

Laboratuvar 7: Kıvrım ve bindirme kuşakları

Çözümler

Güz 2005

1 Tanımlar

Taranmış ve web sayfasında yayımlanmış olan "K. R. McClay, *Glossary of thrust tectonics terms*" kitabını inceleyiniz.

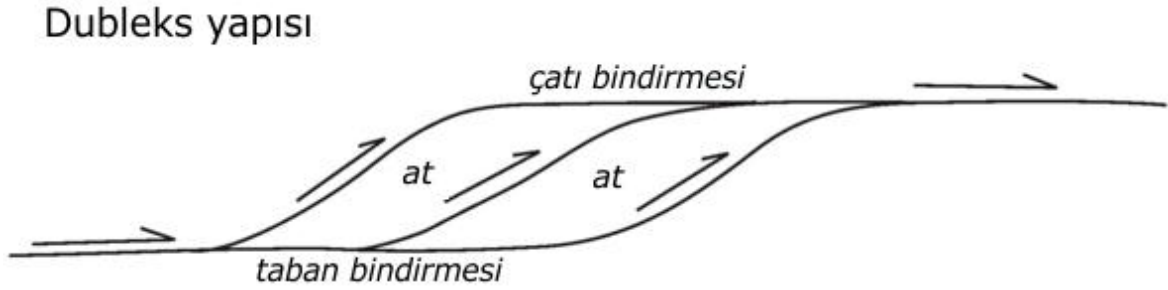
Geriye bindirme . Birçok ince derili kıvrım ve bindirme kuşaklarında, kıvrım ve bindirme yapılarının büyük bir kısmı net, tutarlı hareket yönüne "vergence" sahiptir. Başka bir deyişle, devrik antiklinallerin hareket yönü ve faylardaki eğim ve taşınma yönü malzemenin düzenli bir şekilde önülkeye doğru hareketini göstermektedir. Geriye bindirme, kuşaktaki yapıların bir çoğuna ters yönde eğime sahip bir bindirme fayıdır.

Önülke . İnce derili kıvrım ve bindirme kuşakları genellikle, dağ kuşaklarının kanatlarında yer alır. Dağ kuşağının deforme olmayan tortullardan meydana gelen bölge dışındaki alanı *önülke* olarak bilinir. İnce derili kıvrım ve bindirme kuşakları tipik olarak önceden yatay konumda bulunan tortulların üzerinde sıyrıldığı ve deformasyonu önülkeye doğru yaydığı için bu kuşaklar, *önülke kıvrım ve bindirme kuşakları* olarak adlandırılır.

İç bölge "hinterland" . Genelde yüksek dereceli metamorfik kayalar ve sünümlü deformasyon tarihçeleri ile temsil edilen dağ kuşağının çekirdeği, kuşağın *iç bölgesi* dir. İnce derili kıvrım ve bindirme kuşakları genelde deforme olmamış önülke ve çok deforme çekirdek -kuşağın iç bölgesi- arasında yer alır. Önülke bindirme kuşaklarında tektonik taşınma genelde iç bölgeden önülkeye doğrudur.

Bindirme napı "thrust nappe" . Devrik ve belirgin bir asimetriye (hareket yönüne) sahip izoklinal kıvrımdan oluşan bir napıdır. Napılar, sıkça kanatları makaslanmış veya bindirme fayları ile beraber görülür. Hem kıvrımın alt kanatlarındaki makaslamanın veya bindirme faylarının hem de kıvrımların asimetrisi, birbirleri ile uyumlu bir hareket yönüne veya tektonik taşınma yönüne sahiptir. Bu yapıya bindirme napı denir.

Dubleks . Düşük açılı faylar sıkça rampa ve düzlüklerle temsil edilir. Rampalar, alttan ve üstten faylarla sınırlanmış bir seri kiremit kiremit benzeri (paralel veya çapraz dizilmiş) dizilmiş faylarla birlikte bulunur. Bindirme ortamında yapısal topluluk, birçok paralel rampa segmentleri ile birbirine bağlanmış iki düz segmentten (taban ve çatı bindirmeleri) meydana gelir. Bu faylarla birbirine bağlanan kayaç kütleleri *atlar* olarak adlandırılır. Tüm yapısal topluluğa ise dubleks adı verilir.



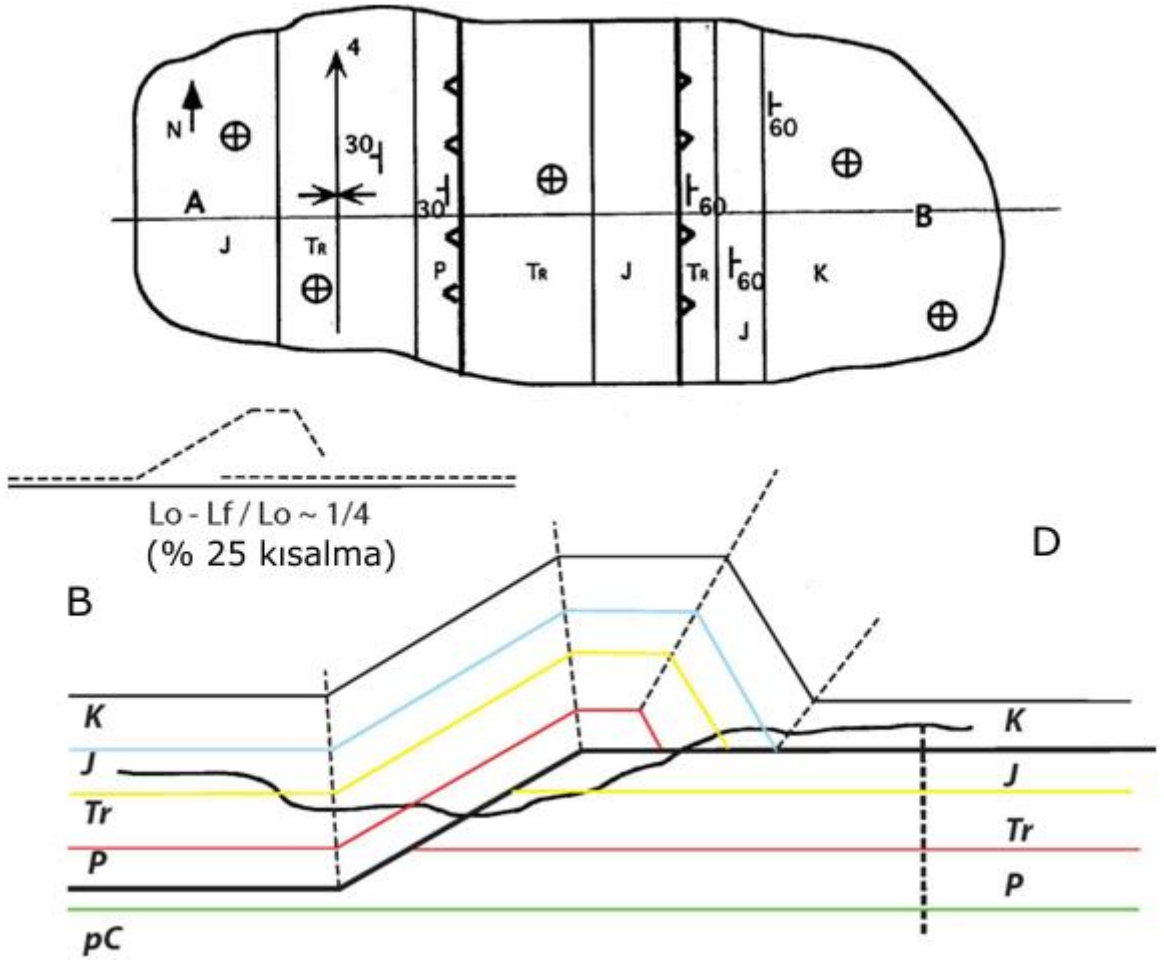
İstif dışı bindirme "Out-of-sequence thrust" . Kıvrım ve bindirme kuşaklarında deformasyon genelde önülkeye doğru ilerler. Böylece, önülkeye gittikçe ilerlemeli olarak bindirmeler gençleşir (taşınma yönünde). Bu istif içi bindirmedir. Farklı olarak, daha genç bir fay diğer faylara göre iç bölgeye yakın ise bu genç fay *istif dışı* dır. Burada istif dışı bindirmenin hareket yönü veya eğim ile bir ilgisi yoktur: geri bindirme olmak zorunda değildir.

Kör bindirme . yüzeye erişmeyen bindirme fayına kör fay denir. Fayın ucu kıvrımın içinde gömülüdür. Bu kıvrım, fay ilerleme kıvrımı, fay ucunu geçen faydaki atımı geometrik olarak dengelemek için gereklidir.

2 Bindirme ile ilişkili kıvrımlar - enine kesitler

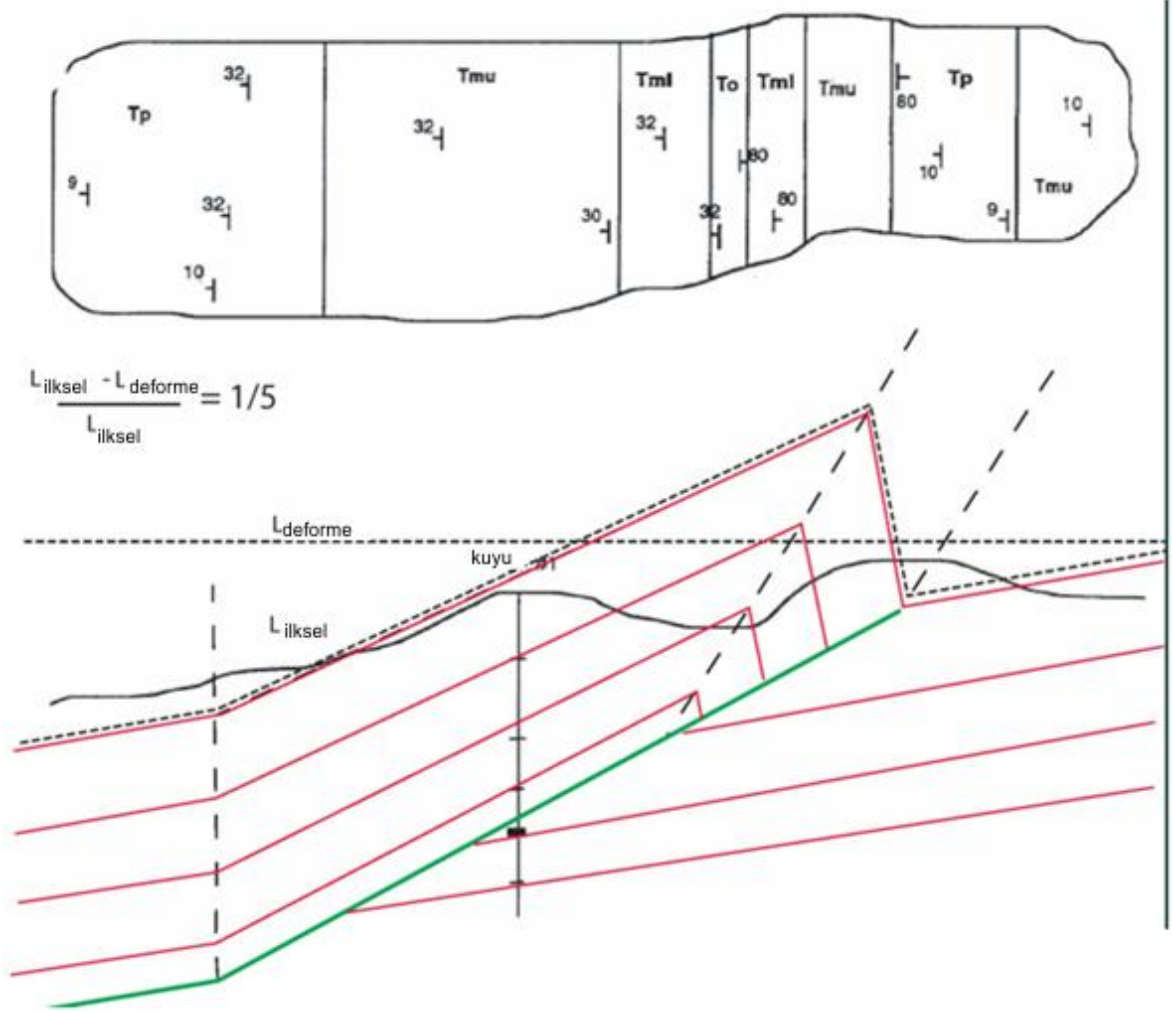
2.1

Bu bir seri fay tümseği kıvrımlarıdır: düzlükten rampaya geçiş üzerindeki bir senklinal ve rampa gerisinden üst düzlüğe geçiş üzerindeki bir antiklinal. Kısalma hesaplaması şeklinde içinde şematik olarak gösterilmektedir. Kısalma ölçüsü, sonuçları ölçeklendireceği için bir bakıma deforme hat uzunluğu seçiminize bağlıdır. Bu hesaplamaları kesitin bir kenarından diğer kenarına olan mesafeyi kullanarak yaptım.



2.2

Bu, fay ilerleme kıvrımıdır. Kısalmayı hesaplamak için kesikli çizgi boyunca ölçüm aldım.



3 Kum kutuları ve kritik incelme teorisi

3.1

Kum kutusu deneyi, ince derili kıvrım ve bindirme kuşaklarının ölçeklenebilir analog modelinin yapılmasını amaçlamaktadır. Kutu, sert ve saydam özelliğe sahip plastik camdan yapıldır. Bu kutuda kum ve kahve tabakaları, eğimli bir düzlem boyunca polyester bir film üzerine serilmiştir. Altındaki kumun kalınlığı yaklaşık 4 cm olup düzlemin eğimi 4°'dir. Bindirme kuşağındaki malzemenin önülkeye doğru taşınmasını simüle etmek için, polyester film tortulun altından önülkeyi kutunun arkasına doğru taşıyacak şekilde çekilmiştir. Çok çabuk bir şekilde duraylı kum kaması oluşmuştur. Bu kamanın önülkeye doğru, 6° açı oluşturan kamanın üst kesiminde iki kenarı vardır. Arka duvara doğru ilk oluşan geri bindirme ve geri kıvrımlar daha yüksek açıdır (25°). Bu geometri temel olarak stabildir. Hatta, polyester filmin çekilmesi ile birlikte kamaya daha fazla malzeme katılması sonucu kama büyür. Ancak, açı nispeten sabit kalır.

Mükemmel bir kama şeklinden sapmalar, önülkeye doğru hareket eden kıvrımların üst yüzeyindeki deformasyondan kaynaklanmıştır. Üstten

bakıldığında deformasyonun sonunda beş veya altı ana yapının kıvrımın üst yüzeyinde yaygındır. Kısılma yapılarının büyük bir kısmı, iç kesimlerinde olasılıkla fayların yer aldığı kıvrımlardan oluşmaktadır. Bir denemede, orta tabakadaki malzeme yüzeye çıkmıştır.

Plastik camın duvarları, sürtünmenin etkisiyle duvar kesiminde daha az kıalmaya neden olmuştur. Kenarlarda gelişen bir diğer etki ise ilksel tortul paketinin aniden incilmesi olmuştur. Tortul paketin yanal olarak incelendiği kesimlerde birçok yırtılma fayı oluşmuştur.

Deformasyonun büyük bir kısmı kamanın önünde yer almıştır. Kıvrımlar ve faylar kamanın arkasında oluşmasıyla birlikte deformasyon hiç olmamış veya çok az olmuştur. Böylece, yapıların büyük bir çoğunluğu, "bir sıra ile" en genç veya en yaşlı yapılar önülkeye yakın olacak şekilde gelişmişlerdir.

Önemli miktarda erozyonun kamanın deformasyon dinamiğini etkileyebileceği düşüncesini kamanın üzerinden büyük miktarda malzeme kaldırarak denedik. Devam eden sıkışma sürecinde, ilksel geriye bindirme ve geriye kıvrımlar, olasılıkla ilksel duraylı kama geometrisine dönebilmek için tekrardan aktif konuma geçti.

3.2

Bir kamanın geometrisini, içindeki deforme olan malzemenin dayanımı ve kamanın oluştuğu dekolmanın sürtünmeye karşı olan direnci belirler. Özellikle zayıf dekolman ve düşük kama açısının olduğu durumda, kuvvetli kama malzemesi aynı etkiye sahiptir. Kum gibi malzemelerde bu parametreler plastik film ve gevşek kum arasındaki içsel sürtünme açısından etkilenebilir. İnce derili kıvrım ve bindirme kuşaklarında, kayaçlar olasılıkla Mohr-Coulomb kriterlerine göre deforme olduğu için kum, analog malzeme olarak kötü bir seçim değildir.

3.3

Bu kısım, kendine benzer kama büyümesi kavramını anlamanızı sağlamak içindir. Eğer kama açısı 5°'de kalırsa ve kamanın ucu deniz seviyesinde olursa, 180 km uzunluğundaki kamanın kendine benzer büyümesinin kamanın tepesinin 15.5 kilometrenin üzerinde bir yüksekliğe neden olabileceğini işaret etmektedir. Bu değer, bugün dünyadaki en yüksek bölgeden üç kat daha fazladır (Himalayalardaki tek yükselti 8 km'ye erişebilir. Ancak, kuşağın tepe bölgesinin ortalama yüksekliği 5 kilometrenin biraz üzerindedir).

Bu çözümleme birçok önemli parametreyi ihmal etmektedir. Birincisi, izostatik denge ihmal edilmektedir. Her bir kilometre topoğrafyanın, okyanusun altındaki bir buzdağının hacmi gibi, kabuğun derinde 6 veya 7 kilometre kalınlığı olduğunu biliyoruz. Böylece, izostatik çökmenin 15 kilometre yüksekliğindeki kamanın

büyük bir kısmını oluşturmasını bekleyebiliriz. İkincisi, kritik kama teorisi sabit dayanım olduğunu varsayar. Ancak, kayaçların dayanımının derinlikle birlikte önemli miktarda değiştiğini biliyoruz. Artan basınca bağlı olarak derinlikle birlikte dayanımdaki artış, Mohr-Coulomb reolojisi ile açıklanabilirken, belli sıcaklığın üzerinde kayaçlar viskoz ve visko-plastik akma kanunlarına göre sınımlı olarak deforme olurlar. Son olarak, erozyonu ortalama yamaç eğimi ve yükseklikle birinci derecede ilişkilendirdiğimiz için, yüksek dağlar oluştuğunda aşınma miktarının da artmasını bekleriz. Jeomorfoloji (kabuk direnci değil), yeryüzündeki dağların yüksekliği için gerçek sınır olabilir.

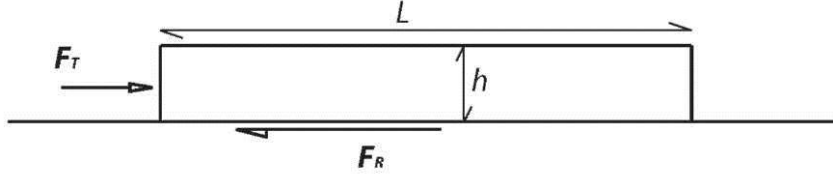
3.4

Kum kutusu deneyindeki arka duvar, tüm düzeneğin belki de en yetersiz kısmıdır. Doğadaki hangi malzeme düşey ve kırılmaz bir duvara benzerlik gösterir? Kritik olarak incelenen kamalar ile ilgili ilk makaleler önlerindeki kamayı iten iş makinalarını gösteren şekiller içermektedir.

Anlaşılması gereken şey, kritik incelleme modelleri ve kum kutusu deneylerinde kıvrım ve bindirme kuşakları ile yığışım prizmalarının tanımlaması veya canlandırılması amaçlanmaktadır. Bu deneyler, büyük bir dağ kuşağının, özellikle dış kesimlerinin, anatomisinin küçük bir kısmına ait modelleri oluşturmaktadır. Arka duvar, burada dağ kuşağının iç kısmıdır ve tüm modellerde dağ kuşağının kalın kabuk ve yüksek rakımlı bölgelerden oluşması gerekmektedir. Dağ kuşağının hangi kısmının kalınlaştığı ve bu kalınlaşmaya kum kutusu deneyinin ışık tutup tutmadığı konunun dışındadır.

Alternatif olarak, daha küçük dağ kuşağı sırt sırta olan iki Coulomb kaması olarak tanımlanabilir. Deneyimiz bu hatlar boyunca arka duvarın neler yaptığına dair ipuçları sağlamıştır. Kamanın tepe noktasının arka duvarda olmadığını hatırlayınız. İlk oluşan yapılardan biri, geriye bindirme ve geriye kıvrımlar olmuştur. Deneyde oluşan kama, biri önülkeye doğru 5°'lik eğime sahip, diğeri iç bölge/arka duvarla 20°'lik açıya sahip iki kenara sahiptir. Temelde, birbirlerine dayanan iki kamadan oluşmaktadır. Her bir kama diğeri kamanın arka duvarını oluşturur. Bazı deneylerde araştırmacılar, alttaki plastik filmi tortul istifin ortasındaki bir yarı boyuncaya çekmişlerdir. Oluşan yapılar bizim deneyimizde oluşan yapılara çok benzerdir. Biri diğeri arka duvar olacak şekilde iki kama oluşmuştur. İki kenarlı dağ kuşağına örnek olarak sıkça bahsedilen Tayvan Adalarında, dağ kuşağının her iki kanadında farklı yönlerde bindirme yönüne "vergence" sahip iki ince derili kama tanımlanmıştır.

4 Büyük bindirmelerin mekanik paradoksu



$$\sigma_{xx} = \frac{F_T}{h} \Rightarrow F_T = \sigma_{xx}h$$

$$F_R = \sigma_{yx}L$$

$$\sigma_{yx} = \mu\sigma_{yy} = \mu\rho gh \quad (= \tan\phi\rho gh)$$

$$\text{Eğer } F_R = F_T$$

$$\sigma_{xx} = \frac{\sigma_{yx}L}{h} = \mu\rho gh$$

Yatay tektonik gerilme 100MPa kabul edildiğinde, $\mu = 0.038$. İçsel sürtünme açısı cinsinden, $\phi \sim 2^\circ$. Price (1988), kaya deformasyon deneylerinden elde edilen kaya dayanım değerlerini, μ of 0.577 and $\phi = 30^\circ$ olarak kabul eder. Twiss ve Moores (örneğin sayfa 171), $\phi = 28.7 \pm 7.4$ değeri veren kumtaşı örneklerinin deformasyonuna ait sonuçları açıklamıştır. Başka bir deyişle, analizimiz deneysel sonuçlardan beklenenden çok daha zayıf fayların oluşabileceğini öngörmektedir.

Doğrudan daha uzak $\mu = 0.6$ değeri kabul edildiğinde, rijit blok boyunca kaymayı başlatmak için $\sigma = 1.6$ GPa'ya gereksinim vardır. Twiss ve Moores (sayfa 207), bir kayacı kırmak için gereken gerilmeye dayanarak, gerilmenin maksimum değerinin 250 MPa olduğunu kabul eder. Ancak, 250 MPa çok iyimser bir değer olmakla birlikte, gerçek değer litostatik basınca (bundan dolayı bloğun yüksekliğine) bağlıdır. (Twiss ve Moores, bu problemi maksimum gerilmeyi 250 MPa olarak itilen bloğun maksimum uzunluğu cinsinden tartışmaktadır. Bloğun maksimum uzunluğunu 17 km bulmuşlardır.)

Hubbert ve Rubey, temelde etkin sürtünme dayanımını büyük ölçüde azaltan bir mekanizma önererek açık paradoksa farklı bir yaklaşımda bulunmuşlardır. Özellikle, sürtünme dayanımı için, gözenek akışkanı basıncı göz önüne alınarak denklemin yeniden düzenlenmiş şekli:

$$\sigma_{yx} = \mu\sigma_{yy}^* = \mu(1 - \lambda)\rho gh$$

burada λ gözenek akışkanı faktörü olup gözenek akışkanı basıncı p ve litostatik basınç ρgh arasındaki orana karşılık gelir. Hidrostatik gözenek suyu basıncı ($p = \rho_w gh$, burada ρ_w suyun yoğunluğudur) fayın tabanı boyunca sürtünme dayanımını ($\lambda \sim 0.4$) büyük ölçüde azaltmaktadır. Gözenek akışkanı basıncı litostatik basınca yaklaştığında $\lambda \sim 1$ olur ve sürtünme dayanımı sifira yaklaşır.

Doğada bu derecede yüksek akışkan basıncı varlığına ait kanıtların olup olmadığı sorusu ortaya çıkmaktadır. Bazı ortamlarda şüphesiz çok yüksek akışkan basıncı bulunmaktadır. Diğer taraftan, birçok fayda yapılan arazi gözlemleri bunun genel bir mekanizma olamayacağını göstermektedir. Özellikle, derste karasal ortamda yüzlek veren aşınma yüzeyi üzerine bindirme istifinin yerleştiğini açık olarak gösteren saha verilerinin bulunduğu Nevada'daki Keystone bindirmesine ait birkaç slayda bakmıştık. Keystone bindirme istifi, litostatik akışkan basıncı oluşturamayacak olan dere çakılları ve pekleşmemiş alüvyal çökeller üzerinde ilerlemiştir. Price (1988), "büyük bindirmelerin mekanik paradoksu" olarak adlandırdığı ana problemin, modelin tanımının hatalı yapılmasından kaynaklandığını düşünmektedir. Burada paradoks sadece, yerleşen bindirme istiflerinin büyüklüğü ile bağlantılı özgün bir mekanik tanım (bir model) kapsamında kalmaktadır. Price, gerçek bindirme faylarının eski (Canadian Rockies'deki faylar gibi) ve aktif (1964 Alaska depremi gibi) örneklerine bakıldığında bu mekanik tanımlamanın tümüyle uyumsuz olduğunu anlayabileceğimizi öne sürmektedir. Modeli bırakın ve paradokstan kurtulun. (Bindirme faylarında mekanik paradoksun varlığı, modelin büyük derecede kusurlu olma olasılığı konusunda bizi uyarmıştır.)

Mekanik modelde, özellikle bindirme istiflerinin: (1) tümüyle rijit hareket ettiğini, (2) arkadan itildiğini ve (3) bindirme istiflerinin tabanı boyunca hareketin tüm fay yüzeyinde olduğunu kabul edilir. Price, doğadaki gerçek faylar üzerinde yapılan gözlemlerle bu üç kabulün olası olmadığına işaret etmiştir. Bindirme istifleri rijit değildir: deformasyon - kıvrımlanma ve kırılma - tüm bindirme istifinde olur ve fay boyunca atım miktarı doğrultu ve hareket yönü boyunca değişkendir. Ayrıca bindirme fayları boyunca kayma, bir seferde fayın küçük bir kısmını oluşturan birçok küçük kayma hareketinin birleşmesi sonucu olur. Tek bir kayma hareketinde bile kırılma aynı anda gerçekleşmeyip makaslama dalgası hızı "shear wave velocity" ölçeğinde ilerler. Price Oldow'dan bir alıntı yapar: "bindirmeler aynı anda tek bir kütle olarak hareket etmeyip kısmen biri diğerini izler ... hareket kızaktaki gibi olmamakta ve bütün halinde zeminde ilerlemekte olup daha çok bir tırtılın ilerleyişine benzer. Tırtılın aynı anda bir parçası ilerlerken ve tüm vücudu hareket eder ve taşınır".

Washington'un yanıtı gerçekten oldukça inceliklidir. O, hem Price'ın açıklamasını beğenmemekle birlikte Hubbert ve Rubey'in modelini de kurtarmak

istememektedir. Özellikle, Price'ın açıklamasında fay hareketinin tüm yüzeyde aynı anda olmamasının paradoksu çözeceği düşüncesini reddetmektedir. Örneğin, Price'ın 1964 Alaska depremine ait gözlemlerine karşı çıkmamaktadır. Faydaki kaymanın aynı anda olmamasının paradoksta bir değişikliğe neden olmadığını öne sürmektedir. Washington, fay hareketinin ve depremlerin temelde fay boyunca ortaya çıkan elastik yamulmanın boşalması olduğu ve belli bir zaman aralığında meydana gelen elastik yamulmaların aktif bir fay boyunca kırılma öncesi makaslama gerilmelerinin genelde kırılma için gerekli gerilmeye veya bu değere yakın olduğunu iddia etmektedir. Dolayısıyla araştırmacı, tüm fay yüzeyinin bu kritik denge noktasına nasıl geldiğini açıklama ihtiyacının, Hubbert ve Rubey'in problemi olan bindirme istifinin arkasındaki tektonik gerilme ile taban direncinin nasıl dengelendiği konusu ile aynı şey olduğunu öne sürmektedir. Araştırmacının çözümü, modelin temel kısmının atılmasını da içermektedir. Ancak, atılan şey bindirme istiflerinin arkadan itilen düzlemsel kütleler şeklinde hareket ettiği kavramıdır.

Washington, bindirme kuşaklarındaki genel kama geometrisine başvurmuştur. Bindirme kuşakları, kamanın arkasına doğru artacak şekilde uygulanan ve hareketi sağlayan gerilmenin olduğu yüzey alanı nedeniyle taban dekolmanı boyunca taşınabilir. Her bir bindirme istifi, tüm kama ile birlikte hareket eder ve böylece bir bindirme istifindeki hareketin büyük bir kısmı bindirme istifinin üst yüzeyi boyunca sürüklenmesi ile gerçekleşir. Washington'un söylemeye çalıştığı şey aslında problemin bir kısmını bindirme istifinin yalıtılmış olmasının dikkate alınması oluşturmaktadır. Bindirme kuşakları, kiremit benzeri dizilmiş bir seri faydan meydana gelir. Bindirme istifleri tabandaki bir fay boyunca hareket ettikçe (ancak, tipik olarak istifin üst kesiminde bir başka bindirme bulunmakta), bu hareketin istifin tabanına yeterli gerilmenin iletilmesine önemli bir etkisi vardır. *(Not: bu makaleyi ilk okuduğumda Washington'un yanlış yolda olduğunu düşündüm. Ancak, birkaç kez okuduktan sonra ilk izlenimimden daha fazla kanıtın olduğunu ve bu kanıtların daha açık bir şekilde ifade edilebileceğini düşünüyorum.)*

Price'ın cevabı iki aşamalıdır. Birincisi, Washington'un aktif bindirme faylarının her yerde göçmeye yakın olması iddiasına karşı çıkmaktadır (Washington'un fazla veriye dayanmayan bir iddiası). Eğer bindirme fayları tüm yüzeyleri boyunca aynı anda kaymıyorsa, yüzey alanının büyük ölçüde bir fonksiyonu olan durdurma kuvvetinin dengelenmesine gerek yoktur. Bu husus halen durmaktadır. Ancak, bindirme istifi ile ilgili bu modelin çürütülmesi bakımından, Price'ın bindirme istifleri boyunca gerilmenin nasıl iletildiği ve bu gerilmelerin kökeninin ne olduğunu açıklayamadığı bir gerçektir. Price, modelin terk edilmesi ile paradoksu çözmekte, ancak alternatif bir model önermemektedir.

İkincisi, Price fay hareketini açıklayan bir model olarak kritik kama görüşünü kanıtlamaya davet etmektedir. Kritik kama modelleri (kum kutusu modelleri) tabanı boyunca kayan malzeme kütlelerinin derinlerdeki deformasyonunu

göstermek için idealdir. Taban dekolmanları dışında bu modellerde hiç fay olmadığı için Price haklıdır. Washington'un Şekil 1'inin biraz *özel amaçlı* olduğu görülmektedir ve arazide bindirme faylarını inceleyerek 30 yıl geçiren Price'in neden bu bindirme istifine ait gerçekçi olmayan modeli küçümsediğini anlamak kolaydır. Ancak, Washington'un gerçekte yapmaya çalıştığı deforme olan kütlenin bulunduğu yerde (kritik incelen kama gibi bir şey) her bir bindirme istifini hareket ettiren başka bir gerilme kaynağı olduğunu göstermekti. En azından Washington modele (detayları biraz belirsiz olan model) farklı bir bakış açısı sağlamaktadır.