

## **DALGA ŞEKLİ TERS ÇÖZÜMÜNDEN 3 KASIM 2002 DENALİ DEPREMİNİN KAYNAK MEKANİZMA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE DEPREME İLİŞKİN COULOMB GERİLME DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ**

### **DETERMINATION OF SOURCE RUPTURE PROCESS OF NOVEMBER, 3, 2002, DENALI EARTHQUAKE FROM WAVEFORM INVERSION AND STUDYING THE COULOMB STRESS CHANGE DUE TO EARTHQUAKE**

**Serkan Özçelik, Hakan Alp, Ali Pınar**

**İ.Ü. Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 34320, Avcılar - İstanbul**

**ÖZ:** 3 Kasım 2002 tarihinde Alaska'nın orta bölgesinde bulunan Denali Fayı üzerinde büyüklüğü  $M_w=7.9$  olarak belirtilen (USGS), bir deprem meydana gelmiştir. Denali (Alaska) depreminin arazi gözlemleri raporuna göre yaklaşık 300-330 km'lik sahip kırık uzunluğu belirtilmiştir. Bu depremle ilgili olarak uzak alan cisim dalgaları kullanılarak, dalga şekli ters çözüm yöntemi kullanılarak kaynak parametreleri hesaplanmış, depremin oluşum mekanizması hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Ters çözüm çalışmaları sonucunda Denali depremi üç alt olayla açıklanabilmektedir. Ters faylanma bileşenine sahip olan birinci alt olay, Susitna Glacire bindirme fayının bulunduğu bölgede, en büyük enerji boşalımının meydana geldiği olaydır. İkinci alt olay ( $M_o= 3,04 \times 10^{20}$  Nm) Denali Fayının orta kısmında ve üçüncü alt olayda Denali ve Totschunda Faylarının kesiştiği noktada olduğu sonuçları elde edilmiştir. 3 Kasım 2002 Denali Depreminden elde edilen ters çözüm sonuçları, depremin statik gerilme değişiminin incelemesine temel oluşturmaktadır. Bunun sonucunda elde edilen gerilme dağılımına göre Denali fayının güneydoğu kesiminde yer alan ve bölgenin önemli bir fay sistemlerinden olan Totschunda fayı sisteminin Cross Creek kısmında yaklaşık 0.09 bar kadar bir gerilme azalımı göstermiştir. Denali fayının güneybatı bölümündeki Susitna Glaciere segmentine ise 0.1 bar kadar gerilme yüklemesine sebep olmuştur. Ana şoktan sonra meydana gelen artçı deprem dağılımları ve bölgesel tektonik ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Dalga şekli ters çözümü, Coulomb gerilme dağılımı, sismik etkinlik, Alaska, Denali fayı.

**ABSTRACT:** The November 3, 2002 Denali fault earthquake ( $M_w=7.9$ ), which is an inland event that occurred in Central Alaska as by reported USGS. According to field observations Denali earthquake, about 300-330 km surface rupture has been reported. We investigated the source process of Denali earthquake using tele-seismic body waveforms data to estimate the source parameters. Three subevents were necessary to explain the observed seismic records. Our results show that the first subevent took place near on the Susitna Glaciere thrust fault, second subevent also took place center at the part of the Denali fault that it has got the biggest seismic moment ( $M_o=3,04 \times 10^{20}$  Nm), and third subevent occurred near to the intersection points of the Denali and the Totschunda Faults. We used the waveform inversion results for source parameters to the Coulomb Failure Stress changes that occurred along the Denali Fault to explore the relationship between failure stress and the aftershock distribution. Mapping the failure stress revealed that there is a significant correlation between the aftershock distribution and the area where static stress was raised. The 2002 Denali earthquake decrease the Coulomb failure stress about 0.09 bar along the Cross Creek segment of the Totschunda Fault. Hence, 2002 Denali earthquake increase the Coulomb failure stress about 0.1 bar towards to the Susitna Glacier thrust fault.

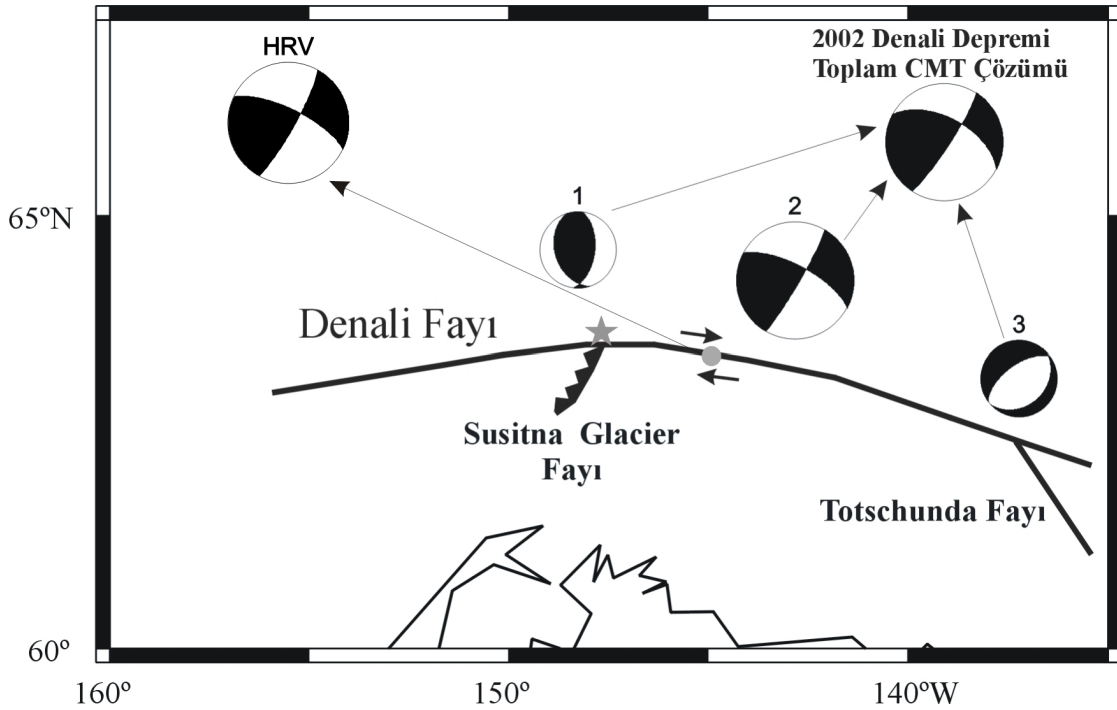
**Key Words:** Waveform inversion, Coulomb stress change, seismic activity, Alaska, Denali fault.

## GİRİŞ

### 1. Bölgenin Tektonik Yapısı

23 Ekim 2002 tarihinde  $M_w=6.7$  büyüklüğünde meydana gelen Nenana dağı depreminden 10 gün sonra Denali Fay Sistemi (DFS) üzerinde orta Alaska bölgesinin son 150 yıldaki en büyük depremi oluşmuştur (Şekil 1). Nenana dağı depremi, Denali fayı depreminin dış merkezinin yaklaşık 22 km doğusunda, DFS üzerinde oluşmuştur (Eberhart – Philips ve diğ., 2003; Ratchkovski ve diğ., 2003) (Şekil 1). Arazi gözlemleri sonucu, toplam kırık uzunluğu yaklaşık 300-330 km olarak belirtilen 3 Kasım 2002 Denali Fayı

depreminde, 3 ayrı fay parçası kırılmıştır. İlk hareket DFS'nin güneybatı ucundaki Susitna Glacier bindirme fayı üzerinde başlamıştır. Sonra kırılma Denali Fay sisteminin ana bölümüne doğru hareket etmiştir ve  $143^\circ$  batı boylamı yakınındaki Totschunda fayına ulaşıncaya kadar yaklaşık 220 km boyunca sağ yanal doğrultu atımlı şekilde kırılmaya devam etmiştir (Ratchkovski ve diğ., 2003) (Şekil 1). Yapılan çalışmalara göre Susitna Glacier fayı üzerinde yaklaşık 4m düşey atım, Totschunda ve Denali Fayı birleşim noktasında 8.8m yatay atım görülmektedir (Eberhart – Phillips ve diğ., 2003).



**Şekil 1:** Denali Fay Sistemi ve 3 Kasım 2002 Denali depreminin dış merkezi (yıldız) gösterilmektedir (IRIS). Oklar hareket yönünü göstermektedir, elde edilen alt olayların ve toplam olayın odak mekanizma çözümleri belirtilmiştir. Sol üst köşede Harvard CMT çözümü ve fay üzerinde içi dolu daire ile Harvard tarafından verilen depremin dış merkezi gösterilmiştir.

**Figure 1:** Denali fault system (DFS) and epicenter of 3 November 2002 Denali earthquake focal mechanisms of the subevents and total CMT solution of the 2002 Denali earthquake are also shown on this map. On the left side Harvard CMT solution is plotted. Here also, solid circle designate the epicentre of the Denali earthquake which is reported by Harvard. Arrows along the fault line represent the direction of motion on the DFS.

DFS güneydoğu Alaska'dan Kanada'ya ve Orta Alaska'dan Bering denizine doğru yaklaşık 1200 km boyunca genişleyen bir sistem olarak tanımlanmaktadır. DFS, sağ yönlü bir fay olup çeşitli fay bölümlerinden oluşan doğrultu atımlı bir fay niteliğindedir (Grantz, 1966). Denali fayı güneyde McKinly ve kuzeyde Hines Creek parçaları içerisine doğru bölümlere ayrılır ve doğuda Totschunda fayına doğru devam eder. DFS,

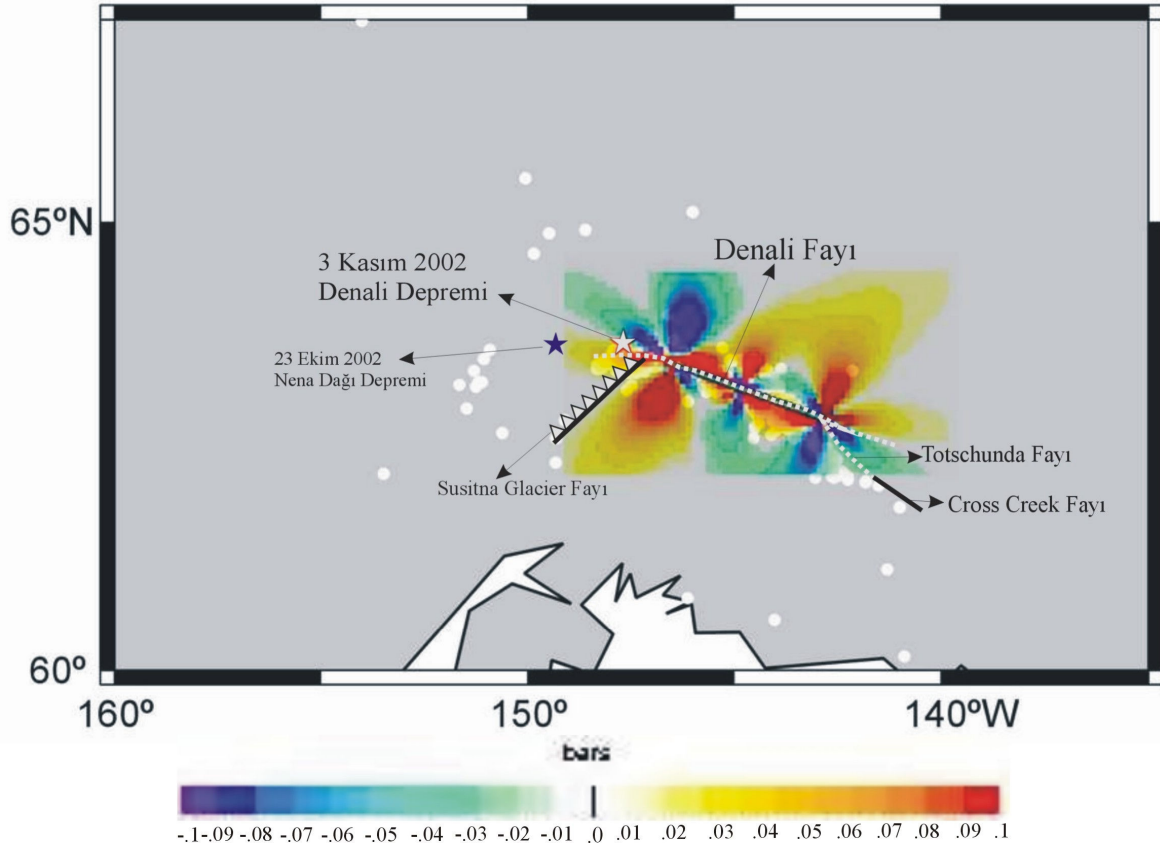
Güney Alaska tektoniğinin oluşumunda önemli bir role sahiptir. DFS genel olarak sağ yanal doğrultu atımlı bir fay olarak tanımlanırken, tektonik geçmişi bakılınca sadece bir parçası tam olarak anlaşılabilir. Yapılan önceki GPS çalışmaları, Denali Fay sisteminin merkez bölümü boyunca kayma değerinin 0.8cm/yıl olduğunu göstermektedir (Fletcher, 2002).

## 2. Depremsellik

Alaska bölgesinin, kıtasal depremselliği çok karmaşık tektonik yapılarla ilişkilidir. Büyük tektonik yapılardan biri sağ yanal doğrultu atımlı fay sistemi özelliğine sahip Denali Fayıdır. Bölge  $M=7.0$ 'den büyük magnitudlü depremlerin meydana geldiği bir yerdir. Bu bölgenin sismik aktivitesi batıdan doğuya doğru azalım göstermektedir. 2002 yılındaki iki depremden önce bölgede meydana gelmiş en büyük deprem  $M=7.2$  büyüklüğündeki 7 Temmuz 1912 depremidir. Bu depreme ait hiçbir sismogram kaydı olmadığı gibi yüzey faylanması hakkında da herhangi bir bilgi de bulunmamaktadır. Geçmişte oluşan en yakın deprem, 22 Ekim 1996'da meydana gelmiş olan  $M=5.7$  büyüklüğündeki depremdir. Genel olarak DFS, belirli sıklıklarda oluşan büyük depremlerin meydana geldiği

sismik etkinliğe sahip bir bölge olarak tanımlanabilmektedir.

Nenana Dağı ve Denali Fayı depremleri yoğun bir artçı deprem dağılımına neden olmuştur.  $M_w=6.7$  büyüklüğündeki 23 Ekim 2002 Nenana dağı depreminin artçılarının sayısını AEIC (Alaska Earthquake Information Centre) 1000'den fazla olarak rapor etmiştir ve Aralık ayının ortalarına kadar 14000'den fazla artçı deprem kaydı yapılmıştır. Nenana dağı depreminin en büyük artçıları 3.8 büyüklüğündeki iki adet depremdir. Büyük artçı depremler 7 km derinlikte meydana gelmişlerdir. Nenana dağı depreminin odak derinliği 8.3 km, Denali fayı depreminin odak derinliği ise 15 km olarak bulunmuştur. 2002 Denali fayı depreminin artçı depremlerinin dağılımı yaklaşık olarak 40 km uzunluğunda ve 20 km genişliğinde bir alanda kümelenmişlerdir (Şekil 2).



**Şekil 2:** 2002 Denali fayı depreminin Coulomb gerilme dağılımı. İçi dolu beyaz daireler ana şoktan sonra Aralık ayı sonuna kadar meydana gelen artçı şokları, yıldızlar 2002 yılında meydana gelen depremlerin dış merkezlerini ve DFS içindeki tektonik yapılar şematik olarak gösterilmektedir.

**Figure 2:** Coulomb stress change of the 2002 Denali fault earthquake. The closed circles are the aftershocks after the main shock until the end of the December. Stars indicate locations of 2002 events and tectonic structures on the DFS are also shown here.

## YÖNTEM

### 1. Dalga Şekli Ters Çözüm (2002 Denali Depremi)

3 Kasım 2002 tarihinde meydana gelen Denali fayı depremi zaman ortamında incelenmeye çalışılmış, kaynak parametreleri ve oluşum mekanizmaları Kikuchi ve Kanamori (1991), tarafından geliştirilen tele-sismik cisim dalgalarının dalga şekli ters çözüm yöntemi ile değerlendirilmiş ve kaynak mekanizma özellikleri araştırılmıştır. Cisim dalgalarının zaman ortamında değerlendirilmesi, kaynak kırılma işlemi ile faylanma mekanizmasından ayrıntılı bir şekilde bilgi edinilmesini sağlamaktadır (Kikuchi ve Kanamori, 1982, 1991).

Kullanılan yöntemde karmaşık (complex) ya da tek şokla oluşan depremlerin kaynak parametreleri elde edilmektedir (Pınar, 1995, 1998; Özçelik, 2004; Özçelik ve Pınar, 2005). Kikuchi ve Kanamori (1991) her bir nokta kaynağın bütün parametrelerini (faylanma mekanizması, sismik moment, kırılma zamanı, kırılma süreci, nokta kaynağın yeri ve derinliği) belirleyecek şekilde yöntemi geliştirerek çeşitli çalışmalarda kullanmışlardır. Bu parametreler, gözlemsel ve yapay sismogramların birbirlerine en uygun hale getirilmesi ile elde edilir. Bu yöntemi kullanarak depremde açığa çıkan enerjinin zaman ve uzaysal dağılımı incelenebilmektedir. Farklı odak derinlikleri için ters çözüm yapılarak gözlemsel ve teorik sismogramlar arasındaki uyumun hangi derinlik için en iyi olduğu belirlenmektedir. 2002 Denali fayı depremi için, hata oranının en az düzeyde olduğu farklı odak derinlikleri denenmiş ve CMT (Centroid Moment Tensor) derinliği 15 km olarak hesaplanmıştır. Özacar ve diğ., (2003) yaptıkları benzer çalışmada odak derinliğini 15 km olarak tespit etmişlerdir. Farklı derinlik ve kabuk yapıları denenmesine rağmen gözlemsel sismogramlarda hala yol-zaman grafiğinde yer almayan fazlar varsa ters çözüm işlemine ikinci bir şok ilave ederek işlemlere devam edilmektedir. Her bir nokta kaynak için skalar sismik moment değerleri elde edilmektedir ve elde edilen değerler Coulomb gerilme değişiminin incelenmesi için kullanılmıştır.

Dreger ve diğ. 2004 Denali depremini modellemişler ve her bir fay parçasını 3.75 km ile 3.75 km alt fay kullanarak ölçeklemişlerdir. Sismik Green fonksiyonu kullanarak hız modelini elde etmişlerdir.

Levha içinde oluşan ve büyüklüğü  $M_w=7.9$  olarak belirtilen (USGS, HRV) 2002 Denali depreminin tele-sismik kayıtları, dalga şekli ters çözüm yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Bu çalışmada seçilen depremin ana şokunun ve alt olayların meydana geldiği yerler ve odak mekanizma çözümleri Şekil 1'de gösterilmektedir. Tele-sismik kayıtlar IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) veri merkezinden elde edilerek ters çözüm işlemi gerçekleştirilmiştir. Gözlemsel sismogramlar için zaman

uzaklık tablosu kullanılarak seyahat zamanları elde edilmiştir. Deprem sinyallerinin istasyonlara varış zamanları önce Jeffreys ve Bullen (1958) zaman tablosu kullanılarak hesaplanmış, ardından birkaç saniyelik küçük düzeltmeler yapılmıştır. Böylece kabuk yapısının yanal heterojenitesi her bir istasyon için hesaba katılmıştır (Kikuchi ve diğ., 1993).

23 istasyondan alınan deprem kayıtlarında ters çözümleme için zaman penceresi 100 s olarak belirlenmiştir (Şekil 3). İstasyonların kaynak merkezine olan uzaklıkları  $30^\circ - 90^\circ$  arasında seçilmiştir, bu uzaklıklarda kabuk yapısının etkisi en az düzeyde olmaktadır (Tibi ve diğ., 2003; Özçelik ve Pınar, 2005).

Green fonksiyonları farklı derinlikler için bir referans noktasında hesaplanmaktadır. Green fonksiyonları diğer dış merkezlerde sadece başlangıç zamanlarının düzeltilmesi ile elde edilmektedir. Green fonksiyonu hesaplanırken, öncelikle kaynak bölgesi için Dreger ve diğ., (2004) tarafından oluşturulmuş yer altı hız modeli kullanılmıştır (Tablo 1).

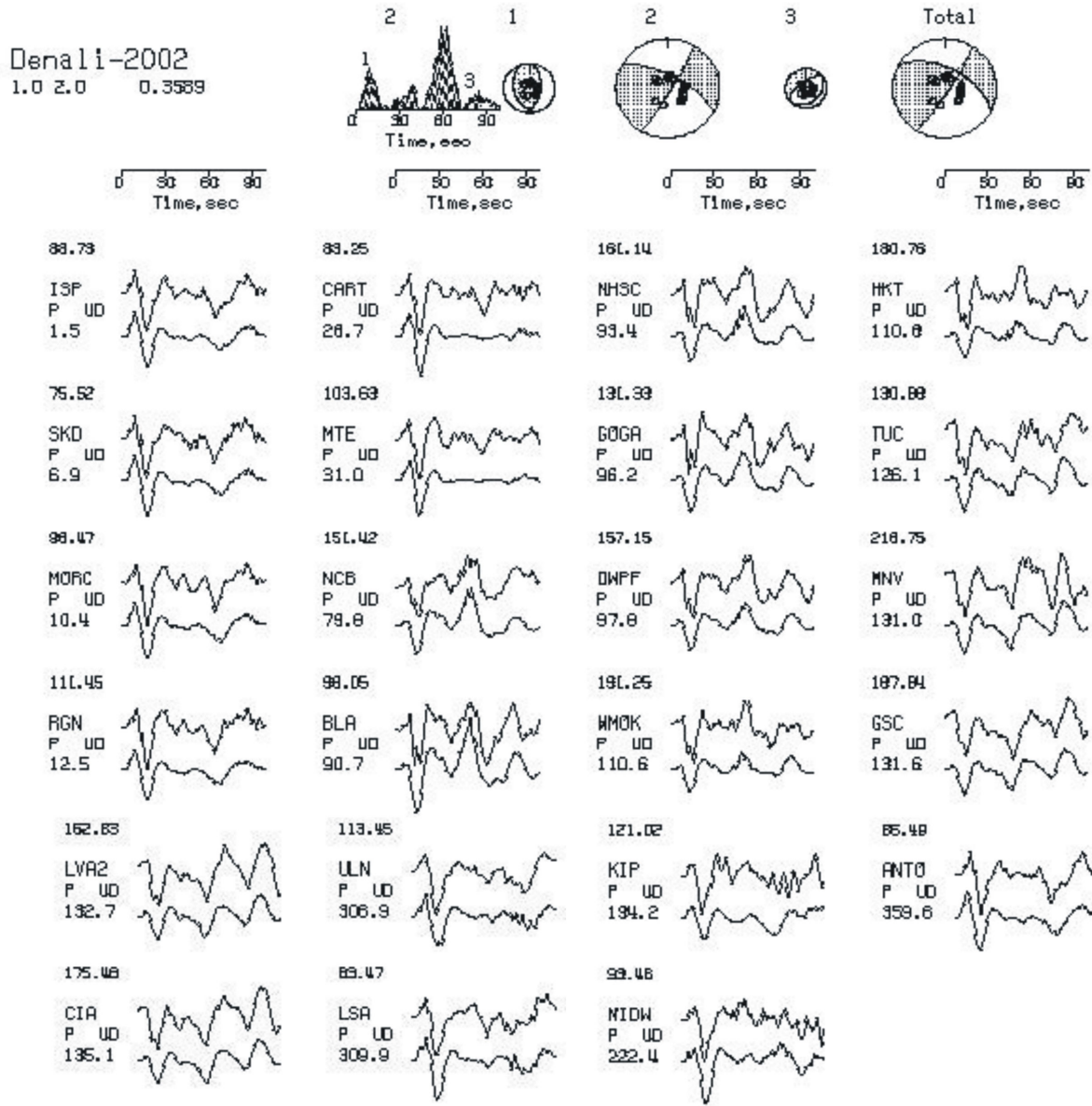
**Tablo 1:** Green fonksiyonu için kullanılan hız modeli (Dreger ve diğ., 2004).

**Table 1:** Crustal structure used in calculating Green functions (from Dreger et al., 2004).

Kalınlık (km)	P Dalga Hızı (km/s)	S Dalga Hızı (km/s)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
3.0	5.40	3.07	2550
8.0	5.90	3.35	2690
13.0	6.25	3.55	2790
5.0	7.10	4.03	3030
11.2	7.90	4.49	3260
50.0	8.29	4.71	3370

Kaynak parametrelerinin hesaplanması öncelikle kırılma süresine ( $\tau_p$ ) ve kırılma hızına ( $v$ ) bağlıdır. Her bir alt olay için kırılma süresinin elde edilmesinde; başlangıç zamanı ve her alt olayın mekanizması kullanılmıştır. Her alt olay, çok sayıda birim uzunluğuna sahip kaynak – zaman fonksiyonlarının toplamından meydana geldiği düşünülerek gözlemsel ve teorik sismogramlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda uyum gösteren birim kaynak – zaman fonksiyonlarının sayısı belirlenmektedir. Tablo 2'de ters çözüm sonucu elde edilen kaynak parametreleri verilmektedir.

Denali fayı depreminin toplam olarak elde edilen CMT sonuçları doğrultu atımlı faylanma özelliğini göstermektedir. Denali fayı depreminde yaklaşık 220 km boyunca Totschunda Fayına kadar sağ yönlü doğrultu atımlı faylanma görülmektedir (Eberhart-Phlips ve diğ., 2003; Ratchkovski ve diğ., 2003).



**Şekil 3:** 2002 Denali fayı depreminin kaynak – zaman fonksiyonu, toplam ve alt olayların odak mekanizması çözümü. Gözlemsel (üsttekiler) ve hesaplanan (alttakiler) dalga şekilleri.

**Figure 3:** Source time function, and mechanisms of total and subevents of the 2002 Denali. Observed (up) and the calculated (below) waveforms.

Denali fayı depreminde kırılma başlangıcı olan birinci alt olayın CMT çözümleri, DFS'nin güneybatısına uzanan ve Glacier bindirme fayı olarak tanımlanan bölgede meydana geldiği görülmüştür. Kaynak kırılma sürecinde birinci alt olay bu bölgede yaklaşık 45 km lik bir kırılma yaratmıştır (Şekil 1). İkinci alt olay, en büyük sismik momente sahip

2) ve DFS nin orta kesiminde oluşan sağ yanal doğrultu atım özelliğini yansıtmaktadır. İkinci alt olay, batıdan doğuya doğru yaklaşık 220 km lik bir kırılma süreci ile devam etmiş ve arazi gözlemleri ile de uyumlu sonuçlar bulunmuştur. Son alt olay ise DFS' nin doğu ucunu temsil eden Totschunda fayının kesişme kısmında oluşmuştur (Şekil 1).

**Tablo 2:** 3 Kasım 2002 Denali Fayı Depremine ait kaynak parametreleri ( $\tau_p$  kırılma zamanı). Altta HRV tarafından verilen deprem kaynak parametreleri. N1/N2 fay düzlemi ve yardımcı düzlem.

**Table 2:** Source parameters of the 2002 Denali fault earthquake ( $\tau_p$  source time duration). We represented to source parameters reported by HRV (below). N1/N2 fault plane and auxiliary plane

Başlangıç zamanı- $\tau_p$ (saniye)	$M_0$ $\times 10^{20}$ Nm	Doğrultu (°)	Eğim (°)	Atım (°)
(1) 2.0-15.0	0.74	162.40	39.00	70.30
(2) 19.0-69.0	3.04	298.30	68.90	174.30
(3) 74.0-98.0	0.48	46.50	30.00	-96.30
<b>Toplam</b>	2.82	297.00	55.80	171.40
		<i>N1/N2</i>	<i>N1/N2</i>	<i>N1/N2</i>
<b>Harvard</b>	7.48	296/29	71/82	171/19

## 2. Coulomb Gerilme Değişimi

Coulomb gerilme değişimi Reasberg ve Simpson (1992); Simpson ve Reasberg (1994), tarafından aşağıdaki şekilde verilmektedir.

$$\Delta CFF = \Delta \tau + \mu' \Delta \sigma \quad (1)$$

Burada  $\Delta \tau$ , kırılan fay üzerindeki kayma gerilme değişimi,  $\Delta \sigma$ , normal gerilme değişimi olarak tanımlanmakta ve  $\mu'$  de efektif sürtünme katsayısı olarak bilinmektedir. Çoğu çalışmada olduğu gibi bu çalışmada da  $\mu=0.4$  olarak alınmış olup bir elastik yarı yüzey için poisson oranı 0.25 değeri kullanılmıştır. Young modülü ise  $8 \times 10^5$  alınmıştır.

Anderson ve Ji, (2003) 23 Ekim 2002 M6.7 Nenana Dağı depremi ve bu depremi takip eden yaklaşık 150 yıl boyunca kuzey Amerika'da meydana gelmiş en büyük doğrultu atımlı deprem olan 3 Kasım 2002 Denali Fayı depremini dikkate alarak iki deprem arasındaki statik Coulomb gerilme değişimini araştırmışlardır ve Nenana depreminin, Denali fayı depremine yaklaşık olarak 30-50 kPa bir gerilme bindirdiği sonucuna varmışlardır. Bu modellemde tablo 2 verilen her bir fay parçasını tek bir yüzey gibi ele almışlardır. Bu çalışmada kayma modülü 30GPa ve poisson oranı 0.25 ve sürtünme katsayısı 0.4 olarak alınmıştır.

Bu iki depremin birlikte, Totschunda fay sisteminin Cross Creek parçasına ve ana şok kırığının güneydoğu Denali Fayına doğru 400kPa'dan fazla bir gerilme artışı olduğu gösterilmiş ve 80 kPa'dan fazla bir gerilme Nenana Dağı kırığının batısında Denali fayı için artış gösterdiğini elde etmişlerdir (Anderson ve Ji, 2003).

Bu çalışmada, 3 Kasım 2002 tarihinde meydana gelmiş olan Denali fayı depreminin Coulomb

modellemesi sırasında ters çözümle elde edilmiş olan kaynak parametreleri ve atım miktarları kullanılmış ve bu parametreler ile depremin oluşturduğu Coulomb gerilme değişiminin komşu faylar üzerindeki etkisi, depremden sonra meydana gelmiş olan artçı depremler ile bir ilişki olup olmadığı irdelenmiştir (Şekil 2).

Yapılan çalışmada, bölgesel gerilme tensörleri Coulomb gerilme hesabında ihmal edilmiştir. Deprem yaklaşık olarak ana Denali fayının güneyinde meydana gelmiş olup doğrultusu N262°E olarak verilmiş ve eğimi de 48° kuzey –kuzeybatı olarak belirtilmektedir (Anderson ve Ji; 2003). Denali fayı depreminin Coulomb gerilme hesabına göre, DFS'nin güneydoğu kesimde yer alan Totschonda fayı sisteminin (Şekil 1), Cross Creek bölümüne yaklaşık olarak 0.09 bar kadar bir gerilme azalmasına neden olmuş, Denali fayının güney batı bölümündeki fay parçasına ise 0.1 bar kadar gerilme yüklemesine sebep olmuştur (Şekil 2). Diğer taraftan depremin ardından meydana gelmiş olan artçı şoklar ile Coulomb gerilme değişimi arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmış 3 Kasım 2002 tarihinden Aralık ayı sonuna kadar olan artçı depremler şekil 2'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere gerilme değişimiyle artçı şoklar arasında çok yakın bir ilişki kurulabilmektedir.

## TARTIŞMA VE SONUÇLAR

IRIS veri merkezinden alınan deprem kayıtları ile, iki adet derin ve büyük depremin oluşum mekanizmaları araştırılmıştır. Dalga şekli ters çözümleme yöntemi kullanılarak nokta kaynak kırılma işlemi ile depremlerin odak mekanizması çözümleri elde edilmiş ve doğrultu, eğim, atım ve sismik moment ( $M_0$ ), kaynak parametreleri hesaplanmıştır (Tablo 2).

Birden fazla alt olaydan meydana gelen Denali fayı depremi, karmaşık (complex) deprem olarak adlandırılabilir. Dalga şekillerinde de cisim dalgalarının karmaşık yapıda olduğu gözlenmiştir.

Uzak alan cisim dalgaları ile yapılan ters çözümleme çalışması sonucunda Denali depreminin üç alt olaydan meydana geldiği bulunmuştur (Şekil 1, 3). Eberhart-Phillips ve diğ., (2003), arazi gözlemleri çalışmaları Denali depremi ile ilgili olarak toplamda yaklaşık 300-330 km uzunluğunda, sağ yönlü doğrultu atım özelliğinin hakim olduğu yüzey kırığı gözlemlenmişlerdir. Kaynak kırılma sürecinde birinci alt olay, Glacier bindirme fayı olarak tanımlanan bölgede meydana gelmiştir. İkinci alt olay, DFS nin orta kesiminde oluşan sağ yanal doğrultu atım özelliğini yansıtmaktadır. İkinci alt olay batıdan doğuya doğru yaklaşık 220 km lik bir kırılma süreci ile devam etmiş ve arazi gözlemleri ile de uyumlu sonuçlar bulunmuştur.

Son alt olay ise DFS nin doğu ucunu temsil eden Totschunda fayının kesişme kısmında oluşmuştur .

Azimutal dağılımı oldukça iyi sayılabilecek 23 istasyondan alınan P dalgası kayıtları, zaman penceresi

100 s seçilerek ters çözümleme işleminde kullanılmıştır. Dreger ve diğ., (2004) tarafından oluşturulmuş yer altı hız modeli kullanılmış ve CMT odak derinliği 15 km olarak bulunmuştur. Nenana ve Denali depremlerinin oluşturduğu artçı şokların derinlik dağılımları 15-20 km kadar ulaşmaktadır (Ratchkovski ve diğ.,2003). Denali depremi dalga şekli ters çözümlenmesi sonucunda üç alt olay ile açıklanabilmiştir (Şekil 1). Glacier bindirme fayının bulunduğu noktada birinci şokun CMT çözümü KG yönlü ters faylanma bileşeni içermektedir (Şekil 1, 2) Denali depremi ile ilgili hesaplanan kaynak parametreleri Tablo 2’de, dalga şekli ters çözüm sonuçları ise Şekil 1’de gösterilmektedir. Bulduğumuz sonuç ve çözümler Harvard ile karşılaştırıldığında, Denali depreminin tamamen doğrultu atımlı faylanma özelliği göstermediği, ilk hareketin meydana geldiği noktada ters faylanma bileşeni bulunduğu görülmüştür (Şekil 2). Elde edilen ters çözüm sonuçları, Eberhart - Philips ve diğ., (2003) tarafından yapılan arazi gözlemleri ve bölgenin tektoniği ile iyi bir uyum sağlamaktadır. Depremlerin dinamik ve mekanik özelliklerinin ayrıntılı incelenmesinde sismolojik gözlemlerler önemli bir yer tutmaktadır.

Elde edilen toplam moment büyüklüğünden ( $M_0=2.82 \times 10^{20}$  Nm) depremin büyüklüğü, bu çalışmada  $M_w=7.7$  olarak hesaplanmıştır.

3 Kasım 2002 – 31 Aralık 2002 aralığında meydana gelen artçı depremlerin uzaysal dağılımı kullanılarak artçı şoklar ile Coulomb gerilme değişimi arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Artçı şokların dağılımı ile ana şoktan sonra meydana gelen gerilme değişimi arasında çok yakın bir ilişki kurulabilmektedir. Ana şoktan sonra bölgede oluşan artçı depremlerin zaman – uzay dağılımları ile Coulomb gerilme değişimi örtüşmektedir.

Coulomb gerilme dağılımına göre, Denali fayının güney doğu kesiminde yer alan ve bölgenin önemli fay sistemlerinden olan Totschunda fayı sisteminin Cross Creek kısmında yaklaşık olarak 0.09 bar kadar bir gerilme azalımı görülmüştür. Denali fayının güney batı bölümündeki Susitna Glacier bölümüne ise 0.1 bar kadar gerilme yüklemesine sebep olmuştur.

## SUMMARY

The November 3,2002 Denali earthquake were inverted using the waveform inversion technique (Kikuchi and Kanamori, 1991) and Coulomb stress change. We first inverted P waveforms of the November 3, 2002 Denali fault earthquake recorded at 23 broadband stations. Three subevents were necessary to explain the observed seismic records. The initial subevent occurred as thrusting on the Susitna Glacier fault where it caused about 45 km surface rupture. Second subevent took place on the central part of the Denali Fault System (DFS) which is a right lateral strike-slip along the about 220 km. This event had a

duration of approximately 100 s and ruptured more than 300 km in length. We obtained a total seismic moment of  $2.82 \times 10^{20}$  Nm, which gives a moment magnitude of  $M_w=7.7$ . This value is less than the moment magnitude ( $M_w=7.9$ ), which is reported by HRV.

We also calculated the Coulomb stress change caused by the Denali Earthquake, and explored the relationship between failure stress and the aftershock distribution. Mapping the failure stress revealed that there is a significant correlation between the aftershock distribution and the area where static stress was raised. The 2002 Denali earthquake decrease the Coulomb failure stress about 0.09 bar long Cross Creek segment of the Totschunda Fault. Hence, the 2002 Denali earthquake increase the Coulomb failure stress about 0.1 bar towards to the Susitna Glacier thrust fault.

## DEĞİNİLEN BELGELER

- Anderson, G., and Ji C., 2003**, Static stress transfer during the 2002 Nenana Mountain-Denali Fault, Alaska, earthquake sequence, Geophysical Research Letters, Vol. 30, No. 6, 1310, 2002
- Dreger, S.D., D.D. Oglesby, R. Harris, N. Ratchkovski and R. Hansen, 2004**, Kinematic and dynamic rupture models of the November 3, 2002  $M_w7.9$  Denali, Alaska, earthquake, Geophysical Res. Lett., Vol.31, LO4605.
- Eberhart – Philips, D.E., et all., 2003**, The 2002 Denali fault earthquake, Alaska: A large magnitude slip-partitioned event, Science, 300, 1113-1118.
- Fletcher, H.J., 2002**, Crustal Deformation in Alaska Measured Using the Global Positioning System, Ph.D. thesis, University of Alaska at Fairbanks, 257 pp.
- Grantz, A., 1966**, Strike Slip Faults in alaska, U.S. Geological Survey Open-File Report 267, pp.82.
- Jeffreys, H. and K. E. Bullen, 1958**, Seismological Tables, Office Of The British Association, Burlington House, London.
- Kikuchi, M., and H. Kanamori, 1982**, Inversion of complex body waves Bull. Seis. Soc. Am., 72,491-506.
- Kikuchi, M., and H. Kanamori, 1991**, Inversion complex body waves – III. Bull. Seis. Soc. Am., 81. 2335-2350.
- Kikuchi, M., H. Kanamori and K. Satake, 1993**, Source Complexity Of The 1988 Armenian Earthquake: Evidence For A Slow After-Slip Event, J. Geophys. Res., Vol. 98, Pp. 15,797 - 15,808.
- Özacar, A.A.; S.L. Beck and D.H. Christensen., 2003**, Source process of the 3 November 2002 Denali fault earthquake (Central Alaska) from teleseismic observations, Geophysical Res. Lett., Vol.30, No. 12, 1638.

- Özçelik, S., 2004,** Derin Depremlerin (400 –670 km) Oluşum Mekanizmalarının Dalga Şekli Ters Çözüm Yöntemiyle Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004, İstanbul.
- Özçelik, S. ve A. Pınar, 2005,** Derin ve Büyük Depremlerin Kaynak Mekanizma Özellikleri, İ.Ü. Yerbilimleri Dergisi, C.18, S.1, 53-62, Y. 2005.
- Pınar, A., 1995,** Rupture Process and Spectra of Some Major Turkish Earthquakes and Their Seismotectonic Implications, Bogazici University, İstanbul.
- Pınar, A., 1998,** Source inversion of the October 1, 1995, Dinar earthquake (Ms=6.1): a rupture model with implications for seismotectonics in SW Turkey, Tectonophysics 292, 255-266.
- Ratchkovski, N.A., et. all., 2003,** Aftershock sequences of the Mw 7.9 Denali Fault, Alaska, Earthquake of 3 November 2002 from Regional Seismic Network Data, Seismological Res. Lett., Vol.76,6, 743-751.
- Reasenberg, P. A., and R. W. Simpson, 1992,** Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake, Science, 255, 1687– 1690.
- Simpson, R. W., and P. A. Reasenberg, 1994,** Earthquake-induced static-stress changes on central California faults, in The Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989—Tectonic Processes and Models, edited by R. W. Simpson, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 1550-F, F55– F89.
- Tibi, R., G. Guenter and D.A. Wiens, 2003,** Source Characteristics Of Large Deep Earthquakes: Constraint On The Faulting Mechanism At Great Depths, J. Geophys. Res., Vol. 108, No. B2, 2091.

**Yayına Geliş - Received :** 15.03.2006

**Yayına Kabul - Accepted :** 20.06.2006