

MIT Açık Ders Malzemeleri
<http://ocw.mit.edu>

12.113 Yapısal Jeoloji

Kısım 3: Sünümlü deformasyon, kıvrımlar ve dokular

Güz 2005

Bu materyallerden alıntı yapmak veya Kullanım Şartları hakkında bilgi almak için
<http://ocw.mit.edu/terms> ve <http://tuba.acikders.org.tr> sitesini ziyaret ediniz."

İçindekiler

Bölüm 1: Kıvrımlar.....	3
1.1 Şekiller için teşekkür	3
1.2 Okuma.....	3
1.3 Konu ile ilgili terimler.....	3
1.4 Terminoloji ve sınıflama	3
1.4.1 Sınıflama	4
1.5 Kıvrımlarla ilgili geometrik değerlendirmeler	5
1.6 Fay oluşum modelleri	6
1.6.1 Bükülme (buckling).....	6
1.6.2 Düzlem boyunca kayma (flexural slip)	7
1.6.3 Pasif akma kıvrımlanması.....	7
1.6.4 Kıvrım mekanizmalarının birleştirilmesi.....	9
1.6.5 Sayısal modeller.....	11
1.7 Diğer kıvrım türleri: kink kıvrımlar, şevron kıvrımlar, diyapirler.....	12
Bölüm2: Dokular ve deformasyon mekanizmaları.....	14
2.1 Dokular	14
2.1.1 Foliyasyonlar.....	14

Bölüm 1

Kıvrımlar

1.1 Şekiller için teşekkür

Busk inşası şekli dışında bu bölümdeki tüm şekiller Hobbs, H., Means, W., and Williams, P. (1982) *An Outline of Structural Geology*, New York: Wiley and Sons, inc., sayfa 64 - 66.'dan alınmıştır.

1.2 Okuma

Kıvrımlarla ilgili laboratuvarı ve ders notlarını tekrar inceleyiniz. Twiss ve Moores'da iki bölüm kıvrımlara ayrılmıştır. Birincisi (Bölüm 11), kıvrımların sınıflaması ve tanımı ile ilgili olup oldukça sıkıcıdır. İkincisi ise çok daha iyi bir zaman ve enerji yatırımıdır.

1.3 Konu ile ilgili terimler

Her zamanki gibi, anahtar kelimelerin listesi.

Kıvrım tepe çizgisi, kıvrım eksen; kıvrım tepe düzlemi, kıvrım düzlemi; silindirik / silindirik olmayan kıvrım.

Kıvrım tipleri: konsantrik, paralel, benzer.

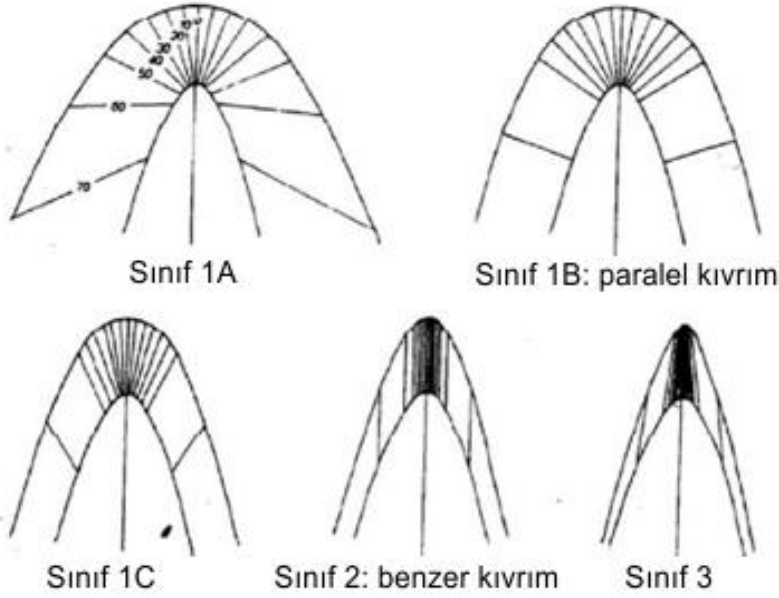
Sıyrıma kıvrımları, şevron kıvrımlar, fay ilerleme kıvrımları, diyapir veya büyüme kıvrımları

Harmonik / disharmonik kıvrımlar, pitigmatik kıvrımlar. Nötr yüzey. Eksen düzlemi foliyasyonu.

1.4 Terminoloji ve sınıflama

Kıvrımların arazi ölçümleri: Ölçüm ve gözlem standart listesi şu şekildedir: kıvrımın silindirikliği, katlı tabakaların kıvrımlanma biçimi (harmonik/disharmonik), kıvrımlanmış tabakaların kalınlığı, kıvrım çevresindeki tabakaların doğrultu ve eğimi, kıvrım tepe çizgisinin oryantasyonu (uzanımı/dalımı), eksen düzleminin oryantasyonu (tepe düzlemi), kıvrımdaki asimetri (S veya Z?), eksen düzlemi foliyasyonunun varlığı, lineasyon kesişimi,

gerilme lineasyonları, kıvrım tepesi veya kanatlarındaki ikincil yapılar (örn. kıvrımda tabakalar arasında kayma, kırıklar, akma verileri).



Şekil 1.1: Kıvrımların Ramsay sınıflaması

Arazide küçük fayların bile dikkatli ölçülmesi ve belgelendirilmesi, (1) kaya birimlerinin dağılımını kontrol eden büyük, harita ölçeğindeki kıvrımların geometrilerinin küçük kıvrım geometrileri ile ilişkili olması, (2) kıvrımların deformasyon şeklinin deformasyon koşulları hakkında bilgi vermesi (sünümlü veya gevrek) nedeniyle çok önemlidir. Ayrıca, (3) kıvrımlanma tektonik taşınma ve kısalmanın bir sonucu olduğu için, kıvrımlanmanın geometrisi ve şekli bölgenin tektonik tarihçesinin ortaya çıkarılması için çok önemlidir.

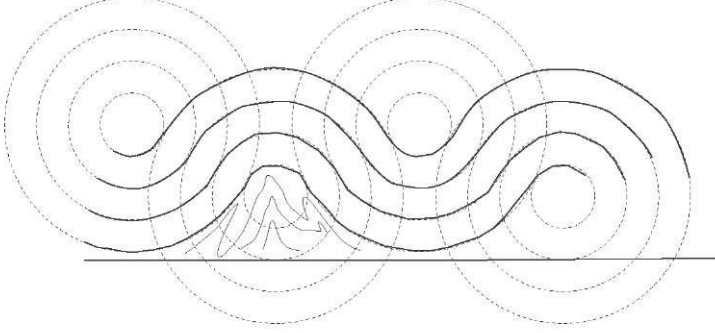
1.4.1 Sınıflama

Kıvrımların arazi ölçümü ve tanımlaması, kıvrımların sınıflaması için bir temel oluşturmaktadır. Kıvrım sınıflama tablolarının geometri (sadece tanımlayıcı sınıflama) ile mekaniğe (oluşum modelini öngören bir sınıflama) dayalı olabildiğine dikkat ediniz. Geometrik sınıflama tabloları oldukça anlaşılması zor olabilir. Ancak, iyi bir sınıflama tablosu oluşum koşulları ve süreçlerdeki farklılıkları yansıtır. Detaylı kıvrım sınıflama tabloları Twiss ve Moores'da Sayfa 220-235 arasında anlatılmaktadır. Geniş anlamda iki (veya üç) kıvrım türü dikkate değerdir: paralel veya benzer kıvrımlar.

Paralel kıvrımlar

Paralel kıvrımlar (Ramsay sınıflamasında Sınıf IB) kıvrımdaki tabakaların dik kalınlığı sabit olan kıvrımlardır. **Konsantrik** kıvrımlar, ortası eğri olan yaydan meydana gelen iç ve dış tabakalardaki paralel kıvrımların özel bir şeklidir. Bu tür faylar, deformasyonun büyük bir kısmının kayaçta kısıtlı miktarda sünümlü

akmaya imkan verdiği üst kabuk tektonik ortamlarında yaygındır. Bunun yerine, deformasyonun çoğunluğu tabaka sınırlarında veya tabakalar boyunca kayma ile dengelenir.



Şekil 1.2: tabaka düzlemleri boyunca kayma "flexural slip" sıyrılma kıvrımlarına ait Busk inşa yöntemi. Kıvrımların tam çekirdeğinde sünümlü deformasyon ve sıyrılma yüzeyinin geometrik olarak gerekli olduğuna dikkat ediniz.

Benzer kıvrımlar

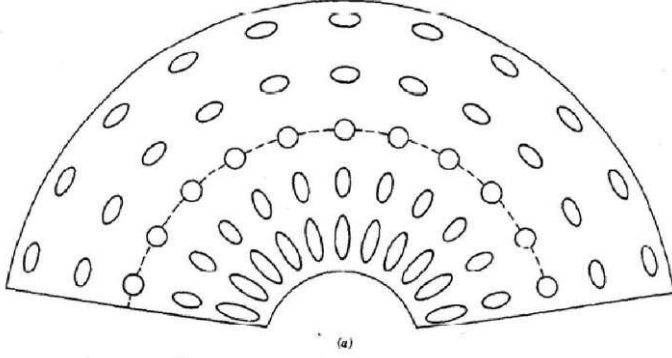
Benzer kıvrımlar (Ramsay'de Sınıf II), paralel eğim izogonları, kıvrım kanatlarındaki nispi incelme ve kıvrım büklüm bölgelerindeki kalınlaşma ile temsil edilir. Bu tür faylar, deformasyonun büyük bir kısmının yaygın sünümlü kaya akmasına imkan veren mekanizmaların etkisiyle olduğu metamorfik sahalarda yaygındır.

1.5 Kıvrımlarla ilgili geometrik değerlendirmeler

Özellikle konsantrik kıvrımlarda, geometri yersel boşluk problemlerinin yanı sıra kıvrımların derindeki devamlılığının belirlenmesine neden olur.

Busk inşa yöntemi, fay geometrilerini tahmin edebilmek için kullanılan bir yöntemdir (Şekil 1.2). Busk kıvrımları, ortak noktada merkezlenmiş çemberlere ait yaylardan oluşan kıvrımlardır. Bu nedenle, bu inşa yöntemi konsantrik fay geometrileri oluşturur. Ancak, Busk inşası kıvrımlanmamış yüzeyde kıvrımların son bulmasını gerektirmektedir. Modelin alt yüzeyinden üst yüzeyine (I3) kadar kıvrımlanmış tabakaların uzunluğu karşılaştırıldığında, uzunlukların oldukça düzensiz ve kıvrımların tabanının (yüzey I0) **sıyrılma** yüzeyi olduğu açıktır. Bu nedenle bu tür faylar sıyrılma kıvrımları olarak adlandırılır (Twiss ve Moores'daki Şekil 11.2 sıyrılma faylarının yüzlekteki örneklerini göstermektedir. Bu kıvrımların ideal konsantrik geometriden uzak olduğuna dikkat ediniz.)

Bir diğerk gereklilik ise "boşluk problemi"ni çözebilmek için belli bir miktar malzemenin antiklinalin tabanına doğru sünümlü olarak akmasıdır: kıvrımlar gerçekten konsantrik bu geometri, yayın yarıçapı küçüldükçe bozulmalıdır. Eğer kıvrımlar zayıf kayaçların üzerinde oluşursa bu malzeme kıvrımın çekirdeğine doğru akmak durumundadır. Bazı durumlarda bu malzeme alana etkiyen basınca bağlı olarak akar ve sünümlü tabakanın basınca uğraması yapının merkezinde "piercement" diyapirlerini oluşturabilir (ne tür bir şeye benzediği konusunda genel bir fikir için Sayfa 102'deki Şekil. 6.9'a bakınız).



Şekil 1.3: Düşme kıvrımlarında yamulma. Şekil, Hobbles, Means ve Williams (1982)'den alınmıştır.

1.6 Fay oluşum modelleri

Kıvrım oluşumu ile ilgili yaygın modeller, bir seri uç üye olasılıklarını ortaya koymaktadır. Modeller birbirinden ayrı değildir ve birçok kıvrım mekanizmasının bir araya getirilmesi, gözlemlenen geometrileri tek bir mekanizmadan daha iyi açıklamaktadır. Bu problemlerle ilgili birçok çalışma olmasına karşın bazı modellerin tümüyle açıklamaktan uzak olduğunu düşünebilirsiniz. Yalnız değilsiniz.

1.6.1 Bükülme (buckling)

Bükülme, nispeten rijit tabakaların iki ucundan itildiğinde meydana gelir (düz bir yüzeye bir parça kağıt koyun ve iki ucunu birbirine doğru yaklaştırın. Bu bükülmedir). Bir tabakanın bükülmesi, tabakanın kalınlığı değişmeyeceğinden dolayı paralel kıvrım geometrileri meydana getirecektir. Bilinmesi gereken önemli şey, modelin özgün bir yamulma şeklini öngörmekte olup olmadığının ve bu modelin gerçekte arazide bu şekilde olup olmadığının kontrol edilebilmesidir.

Bükülme kıvrımlarının karakteristik özellikleri:

(1) Antiklinal şeklinde kıvrımlanan tabakaların üst kesimi genişlemeye, alt kesimi ise sıkışmaya maruz kalacaktır. Sıkışma ve genişleme alanlarını birbirinden ayıran

nötr yüzeyler tanımlayabilirsiniz. Bu yüzeyde malzeme noktaları hiçbir yamulmaya uğramazlar.

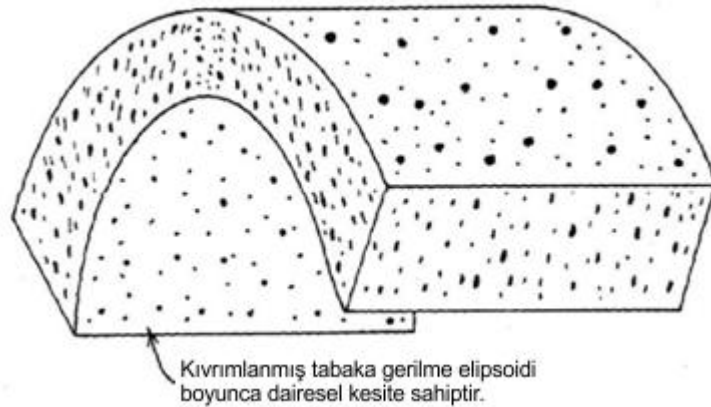
(2) Deformasyon sadece kıvrım ekseninde bükülme şeklinde gerçekleşir. İdeal olarak, kıvrım eksenine paralel genişleme yoktur. Bu **düzlemsel yamulmanın** bir örneğidir.

(3) Sıkışma ve genişleme ile ilgili yamulma nötr yüzeyden uzaklaştıkça artar.

1.6.2 Düzlem boyunca kayma (flexural slip)

Bu kayma telefon rehberinin veya oyun kartlarının kıvrımlanması şeklindedir. Burada kıvrımların, bükülen tabakalara paralel yüzeyler boyunca meydana gelen makaslama ile oluştuğu kabul edilmektedir. Bu model paralel kıvrımlar meydana getirir. Önemli özellikleri:

- 1) Deformasyon kıvrım ekseninde bükülme şeklinde ve kıvrım eksenine dik doğrultudaki kayma yüzeylerindeki makaslama ile gerçekleşir. Bu da düzlemsel yamulmadır. Kıvrım eksenine orta asal yamulma eksenine paraleldir.
- 2) Tabaka kalınlığını korur. Ancak, nötr yüzeyler yoktur.
- 3) Kıvrımlanmış tabaka yamulma elipsleri boyunca dairesel kesite sahiptir.
- 4) Kıvrım kesiti, yamulma elipsinde açılan yelpaze şekli gösterir.
- 5) Kıvrım yüzeyindeki pasif çizgisel işaret/belirteç, kıvrım eksenine göre oryantasyonunu koruyacaktır. Kıvrımlanmadan sonraki lineasyonun stereoplot çizimi kıvrım ekseninde küçük çember oluşturacaktır.



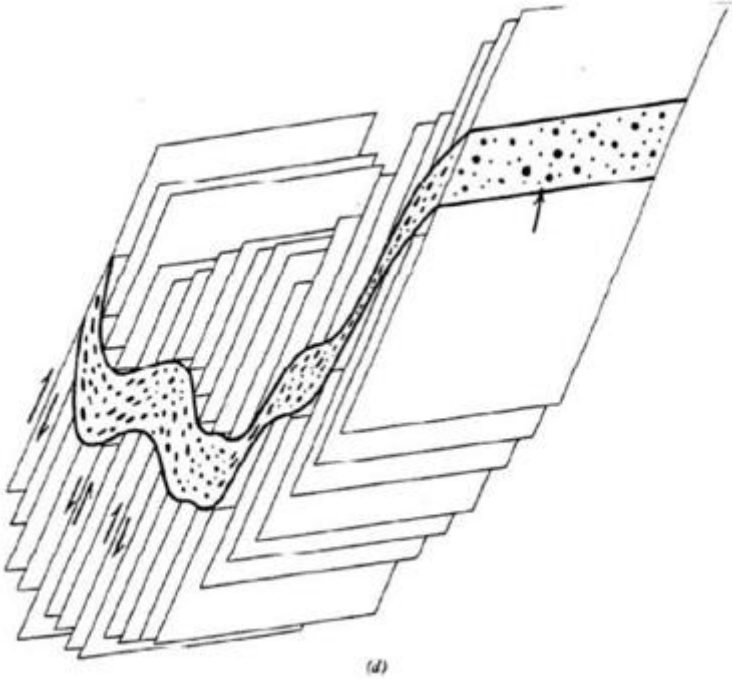
Şekil 1.4: Tabaka boyu kayma gösteren kıvrımlarda yamulma. Şekil HMW(1982)'den

1.6.3 Pasif akma kıvrımlanması

Kıvrımlanmış bir tabakanın, kıvrımlanma sürecinde mekanik bir etki yapmadığı varsayılır. Bu pasif belirteçtir/işarettir. Kıvrımlar, kıvrımlanan tabakalara verev

olan sıkı paketlenmiş yüzeyler boyunca diferansiyel akma veya kayma ile oluşur. Bu durum, benzer kıvrımları oluşturacaktır. Karakteristik özellikleri:

- 1) Bu da düzlemsel yamulmadır. Makaslama düzlemlerindeki basit makaslama ile deformasyon. Makaslama düzlemleri yamulma elipsoidinde dairesel kesitlerdir.
- 2) Makaslanma doğrultusu oldukça değişken olabilir. Tek şart, makaslama düzleminin tabakaya paralel olmamasıdır. Ancak, maksimum kıvrım genliği, makaslama doğrultusu kıvrım eksenine dik olduğunda gerçekleşir.
- 3) Kıvrımın eksen düzlemine paralel düzlemde tabaka kalınlıklarında bir değişim gözlenmemektedir. Ancak, makaslama düzlemine dik, tahmini makaslama doğrultusuna paralel yönde incelendiğinde kıvrımların tepe noktaları ve kanatlar arasında büyük değişim gözlenmektedir. Bu değişim, kanatlardan tepe noktasına bir malzeme akışı olmamasını gerektirir.
- 4) Makaslama düzleminin hareket belirteçleri aynı kıvrımda kanattan kanata değişir. Yamulma elipsleri ve yamulmanın asal eksenleri açılan yelpaze oluşturur.
- 5) Nötr tabaka yoktur ve yamulmalar tabakanın her noktasında sabittir.
- 6) Konsantrik kıvrımlardan farklı olarak, bu kıvrımlar büyük uzunluğa sahip harmonik kıvrımlar olabilir.
- 7) Pasif çizgisel işaret çarpılır ve kayma doğrultusuna doğru rotasyona uğrar. Kayma doğrultusu hiçbir zaman kıvrımın tepe çizgisine paralel olmadığı için başlangıçtaki çizgisel markerler kıvrım tepe çizgisine hiçbir zaman paralel olmayacaktır.
- 8) Tabakaların kalınlığı ile kıvrımların dalga boyu arasında bir ilişki yoktur.



Şekil 1.5: Pasif akma kıvrımlanması. HMW(1982)'den alınmıştır.

Bu model niçin eksiktir.

Pasif kayma veya pasif akma ile kıvrım oluşturabilirsiniz. Ancak gerçekte ne olmaktadır? Metamorfik sahalarda yaygın olarak gözlenen kıvrım türlerini açıklamak için bir modele ihtiyacımız olduğunu hatırlayınız. Bu tür sahalarda kıvrımlar tipik olarak, (1) benzer kıvrım geometrisi, özellikle kanatlarda incelme ve tepede (nispi) kalınlaşma, (2) kıvrım tepe çizgilerine paralel gerilme lineasyonları, (3) yaygın disarmonik kıvrımlanma, (4) tabaka kalınlığı ve kayaç dayanımı ile dalga boyu ve kıvrımlanma türü arasında açık ilişki ile karakterize edilir. Pasif akma kıvrımlanması (1)'i gerçekleştirebilir. Ancak, (2), (3) ve (4)'ü gerçekleştirmede başarısız olur.

Daha önemlisi ise kayma yüzeyinin varlığına ait bir veri olup olmadığıdır. Benzer kıvrımlar genelde eksen düzlemi foliyasyonu ile ilişkilidir ve düzlemde olası bir kayma yüzeyi olabilir. Ancak, foliyasyon düzlemleri veya klivaj boyunca atım (yani kayma verisi) yaygın değildir ve olanlar ise daha çok basınç çözülmesinin etkileridir. Bu yüzeyler üzerinde makaslama var ise kıvrım eksenini ile yüksek açılı bir oryantasyona sahip gerilme lineasyonları görmemiz beklenir. Daha yaygın olarak, gerilme lineasyonları kıvrım eksenine paraleldir. Son olarak, eksen düzlemi yüzeyleri yamulma asal düzlemleridir. Bu yüzeylerde makaslama olmamalıdır.

1.6.4 Kıvrım mekanizmalarının birleştirilmesi

Üç basit model bazı problemlerden etkilenirler.

1. Paralel veya ideal benzer kıvrımlar oluştururlar. Ramsay sınıflamasında bunun anlamı Sınıf IB ve Sınıf II kıvrımlardır. Ancak doğada Sınıf IC ve Sınıf III kıvrımlar daha yaygındır.
2. Kıvrımların **düzlemsel yamulma** ve **basit makaslama** koşullarında oluştuğu kabul edilir. Ancak, bu oldukça basit bir yamulma rejimidir. Doğru olması olası görünmemektedir.
3. Yukarıdaki mekanizmalar ortaç yamulma eksenini λ_2 'nin kıvrım eksenine paralel uzandığını kabul eder. Bunun anlamı baktığımız her yerde gerilme lineasyonlarını kıvrım eksenine dik görmemizdir. Çok daha yaygın olarak, özellikle yüksek dereceli metamorfik sahalarda gerilme lineasyonu kıvrım tepe çizgisine paraleldir.
4. Kıvrımlarda gözlenen en yaygın ikincil yapılardan birisi eksen düzlemi foliyasyonu veya eksen düzlemi klivajıdır. Bu yapı, çok değişik kayaç türlerinde, kıvrım geometrisinde ve kristal-plastik deformasyon ile ilişkili düşük-yüksek dereceli dokulara neden olan metamorfizma derecesinde gelişmektedir. Sadece pasif akma kıvrımlarında (dolaylı olarak) deformasyon sırasında foliyasyon gelişmektedir. Ancak bu durumda, eksen düzlemi foliyasyonunun kayma yüzeyi olduğu yorumu sorgulanmaya açıktır.

Ayrıca teorik modeller kıvrımların bazı temel özelliklerini yok sayabilirler. Bu özellikler, kıvrımların **tabakalı** istiflerde oluşması ve tabakalar arasında **dayanım farklılıkları** olmasıdır. Gerçekte dayanım farklılıklarının kıvrımların oluşabilmesi için *gerekli* oldukları görülmektedir (bu metamorfik kayalar için kesinlikle doğrudur).

Kıvrımların dalga boyu: tabaka kalınlığının bir fonksiyonu

Viskoz malzemelerin kıvrımlanması üzerine yapılan teorik ve deneysel çalışmalar son gözlem ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Kıvrım dalga boyu tabaka kalınlığının ve **dayanım farklılığının** bir fonksiyonudur. Alttan ve üstten zayıf malzeme ile sınırlanan sert tabakadaki kıvrımın baskın dalga boyu aşağıdaki formülle açıklanabilir.

$$\lambda_i = 2\pi h \sqrt[3]{1/6 \frac{\eta_1}{\eta_2}}$$

burada h tabakanın kalınlığı, η her bir tabakanın viskozitesidir. Dalga boyunun doğrudan tabaka kalınlığına ve viskozite kontrastına bağlı olduğuna dikkat ediniz.

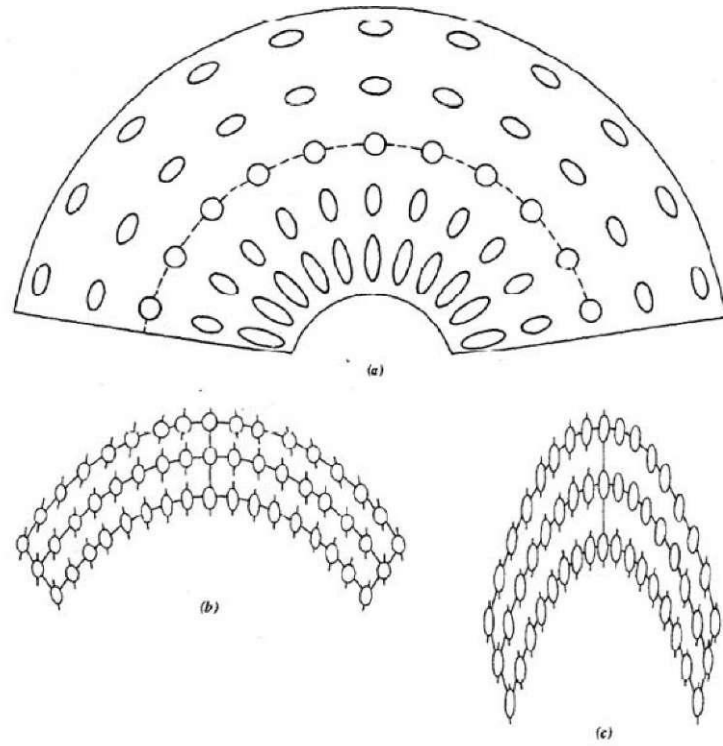
Kıvrımların dalga boyu: çoklu tabakalar

Çoklu tabaka topluluğu, yani η_1 ve η_2 viskozitelerine sahip tabakalar ardalanıyor olsun. Birkaç tabakanın varlığı yukarıda belirtilen eşitlikteki ilişkileri değiştirir.

$$\lambda_i = 2\pi h \sqrt[3]{\frac{1}{6n^2} \frac{\eta_1}{\eta_2}}$$

Burada n tabaka sayısıdır. Tabaka sayısı ile bağlantının varlığı söylenebilir. Ancak, göreceli viskozite ve tabaka kalınlıkları birinci derecede kontrol eden faktörlerdir.

Farklı özgün dalga boylarına (yani belli kalınlık ve viskozitedeki her bir tabakanın kıvrımlandırıldığında meydana gelen dalga boyu) ve birlikte kıvrımlanan birkaç tabakayı incelediğinizde bazı karmaşıklıklar ortaya çıkar. Tabakalar arasında yeterli mesafe olduğunda her tabaka birbirinden bağımsız hareket edecektir ve her birinin kendine özgü bir dalga boyu olacaktır. Bu durum disharmonik kıvrımlanmayı üretmektedir. "Yeterince" mesafenin buradaki anlamı o tabakanın özgün dalga boyunun $1/2$ ile $1/4$ 'ü arasındadır.



Şekil 1.6: Düğme kıvrımın, daha gerçekçi geometri ve yamulma dağılımı oluşturan homojen kısalma ile birleştirilmesi.

Tabakalar birbirlerine yaklaştığında ise aralarında bir etkileşim meydana gelir. Daha ince tabaka kıvrımının iki dalga boyunu göstermektedir. Daha büyük dalga boyuna sahip olanı yakınındaki daha kalın tabaka tarafından kontrol edilmekte ve bu kalın tabakanın özgün dalga boyu ince olanın üzerine gelişmektedir.

Polijenetik modeller: daha gerçekçi kıvrım geometrileri için araştırma

Daha gerçekçi kıvrım geometrileri birçok mekanizmanın birbirleri ile birleştirilmesi ile veya fazla miktardaki homojen kısalma ile üretilebilir. Şekil 1.6 kıvrımlanmış dilimdeki yamulma dağılımını göstermektedir. Dilim nötr-yüzeye sahiptir (a) ve %20 (b) ve %50 (c) seviyesinde homojen kısalmaya maruz kalmıştır. (Sayfa 243-245, Şekil 12.12 ve 12.13'e ve tartışmaya bakınız).

1.6.5 Sayısal modeller

Şekil 1.7 kıvrım oluşumunun sayısal modellemesine ait sonuçları göstermektedir. Bu şekil, homojen viskoz tabaka arasındaki tek viskoz tabakanın deformasyonunun ilk simülasyonudur. İnce çizgiler her noktadaki kısalma asal eksenine dik çizilmiştir. Farklı viskoziteler için üç durum gösterilmektedir. Viskozite kontrastı azaldıkça kıvrımlanmanın öneminin (homojen saf makaslama kısalmasına göre) azaldığına dikkat ediniz. Ayrıca, iki tabaka arasındaki sınıra

yakın kesimde gelişmiş yamulmaya ait asal eksenlerde oluşan sapmaya da dikkat ediniz.

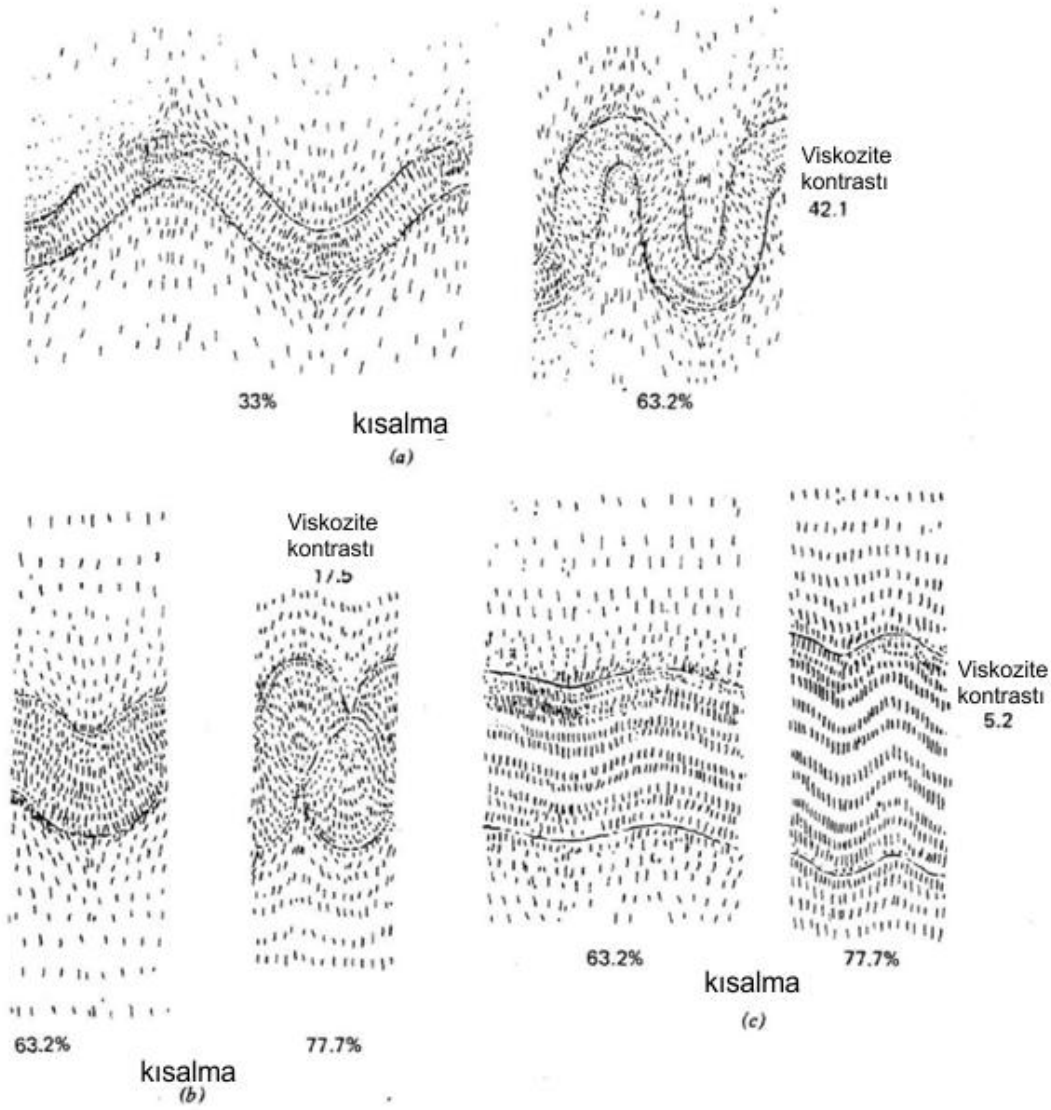
1.7 Diğer kıvrım türleri: kink kıvrımlar, şevron kıvrımlar, diyapirler

Kink kıvrımlar, düz kanatları ve keskin tepesi olan asimetric kıvrımlardır. İki uzun kanadı birbirine bağlayan kısa kanat şeklindedir. Kink geometrileri, kıvrım ve bindirme kuşaklarına ait enine kesitlerin oluşturulmasında çoğunlukla ideal kıvrım geometrilerine benzetilmiştir. Ancak, benzetmenin yanısıra gerçekten bu kıvrımlar vardır. Kink band oluşumunun birçok modeli:

1. Kink band sınırının deforme olmamış malzemeye göçü.
2. Kink band geometrileri göç etmezler. Ancak bunun yerine biri diğerine göre rotasyona uğramış ve makaslanmış tabakalardaki küçük makaslama zonu sınırlarını işaret eder.

Şevron kıvrımlar, tamamen düz kanatları ve çok sıkı kıvrım büklümü olan asimetric kıvrımlardır. Şevron kıvrımı oluşumu ile ilgili bir model, büyüyen kink bantların etkileşimi sonucu olduğunu kabul eder. Bundan başka, şevron kıvrımlar kıvrım büklümünde yoğunlaşan yamulma ile meydana gelen tabaka boyunca kayma sonucu oluşabilir. Tabakalar sonlu bir kalınlığa sahip olduğunda kıvrım büklüm yerinde boşluklar oluşacaktır. Bu boşlukların, damarlanmanın ve akışkan göçünün olduğu bir yer olmasını bekleyebilirsiniz.

Diyapirler, yan kayaçlarına düşey olarak sokulduğu görülen antiformal domlardır. Tuz ve basınca maruz şeyller diyapir yerleşimiyle ilişkili yaygın malzemelerdir. Daha büyük ölçekte, yüksek dereceli gnaylarda doma benzer yükselimler dağ kuşaklarının iç kesimlerinin temel özelliğidir. Genelde, diyapir yerleşiminin yoğunluk farkı gerektirdiği düşünülmektedir. Gözlemlerle ve viskoz davranışa sahip malzemelerin yardımıyla diyapir ve dom yükselimi modelleri ile desteklenen bir görüş, tuzun tipik olarak taşlaşmış tortullardan daha az yoğun olduğunu işaret etmektedir. Yüzdürülebilirlik özellikleri bir kenarı bırakıldığında, diyapirlerdeki malzemenin zayıf olması şarttır ve bu nedenle yönlü basınca göre akarlar. Birçok nedenden dolayı diyapirlerin kanatlarındaki basınç diyapirin merkezindeki basınçtan daha yüksektir. Böylelikle malzeme, yanal olarak diyapire, daha sonra yukarı, diyapire doğru hareket eder. Zayıf malzemelerdeki diyapir benzeri akmanın, sıyrılmaya kıvrımı ortamlarındaki antiklinallerin çekirdeğinin dolmasına neden olduğu dikkate alınmalıdır.



Şekil 1.7: Kıvrım benzetimlerinin sayısal modelleri. HMW(1982)'den alınmıştır.

1.8 Gözden geçirme soruları

1. Tabaka boyu kayma ve pasif akma kıvrımı çiziniz. Kıvrımlanmış tabakalar boyunca beklenen hareket yönünü çiziniz.
2. Pasif belirteç (marker) olarak hareket eden bir lineasyonun olduğu tabakayı ele alınız. Üç ana kıvrım oluşum modeline göre tabaka kıvrımlandığında lineasyona ne olur? Burada anahtar nokta, kıvrımlanmanın pasif belirtecin rotasyonuna neden olup olmayacağıdır. Yani, lineasyonun bulunduğu tabakadaki yamulma elipsoidi dairesel kesite mi sahip (rotasyon yok), yoksa değil mi?
3. Mükemmel bir yukarı doğru tabaka boyu kayma gösteren kıvrımda, derinlikle birlikte kıvrıma ne olur? Neden?

Bölüm 2

Dokular ve deformasyon mekanizmaları

2.1 Dokular

Doku, bir kayadaki bileşenlerin (**doku elemanları** olarak adlandırılır) özel bir şekilde düzenlenmesidir. Bu düzenlenme, genellikle düzenlidir. Örneğin, tortul kayaçların yatay tabakaları bir tür dokudur. Ancak biz, düzenli olmadığını belirten **rastgele doku** tanımlamasını da kullanırız. **Birincil** ve **ikincil (tektonik)** dokuları birbirinden ayırt ederiz. Birincisi, magmatik akma lineasyonu, tortul laminalanma, tabakalanma ve akma foliasyonu gibi dokulardan oluşur. İkinci doku ise deformasyon sonucu oluşurlardır. Tüm ölçeklerde gözlenen diğer bir ayırım ise **penetratif** veya **sürekli** dokudur. Bunların zıt karşılığı **penetratif olmayan** veya **aralıklı** dokudur. Burada doku elemanları arasında belirgin bir boşluk vardır (örneğin çözülme klivajı çizgileri veya kırıklar). Son olarak, dokuları **düzlemsel (foliasyon** olarak adlandırılır) ve **çizgisel (lineasyon)** şeklinde ayırt edebiliriz.

2.1.1 Foliyasyonlar

Foliyasyon, her türlü düzlemsel doku için kullanılan genel bir terimdir. Tabakalanma, laminasyon, akma foliasyonu, klivaj, şistozite ve gnaysik doku foliyasyona dahildir. Birçok foliyasyon özel bir yamulma asal eksenli oryantasyonu ve özel tektonik ortamın ürünüdür. Kayaca bağlı olarak tektonik foliyasyon, aralıklı kırık klivajı, sleyt klivajı, krenülasyon klivajı, şistozite ve gnaysik dokudan meydana gelir.

Kayaçlar, ilksel (örn. Tabakalanma) ve birçok tektonik olayla ilişkili dokuların kaydını tutabilirler. Bunların göreceli zamanlaması, kesme kesilme ilişkileri ile çözülmektedir. Dokuların fiziksel görünümü sonunda malzemeyi, metamorfik dereceyi ve yamulma oranlarını yansıtır. Bu nedenle dokuların dikkatli incelenmesi ve analizi, deforme bir kayacın tektonik tarihçesinin ortaya çıkarılmasında hayati öneme sahiptir.

Klivaj

Klivaj, bir kayacın düzlem boyunca ayrılmasını sağlayan ikincil (tektonik) bir dokudur. En klasik örneği sleyttir. Sleytte, klivaj mükemmel olması nedeniyle kayaçlardan kolaylıkla bilardo masası ve çatı malzemesi olarak kullanılabilir ince, düz dilimler üretilmektedir.

Ayrıran (disjunctive) klivaj Birbirine yaklaşık paralel olan doku bölgesi (klivaj bölgesi olarak adlandırılır) ile tanımlanan bir çeşit aralıklı klivajdır. Her doku bölgesinde tipik basınç çözülmesi verileri vardır (bundan dolayı sıkça **çözünme klivajı** veya **stilolitik klivaj** olarak adlandırılır). Bu bölgeler mikroliton olarak adlandırılan mesafelerle ayrılırlar. Klivaj bölgelerindeki genişlik (dolayısıyla mikrolitonların genişliği) oldukça değişken olup genelde santimetre ölçeğinde gözlenir.

Kalem klivajı Bu klivaj uzun, kalem benzeri parçalanma gösteren kayaçlar ile temsil edilir. Kalem klivajın, (1) killerin tercihli yönelimine (tortullaşma ve sıkılaşma sırasında ayrılan killer) ve (2) tabakaya paralel kısaltmaya dik veya kıvrım düzlemlerinden meydana gelen iki aralıklı klivajın kesişmesinden kaynaklandığı görülmektedir. Bu durum, kırıntılı killerin kıvrımlanmasına ve rotasyona uğramasına, ince taneli çözünebilir minerallerin çözünmesine ve yeni kil minerallerinin kristalleşmesine neden olur. İlksel tabaka ayrılması yeni oluşan klivaj (aralıklı, olasılıkla oldukça zayıf gelişen) ile yüksek açıda kesiştiklerinde kalem klivajı meydana gelir. Daha fazla yamulma ile ilksel ayrımlanmanın silinmesi ve sleyt klivajı oluşması mümkündür.

Sleyt klivajı Sleyt klivajın oluşum süreçleri yukarıda özetlenen süreçler ile aynıdır. Bu süreçler, kırıntılı killerin rotasyonu ve kıvrımlanması, basınç çözülmesi ve kil minerallerinin yeniden kristalleşmesidir. Buradaki fark, klivaj bölgelerinin daha sıkı paketlenmesi ve dokunun tümüyle penetratif ve düzenli olmasıdır. Sleyt klivajı oluşumu düşük dereceli metamorfizmanın başlaması, özellikle smektitten (zayıf düzenli kil) illite (çok daha düzenli kil) geçiş ile eş zamanlıdır. Bu geçiş, sıcaklığa duyarlıdır ve XRD (X-Işınları difraktometresi) ile ölçülebilmektedir.

Fillitik klivaj ve şistozite Fillitik klivaj, düşük derecenin karakteristik özelliğidir. Kil ve mika minerallerinin tercihli yönelimi sonucunda meydana gelirler. En düşük metamorfik derecede kil mineralleri illit olacaktır ve daha yüksek derecelerde ise beyaz mika (serisit/muskovit) ve klorite doğru geçiş gösterecektir. Klivajın deformasyon ile eş yaşlı olarak oluşması durumunda fillosilikat mineralleri güçlü bir tercihli yönelimle büyüyeceklerdir. El örneğinde fillosilikat minerallerinin tercihli yönelimi çok güçlü ayrılma düzlemleri veya klivaj meydana getirmektedir. Ancak, fillosilikatlar çok ince tanelidir ve mineraller genellikle büyütme olmadan görülemezler. Daha yüksek metamorfik derecelerde serisit-klorit, muskovit ve/veya biyotite dönüşür ve tek bir mika minerali yakından incelendiğinde görülebilir. Bu noktada kayaç şist olarak adlandırılır. Şist kayaçları genellikle içerisindeki metamorfik mineral topluluklarına göre adlandırılır (biyotit, muskovit, granat, stavrolit, kyanit v.b.)

Krenülasyon klivajı . Yakın aralıklı klivaj (bunlar sleyt klivajı, fillitik klivaj veya şistozite olabilir) içeren kayaçlar ilksel dokuyla düşük açı yapacak şekilde sıkışmaya maruz kaldığında eski dokuda küçük ölçekli kıvrımlar oluşur. Bu durum, karakteristik akordiyondaki körüklere benzeyen "buruşuk" görünümü oluşturur. Çok düzenli sıkı aralıklı klivaj kıvrımlandığında, küçük kıvrımların aralığı çok düzgün olur ve kıvrım tepe çizgileri ile kanatları düzenli bir şekilde dizilirler. Olasılıkla kanatlardaki basınç çözülmesi veya makaslama incelmeleri, krenülasyon klivajı adı verilen yeni bir foliyasyon meydana getirir. Krenülasyon klivajı simetrik veya asimetrik olabilir. Son olarak, basınç çözülmesi (malzemeyi kanatlardan kıvrım bükümüne taşımaya eğilimli) ve kanatların makaslanması, ilk dokunun neredeyse tamamen yok olmasına öncülük eder. Bu süreç **yer değiştirme** (transposition) ve oluşan yeni doku da **yer değiştirme foliyasyonu** olarak adlandırılır.

Gnaysik bantlaşma. Gnaysik tabakalanma metamorfik kayaçlardaki kaba(milimetreden onlarca santimetre ölçeğinde) bileşimsel tabakalanmadır. Bu bileşimsel bantlaşma birkaç farklı yolla gerçekleşir. **İlksel bantlaşma** veya tabakalanma, ilksel tortul tabakalanmadan veya tortul protolitten gelen bileşimsel farklılıklardan oluşmaktadır. Yerdeğiştirme tabakalanması izoklinal kıvrımlanma veya ilksel tabakanın kıvrım kanatlarının makaslanması sonucu oluşur. Bileşimsel tabakalanma ise metamorfik ayrımlaşma veya ergiyiklerin tabakalanma boyunca veya foliyasyondaki makaslamalar boyunca enjeksiyonu sonucu oluşabilir.

Foliyasyonlar ve kıvrımlar

Düzlemsel dokular makaslama zonunda oluşabilir. Ancak genelde kıvrım toplulukları ile bir tür geometrik ilişki içerisindedirler. Daha spesifik olarak, kıvrımlanmış kayaçlarda düzlemsel dokular genelde kıvrımın eksen düzlemine paraleldir. Durumun her zaman böyle olmayacağını gösteren örnekleri düşününüz (kuvarsit ve şeyl aralanmasının kıvrımlanmış olduğunu düşününüz). Kıvrımlanmış sahalarda foliyasyon son derece kullanışlıdır. Eğer gerçekten eksen düzlemine paralel (veya paralele yakınsa) ise kıvrımlanmış tabakanın ve foliyasyonun kesişimi kıvrım eksenine paralel bir çizginin oluşmasını sağlayacaktır. Bundan başka tabaka ve eksen düzlemi foliyasyonu arasında, kıvrım kapanım konumunun tahmin edilmesine imkan veren özel bir geometrik ilişki vardır. Bunlar kıvrımlı sahaların genel jeolojisinin anlaşılmasında anahtar niteliğindeki ilişkilerdir. Twiss ve Moores'daki 13.5 bölümünü inceleyiniz. Çoklu deformasyonun olduğu sahalarda sinformal antiklinaller ve antiformal senklinaller ve bunun gibi yapılar olabilir. Bunları incelemenin yolu gençleşme ilişkisini belirlemek ve eksen düzlemi dokusu ve yapının kanatları arasındaki geometrik ilişkiyi ortaya çıkarmaktır.

Foliyasyon bir kez oluştuğunda daha sonra başka bir deformasyonla şekil değiştirebilir. Bazı süreçler: makaslama sırasındaki rotasyon (farklı rotasyon mekanizmaları için Şekil 14.4'e bakınız), küçük ölçekli kıvrımlanma (krenülasyon),

yeniden kristallenme/rekristalizasyon. Düzlemsel ve çizgisel dokunun oluşumu ve değişmesi ile ilgili olarak Twiss ve Moores'daki 13. ve 14. Bölümlere bakınız (bunlar kısa bölümlerdir). Porfiroblastlar (örn. Granat) ve düşük yamulma kuşaklarındaki (sonradan oluşan kıvrımların tepe çizgileri) ilksel dokuların korunması, S1, S2 ve S3 gibi belirteçler, jeologlar tarafından kullanılmıştır. Çok özel öneme sahip diğer konu ise, yerdeğiştirme foliyasyonudur. Bu tür bir doku kompozittir. Farklı evrelerde gelişen düzlemsel yapıların paralel olduğu görülür. Yaygın durum, tektonik dokuya paralel bileşimsel tabakalanmayı (örneğin tabakalanma, S0 S0 olarak adlandırılır) bulmaktır. Bu nasıl olur? (13. Bölüm).

2.1.2 Lineasyonlar

Lineasyon, bir kayaç içerisindeki çizgisel doku için kullanılan kökensel bir terimdir. **Kesişim lineasyonu** iki düzlemin kesişimi ile oluşur. Tipik olarak kesişim lineasyonu kıvrımlanmış tabaka ile kıvrımdaki eksen düzlemine paralel klivajın kesişimi sonucu oluşurlar. Bu durumda kesişim lineasyonu kıvrım tepesine paraleldir ve bu nedenle kesişim lineasyonunun oryantasyonunun gözlenmesi bölgedeki kıvrımların geometrisi hakkında faydalı bilgi sağlayacaktır. **Mineral lineasyonu**, özellikle amfibol gibi iyi gelişmiş uzun eksene sahip minerallerin tercihli yönelimi ile belirlenir. Metamorfik minerallerin oryantasyonu sıklıkla yamulma durumunu yansıttığı için minerallerin başta kıvrım tepe çizgilerine paralel olmak üzere asal yamulmaya paralel olarak uzandığı yaygın olarak görülmektedir. **Gerilme lineasyonları**, belirgin bir uzun eksene sahip, gerilmeye maruz kalmış kayaçların belli kesimleri ile tanımlanır. Örneğin, aşırı yamulmaya uğramış konglomeradaki çakılların uzun eksenleri boyunca belirgin bir tercihli yönelimi sıkça gözlenmektedir. Daha küçük ölçekte, her bir mineral (kuvars taneleri gibi) gerilebilir ve kayaçta lineasyonu oluşturabilir. Genellikle gerilme lineasyonlarının maksimum asal yamulma eksenine paralel olduğu yorumu yapılır.

Birçok lineasyonun bölgesel kıvrım oryantasyonlarına veya maksimum genişleme doğrultusuna paralel olması durumu her zaman geçerli değildir. **Budin çizgisi lineasyonu** sünümlü kayaç içerisindeki nispeten dayanıklı tabakanın gerilmesi ile ortaya çıkar. Homojen olarak gerilmenin yerine bu sert tabakada boyun ve şişlikler meydana gelir. Daha fazla gerilme ile daralma ve şişme yapısı, sosise benzemesi nedeniyle budin olarak adlandırılan bir hat üzerindeki tipik eliptik parçaların oluşmasına neden olur. Budinlerin dizilimi, çizgisel doku elemanını oluşturur. Ancak gerçekte bu lineasyon gerilme lineasyonuna diktir.