olmaksızın, kayaç kütlesinin konumunda ve/veya yerinde değişme olur. Bununla birlikte, bir kayaç kütlesi translasyon (yer değiştirme) ve/veya rotasyon (dönme) hareketi esnasında hacim (dilatasyon) ve/veya şekil (distorsiyon) değişikliğe uğrayabilir. Dilatasyon ve distorsiyondan dolayı kütledeki değişikliklerin değerlendirilmesi strain analizlerinin temelidir.

Strain analizleri modern yapısal jeolojinin temelidir. Strain analizleri deformasyon esnasından değişmiş jeolojik madde veya jeolojik kütlenin boyut ve şeklinin orijinal değerleriyle sayısal olarak değerlendirilmesini gerektirir. Deformasyonu değerlendirmek gerilme analizleriyle ilişkilidir.

c. Dinamik analizler: jeolojik yapıların oluşumunda rol oynayan kuvvet, stres ve mekanik süreçleri yorumlar. Dinamik analizlerin inandırıcı, doğru sonuçlar olabilmesi için yapıların kinematik hareket şekilleri ve fiziksel ve geometrik karakteristik özelliklerinin açıklanması gereklidir. Bu analizlerin en büyük yararı deformasyonlara neden olan streslerin bağıl büyüklüklerinin (değerlerinin) ve gerçek konumlarının tanımlanmasıdır.

Jeoloji ve mühendislik jeolojisi literatürü yapıların kökenlerinin, oluşumlarının yorumlanmasına yardımcı olan dinamik modellemelerden bahseder. Dinamik analizlerin temeli teorik ve deneysel araştırmalara dayanır. Dinamik modellerin çoğu ilke olarak geçerlidir fakat çoğu yapısal sistemler bir tek dinamik modelden daha çok modelle tatmin edici bir şekilde açıklanabilmelidir.

Yemek tariflerinde olduğu gibi yapılar ve yapısal sistemlerin gelişimi için dinamik modeller düşünülmelidir. Yemek tariflerinin pek çoğu teorik tariflerin uygulanması ve tariflerin denenmesi sonucunda garantili ürünler/sonuçlar ortaya koyar. Bu nedenle, yaklaşık 2 milyar yıl önce oluşmuş yapısal sistemler için deformasyon şartlarının yorumlanması çok güçtür.

Dinamik modellemelerde, düzenlenmiş sıcaklık, kuşatılmış basınç, deformasyon hızı ve sıvı basıncı koşulları altında kayaçların küçük bir silindirik karotları üzerinde uygulanan deneysel deformasyonlar yapılır.

Büyük jeolojik yapıların her birinin dinamik analizleri farklı yapılır. Faylar ve fay şekilleri yalnızca gerçek kayaçlar kullanılarak değil, kil gibi yumuşak malzeme kullanılarak da deneysel olarak incelenir. Faylar bilinen stres ve/veya hareket koşullarının ışığı altında yorumlanabilir.

II. GERİLME (STRESS)

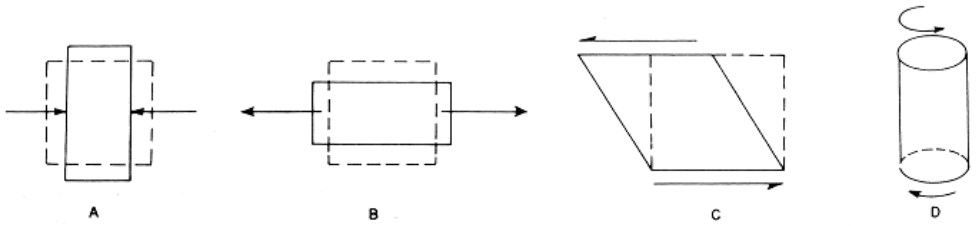
Dış kuvvetlerin etkisi altında denge halinde bulunan bir katı cismin içinde, bu kuvvetlere karşı iç kuvvetler meydana gelir. Cismin bir kesitindeki kuvvetlerin sonsuz küçük bir yüzey parçasına oranı bir limit değere yaklaşır. Bu limit değere cismin ele alınan noktasındaki **GERİLME** si adı verilir.

Diğer bir deyişle, kafi derecede küçük bir yüzey parçası için, birim yüzeye isabet eden kuvvete **GERİLME** denir.

Bir cismin belirli bir kesitindeki gerilme, bir kesite dik (normal), diğeri paralel (teğetsel) olmak üzere iki bileşene ayrılarak incelenebilir.

II.1. Gerilme Tipleri

Dört çeşit gerilme tipi olup bunlar: 1) Basınç gerilmesi (compressive stress), 2) Çekme gerilmesi (tensile stress), 3) Kuvvet-çifti (couple) ve 4) Burulmadır (torsion) (Şekil II.1).



Şekil II.1. Dört tip gerilme tipi. A) basınç gerilmesi, B) çekme gerilmesi, C) Kuvvet-çifti, D) Burulma

II.1.1. Basınç Gerilmesi (Compressive stress)

Bir cisme uygulanan içe yönelmiş gerilmelere **basınç gerilmesi** adı verilir. Bu tür gerilmenin cisimde meydana getirdiği değişiklikler:

- Boyu uzar, eni kısalır
- Kalınlaşır
- Hacimde küçülme meydana gelir
- Yükselir

II.1.2. Çekme Gerilmesi (Tensile Stress)

Bir cisme uygulanan, dışa yönelmiş gerilmelere **çekme gerilmesi** adı verilir. Bu tür gerilmenin cisimde meydana getirdiği değişiklikler:

- Boyu kısalır, eni uzar
- İncelir
- Hacimde bir genişleme meydana gelir
- Çöker

II.1.3. Kuvvet Çifti (Couple-shear)

Birbirine zıt yönlü iki kuvvete **kuvvet çifti** adı verilir. Bu kuvvet çiftinin uygulanması ile cisimde:

- Şekil değişikliği meydana gelir
- Hacminde ve iki boyutlu halde yüzölçümünde bir değişiklik olmaz

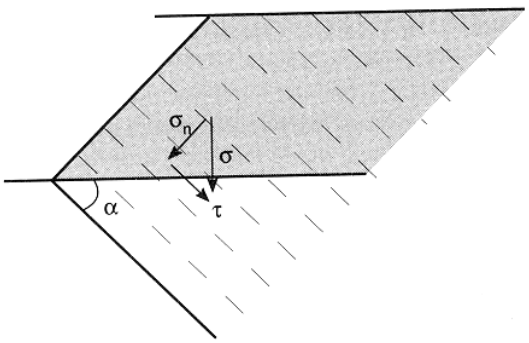
II.1.4. Burulma (Torsion)

Bir cismin farklı iki noktasına, cisme zıt yönde dönmeler meydana getirecek türden kuvvetlerin uygulanması halinde cismin kazandığı şekil değiştirmeye **burulma** adı verilir.

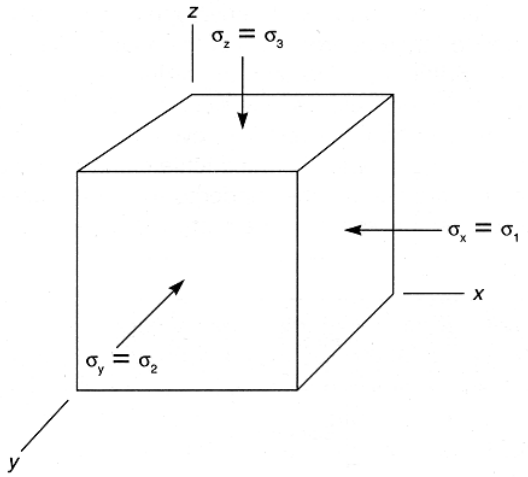
II. 2. Bir Noktadaki Gerilme ve Gerilme Bileşenleri

Bir nokta üzerindeki gerilmelerin durumunu irdelemek için, bu kuvvetlerin sonsuz küçük bir küpün merkezine etki yapıyormus gibi düşünürüz. Bu küp çok küçük olduğu için uygulanan kuvvetin her yüzeye eşit miktarda etki yapmakta olduğunu varsayarız.

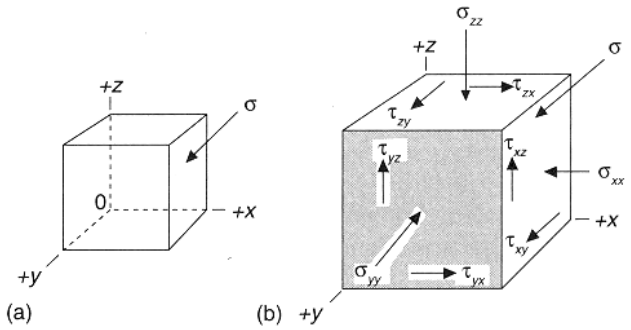
Gerilmenin tanımına göre X,Y ve Z- eksenlerindeki makaslama gerilmelerinin de dengede olması gerekir. Aksi takdirde cismimiz rotasyonal bir hareket yapacaktır. Şekil II.4.b yi incelediğimiz zaman makaslama gerilmelerinin ikişer ikişer eşleştiklerini görürüz. Bunlar eşit büyüklükte ters işaretli gerilmelerdir. Bu yüzden cisim üzerindeki gerilme durumunu çıkarabilmek için 3 normal ve 3 makaslama gerilmesini bilmemiz yeterli olacaktır.



Şekil II.2.



Şekil II.3.



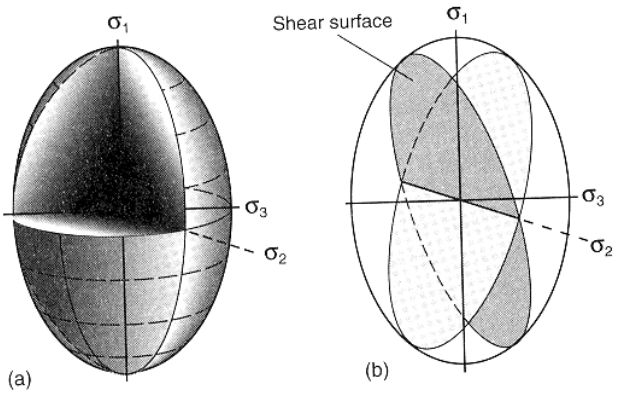
Şekil II.4.

a. Birincil Gerilme Eksenleri

Yapısal Jeoloji konuları içerisinde gelişigüzel X,Y,Z eksenleri seçmek yerine makaslama gerilmelerinin etkilerinin 0 olduğu a, b, c gibi jeolojik yapıya (Z ekseninin yerçekimi doğrultusunda, X ve Y ekseninin de yatay düzlemde bulunmasının gerekmediği) uygun eksenler seçmek yerinde olur. Makaslamaların olmadığı birbirine dik üç düzlem üzerindeki 3 adet normal gerilmeyi **σ_1, σ_2, σ_3**, harfleri ile gösteririz.

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$$

σ_1 en büyük asal gerilmeyi temsil eder. Bu üç gerilmeyi birbirine dik şekilde yönlendirdiğimiz zaman ortaya çıkan kapalı şekle **gerilme elipsoidi** adını veririz (Şekil II.5).



Şekil II.5. Gerilme elipsoyidi

Doğada kaya kütleleri üzerine uygulanan gerilmeler üç boyutta eşitsiz bir durum sergilerler. Bir kaya kütlesinin bir doğrultu yönünde basınca uğraması, bu doğrultuya dik bir düzlem üzerinde yine iki doğrultuda çekme gerilmelerinin ortaya çıkmasına yol açar.

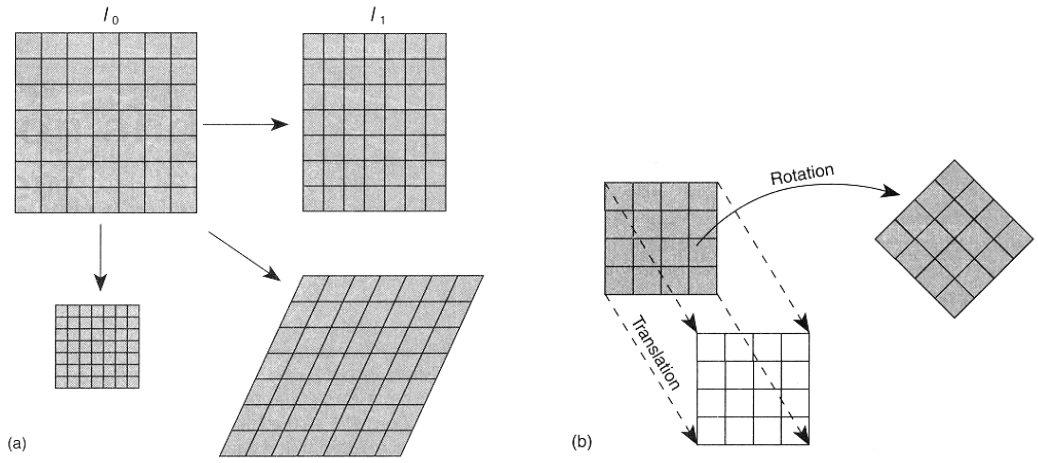
Yapısal jeoloji çalışmalarında basınç gerilmesi pozitif olarak, çekme gerilmesi negatif olarak ele alınır.

b. Gerilme Alanı ve Gerilme Yolları (Stress field and stress trajectories)

Gerilmeler kaya kütlelerinin bütünü üzerinde etkili olurlar. Bu gerilmelerin tesir gösterdiği alana **gerilme alanı** denir. Bu alan içerisinde gelişen gerilmelerin nümerik olarak eşdeğerli olanları çizgilerle birleştirilerek **eş gerilme yolları** elde edilir. Eş gerilme çizgilerinin biribirlerini kestiği noktalara **düğüm noktaları** denir. Bu noktalarda gerilme elipsoidinin özelliğine uygun olarak gerilme çizgileri birbirine dik olarak düzenlenir. Gerilmelerin bir kütle içerisinde tatbik noktasından uzaklaştıkça azalacağı dikkate alındığında gerilme çizgileri kütle içerisinde aşağı doğru eğimlenecek şekilde seyrederler. Bir sahada fayların, kıvrım eksenlerinin ve daykların yönelimleri dikkate alınmak suretiyle kompresyon ve genişleme yönleri saptanarak o noktalarda gerilme elipsoidinin durumu belirlenebilir. Daha sonra bu noktaların birbirleriyle çizgilerle birleştirilmesiyle kütle içerisindeki eş gerilme çizgileri ortaya çıkabilir. Günümüzde bu çalışmalar özellikle neotektonik (güncel tektonik) amaçlı olarak, levhaların hangi bölgelerinin ne tür gerilme rejimleri altında bulunduğunu anlamak için yapılmaktadır. Bu çalışmaların ana amacı sismotektonik analizler olmaktadır. Yine bugün bu tür çalışmaları matematiksel hale sokmuş olan büyük projeler dünya ölçüsünde yürütülmektedir. Örneğin GPS (Global Positioning System) projesi ile uydulardan yer istasyonlarının konumlarını zamana karşı saptamak suretiyle küçük levha parçacıklarının veya yerkabuğu kompartmanlarının birbirlerine göre oransal hareketleri ölçülebilmekte, kayma hızları hesaplanabilmektedir. Bu şekilde sıkışan bölgelerde potansiyel enerji birikimi ile salınmasındaki periyodisite gibi konuların çalışılması deprem risk analizlerine imkan verebileceği gibi, jeolojik olayların mekanizmalarının iyi anlaşılmasına da yol açmaktadır. Bu da geçmiş jeolojik olayların yorumlanmasında kullanılacak düşünce yollarını belirlemektedir.

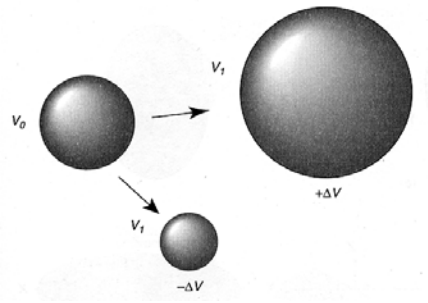
III. DEFORMASYON (STRAIN)

Deformasyon, gerilmelerin neden olduğu sonuç etkidir. Deformasyon translasyon (yerdeğiştirme), rotasyon (dönme), dilatasyon (hacım değişikliği) ve/veya distorsiyon (şekil-biçim değişikliği) şeklinde olabilir (Şekil III.1). Bir kütledeki deformasyon hem dilatasyon hem de distorsiyonun kombinasyonu şeklinde olabilir.

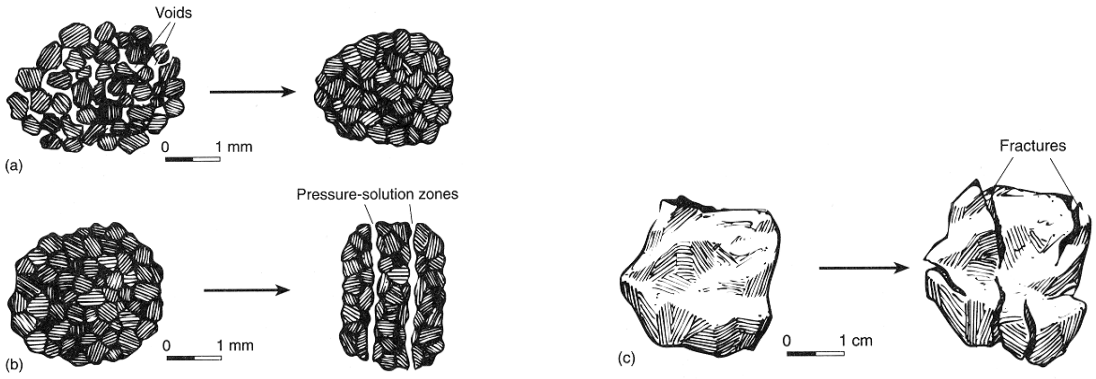


Şekil III.1. Şekil değiştirme (a), yer değiştirme ve rotasyon (b) şeklinde görülen deformasyonlar

İzotropik bir kütlede, kütle üzerindeki kuşatılmış basınçta meydana gelecek değişiklikler dilatasyon şeklinde deformasyonlara yol açar. Kuşatılmış basınçta artma olursa cismin boyutları küçülerek hacmi azalır (**negatif dilatasyon**). Basıncın azalması halinde ise **pozitif dilatasyon** gelişecektir (Şekil III.2, 3).

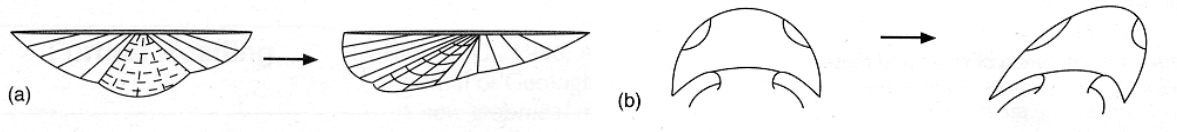


Şekil III.2. Basınçta meydana gelen değişikliklerin yol açtığı hacim değişiklikleri (dilatasyon)



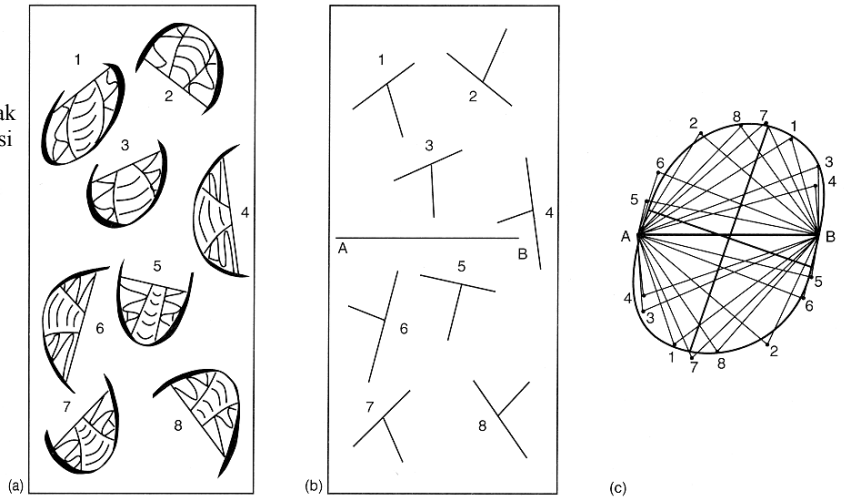
Şekil III.3. Taneler arasındaki boşluğun azalması veya kapanması (a), basınç solüsyonlarının oluşması (b) ve kırıkların oluşması ile meydana gaelen hacim değişiklikleri

Cismimiz şayet yönlenmiş kuvvetlerin etkisi altında kalırsa **distorsiyon** şeklinde deformasyon gelişir (Şekil III.4). Cisimlerde meydana gelecek bu şekil değişikliği yükün miktarına, elastik parametrelere ve cismin şekline bağlıdır. Bütün jeolojik yapılar belirli türdeki bir gerilme rejimi ve bunun neden olduğu deformasyonla gelişirler. Doğadaki bu yapıları inceleyerek gerilmelerin analizini yapabildiğimiz gibi, deformasyon sırasında hangi aşamaların geçirilmiş olduğunu da yorumlayabiliriz. Yapısal jeolojide bu analizleri yapmak için ele alınan jeolojik unsurlar: kıvrımlar, faylar, tektono-sedimanter kökenli yapılar, olistolit, olistostromlar, melanj kamaları, yığışım pirizmaları, çatlaklar, başta dayklar olmak üzere her tür mağmatik sokulumlar, çizgisel yapılar ve bir katman içindeki deformasyonun kendilerine yansıyarak onları yönlendirdiği, yönlenmiş veya kırıklanmış fosiller, uzamış çakıllar, deforme olmuş oolitler dir. Bunların yönelimleri ve kütle içersindeki konumları bize makro veya mikro ölçekte yapısal-tektonik analizler yapma imkanı verir (Şekil III.5).



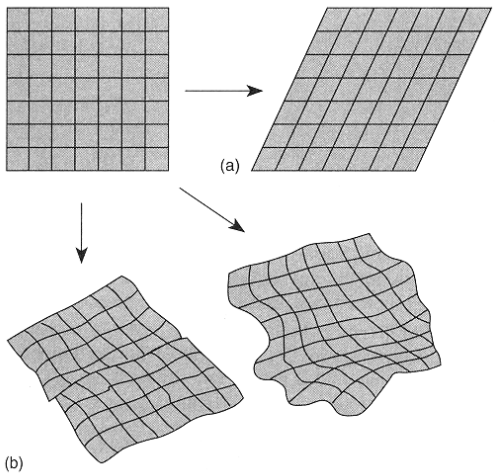
Şekil III.4. Deformasyon neticesinde Brachiopod (a) ve Trilobit cephalonda (b) oluşan şekil değişikliği (Hatcher 1995)

Şekil III.5. Trilobitlerin kullanılarak deformasyonun (strain) belirlenmesi (Hatcher 1995)



III. 1. Homojen ve inhomojen deformasyon

Homojen deformasyon, deformasyon miktarının kütlenin her tarafında aynı olma halidir. Bir jeolojik kütle içinde deformasyonun homojen karakterde gelişmiş olduğunu o kütle içinde ele alacağımız bir takım düşünsel çizgilerin paralelliklerini korumuş olduğunu gözlemekle ortaya çıkartabiliriz. Tersine olarak **inhomojen deformasyonda** bu paralelliğin kaybolduğunu görürüz (Şekil III.6).



Şekil III.6. Homojen (a), inhomojen (b) deformasyon(Hatcher 1995)

III. 2. Deformasyonun ölçülmesi

Deformasyon iki şekilde ölçülebilir. Birincisinde mostralar üzerinde gözleyeceğimiz bir çizginin boyundaki değişme incelenir. Diğer yöntemde ise daha önce miktarını bildiğimiz iki çizgi arasında kalan açının değişimi incelenir. Deformasyon her iki değişimin bir kombinasyonu şeklinde de olabilir.

III.2.1. Lineer deformasyon (Linear strain)

a. Uzama (elongation)

$e = \ell - \ell_o / \ell_o$ $\quad \ell$ = uzamadan sonraki boy

ℓ_o = orijinal boy

$e > 0$ ise uzama (elongasyon)

$e < 0$ ise kısalma (shortening)

Uzunluğunda değişim meydana gelmiş bir jeolojik unsurun orijinal boyunun bilinmemesi güçlük yaratır. Bu nedenle uygun jeolojik unsurların (özellikle fosillerin) sahip oldukları bir takım oranların incelenmesi daha uygulanabilir bir yöntemdir. Örneğin bir fosilin en ve boyu arasındaki orandaki değişimin incelenmesi bize fosilin ve içinde bulunduğu jeolojik kütlenin uzama veya kısalma miktarını ve yönelimi hakkında fikir verebilir.

b. Kuadratik elangasyon

Çizgilerin uzunluklarındaki değişme için diğer bir açıklama da kuadratik elangasyondur (quadratic elongation). Bu λ ile gösterilir ve;

$\lambda = (\ell / \ell_o)^2 = (1+e)^2$ şeklinde ifade edilir.

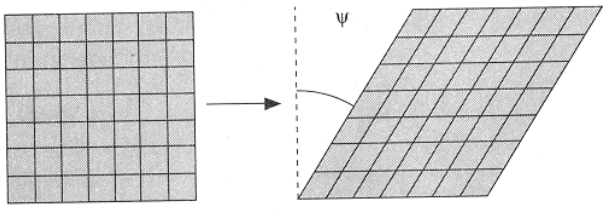
Burada e ve λ boyutsuz kantitelerdir ki, deformasyonun değişik doğrultularda ölçülmesiyle elde edilirler.

III.2.2. Makaslama deformasyonu (shear strain)

Birbirine paralel, ancak zıt yönde ve değişik değerlerdeki kuvvetleri nedeniyle oluşan deformasyon (Şekil III. 7). γ ile gösterilir ve;

$\gamma = \tan \Psi$ şeklinde ifade edilir.

Ψ : rotasyon açısı

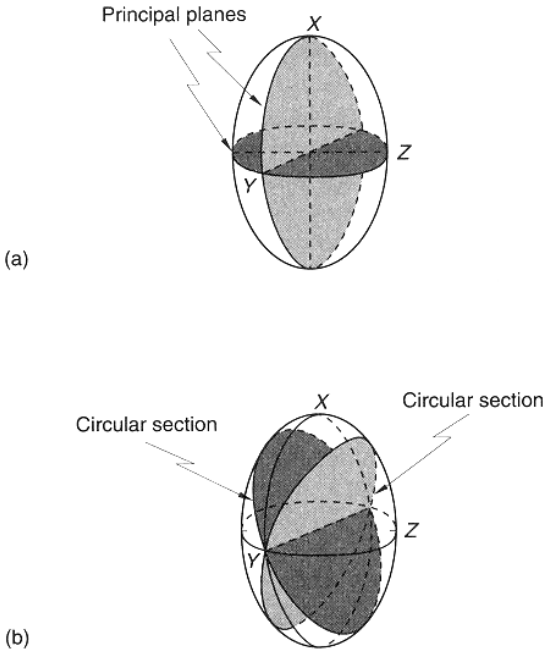


Şekil III. 7. Makaslama deformasyonu (Hatcher 1995)

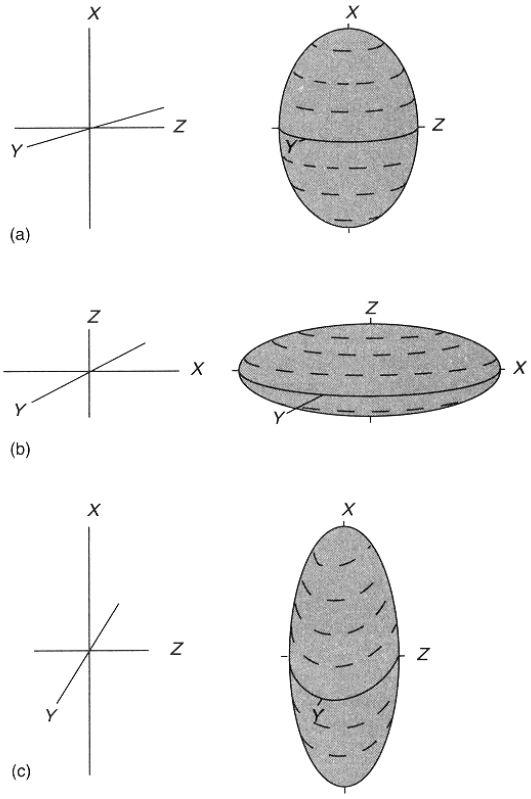
III. 3. Birincil deformasyon eksenleri ve deformasyon elipsoidi

Deformasyonun tanımlanması ve irdelenmesi için en uygun yol, birbirine dik ana deformasyon eksenlerini seçmektir. Bunlar karşılıklı olarak en büyük, orta ve en küçük uzama doğrultularına paraleldir. Görüldüğü gibi deformasyonda jeolojik unsurların boylarındaki uzama pozitif olarak kabul edilmektedir. Bu yüzden gerilme ve deformasyon elipsoidlerinin konumları birbirine diktir. En büyük deformasyona paralel en küçük gerilme yönlenir. Gerilme elipsoidinkine benzer şekilde burada da açısal deformasyonu ekarte edebilmek için bir x, y, z uzay koordinat sistemi yerine pozisyonunu kendimizin ayarlayacağı a, b, c gibi açısal makaslamaların görülmediği eksenler seçeriz. Bu eksenlerin oluşturduğu kapalı şekle **deformasyon elipsoidi** adını veriyoruz (Şekil III.8, 9).

Çok genel olarak yeryuvarının kompresif rejim egemenliğindeki bölgelerinde deformasyon eksenlerinin en büyüğü yer yüzüne dik konumdadır. Bu bize, burada uzamanın düşey doğrultuda geliştiğini ve kabuğun kalınlaştığını ifade eder (kıvrımlı dağ sıralarının meydana gelmesi). Tersine olarak genişlemeli bölgelerde en büyük deformasyon ekseni yere paralel durumdadır. Kabuğun bu şekilde yanlara çekilerek uzaması kabuğun incelmesini sonuçlar. Bu da beraberinde, örneğin jeotermal gradyanın yükselmesi, giderek volkanik etkinliğin oluşumu, kabuğun o kısmının çökmesi (riftleşmesi), denizin bu kısımları kaplaması (transgresyon) gibi jeolojik olayları gündeme getirebilir.



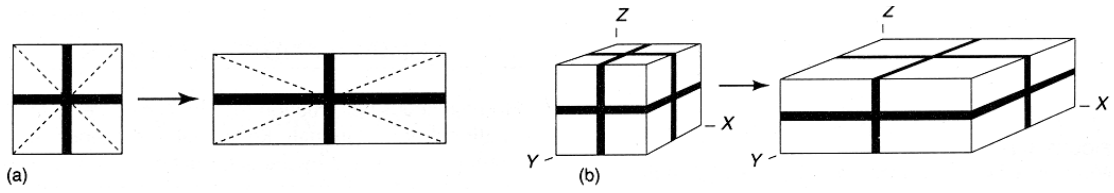
Şekil III.8.



Şekil III.9.

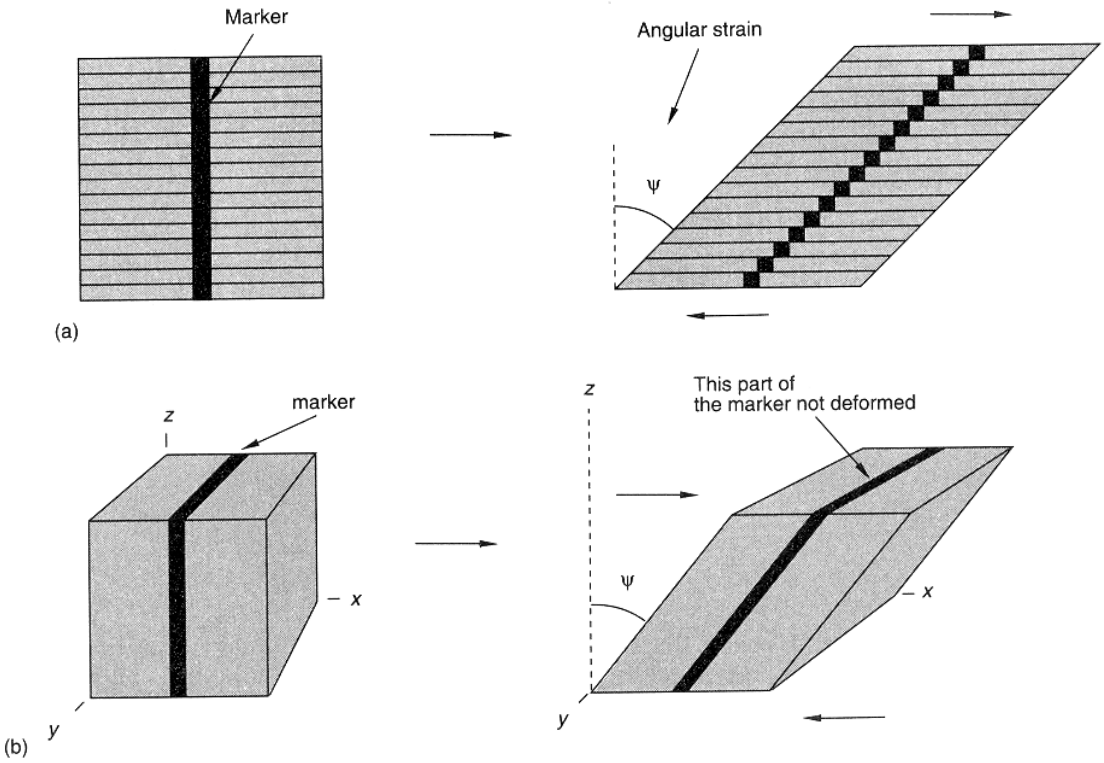
III.4. Saf makaslama (pure shear) ve basit makaslama (simple shear)

Bir jeolojik kütledeki deformasyon sırasında bir yamulma ölçütü (strain marker) kullanmak suretiyle x, y, z eksenlerinin konumlarının değişmediğini anlayabilirsek bu durumda kütlede dönmesiz bir deformasyon meydana geldiğini, bir açısal bozunma olmaksızın çizgilerin yalnızca boyutlarında değişiklikler meydana gelerek biçim bozulmasının oluştuğunu anlayabiliriz. Böyle bir deformasyona **saf makaslama deformasyonu** denir (Şekil III.10).



Şekil III.10. Saf makaslama a) kesit, b) blok diyagram (Hatcher 1995)

Tersine olarak eksenlerin konumları değişirse, yani bir açısal makaslama deformasyonu söz konusu olursa, bu durumda meydana gelen deformasyona da **basit makaslama** adı verilir (Şekil III. 11).



Şekil III.11. Basit makaslama a) kesit, b) blok diyagram (Hatcher 1995).

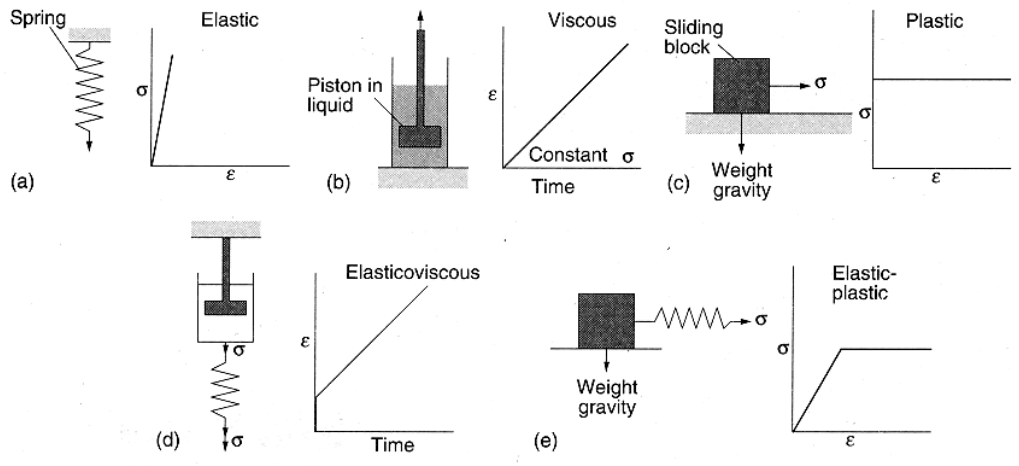
IV. KAYALARIN MEKANİK DAVRANIŞLARI

IV.1 Kayaların davranış şekilleri

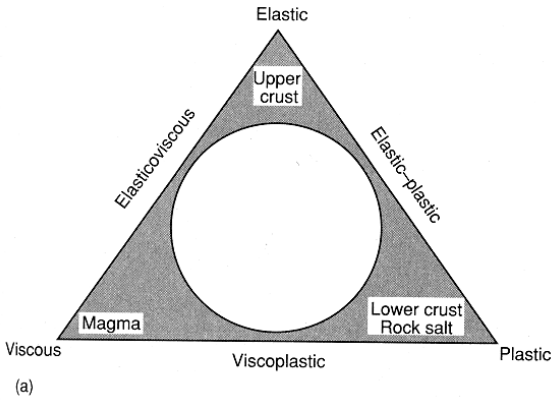
Yeryüzünde gözleyebildiğimiz jeolojik kayalara bakacak olursak, bunların bir kısmının çatlayıp, kırılıp yarılmasına karşılık, diğer bir kısmının kıvrılıp büküldüğünü görürüz.

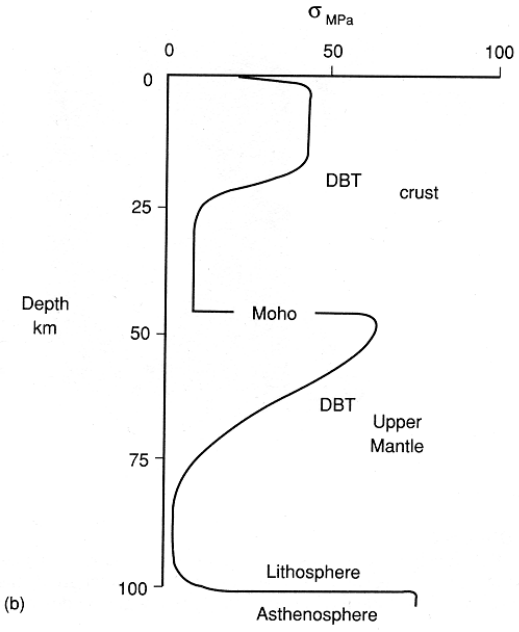
Aynı kaya cinsinde hem kıvrılma hem de kırılma görebildiğimize göre, bu değişik yapı tipleri farklı koşullar altında oluşmuş olmalıdır.

Değişik gerilme ve sıcaklık koşulları altında cisimlerin davranışları üç ana gruba ayrılır: (1) Elastik davranış (elastic behaviour), (2) Plastik davranış (plastic behaviour), (3) Viskoz davranış (viscous behaviour). Bu ana gruplar arasında "elasto-plastik" (elastico-plastic), "plastiko-viskoz" (plastico-viscous) olarak isimlendirilen geçiş bölgeleri de vardır (Şekil IV. 1.).



Şekil IV.1. İdeal mekanik modeller ve değişik karakterdeki mekanik davranışların gerilme-deformasyon grafikleri (Hatcher 1995)





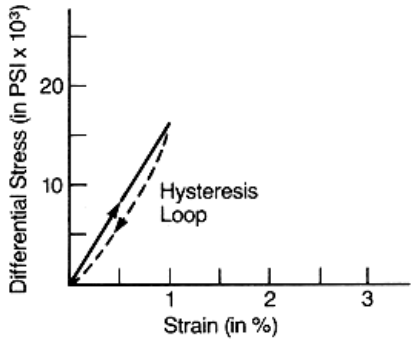
Şekil IV.2. Yer kürenin kabuk (crust), ve mağma (magma) kesimindeki malzemenin davranışını gösteren diyagramlar (Hatcher 1995)

IV.1.1 Elastik davranış / elastik cisim

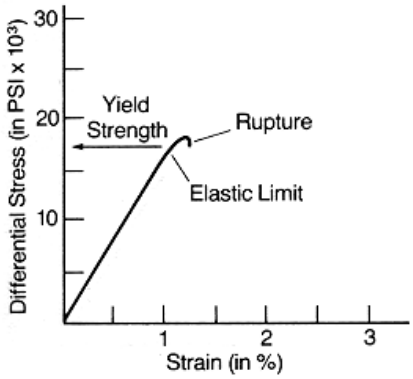
Çubuk şeklinde bir cismin üzerine, aralarındaki uzaklık ℓ olan iki A ve B noktası işaretleyerek cisme iki ucundan bir çekme gerilmesi uygulayalım. Belirli bir gerilme değeri için cismin boyunda $\Delta\ell$ kadarlık bir uzama meydana gelecektir.

Bu deformasyonu uygulayan yükün fonksiyonu olarak bir grafik üzerine işaretleyelim. Çeşitli yükler için elde edilen deformasyonların işaretlenmesi ile bir **gerilme-deformasyon grafiği** (stress-strain diagram) elde edilir (Şekil IV. 3, 4).

İncelenen cisim, belirli bir gerilme değerine kadar yüklendikten sonra, yükün kaldırılması ile yine eski boyutunu kazanıyor, yani cisim üzerine işaretlediğimiz uzaklık yine ℓ ise, böyle cisme **elastik cisim** denir.



Şekil IV.3. Elastik cismin gerilme-deformasyon grafiği

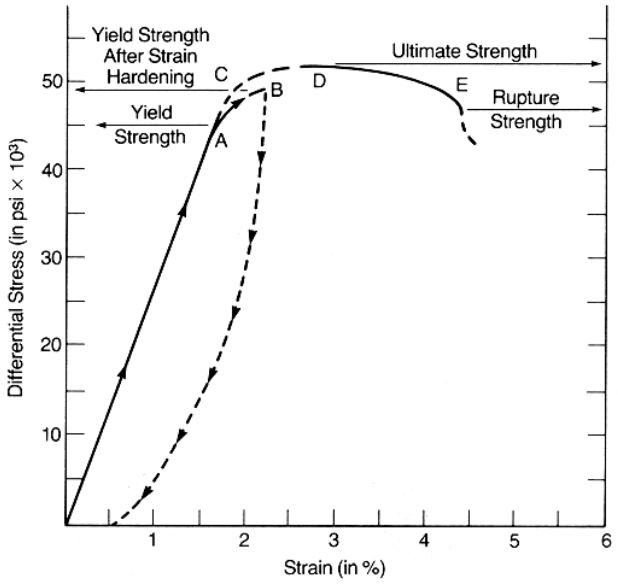


Şekil IV.4. Kırılgan (brittle) cismin gerilme-deformasyon grafiği. **Yield strength**: yenilme dayanımı, **rupture**: kopma, **elastic limit:** elastiklik sınırı.

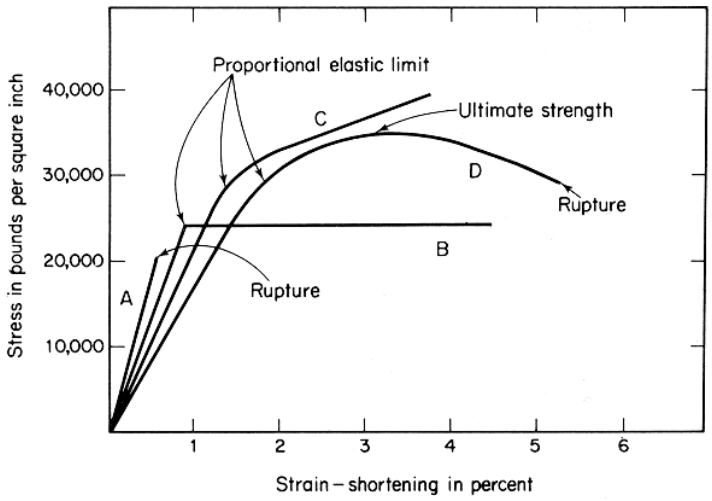
Elastik cisimlerin gerilme-deformasyon grafikleri bir doğru şeklindedir. Bu özellik "Hooke Kanunu"nda ifadesini bulur.

Hooke Kanunu: Mükemmel **elastik** bir cisimde deformasyon gerilmenin lineer bir fonksiyonudur (Şekil IV. 3).

Bütün elastik cisimler ancak belirli bir gerilme değerine kadar muhafaza edilebilirler. Bu sınır gerilmesine **elastiklik sınırı** (elastic limit) denir (Şekil IV. 4). Bu sınırın aşılması halinde yük kaldırıldıktan sonra cisimde bir miktar deformasyon kalır; bu deformasyona **kalıcı deformasyon** (permanent strain) denir. Kalıcı deformasyonun kazanılması halinde gerilme-deformasyon eğrisinde yükün yavaş yavaş azaltılmasına karşı gelen geri dönme aynı yoldan olmaz. Gerilmenin belirli bir değerinde cisim kırılır (Şekil IV. 5).



Şekil IV.5. Çevresel basınç altında deformasyona uğrayan kireçtaşının gerilim-deformasyon diyagramı. A, Platik deformasyonun başladığı nokta. B, eksenel yükün kaldırıldığı nokta. C eğrisi, ikinci yükleme. D eğrisi, plastik deformasyon. E, kopma noktası. **Yield strength**: yenilme dayanımı. **Strain hardening**: deformasyon sertleşmesi. **Ultimate strength**: nihai dayanım sınırı. **Rupture strength**: kopma dayanımı.



Şekil IV.6. Değişik deformasyon tiplerini gösteren gerilme-deformasyon grafiği. A) Elastik deformasyon (kırılgan cisim), B) Mükemmel plastik deformasyon (plastik cisim), C) Birim deformasyon sertleşmesi (strain hardening) gösteren plastik deformasyon (sünümlü cisim), D) Tipik plastik deformasyon (sünümlü cisim)

- ✓ Bazı cisimler elastik limiti takip eden çok düşük bir deformasyondan sonra kırılır. Bu tür cisimlere "**gevrek**" (Brittle) cisim denir.
- ✓ Diğer bir kısım cisim ise elastik limiti aştıktan sonra plastik deformasyon gösterir, bu nedenle elastik limit ile kopma arasındaki deformasyon oldukça büyüktür. Bu tür cisimlere **sünümlü** (Ductile) adı verilir.

IV.1.2. Plastik davranış / plastik cisim:

Gerilmenin sonlu bir değeri için, gerilme artmaksızın deformasyonun sürekli olarak arttığı cisimlere **mükemmel plastik cisim** ler adı verilir.

Mükemmel plastik cisimlerde gerilme deformasyonun hızına da bağlı değildir; gerilme-deformasyon eğrileri yatay bir çizgiden ibarettir.

Çoğu cisim bu sürekli deformasyona belirli bir gerilme değerinden sonra ulaşır ve cisimde akma başlar. Diğer bir değişle küçük gerilme değerleri için elastik bir cisim gibi davranan numune, belirli bir gerilme değerinden sonra (elastiklik sınırı) lineer deformasyon halinden ayrılır. Gerilme daha da arttırılırsa cisimde devamlı deformasyon yani **uniform akma** başlar.

Kayaçlarda uniform akmanın üç değişik mekanizması vardır:

a. Granülasyon
b. Taneler içi (İntragranular) kayma
c. Lokal ergime ve yeniden kristallenme

a. Granülasyonda akma, taneler arası hareketler sırasında çoğu tanelerin gözle görülemeyecek derecede ince çatlaklarla pek küçük parçalara ayrılması ile olur. Bu akma türünde sürtünme önemlidir.

b. Taneler içi kaymada, kristal içinde meydana gelen bir kayma yüzeyi üzerinde bir hareket meydana gelir. Bu hareket iki türlüdür:

Translasyon kayması
İkizlik kayması

Translasyon kaymasında birbirine paralel düzlemler ile ayrılan parçaların her biri birbirine nazaran rölatif hareketler yaparlar. Bu türden bir plastik deformasyon sonucu kristal şekil değiştirir.

İkizlik kaymasında bir kristalin belirli bir kristalografik düzlemi üzerindeki atomik dizilerin bir kısmı, diğer kısmından bir makaslama hareketi ile ayrılır. Bu ayrılma sırasında ayrılan kısımdaki atom şebekesi şekil değiştirir. Bu kaymanın sonucunda kristalde ikizlik teşkil eder.

c. Üniform akmanın bir diğer türü de **lokal ergime ve yeniden kristallenme** dir. Uygun basınç ve sıcaklık altında malzeme içinde lokal ergime meydana gelir. Yeni kristallenme sırasında bu kristaller basıncın minimum olduğu doğrultularda uzarlar. Bu belirli doğrultulardaki uzamalar cisimde üniform bir akma meydana getirir.

IV.1.3. Viskoz Davranış

Viskoz cisimler mükemmel akışkanlarla katılar arasında yer alır. Bu cisimler kendi ağırlıkları ile dahi, zamana bağlı bir deformasyon gösterirler. Çatlak bir bidondan asfaltın sızması gibi.

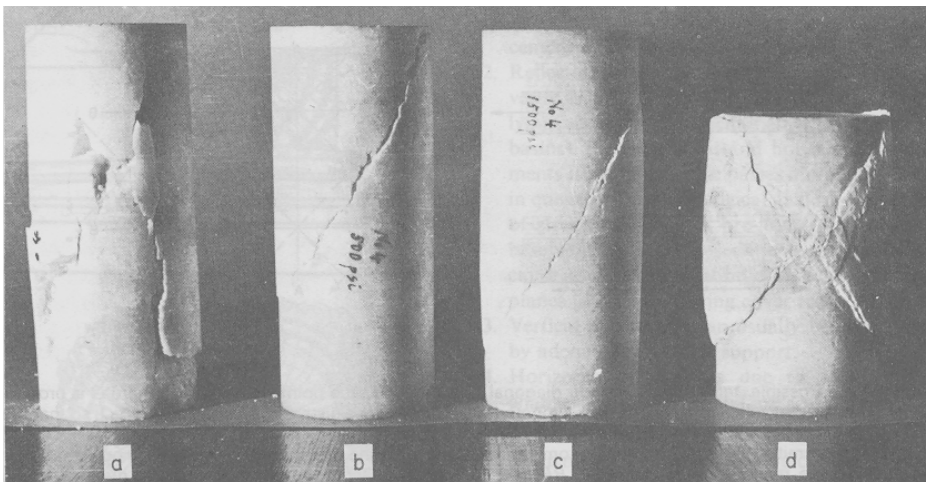
IV.2. Cisimlerin Davranışlarını Kontrol Eden Faktörler

Çevresel basınç (confining pressure) ve yükleme hızı, Sıcaklık (temperature), Solüsyonlar, Zaman (time), Boşluk basıncı (pore pressure), Anizotropi ve inhomojenite kayaların davranışını kontrol eden önemli faktörlerdir.

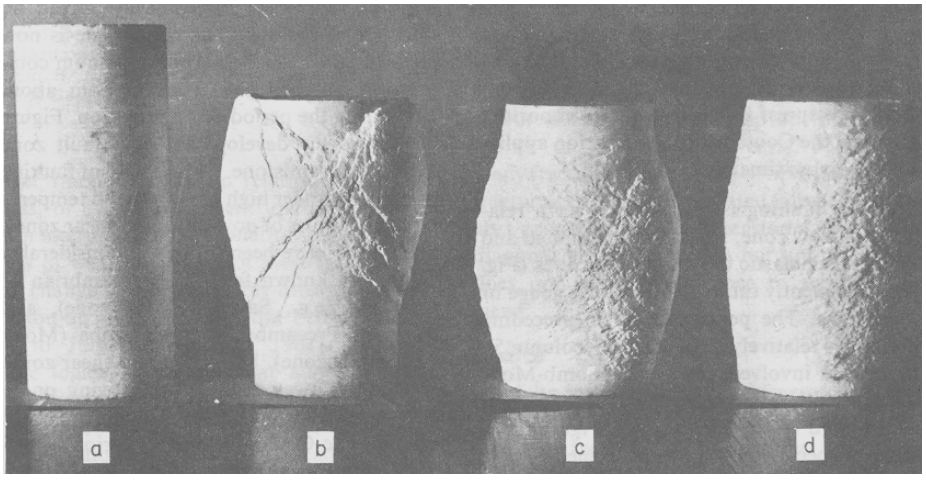
IV.2.1. Çevresel basınç yerin derinliklerinde artar.

KB ↑ Direnç ↑
Yükleme hızı ↑ Direnç ↑

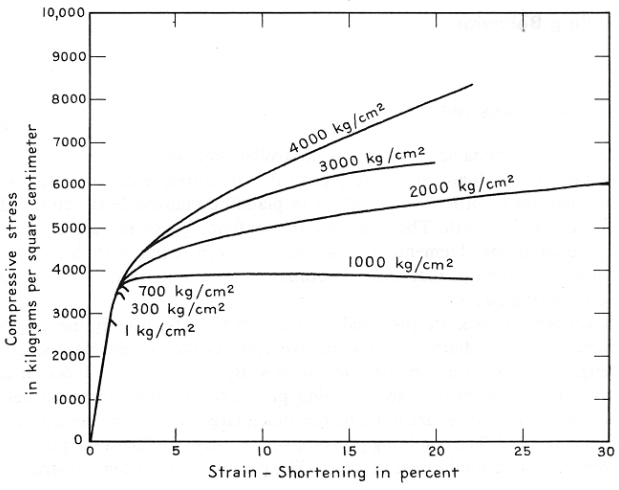
Kayaçlar yeryüzünde çok küçük bir plastik deformasyonu takiben yenildikleri halde, yerin derinliklerinde uzun bir plastik davranış hareketi göstereceklerdir ve yüksek kuşatılmış basınç yüzünden daha yüksek dirence sahip olacaklardır (Şekil IV. 7, 8, 9, 10, 11).



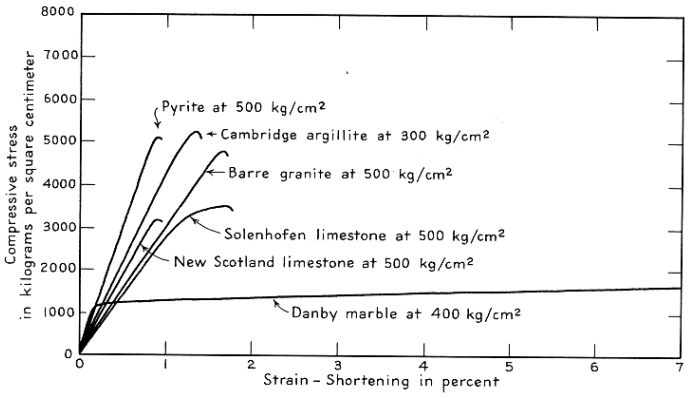
Şekil IV-7. Üç eksenli testte oluşan makaslama yüzeyleri. a) Atmosferik koşullarda yenilme, b) 35 kg/cm^{-2} çevresel basınç altında yüzde 1 deformasyon, c) 100 kg/cm^{-2} çevresel basınç altında yüzde 2 deformasyon, d) 210 kg/cm^{-2} çevresel basınç altında yüzde 12,5 deformasyon (Paterson 1958, Badgley 1965 te).



Şekil IV-8. Yüzde yirmi deformasyon oluşturan değişik çevresel basınc altında ortaya çıkan şekil değişiklikleri. a) Deformasyona uğramamış, b) 280 kg/cm^{-2} çevresel basınç altında, c) 460 kg/cm^{-2} çevresel basınç altında, d) 1000 kg/cm^{-2} çevresel basınç altında (Paterson 1958, Badgley 1965 te).



Şekil IV.9. Değişen çevresel basıncın Solenhofen kireçtaşı üzerindeki etkisi.

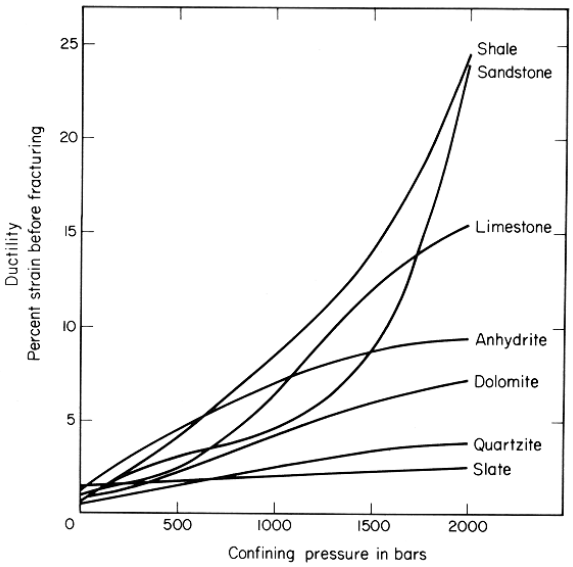


Şekil IV.10. Çevresel basıncın değişik kaya çeşitleri üzerindeki etkisi.

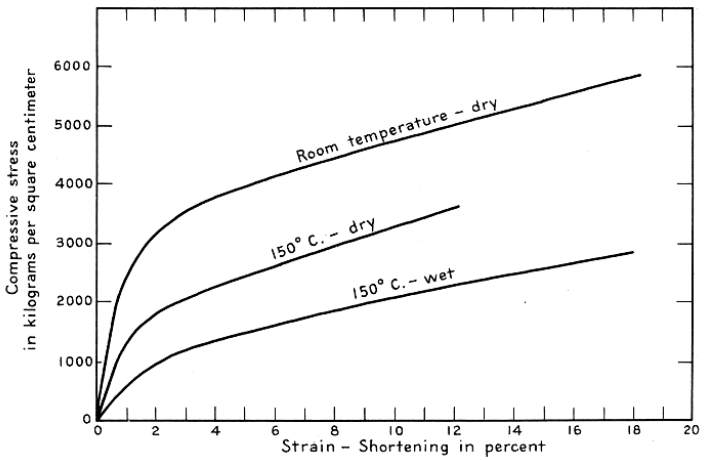
VI.2.2. Sıcaklık

Sıcaklık değişimleri de kayaçların direncini değiştirir. T ↑ Direnç ↓

Yeryüzünde veya sığ derinliklerde kayaçlar için plastik deformasyon söz konusu olmasa da, derinlerde yalnız sıcaklık artmasıyla bile kayaçlar daha kolay plastik davranışa geçebilmektedirler (Şekil IV.12).



Şekil IV.11. Bazı kayaçların değişen çevresel basınç altındaki sünümlülüğü (ductility).



Şekil IV.12. Isı ve sıvıların mermerin deformasyonu üzerindeki etkisi.

IV.2.3. Solüsyonların etkisi

Kayaçların deformasyonu sırasında boşluklarında gezinen solüsyonlarla kayaç arasında etkileşimler meydana gelir. Bu etkileşim özellikle metamorfik kayaçlarda yoğundur. Kayacın çatlaklarında gezinen solüsyonların cinsi, direnci etkiler ve meydana gelecek biçim bozulmasının şiddetini tayin eder. Sıvının yoğunluk ve viskozitesinin artması kayacı daha çabuk yamulmaya ve kopmaya götürür (Şekil IV. 12).

IV.2.4. Zaman

Jeolojik olaylar çok büyük zaman süreçlerinde meydana gelir. Genellikle malzemenin deformasyonu gerilmenin uygulanma sürecine de bağlıdır. Yeryuvarı kısa periyotlu etkilenmelere karşı elastik ve rijid, uzun süreli etkilenmeler karşısında ise plastik davranış gösterir.

IV.2.5. Boşluk basıncı

Kayaçların boşluklarında gezinen sular veya doğrudan boşluğun kendisi litostatik veya kuşatılmış basıncı azaltıcı yönde etki gösterir. Ayrıca malzemenin de kohezyonunu yani yapışkanlığını azaltıcı etki yapar.

IV.2.6. Anizotropi ve İnhomojenite

Kayaçlar her bölümlerinde kompozisyonel farklılık gösterir. Bu nedenle her parçasının tekdüze aynı davranışı göstermesi beklenemez. Örneğin kırıklar, katmanlanma ve foliasyon kayaç dayanımının her doğrultuda aynı olmamasını sonuçlar.

Bileşimsel farklılıklarda kayacın farklı doğrultularda yine farklı dayanımlara sahip olmasına neden olur. Bu özelliğe kayacın **inhomojenite**si adı verilir.

V. TEKTONİK OLMAYAN YAPI ŞEKİLLERİ

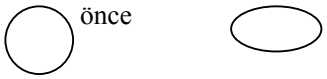
V.1. Primer Yapılar

Bu yapılar kayacın oluşması sırasında meydana gelen yapılardır.

-sedimanter kayalarda, magmatik kayalarda görülür
-metamorfik kayalarda görülmez

Primer yapıların faydası:

- ✓ İç deformasyonun hesaplanması



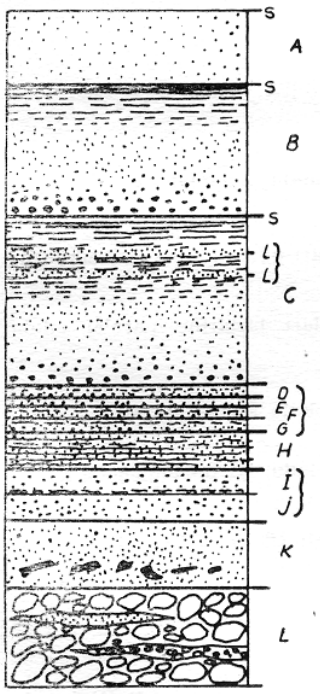
- ✓ Tabaka'nın alt ve üstünün tespiti, böylece göreceli yaş tayini mümkün olabilir.
- ✓ Taşınma (akıntı) yönünün tayini
- ✓ Çökelme ortamının tespiti

V.1.1. Sedimanter primer yapılar

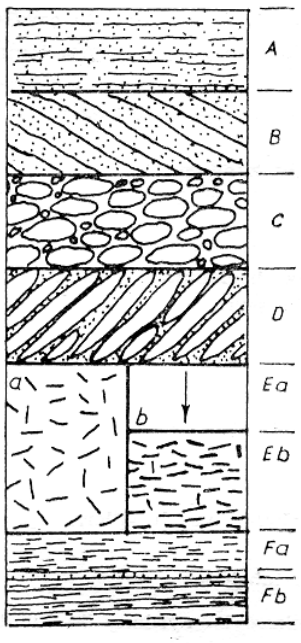
Bu yapılar tabaka içinde gözlenen ve tabakanın alt ve üstünde gözlenen yapılar olam üzere iki grupta sınıflanır.

V.1.1.1. Tabaka içi yapılar

Tortul kayaçların en önemli özelliği tabakalanmadır. Tabakalar birbirlerinden bileşim, doku, renk ve sertlik farkları ile ayrılır (Şekil V.1, 2). Kalınlıklarına göre tabakalar çok kalın tabaka, kalın tabaka, orta kalınlıkta tabaka, ince tabaka, çok ince tabaka ve kalın lamina, ince lamina olarak gruplanırlar (Tablo V.1).



Şekil V.1. Başlıca tabaka çeşitleri. A) Homojen masif kumtaşı B) Dereceli (boylanmalı) tabaka, C) Karışık dereceli tabaka, D-H) ince tabakalar, İ-J) Şeyl laminasıyla ayrılmış kumtaşı, K) Köşeli şeyl parçaları içeren heterojen kumtaşı, L) Heterojen çakıltaşı tabakası, S: tabakalanma yüzeyi.



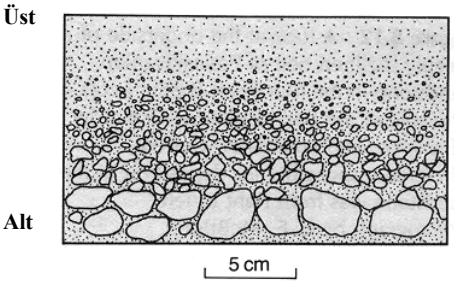
Şekil V.2. Başlıca tabakalanma örnekleri. A) Paralel tabakalanmalı kumtaşı, B) Çapraz tabakalanmalı kumtaşı, C) Paralel dokulu çakıltaşı, D) Çapraz dokulu çakıltaşı, Ea) Sıkılaşmamış kil, Eb) Sıkılaşmış kil, Fa) Paralel doukulu sıkılaşmış kil, Fb) Paralel dokulu iyi tabakalanmalı kil

Tabakalar	100 cm.	Çok kalın tabakalı
		Kalın tabakalı
	30 cm.	Orta tabakalı
	10 cm.	İnce tabakalı
	3 cm.	Çok ince tabakalı
Lamina	1 cm.	Laminalı
	0.3 cm.	İnce Laminalı

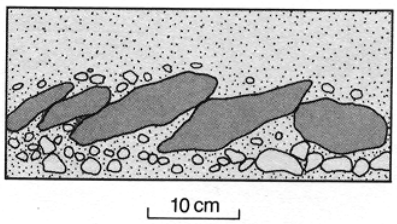
Tablo V.1. Kalınlıklarına göre tabakaların sınıflandırılması

Tortul kayaçların depolanması sırasında ortam özelliklerini yansıtacak şekilde bazı sedimanter yapılar oluşur. Tabaka içinde görülen bu yapıların en önemlileri dereceli-boylanmalı tabakalanma ve çapraz tabakalanmadır.

Dereceli tabakalanma (graded bedding): Tabaka içerisinde taneler büyüklüklerine göre bir sıralanış gösterirlerse buna **Dereceli veya boylanmalı tabakalanma** denir (Şekil V.3). Tabakanın alt ve üstünü tespitte önemli bir yapıdır. Kumtaşlarında, ince çakıl taşlarında gelişir ve türbidit akıntılarla meydana gelir. Ayrıca akıntı yönünde yassı çakılların üstüste dizilmesiyle oluşan **üstüste bindirmeli yapı** (imbrication) (Şekil V.4), akıntı yönünü tespit etmekte kullanılan önemli bir tabaka içi yapıdır.

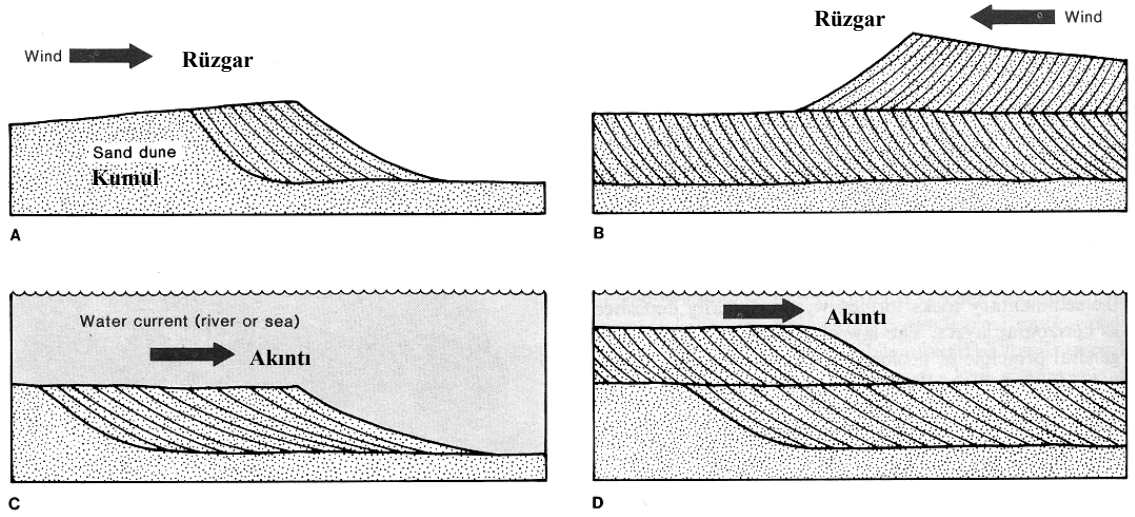


Şekil V.3. Dereceli tabakalanma

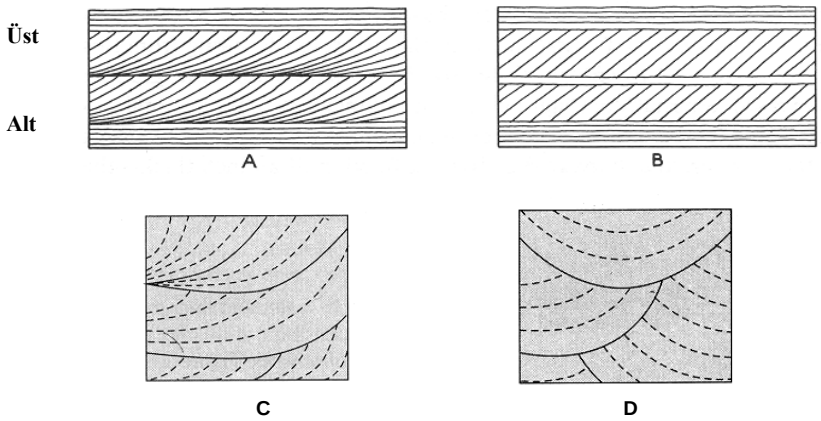


Şekil V.4. Üstüste bindirmeli (imbrication) yapı gösteren çakıltaşı

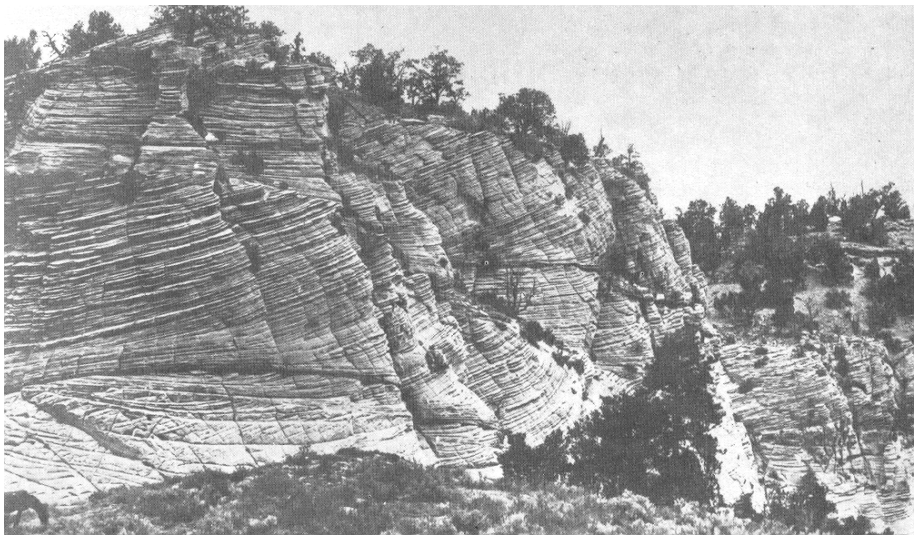
Çapraz tabakalanma (Cross bedding): Klastik tortul kayaçlarda tanelerin sıralanışı, veya dizilişi tabakaların alt ve üst yüzeylerine paralel olmaz ise buna **çapraz tabakalanma** denir. Rüzgar veya akıntının etkisiyle oluşur (Şekil V. 5). Levha, mercek ve kama şeklinde olabilirler (Şekil V. 6).



Şekil V.5.5. A) Rüzgarın etkisiyle oluşan çapraz tabaka, B) Rüzgar yönünün değişmesi sonucunda oluşan çapraz tabakalar, C) ve D) Akıntı (Nehir veya deniz) ile oluşan çapraz tabakalanma.



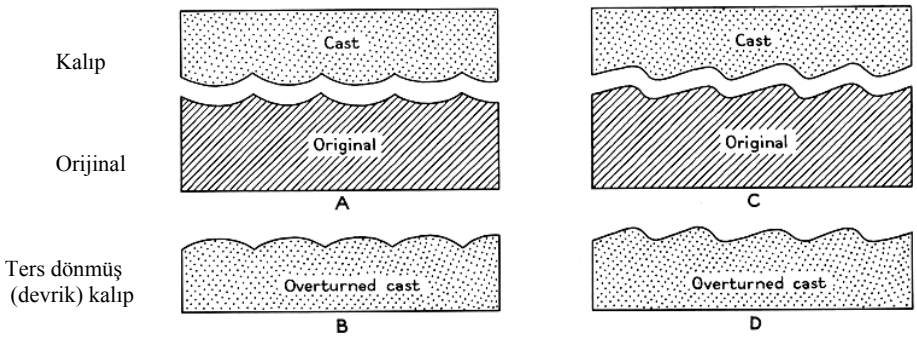
Şekil V.6. Çapraz tabakalanma tipleri. A) Teğetsel, B) Levha şeklinde, C) Kama şeklinde, D) Tekne şeklinde



Şekil V.7. Çapraz tabakalanma gösteren kumtaşı.

V.1.1.2. Tabaka üstü yapılar

Bu tip yapılar tabanın üstünde oluşur ancak daha sonra aşınma nedeniyle kalıp olarak tabakanın alt yüzeyinde gözlenirler (Şekil V.8).

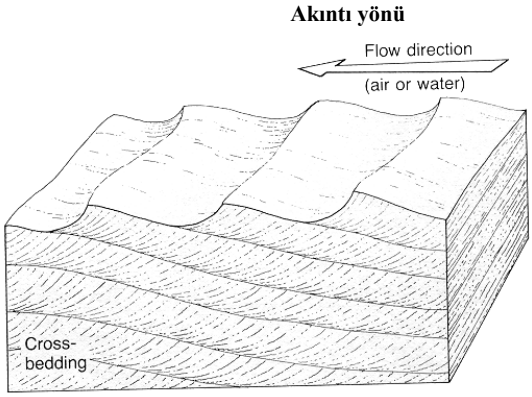


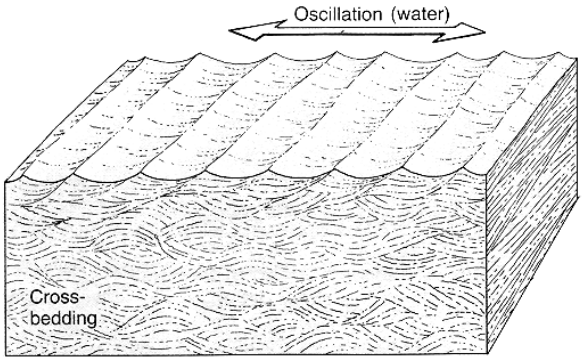
Şekil V.8. Alttaki orijinal sedimanter yapının üzerine depolanan birimde oluşan kalıp (A, D) ve daha sonra, tabakanın devrilmesiyle kalıbın kazandığı görünüm (C, D).

Ripılmarklar

Tabaka yüzeylerinde görülen ve akıntı veya dalga ile oluşan önemli bir yapı şeklidir. Bunlar gevşek ve taneli tortullarda üst yüzeylerin rüzgar, su akıntısı veya deniz dalgalarının etkisi ile inişli çıkışlı bir şekil almalarıdır. Başlıca iki türü olup birincisi **asimetrik** veya **akıntı ripılmarkları**dır (Şekil V.9). Az eğimli yamaçları akıntının veya rüzgarın akış yönünü gösterir. İkinci tür **simetrik ripılmark**lar olup, deniz dalgalarının iki taraflı ritmik hareketleri etkisi ile meydana gelirler. Bu nedenle bunlara **dalga ripılmarkları** da denir (Şekil V.10).

Şekil V.9. Akıntı riplmarkları





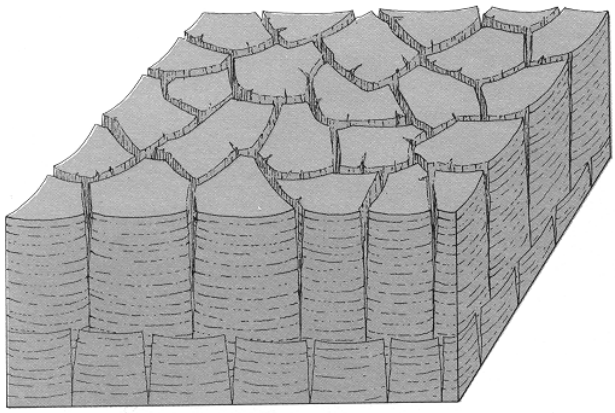
Şekil V.10. Dalga riplmarkları



Kuruma çatlakları

Bunlar killi-çamurlu tortuların uzun süre atmosfer altında kalmaları ve kurumaları sonucu meydana gelir. İç kısımları çoğu kez ince kum taneleri ile dolar. Kum çatlakları aşağı doğru daralır, kama biçimine girerler ve bu özellikleri ile içinde bulundukları tabakanın alt ve üst yüzeyinin belirlenmesini sağlarlar (şekil V. 11).

Yağmur ve dolu taneleri, yumuşak tabaka yüzeyleri üzerine düştüklerinde yuvarlak izler, oyuklar meydana getirirler.

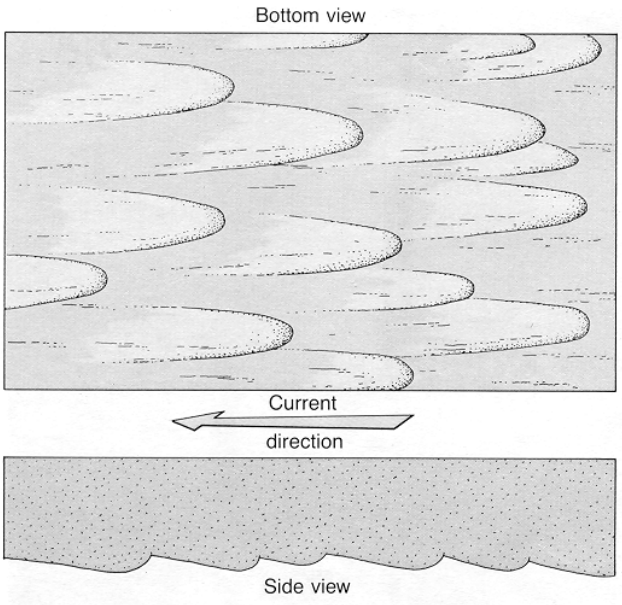




Şekil V.11. Kuruma çatlakları

Oyuk ve sürüklenme izleri ve yük kalıbı

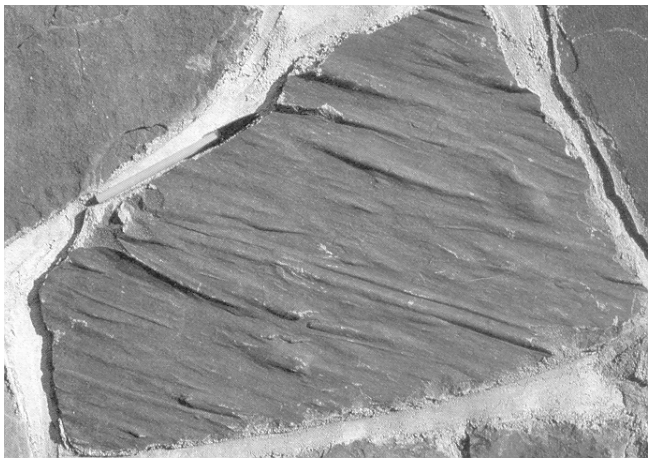
Killi tabakanın üst yüzeyinde oyuklar, yivler ve izler şeklinde; kumlu-taneli tabakaların, özellikle türbiditlerin alt yüzeylerinde kalem, kaval, kaşık ve yumru biçiminde kabartılar, çıkıntılar veya dolgular meydana getirirler.



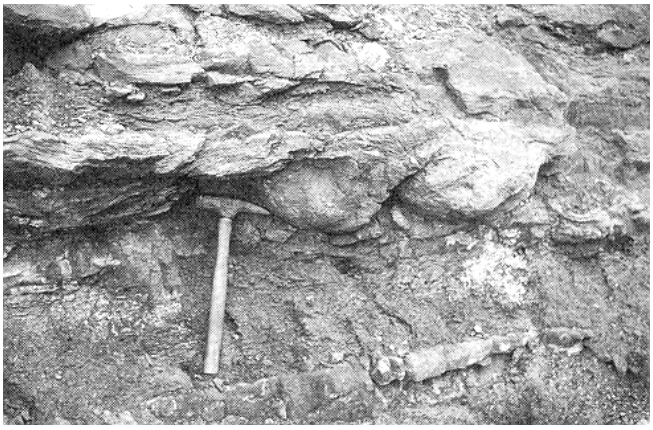
Şekil V.12. Kaval yapısının tabakanın tabanında (a) ve yandan görünümü (b)



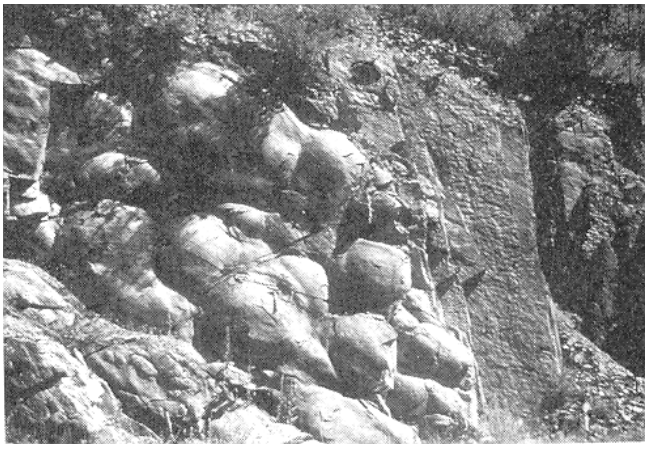
Şekil V.13. Kaval yapısının tabandaki görünümü



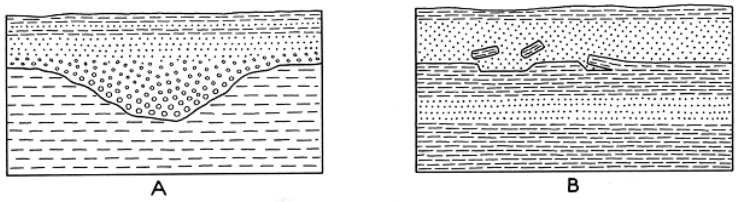
Şekil V.14. Oyuk izlerinin tabandaki görünümü



Şekil V.16. Yük kalıbının (load cast) yandan görünümü



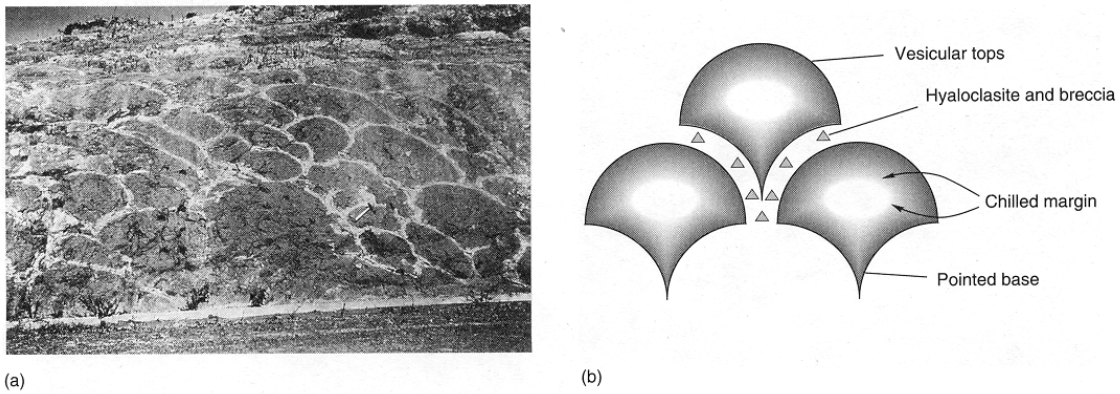
Şekil V.17. Yük kalıbının tabandaki görünümü



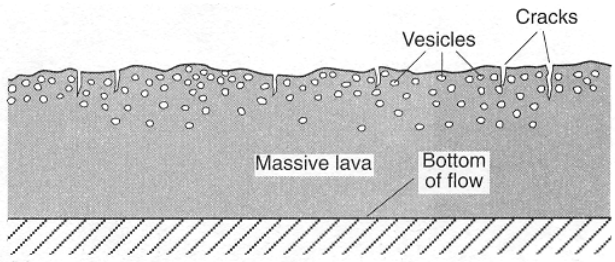
Şekil V.17. A) Derecelenme gösteren kanal dolgusu, B) Daha yaşlı şeyl'in parçalarını içeren kumtaşı

V.1.2. Plutonik primer yapılar

Su altında, deniz diplerinde katılaşan yastık şeklindeki **yastık lavların (pillow lava)** kabarık kısımları lav akıntısının üst yüzeyini gösterir (Şekil V.18). Benzer şekilde boşluklu gözenekli lav akıntılarında, büyük boşluklar lav akıntısının üst yüzeyinde, çok küçük boşluklarda tabakanın alt kesiminde bulunurlar. Alt kısım bazen boşluksuz olabilir (Şekil V.19).



Şekil V.18. Yastık lavların yol yarmasında (a) ve şematik olarak (b) görünümü.

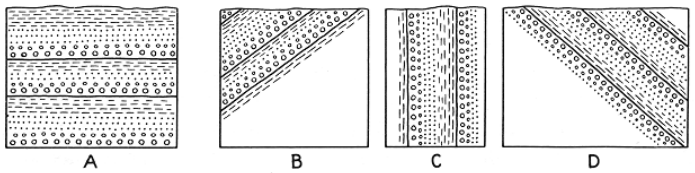


Şekil V.19. Lav akıntısının üst kısmında oluşan hava kabarcıkları (vesicles)

V.I.3.Tabakaların alt ve üst yüzeylerinin saptanması:

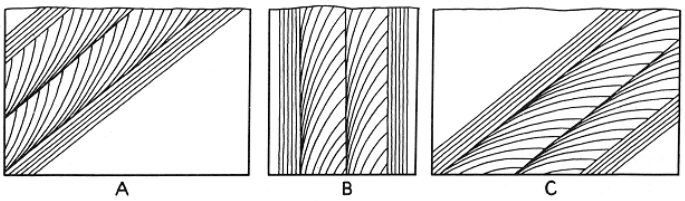
- ✓ Dereceli veya boylanmalı tabakalanma gösteren tabakalarda, genel kural, iri tanelerin altta, ufak tanelerin ise üstte bulunmasıdır (Şekil V.20).

Şekil V.20.

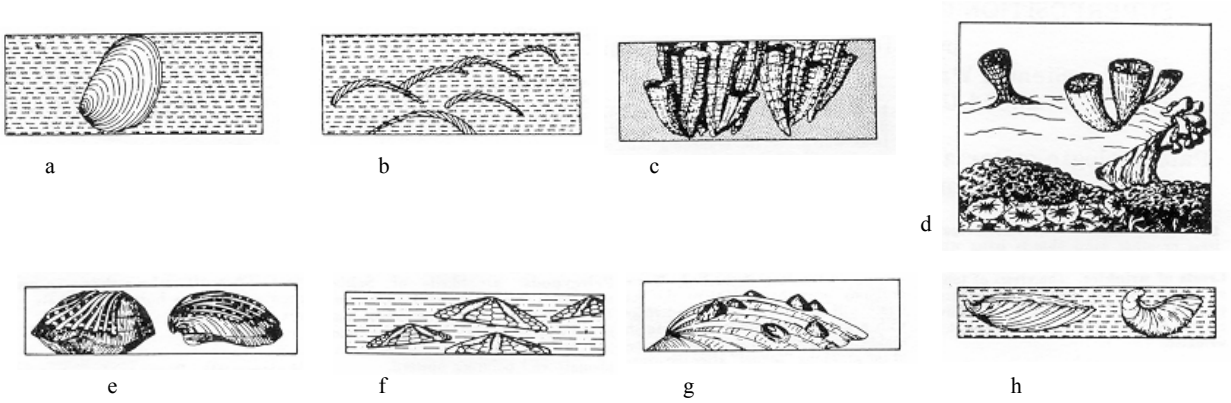


- ✓ Çapraz tabakalanmada, çapraz düzlemlerin az eğimli (yataya yakın) kısımları dikçe olan ve üzerine gelen tabaka yüzeyi ile belirgin bir açı yapan kısım ise tabakanın üstünü belirler (Şekil V.21).

Şekil V.21.

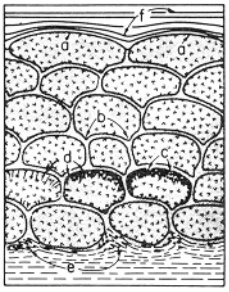


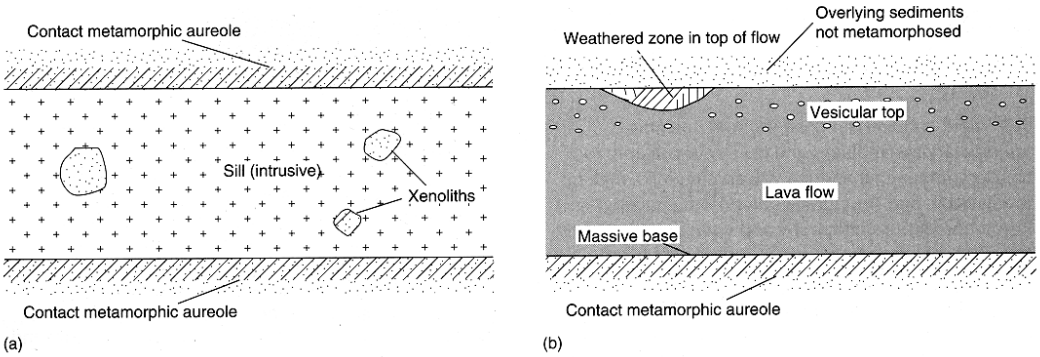
- ✓ Kuruma çatlakları olan tabakalarda çatlakların sivri uçları tabakanın alt yüzeyine doğru yönelmiş bulunur.
- ✓ Simetrik ripılmarkları bulunan bir tabakada, ripılmarkların keskin-sivri uçları tabakanın üst yüzeyini belirler.
- ✓ Kumlu ve killi tabaka sınırlarında oluşan yumruların (yük kalıbı) yuvarlak tarafları kumlu tabakanın alt yüzeyini, killi tabakadaki oyuklar ve çukurluklar bu tabakanın üst yüzeyini belirler.
- ✓ İki kavkılı fosillerde (Brachiopoda), yassı kavkılar tabakanın alt tarafını, kabarık kavkılar üst tarafını belirler.



Şekil V.22. Değişik tür fosillerin deniz tabanındaki normal pozisyonları. a) Pelesipod, b) Pelesipodların açık valvları, c) Rudist, d) Mercan (coral), e) Bryozoa, f) Ekinid, g) Deniz organizmalarının serbest üst kabuğu üzerinde büyüyen kabuklular, h) Simetrik valva sahip olmayan pelesipodların konumu.

Şekil V.23. Yastık lav





Şekil V.24.

V.2. Uyumsuzluk (Diskordans)

Çok sayıdaki tabaka üst üste bulundukları zaman bir **tabaka istifi** meydana getirirler. Böyle bir istifte tabakalar sürekli bir gelişme göstermişler, tabakaların oluşumu sırasında bir zaman boşluğu, sedimantasyonda bir ara verme olmamış ise, bu istife **uyumlu istif** veya **konkordan istif** denir. Sedimantasyonda bir ara verme, bir eksiklik olduğu zaman, tabaka serisi **uyumsuz (diskordan)** durumludur ve uyumsuzluk düzlemi ile iki kısma ayrılır. Bu düzlem, uzun veya kısa süre su üstüne çıkmış, atmosfer etkisinde kalmış eski bir aşınma veya ayrışma yüzeyidir. Bu yüzey, sedimantasyonda ve fosil organizmaların evriminde bir kesikliği, bir boşluğu veya önemli bir dağoluşum (orojenez) safhasını belirler. Genelde, diskordans yüzeyi üzerindeki genç seri bir taban konglomerası ile başlar ve alttaki istife ait kayaçların çakıllarını içerir.

V.2.1 Diskonformiti

Eğer diskordans yüzeyinin her iki tarafındaki tabakalar birbirine ve diskordans yüzeyine paralel durumda ise, buna **diskonformiti** denir (Şekil V.25a).

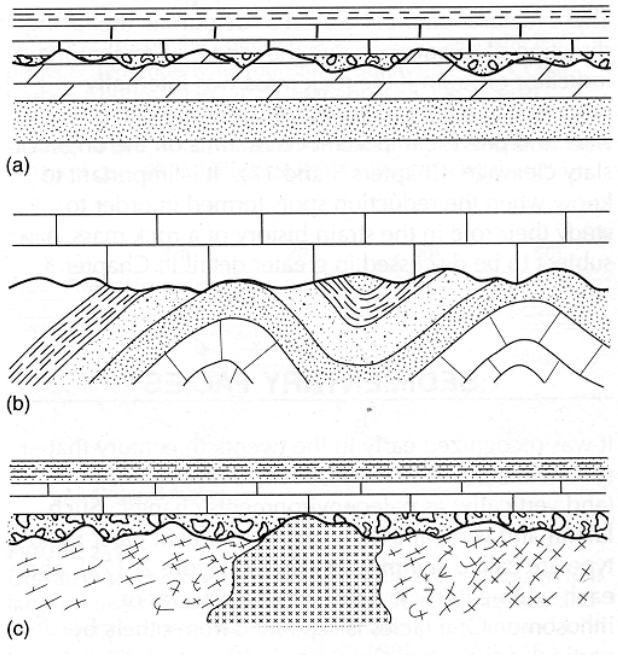
V.2.2 Açısal uyumsuzluk

Diskordans yüzeyinin her iki tarafındaki tabakaların eğimleri arasında belirli bir açı varsa, buna **açısal uyumsuzluk** denir (Şekil V.25b).

V.2.3 Nonkonformiti

Sedimanter birimler metamorfik veya plutonik kayaları örtüyorsa **nonkonformiti**den bahsedilir (Şekil V.25c).

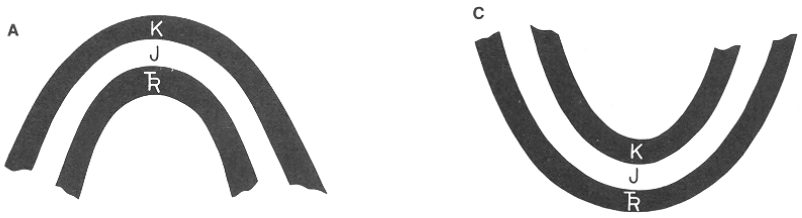
Şekil V.25. Uyumsuzluklar a) diskonformiti, b) açısal uyumsuzluk, c) nonkonformiti



VI. KIVRIMLAR

VI. 1. Tanım ve genel bilgiler

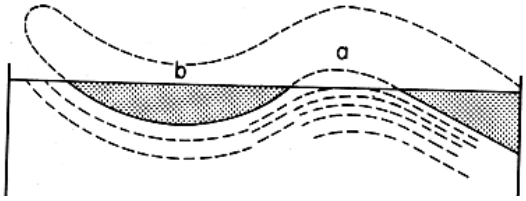
Tabakalı kayaçların tektonik kuvvetlerin etkisiyle kazandıkları dalga şeklindeki deformasyon yapılarına **kıvrım**, meydana gelen olaya da **kıvrımlanma** denir. Bu yapı kubbe (antiklinal) veya çanak (senklinal) şeklinde olabilir (Şekil VI.1).



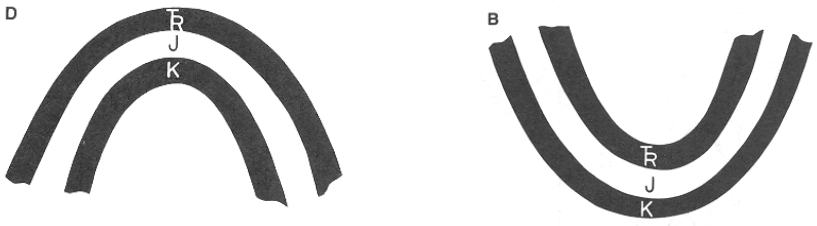
Şekil VI.1. Antiklinal (merkezde yaşlı) Senklinal (merkezde genç)

Bazı hallerde örneğin metamorfik kayaçların bir çoğunda kıvrımlı yapının merkezdeki birimlerinin genç mi yaşlı mı olduğu belli olmaz. Bu nedenle bu tür kıvrımlı yapılar **antiform** veya **sinform** diye adlandırılır (Şekil VI.2).

Şekil VI.2. a) Antiform, b) synform



Dış görünüm olarak antiklinale benzeyen fakat kayaçların yaş sıralaması senklinale uyan bir kıvrıma **antiformal senklinal**, bunun tam tersi duruma da **sinformal antiklina**l adı verilir (Şekil VI.3).

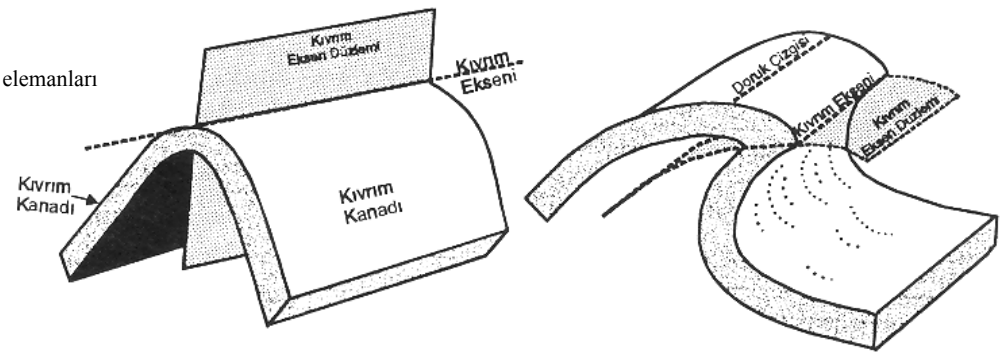


Şekil VI.3. Antiformal senklinal Senformal antiklinal

Kıvrım unsurları (elemanları):

Bir kıvrım her iki yanında bulunan **kanatlardan** oluşur. Kanatların konumuna göre bir kıvrım antiklinal veya senklinal olabilir.

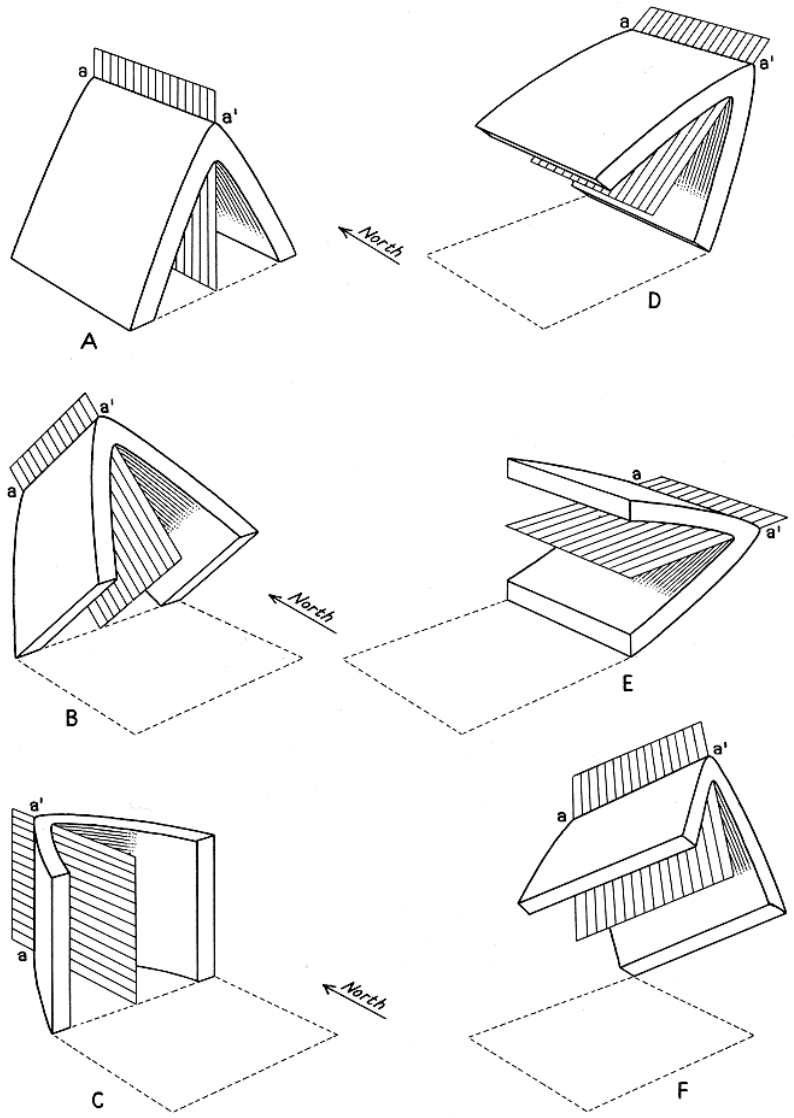
Şekil VI.4. Kıvrım elemanları



Bir antiklinalde topoğrafik olarak en yüksek noktaya **doruk noktası** denir. Bu noktaları üzerinde bulunduran çizgiye **doruk çizgisi**, kıvrılmaya katılan çeşitli tabakaların doruk çizgilerini birleştiren ve onları üzerinde taşıyan düzleme ise **doruk düzlemi** denir (Şekil VI.4).

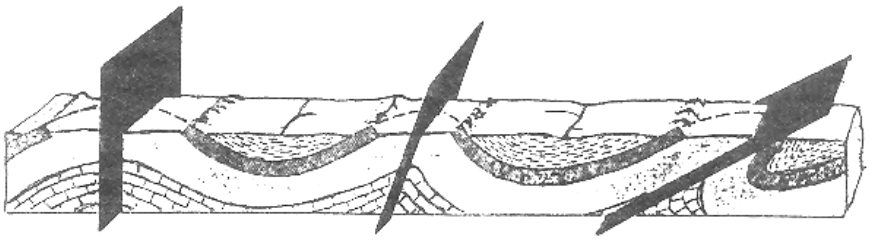
Kıvrım kanatlarının birleştiği çizgiye **kıvrım ekseni** adı verilir. Kıvrım ekseni kıvrılan tabaka serisinin stratigrafik olarak en yüksek seviyesi olup yatay, dalımlı veya düz, kavisli olabilir (Şekil VI.5, 6, 7)).

Kıvrımlanmaya katılan tüm tabaka serilerinin kıvrım eksenlerini birleştiren ve onları üzerinde taşıyan düzleme **eksen düzlemi** denir Eksen düzlemi düşey, eğik, yatık, düzlemsel, kavisli veya düzensiz kavisli olabilir (Şekil VI. 5, 6, 8).

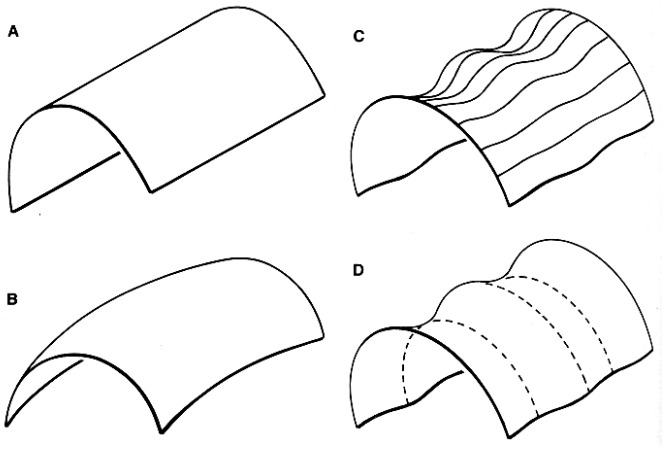


Şekil VI.5. Kıvrım ekseni (a-a') ve eksen düzleminin konumuna göre oluşan değişik kıvrımlar. A. Yatay eksenli, düşey eksen düzlemli kıvrım, B. Dalımlı eksenli, eğik eksen düzlemli kıvrım, C. Düşey eksenli ve eksen düzlemli kıvrım, D. Yatay eksenli devrik eksen düzlemli kıvrım, E. Yatay eksenli, yatık eksen düzlemli kıvrım, F. Dalımlı eksenli ve eğik düzlemli kıvrım.

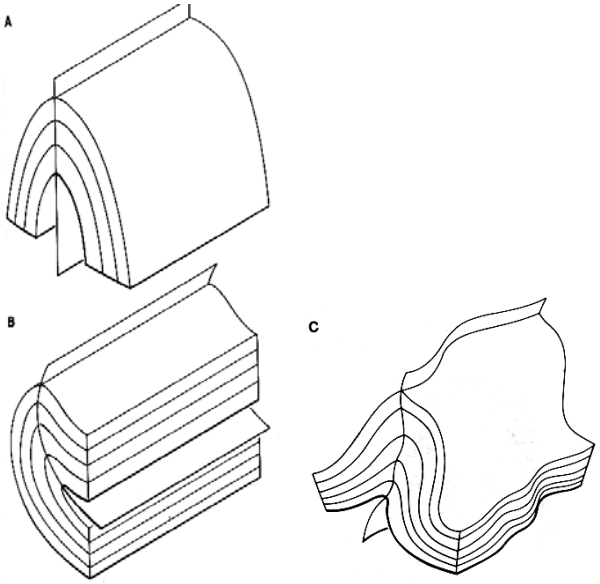
Düşey eksenli kıvrım Eğik eksenli kıvrım Yatık eksenli kıvrım



Şekil VI.6. Değişik eğimli eksen düzlemleri ve kıvrım çeşitleri.

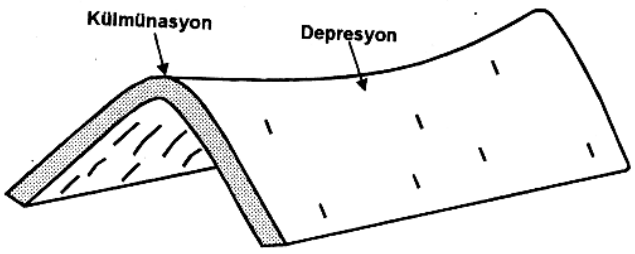


Şekil VI.7. Eksen çizgisi (hinge line) düz (A), kavisli (B), ve düzensiz kavisli (C,D) olan kıvrımlar



Şekil VI.8. Eksen düzlemi düzlemsel (A), kavisli (B), ve düzensiz kavisli(C) olan kıvrımlar.

Kavisli eksen çizgisine sahip kıvrımlarda kıvrım ekseninin en yüksekte bulunan noktasına **külmünasyon** (yükselim), en alçakta bulunan noktasına da **depresyon** (çöküntü) adı verilir (Şekil VI.9).

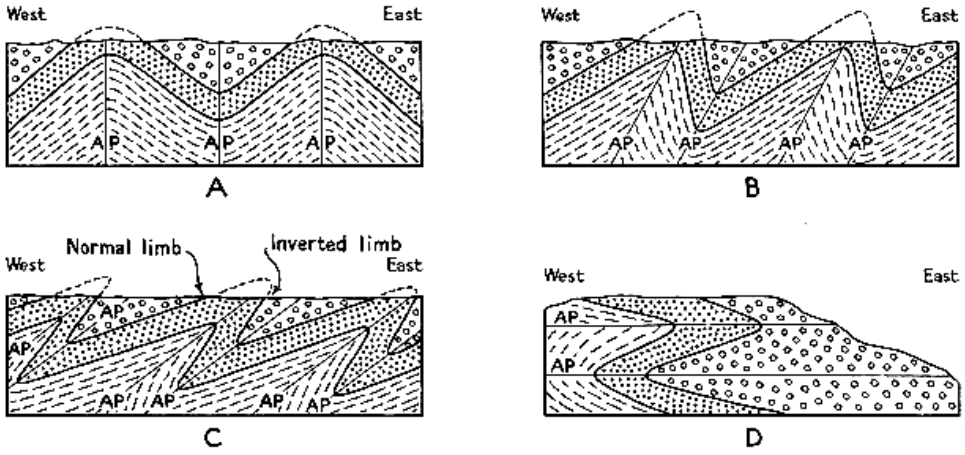


Şekil VI.9. Külminasyon ve depresyon

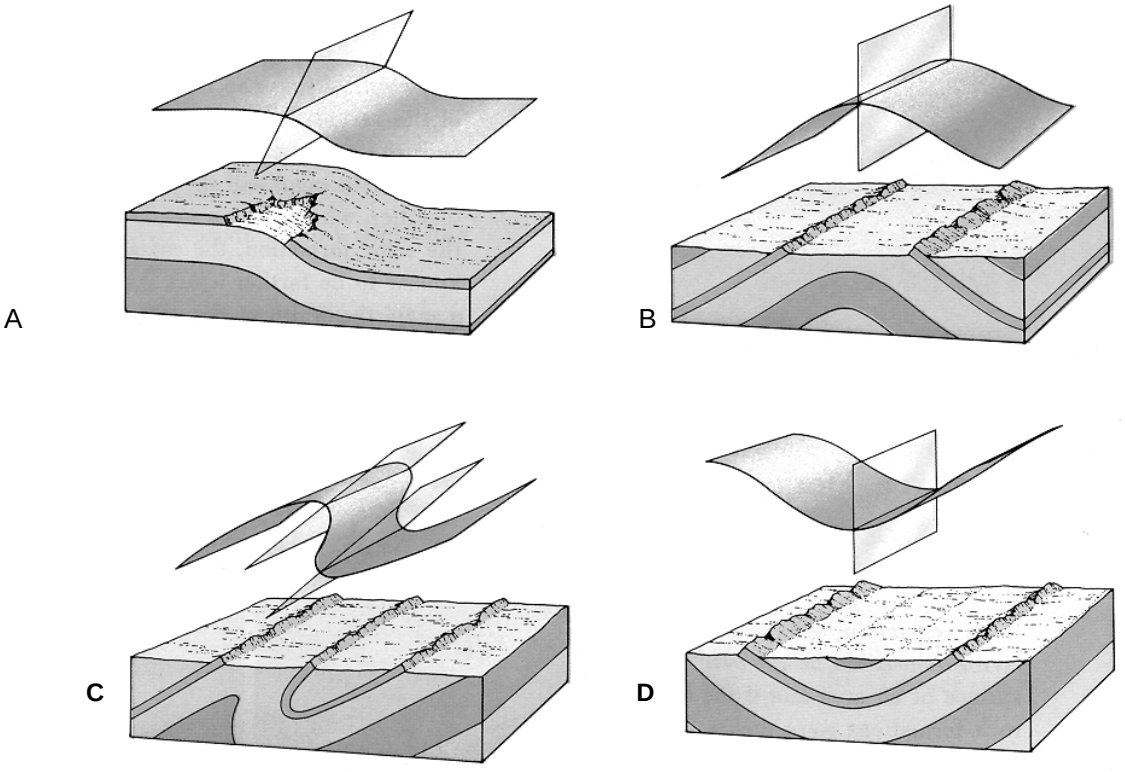
VI. 2. Kıvrımların Sınıflandırılması

En önemli kıvrım sınıflaması şu şekildedir: Kıvrım eksen düzleminin ve kıvrım kanatlarının konumuna göre, Fleuty sınıflaması, şekle ve yapıya göre sınıflama, izogonal sınıflama, kıvrımların yatay ile olan ilişkilerine göre sınıflandırma.

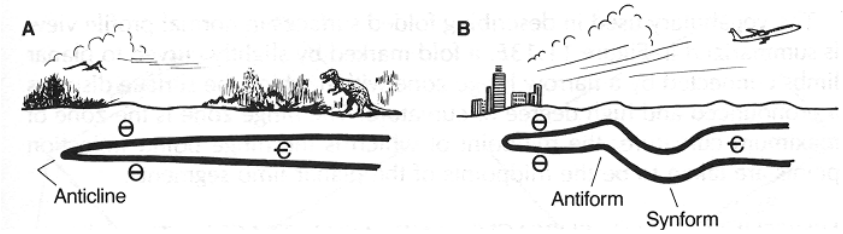
VI.2.1. Kıvrım eksen düzleminin ve kıvrım kanatlarının konumuna göre kıvrımlar simetrik, asimetrik, devrik, yatık (Şekil VI.10, 11) ve yeniden kıvrımlanmış kıvrım (Şekil VI.12) olarak sınıflandırılır .



Şekil VI.10. A. Simetrik kıvrım, B. Asimetrik kıvrım, C. Devrik kıvrım, D. Yatık (recumbent) kıvrım (Billings 1972)

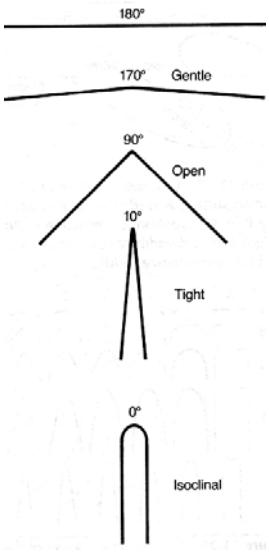


Şekil VI.11. Kıvrım geometrisinin üç boyutlu görünümü. A. Monoklinal, B. Simetrik antiklinal, C. Devrik antiklinal ve senklinal, D. Simetrik senklinal (Hamblin & Howard 1986).



Şekil VI.12. Yatık (A) ve yeniden kıvrımlanmış (superposed) kıvrım (B) (Davis 1984)

VI.2.2. Fleuty Sınıflandırması



Kıvrım kanatları arasındaki açıya göre sınıflandırma (Şekil VI.13):

Kıvrım kanatları arasındaki açı	Kıvrıma verilen ad
0° – 10°	İzoklinal kıvrım
1° – 30°	Sıkı (kapalı-tight) kıvrım
31° – 70°	Kısmen sıkı kıvrım
71° – 120°	Açık (open) kıvrım
121° – 180°	Hafif (gentle) kıvrım

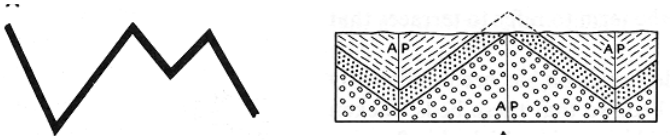
Eksen düzleminin eğim derecesine göre sınıflandırma:

Eksen düzleminin eğim derecesi	Kıvrıma verilen ad
0° –	Yatay
1° – 10°	Yataya yakın
11° – 30°	Azmeyilli kıvrım
31° – 60°	Orta derece meyilli kıvrım
61° – 80°	Çok meyilli kıvrım
81° – 89°	Düşeye yakın kıvrım
90°	Düşey kıvrım

VI.2.3. Şekle ve Yapıya göre sınıflandırma

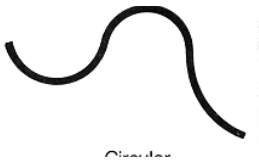
a. Zik-zak (chevron) kıvrım

Gevrek (kompetant) malzemelerde gelişir (Şekil VI.14)



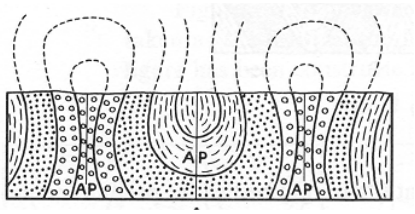
b. Silindirik kıvrım (cylindirical fold)

Yarım daire şeklindedir. Genelde uzun süreli deformasyonu temsil eder. (Şekil VI.15)



c. Yelpaze kıvrım (fan fold)

Kıvrım kanatları yelpaze şeklinde birbirlerine dönük olarak meydana gelen kıvrımlardır. Uzun süren, derin gömülme ve şiddetli sıkışma ile meydana gelirler (Şekil VI.16).



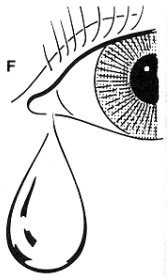
d. Kutu (box/conjugate) kıvrım

Üç kanattan oluşan kıvrımlardır (Şekil VI.17).



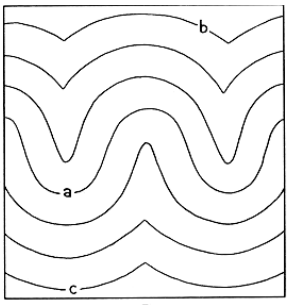
e. Gözyaşı şeklinde kıvrım (tear drop fold)

Devamlı kıvrılarak oluşmuş kıvrımlardır (Şekil VI.18).



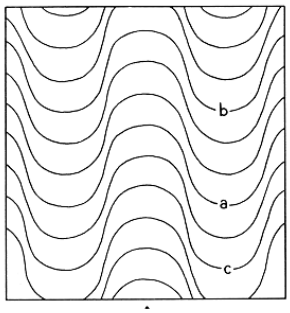
f. Konsentrik kıvrım (paralel/concentric fold)

Kıvrımı oluşturan tabakların kalınlıkları her tarafta aynıdır. Antiklinal derinlere doğru küçülür, senklinaller ise derinlere doğru büyür. Genelde kompetant karakterli kayaçlarda oluşur (Şekil VI.19).

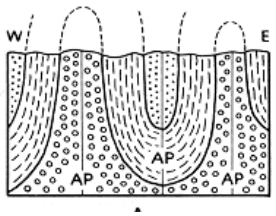


g. Benzer kıvrım (similar fold)

Bu kıvrımlarda tabakaların herbirinin yapmış olduğu kıvrım birbirine benzer ve eşit büyüklüktedir. Tabaka kalınlıkları kıvrım ekseninde artar kanatlarda ise azalır (Şekil VI.20).

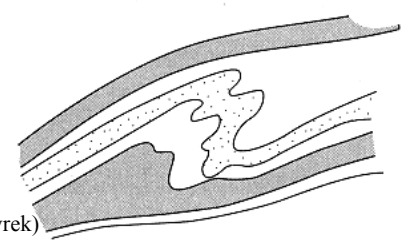


h. İzoklinal kıvrım (isoclinal fold)
(Şekil VI.21)

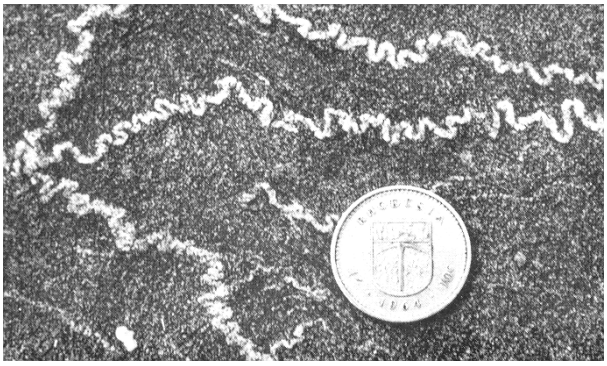


i. Disharmonik kıvrım (disharmonic fold)

Tabakaların plastiklik dereceleri veya kıvrımlanma eğilimleri birbirinden farklı ise ve bu tabakalar birlikte kıvrılmaya uğrarlarsa dsiharmonik kıvrım oluşur.
(Şekil VI.22)



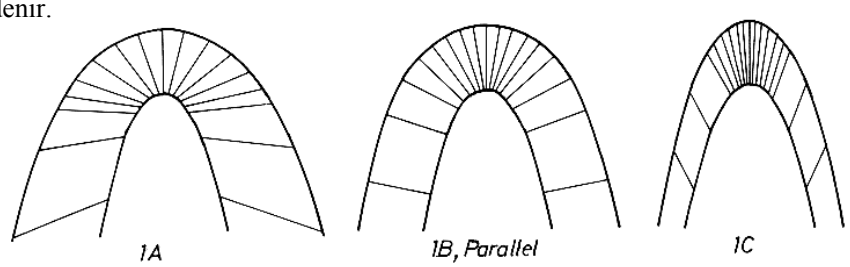
j. Ptigmatik kıvrım
Isı ve basıncın artmasıyla oluşur. Yarı ergimiş katıların çatlaklara, foliasyon düzlemlerine sokulduktan sonra deformasyona uğramasıyla oluşur (Şekil VI.23).



VI.2.4. İzogonal Sınıflandırma

Bir kıvrımda yapıyı sınırlayan iki yüzey üzerinde, eğim dereceleri eşit olan noktalar vardır. Bu noktaların karşılıklı olarak birleştirilmesiyle elde edilen her hat eğim izogonu veya eş eğim hattı olarak adlandırılır. Bu izogonların, kıvrım eksenine göre olan konumları göz önüne alınarak yapılan sınıflamaya izogonal sınıflandırma denir.

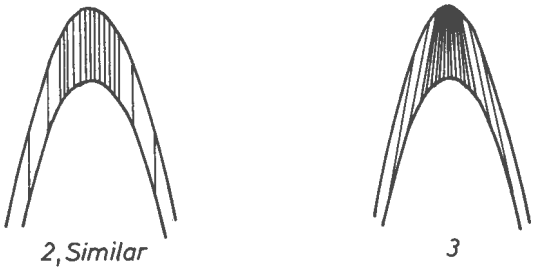
a. Konverjan izogonlu kıvrımlar: Bu kıvrımlarda yapıyı sınırlayan yüzeylerden dışta bulunanı,



içte bulunana oranla daha hafif kıvrımlanmıştır (Şekil VI.24 1A, 1B, 1C)

b. Benzer izogonlu kıvrımlar: Eğim izogonları kıvrım eksenine paraleldir, yani kıvrımın iç ve dış yüzeyi aynı derecede kıvrımlanma geçirmiştir (Şekil VI. 25, 2).

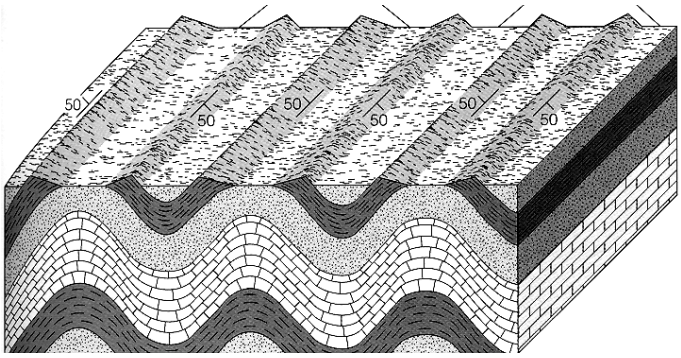
c. Diverjan izogonlu kıvrımlar: İç yüzeyi, dış yüzeyine oranla daha az kıvrılmış olan kıvrımlardır (Şekil VI. 25, 3).



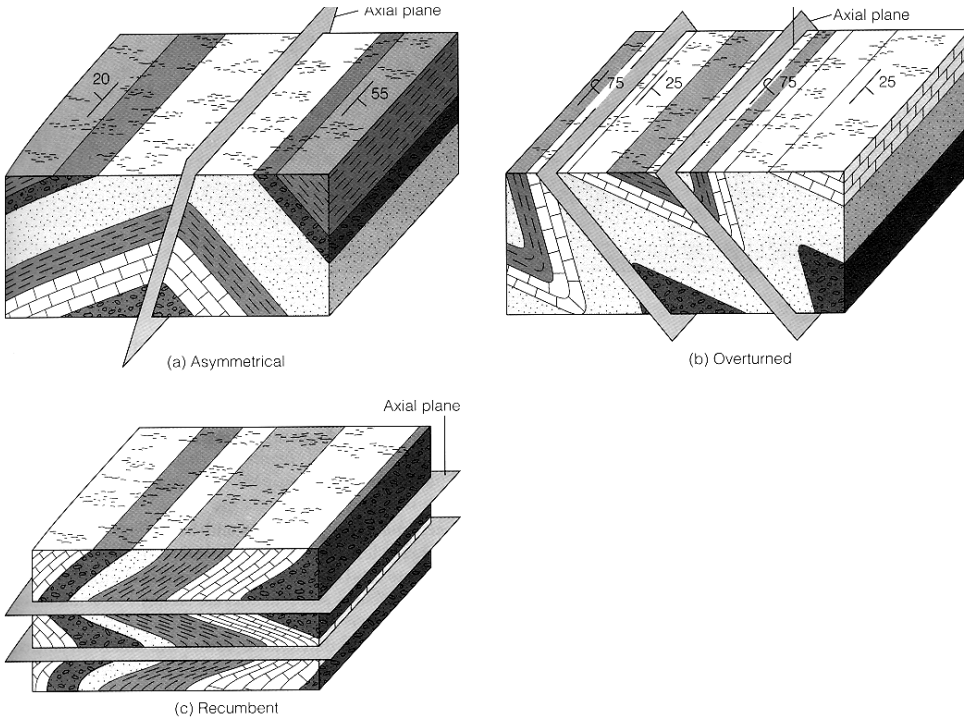
VI.2.5. Kıvrımların yatay ile olan ilişkilerine göre sınıflandırma

a. Dalımsız kıvrımlar (non-plunging folds)

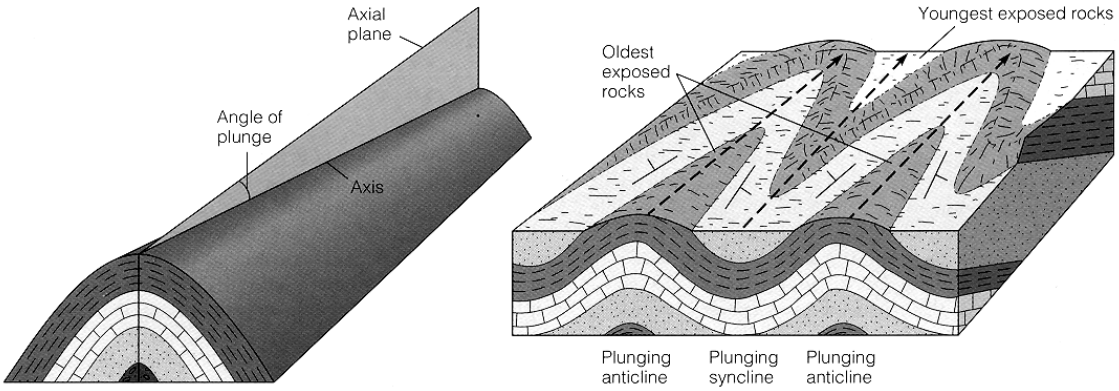
Şekil VI. 26.



Şekil VI.27.



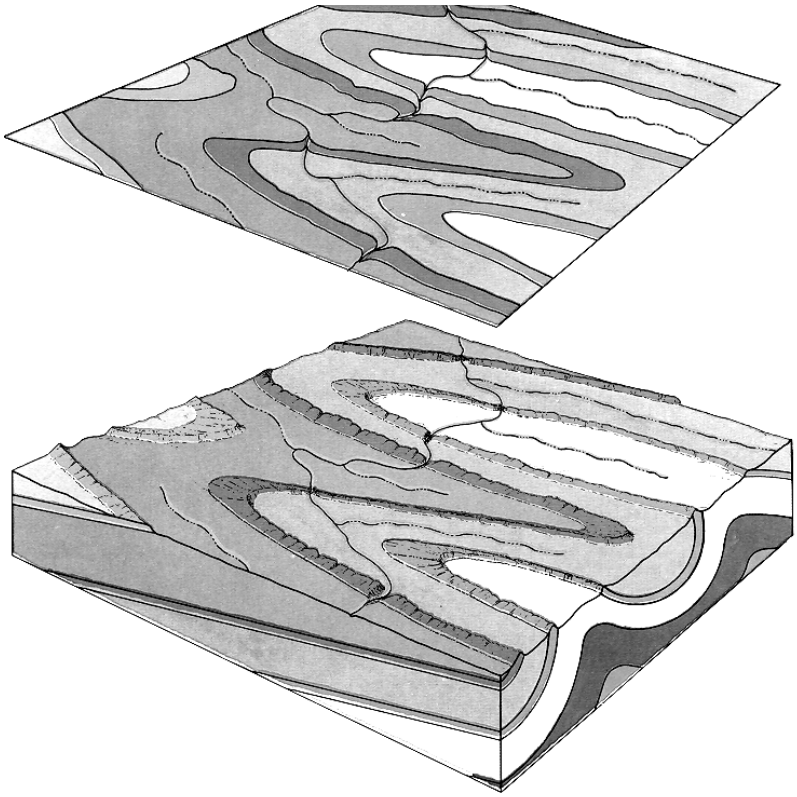
b. Dalımlı kıvrımlar (plunging folds)



Şekil VI. 28.

Jelojik harita

Blok diyagram

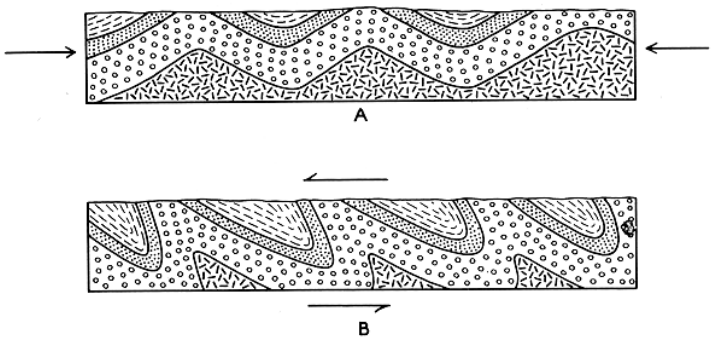


Şekil VI. 29.

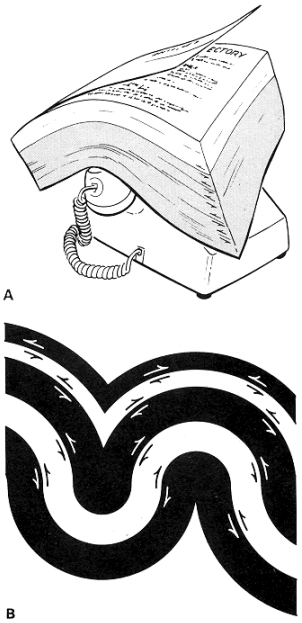
VI.3. **Kıvrımların oluşum mekanizması**

VI.3.1. Fleksür (Konsantrik) kıvrımlanma (Flexure folding)

Sıkışma veya kuvvet çifti etkin rol oynar (Şekil VI. 30). En karakteristik özelliği, kıvrımlanma sırasında tabakaların birbirleri üzerinden kaymasıdır. Yan basınçlar, kıvrım içerisinde tabaka yüzeylerine paralel olacak şekilde hareket ederler (Şekil VI. 31, 32).

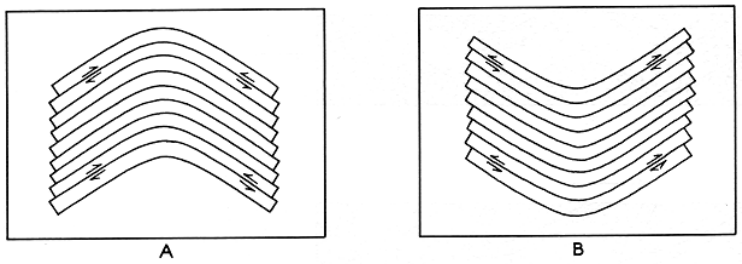


Şekil VI. 30. (Billings 1972)

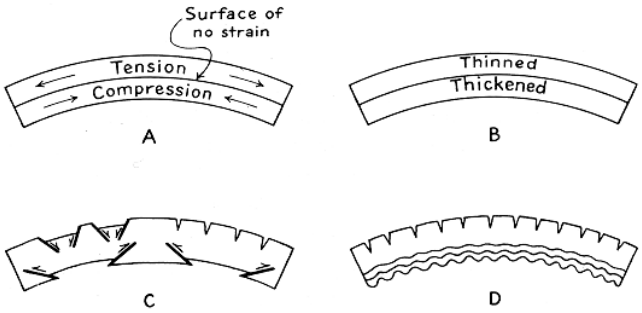


Şekil VI. 31
(Davis and Reynolds 1996)

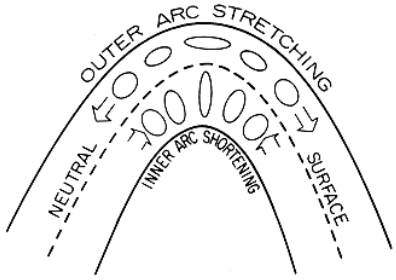
Fleksür kıvrımlanma sırasında kıvrımın dış kısmında tansiyon, iç kısmında ise sıkışma gerilmesi etkin olur. Bunun sonucu olarak kıvrımın dış kesiminde tansiyon çatlakları ve normal faylarla sınırlı horst graben türü yapılar oluşurken iç kısımda ters veya bindirme fayları oluşur (Şekil VI. 33). Orta kesimde bu tür deformasyon görülmez (Şekil VI.34).



Şekil VI. 32. (Billings 1972)



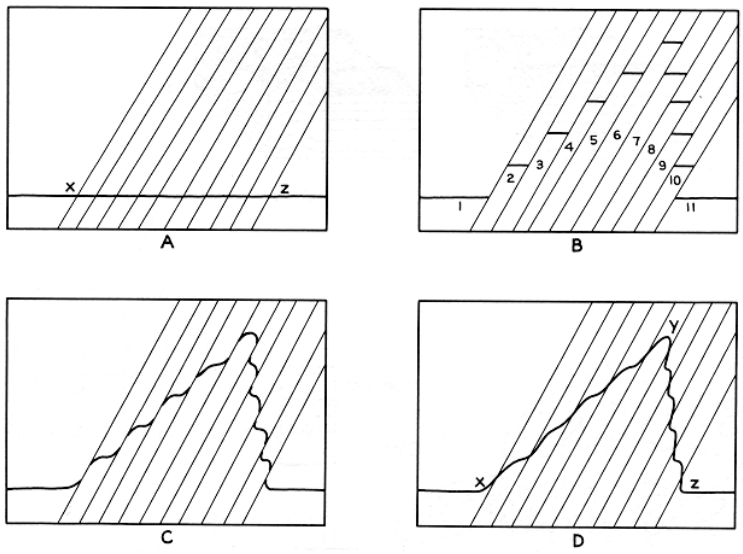
Şekil VI. 33. (Billings 1972)



Şekil VI. 34. (Davis and Reynolds 1996)

VI.3.2. Kesme (Shear) kıvrımlanma (Shear folding)

Tabakaların bazılarına yakından bakıldığında belirli doğrultularda kesme yüzeylerinin geliştiği görülür. Tabaka içinde gelişen iç hareketler, bu tür kesme yüzeyleri boyunca tabakaları kaydırarak kesme kıvrımlanmalarının oluşmasını sağlar (Şekil VI. 35).



Şekil VI. 35.

(Billings 1972)

VI.3.3. Akma kıvrımları (Flow folding)

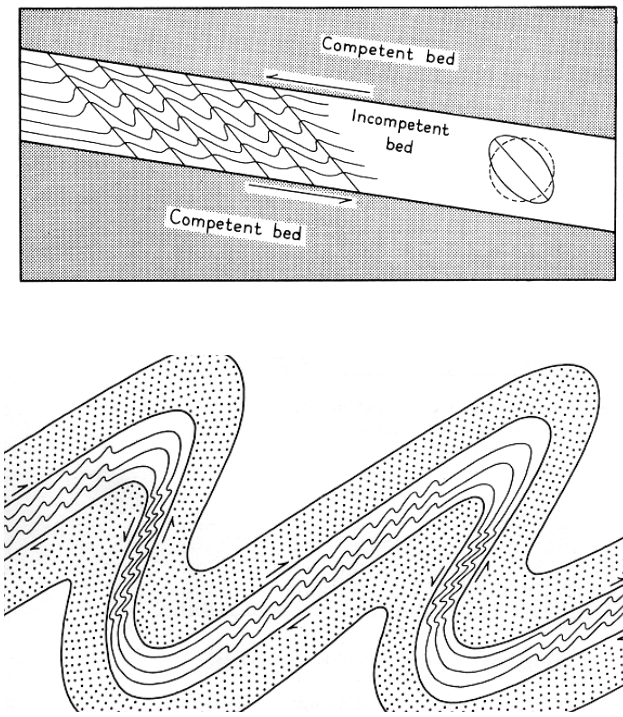
Az-çok akışkan gibi davranan çok yumuşak kayalarda gelişir (Şekil VI. 36).



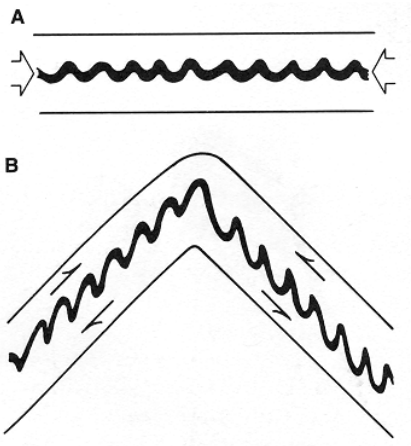
Şekil VI. 36.

VI. 4. Özel deformasyon etkileri

Sürüme kıvrımları (drag folds). Bu kıvrımlar, sert (kompetant) karakterli iki tabaka arasındaki plastik (incompetant) tabakalarda meydana gelir. Kıvrımlanma sırasında birbirleri üzerinde kayarlar. Üst ve alttaki kompetant tabakaların, ortadaki inkompetant tabaka boyunca kaymaları sonucunda inkompetant tabaka içinde küçük ve birbirine benzer kıvrımlar oluşur. Bu tür kıvrımlara **sürüme kıvrımı** denir (Şekil VI. 37, 38).

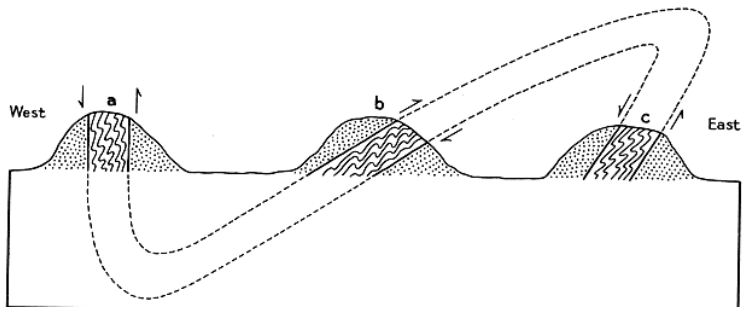


Şekil VI. 37. (Billings 1972)

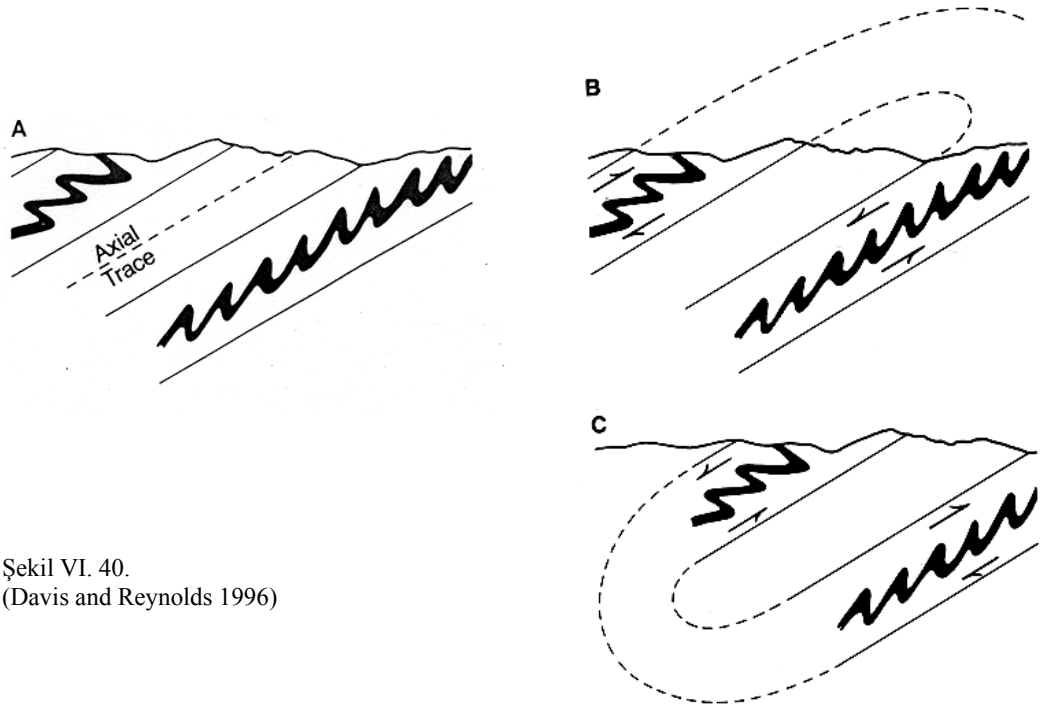


Şekil VI. 38. (Davis and Reynolds 1996)

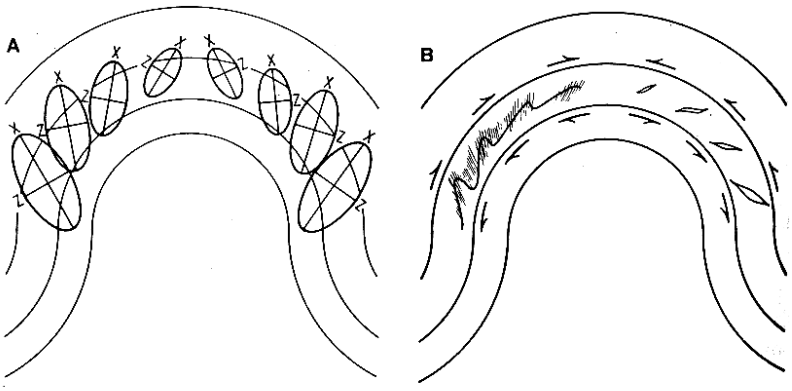
Sürüme kıvrımları ile ana kıvrım yapılarının ilişkisi.
Sürme kıvrımının oluşması için tabaların birbiri üzerinde kayması gereklidir. Sürüme kıvrımı ile kayma yönü, daima belirgin bir ilişki içindedir. Sürüme kıvrımlarının az eğimli kanatları, kayma yönüne az-çok paralel; çok eğimli ve dik kanatları ise, kayma yönüne dik bir gelişim gösterir. Bu ilşki kullanılarak ana kıvrımın türü tespit edilebilir (Şekil VI. 39).



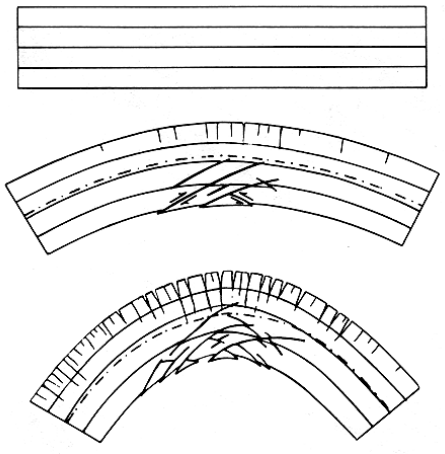
Şekil VI. 39. (Billings 1972)



Şekil VI. 40.
(Davis and Reynolds 1996)



Şekil VI. 41.
(Davis and Reynolds 1996)



Şekil VI. 42.
(Davis and Reynolds 1996)