DEPREM KAYNAK MODELLERİ: GÜNCEL YAKLAŞIMLAR, SORUNLAR, SINIRLAR

Mustafa Aktar

Profesör, Jeofizik ABD, Kandilli Rasathanesi ve Dep. Enst., Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul
Email: aktar@boun.edu.tr

ÖZET:

Deprem kaynağının modellenmesi için geliştirilmiş olan çeşitli yaklaşımlar incelenmiştir. Problem kinematik ve dinamik olarak iki anabaşlık altında ele alınmıştır. Her iki yaklaşım için geliştirilen analitik temelin oluşması kronolojik bir perspektif içinde ele alınmıştır. Problemin diğer bir safhasını oluşturan analitik modellerin numerik uygulamaya dönüştürülmesi konusu da ana hatlarıyla ele alınmıştır. Bu süreçte karşılaşılan darboğazlar tartışılmış ve bu amaçla benimsenmesi kaçınılmaz olan yalınlaştırmalar incelenmiştir. Bu yalınlaştırmalar iki aşamada ele alınmıştır. İlk olarak bilgisayar ortamına geçişte şart olan ayrıklaştırma işlemi ile ilgili konular tartışılmıştır. Bu bağlamda nokta kaynak, statik modelleme gibi uç örneklerin ne anlam ifade ettiği açıklanmıştır. İkinci aşamada ise depremin fiziksel özelliklerine bağlı olarak gerçekçi olduğu kabul edilen yalınlaştırmalar ele alınmıştır. Burada fay düzlemi, kayma yönü, kayma hızı ile ilgili varsayımlar tartışılmıştır. Dinamik modelleme konunda ise bu yaklaşımın en önemli faktörü olan sürtünme katsayısının etkisi incelenmeştir.

ANAHTAR KELİMELER: Deprem Kaynağı, kinematik modelleme, dinamik modelleme

1. DEPREM KAYNAĞI MODELLEMESİ

Deprem kaynağının modellenmesi konusunda ilk çabalar yaklaşık bir asır önce başlamıştır. İlk çalışmalar, sürekli ortamlarda noktasal bir süreksizliğin yolaçtığı elastik dalgaları inceleyen Lamb (1904) ile başlamış sayılır. Son elli yılda bu alanda çok önemli gelişmeler kaydedilmişse de çözümün kısmen başarılabildiğini söylemek doğru olur. Fiziksel açıdan tanımlandığında problemin iki farklı safhasının olduğu görülür. Bunlardan birincisi deprem kaynağından yayılan elastik dalgaların modellenmesi ile kısımdır ki bu, gerek analitik, gerekse nümerik anlamda büyük ölçüde çözümlenmiş sayılır. İkinci ve daha zor olan kısmı ise deprem kaynağının davranışını, bir başka deyişle kırılma sürecinin kendisini açıklamakla ilgilidir. Bu sorunun çözümünde önemli gelişmeler kaydedilmişse de daha katedilmesi gereken uzun bir yol vardır. Konuyu bu şekilde iki ayrı safha olarak düşünmek, deprem araştırma terminolojisinde kinematik ve dinamik modellemeye karşıt gelir. Bu temel ayrımı gözeterek, bu çalışmada da kaynak modellemesi konusu söz konusu iki başlık altında ele alınmıştır. Ancak, kinematik de olsa, dinamik de olsa kaynak modelleme probleminin önemli bir yönü analitik yaklaşımların nümerik karşılığının gerçekleştirilmesidir. Bu nedenle her iki altbaşlığın altında analitik ile birlikte nümerik yöntemler de kısaca tanıtılmıştır.

Problemi yalınlaştırmak açısından, deprem kaynağı ile bunun yolaçtığı yer hareketi (yerdeğiştime, yer hızı veya yer ivmesi) arasındaki bağıntıyı simgesel olarak aşağıdaki gibi ifade edebiliriz:

$$z = f(x,y) \tag{1}$$

Burada z gözlemi yani sismogramı, x deprem kaynağına ilişkin tüm değişkenleri, ve y de elastik dalganın yayıldığı ortama ait tüm değişkenleri içeren parametreler olsun. Kinematik modellemede x ve y'nin hiçbir şekilde z'den etkilenmediği varsayılır. Dinamik problemde ise x, yani kaynağın davranışı, gerilimin tarafından belirlenir, gerilim ise gerinim yani z'in aldığı değerlere bağlı olarak değişir. Burada değişkenler arasında karşılıklı bir etkileşim devreye girer ve problem tekyönlü olmaktan çıkar.

Gerçekte denklem (1) elastodinamik denklemden bir başkası değildir, ve aşağıdaki gibi yazılır:

$$u_{\mathbf{k}}(\mathbf{x},t) = \sqrt{}\, dV(\boldsymbol{\xi})\ \sqrt{}\ d\tau\ \Delta u_i(\boldsymbol{\xi},\tau)\ c_{ijpq}\ \ n_j(\xi)\ \ d/d\xi_q\,(G_{kp}\ (\mathbf{x},\ t-\tau\ ;\ \boldsymbol{\xi},0)) \qquad (2)$$

Birinci entegral deprem kaynağını içeren hacım içerisinde, ikincisi ise zaman ekseninde tanımlanmıştır. Burada $u_k(\mathbf{x},t)$, $\mathbf{x}$ noktasında ve $\mathbf{k}$ yönünde yer değiştirmeyi yani sismogramı ifade eder. $\Delta u_i(\xi,\tau)$ ise kaynakta $\boldsymbol{\xi}$ konumunda, i yönündeki yerdeğiştirmeleri, bir başka deyişle fay düzlemindeki kaymayı gösterir. c_{ijpq} Hook yasasının elastik sabitlerini, $\mathbf{G_{kp}}$'ler ise kaynak noktasından gözlem noktasına tanımlanan Green fonksiyonlarını tanımlar (Aki ve Richard, 1980). Burada kaynak modellemesini ilgilendiren tek terim Δu_i 'dir. Bu denklemin çözümü basit değildir. Herşeyden önce $\Delta u_i(\boldsymbol{\xi},\tau)$ terimleri bir süreksizlik üzerinde tanımlanmıştır. Ayrıca değişkenlerin hepsi, hem zamanda ve hem de uzayda değişim gösteren vektorel birer değerdir. Kinematik problemde kaymanın ($\Delta u_i(\boldsymbol{\xi},\tau)$) alacağı değerlerin herşeyden bağımsız olduğu varsayıldığı için denklem biraz daha kolay ele alınabilir. Dinamik problemde ise çözüm çok daha zordur. Bu durumda kaymanın değeri fay çevresindeki gerilim dağılımına ve sürtünme katsayısı gibi parametrelere bağlı değişecektir. Bunların her ikisi de tekrar $\Delta u_i(\xi,\tau)$'ya bağlı olarak değiştiği için ve problemin çözümü çok karmaşık bir hal alır.

2. KİNEMATİK MODELLEME

Deprem kaynağı ile ilgili yürütülen çalışmaların büyük bölümü kinematiktir. Örneğin, senaryo deprem benzetimi ile ilgilenen bir deprem mühendisi, $\Delta u_i(\boldsymbol{\xi},\tau)$ ve $\mathbf{G_{kp}}$'le için baştan sabit değerler kabul eder ve sorun $u_k(\mathbf{x},t)$'yi belirlemeye indirgenir. Bu bir düz problem tanımıdır (forward problem). Bir jeofizikçi ise aynı problemi ters yönde ele alınır (inverse problem). Çıkış noktasını eldeki veriler (sismogram) yani $u_k(\mathbf{x},t)$'ler oluşturur, ve bu kez $\mathbf{G_{kp}}$'ile ilgili bir varsayım yapılarak, $\Delta u_i(\boldsymbol{\xi},\tau)$ tahmin edilmeye çalışılır.

Düz Kinematik modelleme, bir fay düzleminin iki yanında oluşan kayma süreci matematiksel veya nümerik bir şekilde tam olarak ifade edilmiş sayılır. Bu problemde fay düzlemindeki kaymaların yolaçtığı gerilim değişimleri ile ilgilenilmez. Gerilimin hangi direnç mekanizmasını yenerek ne tür bir kaymaya yolaçtığı, bir kere başlamış bulunan kaymanın nelerden etkilenerek ve hangi kurallara uyarak gelişeceği ve sonunda nasıl duracağı gibi kayma sürecini denetleyen fizik yasaları gündeme gelmez.

2.1. Analitik Yaklaşım

Kinematik problem, eninde sonunda elastodinamik denkleminin belirli sınır koşulları altında çözülmesine karşıt gelir. Bir kısmi diferansiyel denklem olarak bu bile çok kolay değildir. Belli varsayımlar yaparak bazı parametrelerin yalınlaştırması zorunluğu vardır. Yalınlaştırma kaynak veya ortam için ayrı ayrı yapılabilir. Bu çalışmada sadece kaynak ile ilgili yalınlaştırmalardan söz edilecektir. En genel halinde kaynak modeli uzayda ve zamanda değişim gösteren bir kayma yoğunluk fonksiyonu olarak tanımlanmıştır (denklem (2)'de $\Delta u_i(\xi,\tau)$). Burada kayma, fay düzleminin iki tarafının birbirine göre yerdeğiştirmesi demektir. Bir başka deyişle elastik dalganın yayıldığı sürekli ortamda fayı temsil eden bir süreksizliğin tanımlanmış olması gerekir. Genel anlamda her türlü süreksizlik, matematiksel açıdan ele alınması ve çözümlenmesi güç olan bir özelliktir. Buna rağmen elastodinamik denklemin bu şekliye çözülmesi yönünde çabalar olmuştur (Kellis-Borok, 1956; Knopoff ve

Gilbert, 1960; Burridge ve Knopoff, 1964). Ancak daha uygun bir yöntem süreksizlikten kurtulmanın bir yolunu bulmaktır. Bu aşamada moment tensörü kavramı gündeme gelmiştir. Nitekim, fay düzelmindeki yerdiştirme süreksizlikleri (displacement discontinuity) yerine, fizikte uzun zamandan beri kullanmaya alışık olduğumuz bir başka kavram olan kuvveti kullanmak çözümü kolaylaştırır. Bu yaklaşıma eşdeğer cisim kuvvetleri (equivalent body forces) adı verilir. Bu çözümlemenin iki safhası vardır. İlk gelişme Lamb (1904) ve Love (1945) gibi araştırıcıların deprem kaynağındaki yerdeğiştirme süreksizliği yerine buna eşdeğer bir cisim kuvvet dağılımının kullanılabileceğini göstermeleri ile başlamıştır. İkinci aşama ise Gilbert (1970) ve Backus ve Mulcahy (1976) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu araştırıcılar ise deprem kaynağını, elastik bir ortam içerisinde tanımlanan inelastik bir bölgenin varlığını ile (gerilim artığı - stress glut) modellemişlerdir. Bu şekilde varsayılan inelastik kısmı ifade etmenin en uygun yolunun da moment tensörü olduğunu göstermişlerdir. Bu yolla, süreksiz bir ortam için tanımlanmış olan elastodinamik denklem, bu kez tümüyle elastik bir ortam için yeniden ifade edilebilmiştir:

$$u_k(\mathbf{x},t) = \sqrt{}\ d\tau \sqrt{}\ \ m_{ij}(\xi,\tau)\, G_{ki,j}(\mathbf{x}, t-\tau ; \xi,0))\, dV \qquad (3)$$

Birinci integral zaman boyutunda, ikincisi ise gerilim artığının (stress glut) tanımladığı kaynak hacmi içerisinde tanımlanmıştır. Bu yeni denklemde kayma yoğunluk fonksiyonu yerine moment tensor yoğunluk fonksiyonu yeralmıştır. Yeni değişken de bir önceki gibi hem zaman ve hem de uzayda değişim gösterir. Ancak bu yeni kısmi differansiyel denklemi çözmek öncekinden çok daha kolaydır çünkü ortamda herhangi bir süreksizlik yoktur. Bu aşamada çözümü kolaylaştırıcı bazı yalınlaştırmalar da yapılabilir. Örneğin kaynağın bir hacım yerine, bir yüzey olduğu, hatta giderek bir noktada yoğunlaştığı kabul edilebilir. Nokta kaynak varsayımı durumunda denklem (3) çok basit bir evrişim (convolution) biçimini alır:

$$u_k(\mathbf{x},t) = M_{ij} * G_{ki,j} \qquad (4)$$

Elastodinamik denklemin bu şekilde çözümündeki ayrıntılar için çeşitli kaynaklara başvurulabilir (Aki ve Richard, 1980; Udias, 1999).

Bu aşamada moment tensorün bazı önemli özelliklerinden bahsetmek yararlı olur. Birincisi, yalın bir dislokasyon modelinin ikili kuvvet çifti (double couple) ile ifade edilebilme özelliğidir. Bu durumda moment tensor belli özelliklere sahiptir (eigen değerlerden birisinin sıfır, diğer ikisinin de eşit ama ters polariteli olmaları). Bir başka özellik, sıfırdan farklı olan eigen değerlerin depremin skaler sismik momentine eşit olmasıdır. Diğer özel bir durumda, örneğin eğer sismik kaynak bir hacım değişikliği içeriyorsa, bu moment tensorünün eigen değerlerinin toplamında (trace) ifade bulur. Dislokasyon modelinin dışındaki diğer bazı kaynak türleri için de moment tensor biçimleri vardır (ör. CLVD). Moment tensörün bu tür özellikleri deprem türlerini ve patlatmaları birbirinden ayırt etmek için son derece yararlıdır.

2.2. Nümerik Yaklaşım

Günümüzde nümerik uygulamalar bilgisayar ortamına yapılır ve bu geçişte sürekli olduğu varsayılan bazı fiziksel parametrelerin ayrıklaştırılması gerekir. Bunlar da temelde zaman ve uzayı tanımlayan bağımsız değişkenleri ilgilendirir. Zamanın ayrıklaştırılması çok yaygın olarak yapılan bir işlem olduğundan daha kolay algılabilir. Burada, zaman içinde değişim gösteren her tür verinin (örneğin sismogram) ayrık değerlerle (örnekleme) ifade edilmesi söz konusudur. Bu da bu veri ile ulaşılacak her türlü sonuca frekans açısından bir üstsınır getirilmesi anlamına gelir. Nyquist yasasına göre bu üstsınır örnekleme frekansının yarısı kadardır. Depremlerle ilgili çalışmalarda, özellikle yıkıcı büyüklükteki bir deprem inceleniyorsa (M>5.0-5.5), üstlimitin 1-2 Hz civarında olması yeterlidir. İkinci ayrıklaştırma işlemi ise uzayda problemi daha küçük elemanlara ayırma girişimidir. Örneğin, bir fay düzleminin tek bir parça yerine, yanyana dizilmiş ve birbiri ardına tetiklenen birçok

parçacıkdan oluştuğu varsayılır. Bu durumda herbir parçacık bir nokta kaynak gibi ele alınabilir ve modelleme çok kolaylaşır. Uygulamada, bu parçacıkların geometrisi istenildiği şekilde seçilebilir (üçgen, kare, altıgen, vb), ancak kare en sık olarak kullanılan biçimdir. Büyük yıkıcı depremler incelenirken fay yüzeyini, 4x4 veya 5x5 km boyutunda kare parçalarından oluşan bir mozaik gibi düşünmek en yaygın yaklaşımlardan birisidir. Bu şekide ayrıştırılmış olan fay düzleminde, herbir parçacık (subfault) için belirlenmesi gereken bir parametre takımı vardır. Bu parametre takımı, herbir parçacık için kayma vektörü (yön, genlik), zaman değişim biçimi, kırılma hızı ve kırılma yönü gibi parametrelerden oluşur. Kinematik yaklaşımlarda, ister düz veya ister ters çözüm olsun, temel sorun herbir parçacık için bu değişkenleri gerçekçi biçimde tanımlamaktır. Sayılar yüksek olduğundan bu kolay bir işlem sayılmaz. Örneğin olası Marmara depremi modellemesinde parçacık sayısının 120 mertebesine ulaştığı düşünülürse, bilinmeyen sayısını 1000'lerin üzerine çıktığı görülür. Bu aşamada pratik açıdan belli varsayımların ve basitleşmelerin yapılması kaçınılmaz olur.

Kaynak tanımını basitleştirmenin en yaygın yöntemi, kayma değişkeninin (denklem (2)'de $\Delta u_i(\xi,\tau)$) tüm parçacılarda aynı yönde ve aynı genlikte olduğunu varsaymaktır. Bu basitleştirme, her bir hücre için tanımlanan kayma vektörünün skaler bir değere indirgenmesi anlamına gelir. Bu basitleştirmenin daha ileri derecesi ise tüm yerdeğişmenin uzayda tek bir noktada toplandığını varsaymaktır. Bu son varsayım ise jeofizikde çok yaygındır ve telesismik kaynak mekanizması çözümünde kullanılan nokta kaynak varsayımına karşıt gelir. Ancak her iki varsayım da yakın alan çözümlemeleri için geçerliliğini kaybeder.

Yukarıda açıklanan uzay eksenine bağlı basitleştirmeye eşlenik diğer bir basitleştirme de zaman eksininde tanımlanabilir. Bu basitleştirme, fay üzerindeki tüm noktaların zaman içinde benzer bir şekilde kaydığını (denklem (2)'de $\Delta u_i(\xi,\tau)$) varsaymaktır. Bu yaklaşım kinematik modellerde çok sık kullanılır. Örneğin tüm hücrelerin bir üçgen veya bir trapezoid gibi aynı zaman kaynak fonksiyonuna sahip olduğu düşünülür. Son kertede tüm kaymaların aynı anda ve sonsuz kısalıktaki bir süre içerisinde oluştuğu da varsayılabilir. Bu yaklaşım jeodezik modellemelerin esasını oluşturan satik modellemeye karşıt gelir. Burada sadece depremin öncesi ve sonrasındaki arasındaki yerdeğiştirme farkı ile ilgilenilir, aradaki geçişin nasıl oluştuğu önemli değildir. Coulomb sürtünme yasalarının uygulandığı statik tetikleme yöntemleri, deprem kaynağının bu şekilde modellenmesi esasına dayanır (King ve Diğ. 1994).

Yukarıda ele alınmış olan ayrıklaştırma ile ilgili basitleşitrmeler dışında problemin doğasına bağlı olarak da bazı basitleştirmeler de yapılabilir:

a) Fay yüzeyinin düzlem olduğu varsayımı: Bu durumda herbir fay parçacığının uzaydaki yönü (ifade (2) deki n_k terimi) tek bir vektör ile ifade edilebilir. Bu önemli bir basitleştirmedir ve artçı çalışmalarından edinilen bilgilere göre gerçeğe de oldukça yakındır.
b) Kırılma hızının sabit olduğu varsayımı: Bu durumda her bir hücrenin ne zaman kırılmaya başlayacağı önceden kolayca hesaplanabilir. Her hücrenin tetiklenme zamanı, o hücrenin deprem merkezinden uzaklığının sabit bir kırılma hızına bölünmesi ile bulunabilir. Genelde kırılma hızının ortamdaki en küçük kesme dalgası hızından %10 daha yavaş olduğu varsayıldığı için, bu sadeleştirme çok etkili olur. Ancak son yıllardaki gözlemler bu ön kabulu giderek sorgular niteliktedir (Bouchon ve Diğ, 2002).
c) Tüm hücrelerdeki kaymalarının fay düzlemine paralel olması: Bu varsayım, depremin yalın bir dislokasyon kaynak olduğu ve hiçbir hacım değişikliği içermediği anlamına gelir. Bu basitleşme ile kayma vektörünün yönü bir düzlem içerisinde tanımlanır. Bu şekilde bu kayma değişkeni üç boyuttan ikiye indirgenmiş olur. Depremlerde gerilim boşalımının çok büyük büyük bir oranının (>%90) bu şekilde oluştuğu gözlendiği için bu da gerçekçi bir varsayımdır.

Yukarıda verilmiş olan yalınlaştırma işlemleri özellikle ters çözümlerde çok etkilidir. Aksi taktirde bilinmeyen sayısı kadar fazla olur ki tekil çözüm imkansızlaşır. Genelde, eldeki verinin sayı ve kalitesine göre yukarıdaki varsayımların bazılarının geçerli, diğerlerinin gerçersiz olduğu ters problemler tasarlanır. Örneğin Izmit depremi

için yapılan bir analizde b. maddesi dışında diğer tüm varsayımların geçerli olduğu varsayılmıştır (Bouchon ve Diğ, 2002). Buna rağmen problemin çok çözümlülükten kurtarılması mümkün olamamış ve aynı gözlem setine karşılık gelen birden fazla hız-kayma dağılım sonuçları elde edilmiştir. Bu durumda çözüm için birbirinden çok farklı yaklaşımlar benimsenebilir. En yaygın olanı, çok sayıda çözüm üretmek ve nihai çözümün bunların ortalaması olduğunu varsaymaktır. Bu, istatiksel anlamda ayakkabı bağı yöntemi (boot-strapping method) yaklaşımına karşıt gelir. Nitekim Bouchon ve Diğ (2002) İzmit depreminin çözümünde bu yaklaşımı uygulamışlar ve gerçekçi bir sonuç üretebilmişlerdir.

3. DİNAMİK MODELLEME

Tarihsel sürece bakıldığında, deprem kaynağının dinamik modellemesinin kuramsal açıdan iki farklı yaklaşım ile ele alındığı görülür. Bunlar kırılma mekaniği (fracture mechanics) ve sürtünmeli kayma mekaniği (frictional sliding) yaklaşımlarıdır (Sholtz 1991, Kanamori ve Brodky 2004). Her iki yaklaşım da aynı konuyu farklı fenomenoloji ve farklı terminoloji ile ele alır, ancak karşılaşılan sorunlar ve getirilen çözümler oldukça benzerdir. Kırılma mekaniğinde kırılmayı belirleyen değişkenler gerilim şiddeti faktörü (stress intensity factor) ve yitim geriliminin seçimidir (yield stress). Sürtünmeli kaymada ise sürtünme katsayısının ne şeklide tanımlandığı bütün süreci belirleyen faktördür. Deprem araştırmaları bağlamında ikinci yaklaşımının bugüne dek daha yaygın kullanılmış olduğu göze çarpar. Bu çalışmada da ikinci yaklaşımın terminolojisi kullanılmıştır.

2.1. Analitik Yaklaşım

Dinamik modellemede, elastodinamik denklemde yeralan fay düzlemindeki kaymaları veya bunun eşdeğeri olarak moment tensör dağılımı, ortamda oluşan gerilime bağlı olarak ifade etmek gerekir. Bu çok karmaşık bir sorundur: fay düzlemindeki kayma miktarı biçim değiştirmeyi, biçim değiştirme de yeni bir gerilim dağılımını (fay yüzyinde çekme), yeni gerilim dağılımı da yeni bir kayma dağılımını ortaya çıkaracaktır. Tipik bir fay dinamiği modellemesinde, gerilimlerin belirlediği sınır koşulları altında kayma fonksiyonun hangi değerleri alacağı araştırılır. Problemin tanımlanma şekline göre, fay düzlemindeki çekme kuvveti ile ilgili herhangi bir sınır koşulu varsayımı yapılabilir. Örneğin, fay düzleminde bütün çekmelerin ($T(x,t)=0$) sıfır olduğu, ancak fay düzleminin geometrisinin sürekli değiştiği (büyüyebilir, kayabilir, küçülebilir) sınır koşulu olarak uygun bir seçim olabilir (Tada, 2009). Daha yaygın olarak kullanılan diğer bir yaklaşım ise, çekme ile kayma arasında analitik bir bağ kurmaktır. Kırılma mekaniği terminolojisinde sürtünme yasası adı verilen bu tür analitik bağ, söz konusu ortam için bir konstitütif yasa oluşturur. Kayma ile çekme arasında tanımlanacak olan bağ dinamik modellemenin en önemli konusudur ve en yoğun araştırmalar bu alanda yapılmaktadır. Tanımlanacak olan bağ ister istemez ampirik niteliktedir. Bu konuda yapılan çalışmaların geniş bir tartışması ve kapsamlı bir kaynak taraması için Dieterich (1994)'e başvurulabilir. En genel anlamda çekmenin kayma miktarına ve kayma hızına bağlı değiştiği varsayılır:

$$T(\mathbf{x},t) = F(\Delta u\,(\mathbf{x},t),\, d\,\Delta u\,(\mathbf{x},t)/dt) \qquad (5)$$

Burada $T(\mathbf{x},t)$ çekmeyi, $\Delta u(\mathbf{x},t)$ fay üzerindeki kaymayı gösterir. Bu ifade çekmenin hem fay üzerindeki yerdeğiştirmeye, hem de onun hızına bağlı değiştiğini gösterir. Çekmenin kayma hızı ile azaldığı (velocity weakening) veya çoğaldığı (velocity streghtening) model türleri vardır. Hatta değişik ortam ve zaman ölçeklerinde her iki kuralın da geçerli olabileceği durumlar söz konusudur. Mesela bir fayın ilk kırılma anına, saniyeler ölçeğinde bakılırsa, hızın artması ile birlikte kabuktaki ilk direncin yenildiği ve çekmenin hızla azaldığı görülür. Bu bir anlamda statik ve dinamik sürtünme katsayıları arasındaki farkı vurgulayan, çok bilindik ve tüm laboratuvar deneylerinde doğlulanmış bir ilişkidir (Byerlee, 1978). Ancak aynı faya farklı bir zaman ve uzamsal ölçekte bakıldığında tam tersi bir davranış da gözlenebilir. Nitekim fayın mantoya yakın derin kısımlarında, özellikle post-sismik gevşeme (post-seismic relaxation) dönemindeki deformasyonlara uzun zaman ölçeğinde

(örn yıllık) bakılırsa, deformasyon hızının artması ile çekmenin de arttığı gözlenir (Hearn ve diğ, 2009). Bu da bir önceki sürtünme davranışının tam tersidir. Genel olarak yavaş kayma (μm/s, sünme- creep) ve hızlı kayma (m/s, sismik hareket, deprem) arasında çok büyük bir fark olduğu, bu nedenle iki farklı sürtünme kurallarının geçerli olmasının doğal olduğu söylenebilir. Her iki kayma fazını da kapsayan modeller vardır ve bunların en bilineni Dieterich-Ruina sürtünme yasasıdır (Dieterich 1978, Dieterich 1979, Ruina 1983):

$$T(\mathbf{x},t) = F(\Delta u (\mathbf{x},t), d \Delta u (\mathbf{x},t)/dt, \theta) \quad (6)$$

Burada θ tanımlanan yeni değişkene durum değişkeni adı verilir. Bu değişken sürtünme yüzeyinin zaman içinde zayıflamasını temsil eden bir ara değişkendir. İçerisinde kritik uzunluk olarak tanımlanan, sürtünmenin zayıflamaya başlaması için ne kadar kayma oluşması gerektiğini gösteren bir uzunluk parametresi içerir. Bu yasada önemli olan, sürtünmenin oluşturduğu direncin sadece o andaki kaymaya ve kayma hızına bağlı olmaması, buna ek olarak geçmişinin etkisini o anda özetleyen bir durum değişkenine bağlı olarak tanımlanmasıdır (Dieterich, 1978). Bu bağlantı doğrusal değildir, hatta son yıllarda kaotik davranış gösterdiği de gösterilmiştir (Erickson et al., 2009). Sürtünme ile ilgili konsitütif denklemin bu derece karmaşık olması depremin kırılma sürecinin daha da karmaşık bir yapıda gelişmesi anlamına gelir. Ancak bu alanda yapılan çalışmalar depremin kırılma sürecine ilişkin birçok ayrıntıyı açıklamaya yetecek düzeye erişmiştir. Örneğin, sadece kayma-zayıflama (slip-weakening) yasası ile normal bir kırığın ilerleme aşamasında belli bir süre sonra süpersonik hıza ulaşabileceği gösterilebilmiştir (Dunham, E. M, 2007).

2.1. Nümerik Yaklaşım

Dinamik modellerin doğrusal olmayan (hatta kaotik) davranışları numerik ortama geçişi de çok zorlaştır. Bu nedenle numerik çalışmalarda sismik sürecin tümünün modellenmesi yerine benzer davranışın izlendiği farklı zaman ölçeklerinde (kosismik, intersismik gibi) ayrı ayrı modellemeler yapılır. Burada özellikle deprem süresine karşılıkgelen (kosismik) modelleme üzerinde yoğun ilgi vardır. Ancak gözlem verisi açısından bakılırsa çözüm uzayının yeteri kadar sınırlandırılamadığını kabul etmek gerekir. Deprem çok büyük ölçekte oluşan, ancak küçük ölçekteki gözlemlerin de önem kazandığı bir fiziksel olaydır. Örneğin büyük depremlerin hiçbirisi yeterince öncesinden veya yakınından gözlenmiş değildir. Bu sınırlamalar sonucunda dinamik modellemeleri öngörüde bulunmak yerine sürecianlamakiçin geliştirilen modeller olarak kabul etmek gerekir. Anlamakiçin yapılan modellerde yalınlaştırmalar kaçınılmaz olur. Bunların bir bölümü sürtünme ile ilgili konstitütif yasanın basitleştirilmesidir. Bu bağlamda çok farklı modeller geliştirilmiştir. En yaygını, kayma arttıkça çekmenin doğrusal olarak azalması ve belli bir kritik kayma değerinden sonra çekmenin sabitleşmesidir. Diğer bir basitleştirme de deprem öncesi fay zonunda gerilim dağılımının ne olduğu ile ilgilidir. Nitekim başlangıç gerilim dağılımı, deprem dinamiği açısından çok belirleyicidir (Olsen ve diğ, 1997) ve bu konuda yapılacak her varsayım sonucu etkiler. Malesef bu başlangıç gerilimleri ile ilgili varsayımları yönlendirecek gözlem verisi hemen hemen hiç yoktur. Bütün bu darboğazlara rağmen çok sayıda depremin dinamik modellememesi yapılmıştır. Burada temel olarak iki yaklaşım kullanılır: Sınır Entegrali Elemanı Yöntemi (geniş bir açıklama için bkz. Tada, 2009) ve Sonlu Elemanlar Yöntemi (Madariaga ve diğ, 1998; Olsen ve Archuleta, 1996).

3. SONUÇ

Deprem kaynağının modellemesi basit bir dalga yayılımı probleminden, doğrusal olmayan fiziğe kadar uzanan geniş bir alanda yürütülen çalışmaları kapsar. Sorunun kuramsal altyapısı oluşturulabilse bile, bunun analitik veya nümerik çözümü her zaman kolay değildir. Bu nedenle modelde yalınlaştırmalar kaçınılmaz olur. Bütün bu süreçte atılacak adımları yönlendirecek gözlem verisi de gerek nitelik ve gerekse nicelik açısından yeterli değildir. Ancak son yıllarda aletsel donanımda gözlenen gelişmeler deprem kaynağının daha iyi izlenmesine ve geliştirilen fiziksel modellerin daha da geliştirilmesine imkan sağlamıştır.

KAYNAKLAR

Aki K.& Richard, R. G. (2009) Quantitative Seismology, University Science Books, USA
Backus, G.& Mulcahy , M. (1976), Moment tensors and other phenomenological descriptions ofseismic sources I Continious displacements, Geophys. J. R. Astr. Soc. **46**, 341-361
Bouchon, M., Toksöz, N., Karabulut, H., Bouin, M-P., Dietrich, M., Aktar, M, and M. Edie, Space and Time Evolution of Rupture and Faulting during the 1999 İzmit (Turkey) Earthquake, (2002), *Bull. Seism. Soc. of Am.*, **92**, 1, 256-267
Byerlee, J. D. (1978) Friction of Rock, Pageoph, **116**, 615-626
Burridge, R. & Knopoff, L. (1964) Body force equivalents for seismic dislocations, Bull. Seis. Soc. Am. , **54**, 1875-1888
Dieterich, J. H. (1978) Time-dependent friction and the mechanics of stick-slip, *Pure appl. Geophys.*, **116**, 790-806
Dieterich, J. H. (1979) Modelling of Rock Friction 1. Experimental Results and constitutive equations, *J. Geophys. Res.* **84,** 2161–2168
Dieterich, J., (1994) A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering, J. Geophys. Res., **99**, 2601-2618
Dunham, E.M. (2007) Conditions governing the occurence of supershear ruptures under slip-weakening friction, *J. Geophys. Res.* **112,** B07302, 1-24
Erickson, B., Birnir, B., Lavallée, D. (2009) Chaos and Localization in Dieterich-Ruina Friction, SCEC Meeting
Gilbert, (1970) Excistation of the normal modes of the Earth by earthquake sources , Geophys. J. R. Astr. Soc. **22**, 223-226
Hearn, E. H., McClusky, S. , Ergintav, S. and Reilinger, R. E. , (2009) Izmit earthquake postseismic deformation and dynamics of the North Anatolian Fault Zone, J. Geophys. Res, **114**, B08405, doi:10.1029/2008JB006026
Kanamori, H, Brodsky, E. (2004) The physics of earthquakes Rep. Prog. Phys. 67 (2004) 1429–1496
Kellis-Borok, (1956) Methods and results of the investigations of the earthquake mechanisms,Publ. Bureau Central Seism. Int. SerieA, Trav. Scient, **19**, 383-394
King, G. C. P., Stein R. S. and Lin J. (1994) Static stress changes and the triggering of earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Amer., **84**, pp. 935-953*
Knopoff, L. & Gilbert, F. (1960) First motions from seismic sources, Bull. Seis. Soc. Am. , **50**, 117-134
Lamb, H. (1904) On the propogation of tremorsover the surface of an elastic solid, Phil. Trans. Roy. Soc. A **203**, 1-42
Love, A. E. H. (1945) The Mathematical Theory of Elasticity, Cambridge University Press,UK
Olsen, K. B., Archuleta, R.(1997) Three dimentional simulation of earthquakes on the Los Angelos Fault System, *Bull. Seismol. Soc. Amer., **86**,575-596*
Madariaga, R. , Olsen, K. B., Archuleta, R.(1998) Modelling dynamic rupture on three dimentional earthquake fault model, *Bull. Seismol. Soc. Amer., **88**, 1182-1197*
Olsen, K. B., Madariaga, R. , Archuleta, R.(1997) Three dimentional dynamic simulation of the 1992 landers Earthquake, Science, **278**, 834-838
Ruina, A. (1983) Slip instability and state variable friction laws, J. Geophys. Res, **88**, 10359-10370
Sholtz, C.H., (1991) The mechanics of earthquake Faulting,Cambridge University Press, UK
Tada, T., (2009) Boundary Inetegral Equation Method for Eartquake Rupture Dynamics, Fault-Zone properties and earthquake Tupture Dynamics, ed. Eiichi Fukuyama, Academic Press. , 217-267, USA
Udias, A. (1999) Principles of Seismology, Cambridge University Press, UK