

2000-2002 YILLARINDA AFYON SULTANDAĞ BÖLGESİNDEKİ DEPREMLERİN ($M_w \geq 5.8$) ETKİLEŞİMİ

STRESS INTERACTION BETWEEN EARTHQUAKES ($M_w \geq 5.8$) IN AFYON SULTANDAG REGION THAT OCCURRED IN 2000 and 2002

Hakan ALP, Serkan ÖZÇELİK, Nihan SEZGİN, Ali PINAR
İ.Ü. Mühendislik Fakaltesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 34320, Avclar-İstanbul

ÖZ: Afyon Sultandağı bölgesinde 15 Aralık 2000 tarihinde büyüklüğü $M_w=6.0$ olan bir deprem meydana gelmiştir. Bu depremden yaklaşık iki yıl sonra 3 Şubat 2002'de saat 07:11'de (GMT) büyüklüğü $M_w=6.5$ olan bir deprem ve bu depremden yaklaşık iki saat sonra ise 09:36 (GMT) büyüklüğü $M_w=5.8$ olan bir deprem daha oluşmuştur. Bu üç deprem arasındaki etkileşim Coulomb kırılma kriteri kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma alanı olan Afyon – Sultandağı bölgesinde meydana gelen depremlerin odak mekanizmaları ve bunların bölgesel tektonikle ilişkileri oldukça karmaşık bir yapıyı işaret etmektedir. 15 Aralık 2000 $M_w=6.0$ depremine uygulanan kriter sonucunda elde edilen Coulomb gerilme dağılımına bakıldığında 3 Şubat 2002 'de meydana gelen depremlerin gerilmenin artmış olduğu yerlerde oluştuğunu ve bu durumdan yola çıkarak 2000 yılı depreminin 2002 yılındaki depremleri tetiklemiş olduğu söylenebilir. Aynı şekilde 2002 yılı 07:11 de meydana gelen depreme uygulanan kriter ile elde ettiğimiz Coulomb gerilme dağılımı içerisinde aynı gün saat 09:36'da meydana gelen deprem yer almaktadır. Benzer bir ilişki bu depremler arasında da kurulabilmektedir. Bu depremlerden sonra meydana gelen artçı şok dağılımı da Coulomb gerilme dağılımı ile büyük bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Afyon – Sultandağ, Coulomb gerilme dağılımı, tetiklenme.

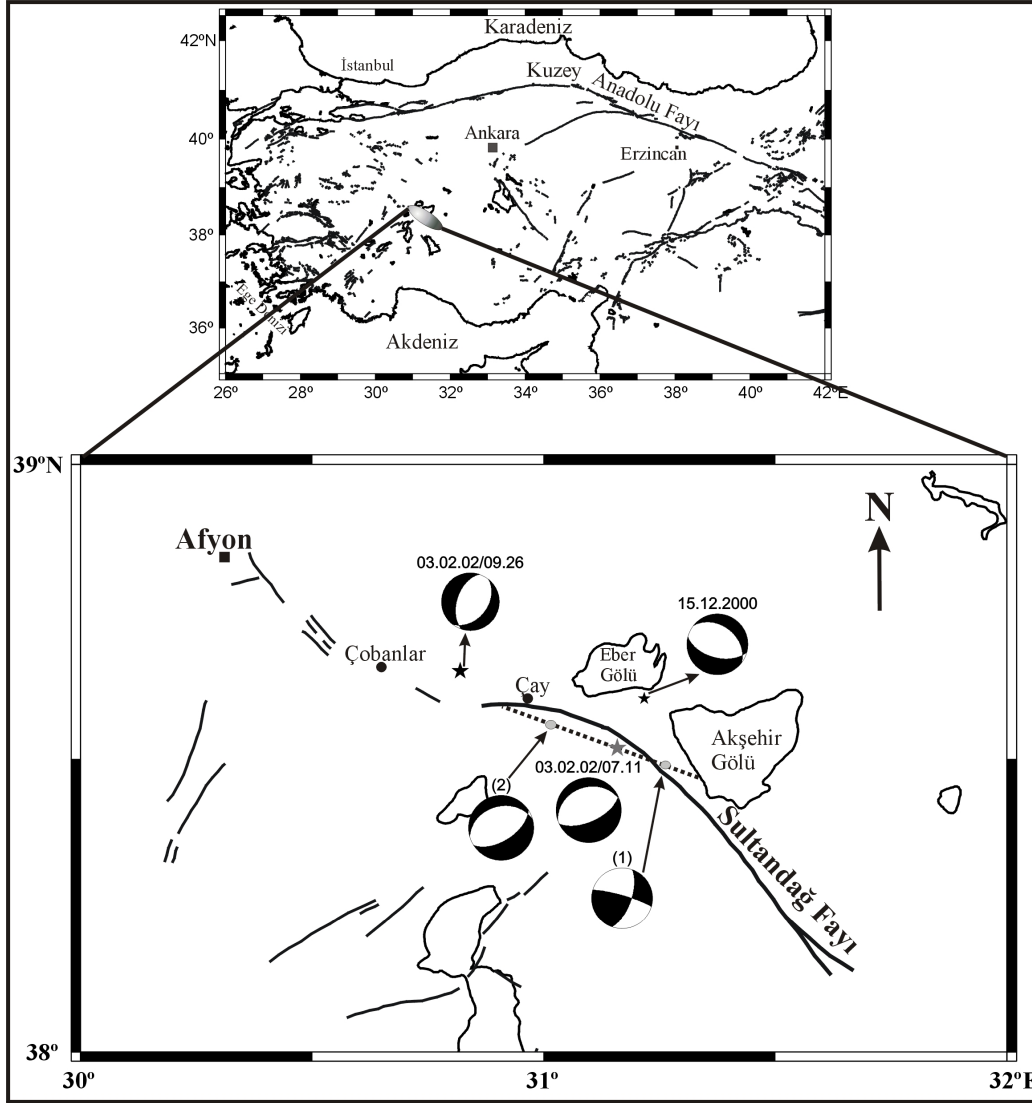
ABSTRACT: An earthquake ($M_w:6.0$) occurred by December 15th,2000 in Afyon Sultandag Region After two years from this earthquake, another earthquakes occurred by February 3rd, 2002 at 07:11 and 09:36 (GMT). The interaction between three earthquakes, one in 2000 and two in 2002, occurred in Afyon-Sultandag region are investigated through Coulomb Failure Criterion. The focal mechanism of Western Anatolian's earthquakes and their relations with active tectonics suggest that, the focal mechanisms of western Anatolian's earthquakes and their relation with active tectonics suggests that this area is very complicated in deformation. Anatolian plate is compressed between Africa and Eurasia plates, and moves westward. As a result its inner part is exposed to deformation. In Western Anatolia, normal faults form grabens at different orientations. The Coulomb stress changes associated with the 2000 main shock sequence reveal that the February 3rd, 2002 main shock occurred in a stress increased region. Our interpretation suggests that Feb 3,2002 earthquake is triggered by the 2000 Sultandag earthquake. Similar relation was identified between the 07:11 ($M_w=6.5$) and 09:36 ($M_w=5.8$) large shocks occurred on February 3rd.

Key Words: Afyon – Sultandag, Coulomb stress change, trigger.

GİRİŞ

Bu çalışmada Afyon–Sultandağ bölgesinde 15 Aralık 2000 tarihinde meydana gelmiş $M_w=6.0$ büyüklüğündeki deprem ve 3 Şubat 2002 tarihinde yaklaşık iki saat arayla oluşmuş büyüklükleri sırası ile $M_w: 6.5$ ve $M_w: 5.8$ olan depremler kullanılmıştır. Bu depremler kuzeybatı-güneydoğu uzanımlı Sultandağ fayı üzerinde oluşmuştur (Şekil 1). Bilindiği üzere, bir

deprem kendisinden sonra meydana gelebilecek depremleri normal oluş zamanından öne çekebilmekte, geciktirebilmekte ve hatta tetikleyebilmektedir. Bu durumdan yola çıkılarak incelenen üç depremin oluşumları sebebiyle Coulomb gerilme alanında meydana gelen değişimlerin, diğer depremlerin oluşumlarını etkileyip etkilemedikleri araştırılmıştır.



Şekil 1: Türkiye'nin başlıca tektonik birimleri ve çalışma alanı (Barka, 1992a'den derlenmiştir) (üst). Sultandag fayı üzerinde 2000-2002 depremlerinin dış merkezleri (yıldız) ile elde edilen CMT (Centroid Moment Tensor) çözümleri gösterilmektedir. (1) 03.02.02 07:11 GMT depreminin birinci alt olay CMT çözümü (2) ikinci alt olay CMT çözümü. Ayrıca kesikli çizgiler ile 2002 (07:11) depreminin şematik olarak kaynak kırılma yönelimi gösterilmiştir, içi dolu noktalar yaklaşık olarak alt olayların meydana geldiği yerleri temsil etmektedir (alt) (Özçelik ve diğ., 2005'den).

Figure 1: Tectonics of Turkey and showed area indicates the study area (compiled from Barka, 1992) (up). Regional map showing epicentres of the earthquakes in Afyon area. The surface trace of the Sultandag Fault is also depicted and showed the CMT solution (down). The epicenter of the 2000-2002 events is shown (star) and also indicated CMT on and around Sultandag Fault. [1] The CMT of first subevent of 2002 (07:11), and [2] second subevent of main event 2002 (07:11) is also shown. We showed that schematic illustration of the direction of rupture line by process, and also the circles represent to that where is occurred subevents (down) (after Ozcelik and et al., 2005).

Levha hareketleri sonucunda bir fay parçasının 0.1 bar yüklenmesi, levhaların relatif hızına bağlı olarak, uzun bir zaman içerisinde gerçekleşmektedir. Levha hareketleri ile San Andreas Fayı (SAF) kollarında 1.0 barlık bir yüklemenin 10 yıl alacağını

Stein ve diğ., (1992) hesaplamışlardır. Daha sonra ise Kuzey Anadolu Fayı (KAF) üzerinde yaptıkları çalışmaları sonucunda 0.3-3.0 barlık gerilme artışıyla KAF üzerindeki bir depremin oluş süresinin 3-30 yıl öne çekilebildiğini göstermişlerdir. Oluşan gerilme

değişimi, kabuğun kırılğan kısmının altındaki astenosferin rahatlama mekanizmasına bağlı olarak küçük ve orta büyüklükteki depremler üzerine etkisi 5-10 yıl sonra ortadan kalkarken büyük depremler için etkisi çok daha büyük olacağını belirtmişlerdir (Jaumé ve Sykes, 1992; Stein ve diğ.; 1996). Kaliforniya depremleri kullanılarak yapılan çalışmalara göre, bir depremin oluşturduğu gerilme alanı içerisinde yer alan bir depremin oluşumunu, belirli bir şekilde etkilediği bir çok araştırmacı tarafından ortaya konulmuştur (Stein ve Lisowski, 1983; King. ve diğ., 1994; Hudnut ve diğ., 1989; Harris ve Simpson, 1992; Jaumé ve Sykes, 1992; Stein ve diğ., 1992; Oppenheimer ve diğ., 1998).

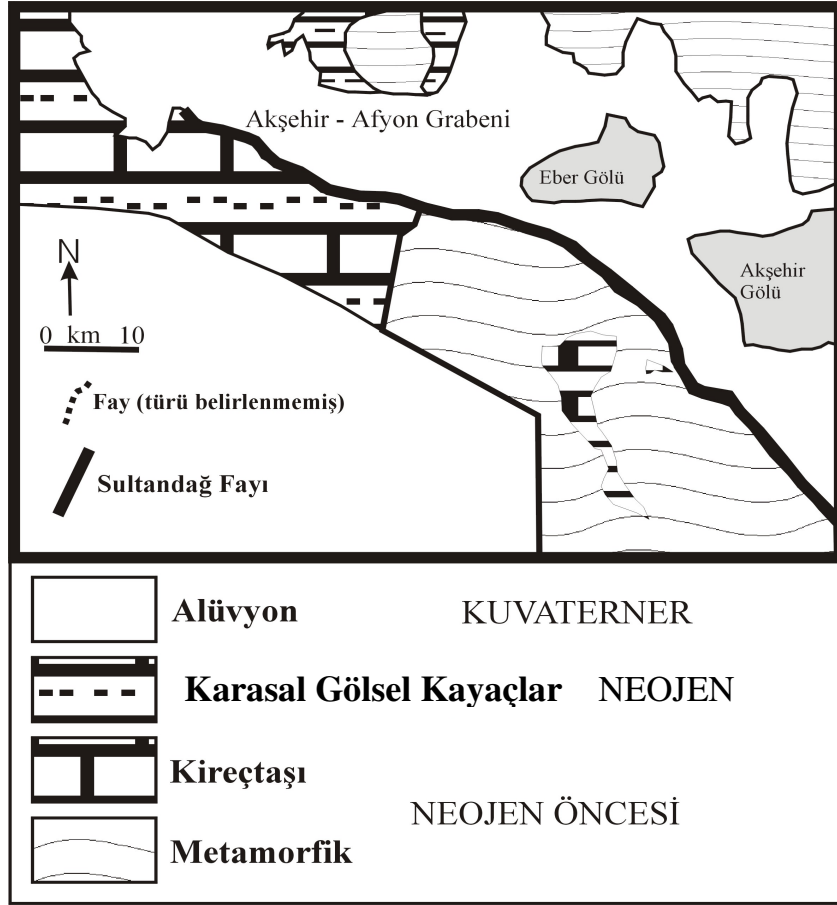
Reasenber ve Simpson (1992), 1989 yılında Kaliforniya'da San Francisco yakınlarında olan $M_w=7.1$ büyüklüğündeki Loma Prieta depremini modellemişler ve SAF'ın kolları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. SAF'ın bazı bölümlerini kırılmaya yaklaştırmak, güneyindeki Hayward fayı üzerinde gevşemeye neden olarak deprem olasılığını azaltmış olduğunu göstermişlerdir. Stein ve diğ. (1996), yöntemi ters faylanma mekanizması ile oluşan 1994 Northridge depremini ($M_w=6.7$) ve ilgili olabilecek depremleri modelleyerek bu kriteri uygulamışlardır. Ayrıca düşey gerilme bileşenlerinin önemli olduğunu gösterip kullandıkları bilgisayar programını ona göre düzenlemiş ve hem derinlik kesitlerinde hem de yatay kesitlerde gerilme artışı ile artçı şokların yerlerinin uyumlu olabildiğini göstermişlerdir.

Pınar ve diğ. (2001), 1999 İzmit depremine uyguladıkları bu kriterle bölgede, gelecekte büyük bir deprem olma olasılığının ana şok kırık zonunun batıya genişlemesini üç fay parçası için göstermişlerdir. Bu fay parçaları Yalova – Hersek (0.45 MPa), Prens adaları parçası (0.18 MPa) ve Çınarcık – Yalova parçaları olarak ayrıntılı bir şekilde göstermişlerdir. Afyon - Sultandağ bölgesinde, 2000 yılında bir ve 2002 yılında iki olmak üzere (15 Aralık 2000 – 03 Şubat 2002), meydana gelen üç depremin (Şekil 1), birbiriyle olan etkileşimleri incelenmiş, olası bir tetikleme (Özer ve diğ., 2002) veya normalde olacağı süreden daha önce meydana gelmesindeki etkisini, Coulomb kırılma kriterini uygulayarak araştırılmış ve gelecekte birbirine yakın olan fay parçalarının, bu depremlerden etkilenecek potansiyel deprem oluşturabileceği olgusu irdelenmiştir.

Çalışma Alanının Jeolojisi ve Tektoniği

Bölge, jeolojik olarak Sultandağları olarak tanımlanan ve bölgenin önemli yükseltilerini oluşturan metamorfik ve kalker birimleri ile genellikle düzlükler ve ovalar ile karakterize edilebilecek Neojen-Kuvaterner yaşlı birimlerden oluşmaktadır (Şekil 2). Bölgede yeralan başlıca tektonik elemanlar Sultandağ yükselimi, Akşehir-Afyon çöküntüsü, Sultandağ fayı ve Fethiye - Burdur fay zonudur. Jura öncesi yaşlı

metamorfik kayalarla temsil edilen Sultandağ yükselimi faylarla yükseltilmiş kuzeybatı güneydoğu uzanımlı bir yüksek dağ sırasıdır (Nurlu ve Kuterdem, 2002). Sultandağ yükseliminin kuzeydoğusunda yer alan Akşehir - Afyon çöküntüsü ise 5 ila 20 km genişliğinde ve 90 km uzunluğunda çizgisel bir çöküntü alanıdır (Şekil 2). Akşehir ve Eber göllerinin de içinde bulunduğu bu alan Kuvaterner yaşlı kalın çökellerle doldurulmuştur. Şekil 2'de bölgenin temel jeolojik birimleri gösterilmektedir. Şekil 2'de de görüldüğü üzere bölgede Sultandağ Fayının kuzey kesimlerinde Kuvaterner yaşlı alüvyon malzeme ve güney bölümün de ise Neojen yaşlı karasal görsel kayalar ve Neojen öncesi metamorfik kayalar hakimdir. Ayrıca, yine bu döneme ait kireçtaşları da fayın güney tarafında mevcut olarak jeoloji haritasından görülmektedir (Şekil 2). Burada dikkat edilecek olan kısım jeolojik birimlerin farklılaşmasında anlaşılacağı üzere bir çeşitli faylanma hareketleri mevcuttur (Türkiye Jeoloji Haritası). Bu faylanma hareketleri bölgenin eğim durumunu değiştirmiş, yüksek satırlar, şiddetli bir aşınmaya, depresyon sahasında ise hızlı bir sedimantasyona (çökelmeye) uğramıştır (Atalay, 1975). İnceleme alanı içinde tektonik açıdan en önemli olarak bilinen fay sistemi (Şengör ve diğ., 1985) tarafından adlandırılan Sultandağ Fayı, yaklaşık 65 km uzunluğunda olup genel doğrultusu $K65^{\circ}D$ olarak gösterilmiştir (Şekil 1, 2). Isparta buklümünün şekillenmesinde önemli rol oynayan Sultandağ fayı neotektonik dönemin başlangıcında geliştiği ve bu dönemde sağ yönlü doğrultu atımlı fay olarak çalıştığı Boray ve diğ., (1985) tarafından belirtilmiştir. Şaroğlu ve diğ., (1987)'ye göre fayın geçtiği alanlardaki genç morfolojik kanıtlara dayanılarak diri fay olarak tanımlanan Sultandağ fayını neotektonik dönem başında sağ yönlü doğrultu atımlı daha sonra bindirme niteliğinde yüksek açılı ve az atımlı olarak çalıştığı düşünülmektedir. Koçyiğit ve diğ., (2002)'ye göre Akşehir fayı olarak da tanımlanan fayın kuzeydoğu bloğu düşmekte olup, düşen blok üzerinde Akşehir ve Eber gölleri meydana gelmiştir (Şekil 1,2). Faya asılı olarak kalmış taraçalar, asılı vadiler ve faya doğru eğimlenmiş alüvyon yelpazeleri fayın aktif olduğunu gösteren saha verileridir (Şekil 2). Sultandağ depremi Türkiye'nin neotektonik çatısında önemli yeri olan ve literatürde Anadolu'nun batıya kaçışında yapısal bir eşik olarak tanımlanan Isparta dirseğinin kuzey ucunda meydana gelmiştir. Bu dirsek kuzey ve kuzeydoğusundan Sultandağ fayı tarafından sınırlanmaktadır. Sultandağ yükselimi ile kuzey ve doğusundaki graben havzaları arasında yer alan bölümü yaklaşık 100 km uzunluktadır. Bu fayla ilişkili olan Afyon grabeni de dahil edildiğinde fay zonunun uzunluğu 150 km'ye yaklaşmaktadır. Sultandağ fayı düşük atımlı normal fay niteliğindedir. Zonal bir gidiş gösteren ana fay zonunun genişliği birkaç on metre ile birkaç km arasında değişir.



Şekil 2: Afyon – Akşehir bölgesi Jeoloji Haritası ve çalışma alanının genel jeolojik birimleri (1/500000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritasından düzenlenmiştir).

Figure 2: The Geological map of the area Afyon and Akşehir, and geological frame of the study area (compiled from the Geological Map of Türkiye, in the scale of 1/500000).

Çay yöresine rastlayan kuzey ucundaki morfolotektonik verilere göre faydaki görünür eğim- atım 1000 metreyi aşmaktadır (Emre ve diğ., 2002). 3 Şubat 2002 depremi, Sultandağ fayının kuzey batı ucunda gelişmiştir (Şekil 1). Eski depremlere ilişkin fay sarplıkları belirgin olup Holosen çökellerinde eski deprem deformasyonları gözlenmiştir (Emre ve diğ., 2002). Sultandağ yöresinde yer alan grabenler Türkiye'nin önemli bir sismojenik zonunu oluşturmaktadır (Şekil 2). Bölgede yoğun mikrosismik aktivite gözlenir. Son yüzyılda magnitüdü $M_w=5.0$ 'dan büyük üç deprem meydana gelmiştir. Bu depremler 1921 İlgın-Argıthanı ($M_w=5.4$), 1946 Argıthanı ($M_w=5.5$) ve 15 Aralık 2000 Çobanlar ($M_w=6.0$) depremleridir (Ambraseys, 1988; Taymaz ve Tan 2001). 1921 ve 1946 Argıthanı depremleri fayın güney ucunda, 15 Aralık 2000 Çobanlar depremi (Akşehir) ise kuzey ucunda gerçekleşmiştir. Tarihsel aktivite açısından değerlendirildiğinde 3 Şubat 2002 Sultandağ depreminin, fayın sismik boşluk olarak

yorumlanabilecek Çay segmenti üzerinde gerçekleşmiş olduğu söylenebilir. Sultandağ depremi ana şoku (USGS $M_s=6.5$) 03 Şubat 2002 yerel saatle 09:11.28 de oluşmuş ve bunu yoğun artçı şoklar izlemiştir. Ana şoktan yaklaşık iki saat sonrada $M_s=5.6$ (USGS) büyüklüğündeki deprem, ilk depremde orta hasar görmüş olan bazı binaların yıkılmasına neden olmuştur (Emre ve diğ. 2002).

Ana şok ve iki saat sonra gelişen büyük artçı şokun büyüklüğü, dışmerkez koordinatları ve derinliğine ilişkin Harvard University Seismology Group'undan derlenen bilgiler Tablo 1'de gösterilmiştir.

Odak mekanizması çözümlerinde, ana şok ve onu izleyen $M_w=5.6$ büyüklüğündeki artçı şok normal faylanmayı yansıtmaktadır. 2002 yılında meydana gelen $M_w=5.6$ büyüklüğündeki artçı şok, 15 Aralık 2000 tarihinde meydana gelen $M_w=6.0$ büyüklüğünde ve odak mekanizması çözümlerinde normal faylanma gösteren Çobanlar depremi (Akşehir) dış merkezlerine yakın bir konumdadır.

Tablo 1: Çalışılan depremlere ilişkin HARVARD tarafından elde edilen deprem kaynak parametreleri (Harvard University Seismology Group).**Table 1:** Source parameters of the events by Harvard Seismology Group.

Deprem	Enlem	Boylam	Doğrultu (°)	Eğim (°)	Kayma (°)	Derinlik (km)	Büyüklik
15-12-2000	38.40	31.35	285	41	-100	15	Mw: 6.0
03-02-2002	38.62	31.21	269	37	-71	15	Mw: 6.5
03-02-2002	38.23	30.56	236	45	-58	15	Mw: 5.8

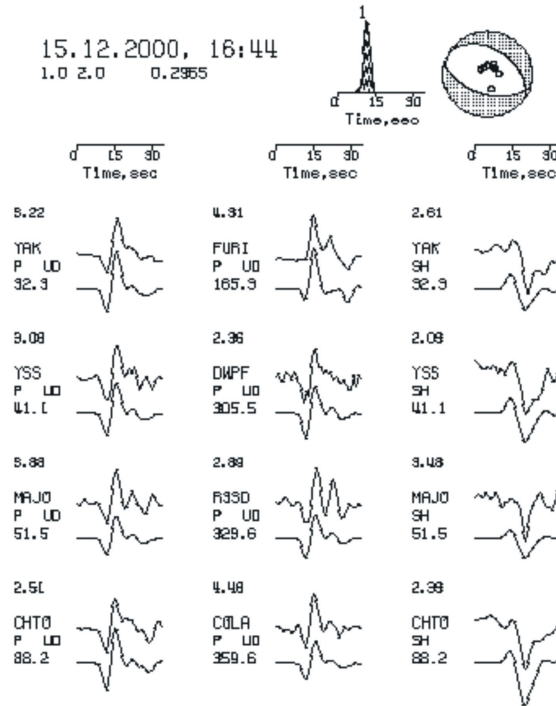
2000 ve 2002 Depremlerinin Kaynak Çözümleri

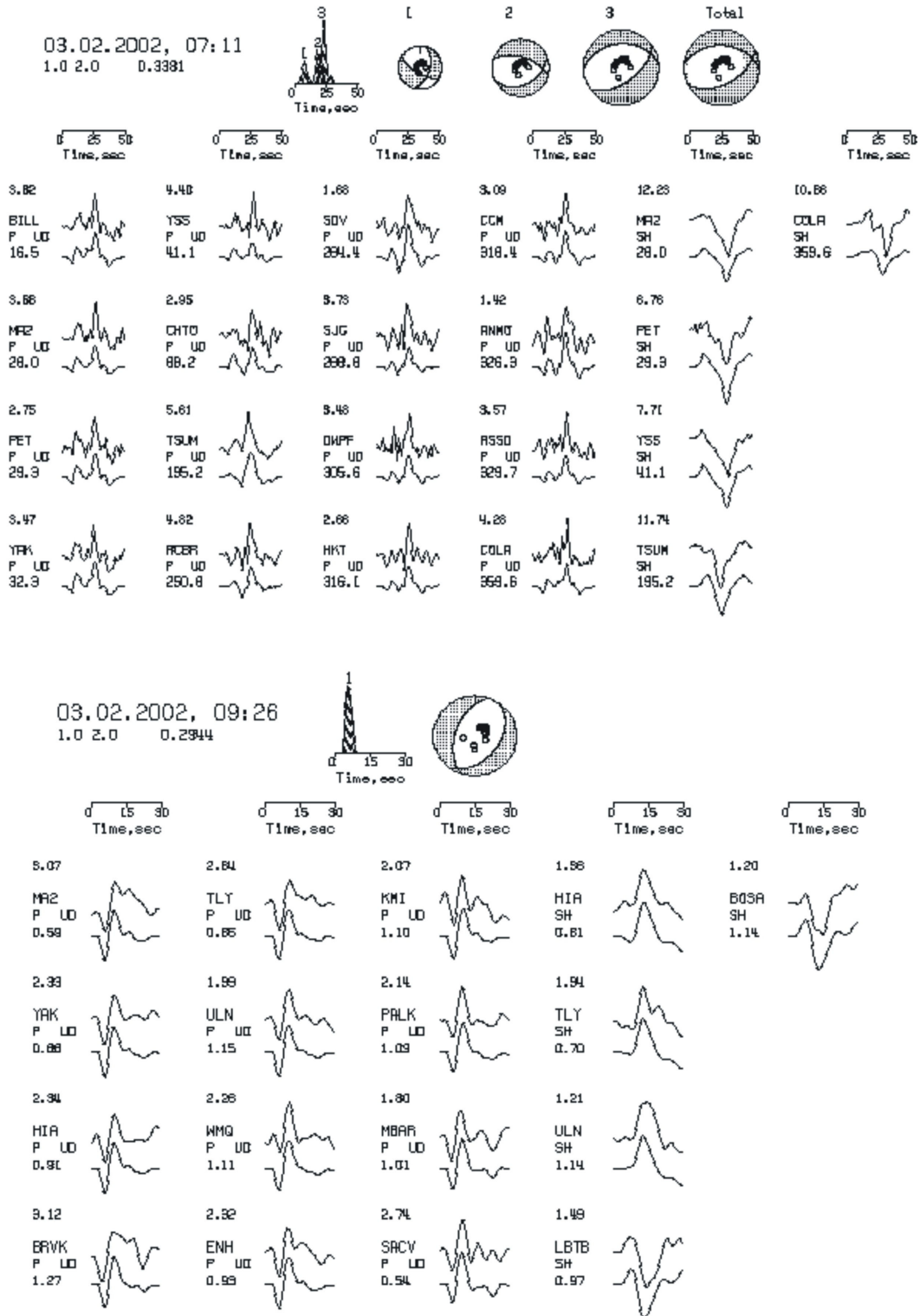
Çalışma alanının hem doğusunda hem de ortasındaki depremlere ait fay düzlemi çözümleri, Akşehir-Afyon ana grabeni ile aynı doğrultuyu veren, genellikle D-B ya da DGD-BKB uzanımlı ve ortalama $62^\circ \pm 10^\circ$ eğim açısına sahip fayları belirlemektedir. Buna karşın batıdaki deprem fay düzlemleri çözümleri D-B'dan K-G 'e değişen doğrultulardaki oblik normal atımlı fayları göstermektedir (Tapırdamaz ve diğ. 2002). Bu bölge K-G uzanımlı Şuhut, Karamuk grabenleri ile D-B uzanımlı Akşehir-Afyon grabenlerinin kesiştiği alana denk gelmektedir. Batıdaki fay düzlemi çözümlerindeki farklılık, buradaki karmaşık fay geometrisi ile açıklanabilmektedir.

Çalışmada kullanılan depremlerin tele-sismik kayıtları dalga şekli ters çözüm yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Bu çalışmada seçilen depremlerin

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. Ters çözümlerlerde kullanılan P ve SH dalgaları için iç merkez uzaklıkları sırası ile $30^\circ - 90^\circ$ ve $40^\circ - 70^\circ$ arasında olan istasyon kayıtları seçilmiştir. Bu uzaklıklar için, kabuk yapılarının etkileri ve yer içinden kaynaklanan etkiler en az düzeydedir.

2000 ve 2002 depremlerinin ters çözümünde P ve SH dalga şekilleri kullanılmıştır (Şekil 3, 4). Kikuchi ve Kanamori (1991) tarafından geliştirilen dalga şekli ters çözümlemesi yöntemi kullanılarak odak mekanizması çözümleri elde edilmiş ve kaynak parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen kaynak parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Şekil 3:** 2000 yılı Afyon – Sultandağ depreminin kaynak – zaman fonksiyonu ve odak mekanizması çözümü. Gözlemsel (üsttekiler) ve hesaplanan (alttakiler) dalga şekilleri.**Figure 3:** Source time function and the mechanism of the event of the 2000 Afyon- Sultandag earthquake. The observed (upper) and the calculated (lower) waveforms.



Coulomb Gerilme Değişimi Modellenmesi

Bu çalışmada faylanma ya da deprem olayını açıklamak için Coulomb Kırılma kriteri kullanılmıştır. Bu kritere göre bir düzlem boyunca kırılmada rol oynayan asal kuvvet kayma ya da teğetsel gerilmedir. Bu gerilmeyi azaltacak yönde etkiyen kuvvet ise düzleme etkiyen normal kuvvet (σ) ile iç sürtünme katsayısının (μ) çarpımıdır. Bu kuvvetlere bağlı olarak Coulomb kırılma kriteri şu şekilde formüle edilmiştir.

$$|\tau| = S_o + \mu\sigma$$

burada S_o kohezyon veya malzemenin dayanım gerilmesi olarak tanımlanır. τ 'nin işareti kırılmanın yönünü belirlediğinden dolayı mutlak değer içersinde gösterilmiştir.

Faylanma ve kırılma nedeni ile oluşan kalıcı gerilme veya Coulomb gerilmesindeki değişim $\Delta\sigma_f$ kırılma öncesi ve kırılma sonrasındaki kalıcı gerilme değerlerinin farkına eşit olacaktır. Buna göre Coulomb gerilmesindeki değişim;

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau - \mu(\Delta\sigma - \Delta p)$$

şeklinde yeniden yazılabilir (King ve diğ. 1994).

Burada $\Delta\sigma$ ve Δp sırası ile kırılma yüzeyine etki eden normal kayma gerilme değerlerindeki değişimlerdir. Δp ise boşluk sıvı basıncındaki değişim olarak ifade edilir. Eğer ortamdaki gerilme değişimi akma yolu ile kendini dengelemeye çalışan boşluk sıvı basıncındaki değişimden daha hızlı olursa, Δp ortamdaki çevresel gerilme ile ilişkilendirilebilir. Kırılma yüzeyinin gerilme eksenine ile arasındaki açının β olduğu kabul edilirse . Coulomb gerilmesi σ_f , β açısının

$$\tan 2\beta = \pm \frac{1}{\mu}$$

olması durumunda en büyük değerine ulaşır. Bu çalışmada μ değeri 0.4 olarak alınmış ve hesaplamalarda elastik bir yarı yüzey düşünülerek Poisson oranı 0.25 olarak kullanılmıştır. Çalışmada Afyon-Sultandağ bölgesinde 15 Aralık 2000 günü

meydana gelmiş $M_w=6.0$ büyüklüğündeki deprem ve 3 Şubat 2002 tarihinde yaklaşık iki saat arayla oluşmuş büyüklükleri 6.5 ve 5.8 (M_w) olan depremler kullanılmıştır. Bu depremler Sultandağ fayı üzerinde oluşmuşlardır. Artık bilindiği üzere bir deprem kendisinden sonra meydana gelebilecek depremleri normal oluş zamanından öne çekebilmekte, geciktirebilmekte ve hatta tetikleyebilmektedir. Bu durumdan yola çıkılarak çalışılan bu üç depremin oluşumları sebebiyle Coulomb gerilme alanında meydana gelen değişimlerin diğer depremlerin oluşumlarını etkileyip etkilemedikleri araştırılmıştır.

Modellenen Depremler

15 Aralık 2000 Depremi ($M_w=6.0$)

İlk olarak modellenen 15.12.2000 tarihinde, kuzeybatı-güneydoğu uzanımlı Sultandağ fayı üzerinde oluşan ve sismik moment büyüklüğü $M_w=6.0$ olan Akşehir depremidir. Akşehir Depremi olarak da adlandırılan ve 15 Aralık 2000 tarihinde meydana gelen deprem yaklaşık 10-15 km uzunlukta bir yırtılma oluşturmuş ve artçı depremler bu kırık boyunca yoğunlaşmıştır. 15 Aralık 2000 Akşehir depremi ($M_w=6.0$) hasarı, sadece Akşehir gölünün güneydoğusunda Adsız kasabası ile Yaşarlar köyü civarında yoğunlaşmıştır. Depremi izleyen iki haftalık süre içinde, bölgede büyüklüğü 2.5-4.6 arasında değişen 30 civarında artçı deprem olmuştur (B.Ü. Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Afet işleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Enstitüsü kayıtları). Artçı deprem episentirlerinin değişim ve yoğunlaşma biçimi, 15 Aralık 2000 Sultandağ depreminin, Akşehir Fay Zonunun Sultandağ ile Akşehir arasında kalan yaklaşık 25 km uzunluğundaki bir kesiminin hareket etmiş olduğunu ve depremi oluşturduğunu kanıtlamıştır (BÜ Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Afet işleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Enstitüsü kayıtları). Bu depreme ait kaynak parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. 15 Aralık 2000 depremi için yapılan çalışmada Coulomb 2.5 programına giriş verisi olarak verilen değerler çalışmada kullanılan depremlerin atım miktarları ve odak mekanizması parametreleri Özçelik ve diğ. (2005)'den elde edilmiştir.

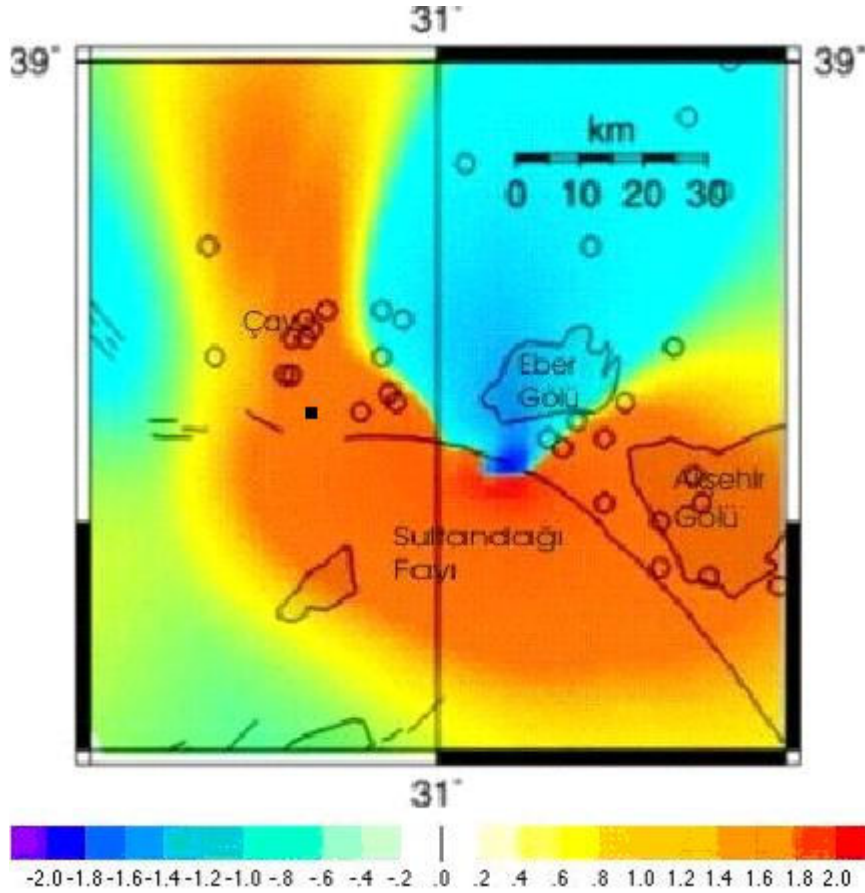
Tablo 2: Çalışmada kullanılan 2000 ve 2002 yılı depremlerinin kaynak parametreleri. Derinlik kaynak kırılma sürecinin başladığı odak derinliğini belirtmektedir

Table 2: Source parameters of the subevents and total seismic moment of 2000 and 2002 – Sultandag earthquakes in this study. The depth also is start of rupture processing for events.

Depremler	Koordinat	Derinlik (km)	Mo ($\times 10^{18}$ Nm)	Doğrultu ($^{\circ}$)	Eğim ($^{\circ}$)	Atım ($^{\circ}$)
15.12.2000	38.63°E,31.19°E	10.0	0.96	104.80	53.50	-103.70
03.02.2002 (07:11)	38.57°N,31.27°E	7.0				
[1. alt olay]			1.17	285.90	82.10	155.10
[2. alt olay]			4.00	57.40	57.20	-99.20
Toplam			3.53	65.30	60.70	-92.90
03.02.2002 (09:26)	38.65°N,30.82°E	9.0	0.49	198.20	51.90	-102.80

Dalga şekli ters çözümlene sonucu elde edilen atım değerleri, programa giriş verisi olarak girilmiş ve bu verilerden fay geometrisi ayrıntılı bir şekilde görülmüştür. Giriş verisi elde edildikten sonra hesaplanan 15 Aralık 2000 $M_w=6.0$ büyüklüğündeki depremin Coulomb gerilme alanı değişimi Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü üzere 15 Aralık depremi Coulomb gerilme dağılımı 3 Şubat 2002 tarihinde oluşan ve büyüklüğü 6.5 olan depremi

yaklaşık olarak 1.5 bar etkilemiştir. Şekil 5'te verilen skalada bu gerilme değişimi görülebilmektedir. Gerilmenin artmış olduğu yerde oluşan $M_w=6.5$ büyüklüğündeki deprem 15 Aralık depreminden etkilenmiştir. Doğal olarak bunun sonucunda 15 Aralık 2000 depreminin, 3 Şubat 2002 ($M_w=6.5$) depreminin oluşumundan daha önce meydana gelmiş olabileceği şeklinde yorumlanmıştır.



Şekil 5: 15 Aralık 2000 $M_w=6.0$ depremi Coulomb gerilme dağılımı.

Figure 5: Coulomb stress change of 2000 event, $M_w=6.0$

3 Şubat 2002 Depremleri ($M_w=6.5$, $M_w=5.8$)

3 Şubat 2002 de, yaklaşık iki saat arayla iki adet deprem meydana gelmiştir. Yerel saatle 09.11 (07.11 GMT) de meydana gelen ilk depremin merkezi Sultandağ ilçesinin 10 km güneydoğusundadır ve büyüklüğü $M_w=6.5$ (Harvard çözümü) dir. 3 Şubat 2002 tarihinde meydana gelen depremlerin kaynağı olan Akşehir Fayı (veya Sultandağ Fayı), Karaman-Konya çöküntüsünün güneybatı kenarını sınırlayan, KB-GD doğrultulu önemli bir kırıktır. Daha çok Akşehir Fayı olarak adlandırılan bu kırık, güneydoğuda Beyşehir'in kuzeyi ile kuzeybatıda Çay kasabası arasında sürekli ve topografik olarak oldukça belirgin bir görünüş sunar. Kuzeydoğuya doğru eğimli olan fayın kuzey bloğu düşmekte olup, düşen blok üzerinde Akşehir ve Eber gölleri meydana gelmiştir. (Koçyiğit ve diğ. 2000) tarafından yapılan arazi gözlemleri sonucunda deprem öncesi tartışmalı olan fay niteliğinin (normal fay, veya bindirme fayı) kuzey eğimli normal bir hareket olduğunu göstermektedir. Kuzey blok aşağı düştüğüne göre hareketin normal faylanma olduğu anlaşılmaktadır. Doğudan batıya doğru Sultandağ ilçe merkezi, Eber gölü güney sahilindeki Oğuz hüyükü tepe, Çay ilçesi ve Maltepe köyünde uzunlukları 100 m ile 3 km arasında değişen yüzey kırıkları gözlenmiştir (Koçyiğit ve diğ. 2000). Ters çözümleme sonucunda 3 Şubat 2002 depremlerinde elde etmiş olduğumuz verilerin kullanılarak, Coulomb gerilim dağılımı aşağıda verilmektedir (Şekil 6 ve Şekil 7). Şekil 6'da görüldüğü üzere, büyüklüğü $M_w=6.5$ olan depremin, Coulomb gerilim dağılımının yaklaşık olarak 2.0 bar artış gösterdiği bölge içersinde bu depremden yaklaşık iki saat sonra meydana gelen $M_w=5.8$ büyüklüğündeki ikinci bir deprem yer almaktadır. Bu sonuçtan yararlanarak 3 Şubat 2002 tarihinde saat 07:11(GMT) itibariyle meydana gelen depremin aynı gün saat 09:36'da oluşan depremi tetiklediğini söyleyebiliriz. $M_w=5.8$ büyüklüğünde meydana gelen depremin Coulomb gerilme dağılımına bakılırsa (Şekil 7); $M_w:5.8$ büyüklüğündeki depremin gerilim artışı gösterdiği yerler Sultandağ fayının kuzeybatı kesimi olarak görülmektedir. İlerde olabilecek bir depremin muhtemel yeri olarak bu kesim gösterilebilir. Bu kesime yaklaşık olarak 0.75 bar kadar gerilim biriktiği Şekil 6'dan görülebilmektedir.

Tartışma ve Sonuçlar

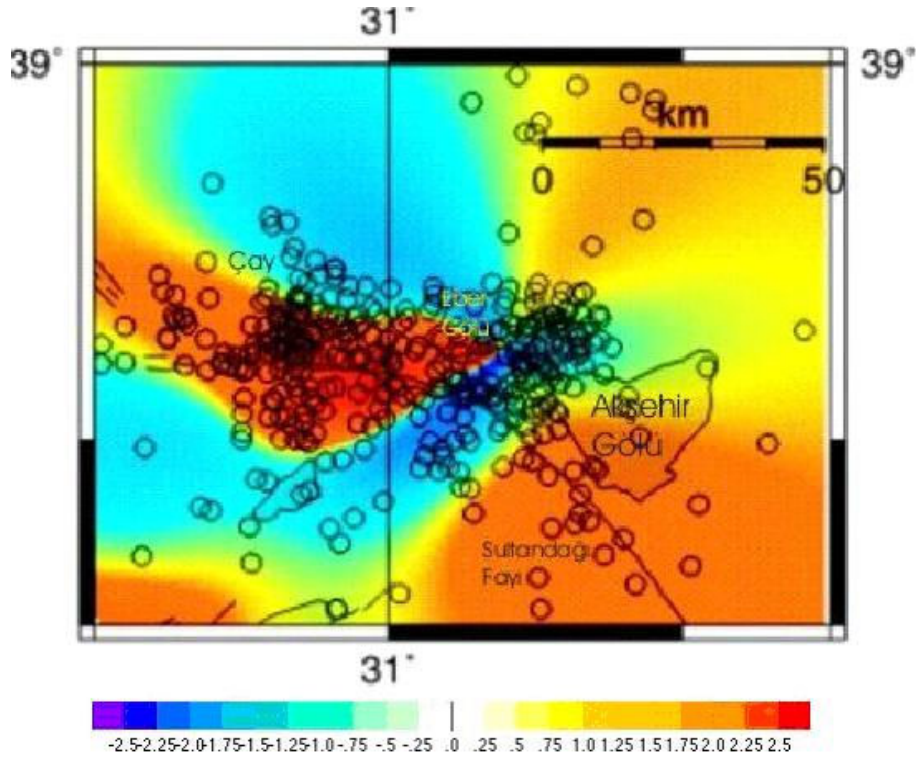
Afyon – Sultandağ bölgesinde ve Sultandağ fayı üzerinde meydana gelmiş olan üç adet depremin

birbiriyle olan ve artçılarıyla olan etkileşimi Coulomb kırılma kriteri kullanılarak araştırılmıştır. Kullanılan depremler için giriş verisi olarak hazırlanırken her bir deprem için kaynak mekanizması değerleri ve atım miktarları Özçelik ve diğ., (2005) tarafından depremlerin dalga şekli verilerinin analizinde, Kikuchi ve Kanamori (1991) tarafından geliştirilen uzak alan cisim dalgalarının ters çözüm yöntemi kullanılarak elde edilmiş ve bu değerler giriş verisi olarak kullanılmış, Coulomb gerilme dağılımı elde edilmiştir (Şekil 5-7).

15.12.2000 ve 03.02.2002 tarihlerinde Afyon-Sultandağ bölgesinde meydana gelen orta büyüklükteki üç deprem, uzak alan ($30^\circ < \Delta < 90^\circ$) cisim dalgalarının ters çözümlemesi ile değerlendirilerek odak mekanizma çözümlerinden depremlerin kaynak parametreleri ve kaynak-yırtılma mekanizmaları elde edilmiştir (Tablo 2, Şekil 1). 2000 yılında oluşan depremin odak derinliği 10 km ve aletsel büyüklüğü sismik momentten $M_w=6.0$ olarak hesaplanmıştır. Eber Gölü'nün uç kısmında meydana gelen depremin kırılma süreci güneydoğu yönünde ilerlemiştir. 2002 yılındaki ikinci deprem (09:26 GMT) birinci depremden bağımsız başka bir şok olarak değerlendirilmektedir (Özer ve diğ. 2002). 2000 yılındaki Eber gölü kıyısındaki deprem, 2002 yılındaki ilk depremin oluşmasını sağlamış olacağı ve 07:11 GMT (09:11 yerel saat) zamanlı depreminde aradaki sismik boşluğu birinci alt olayın kırılma sürecinden tamamladığı anlaşılmaktadır.

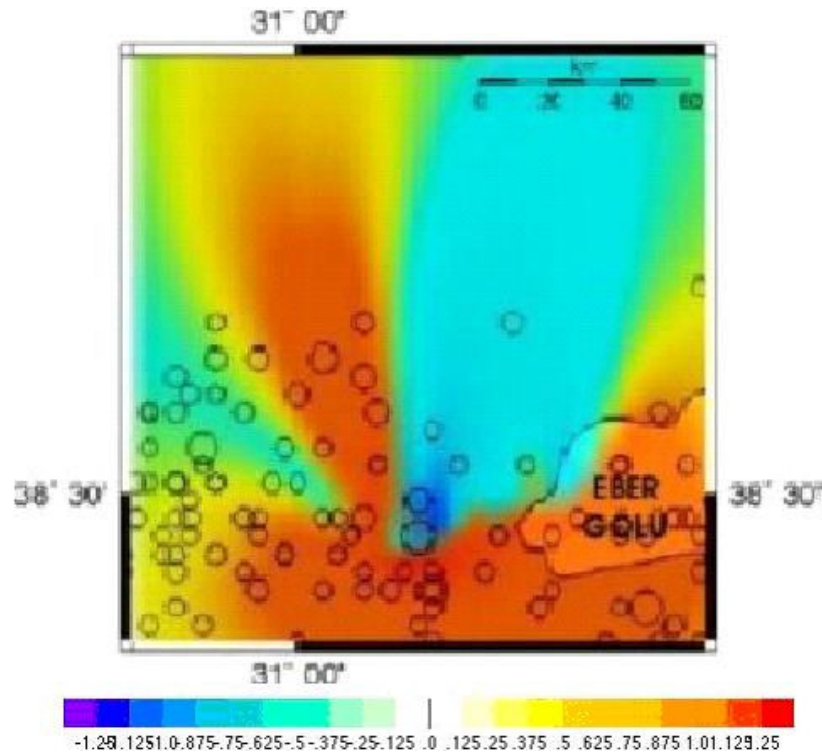
2002'deki ikinci deprem en büyük artçı şok olarak belirtilmiştir fakat depremin dış merkezi birinciden yaklaşık 40 km kuzey batıda yer almaktadır (Tablo 2, Şekil 1). Çalışmada kullanılan üç depremin kaynak mekanizması çözümleri, bölgenin tektoniği ile açıkça uyumludur, fakat 2002 deki ilk depremin kırılma başlangıcı doğru atım bileşenleri içermektedir. Bunu bölgenin farklı tektonik unsurların etkisinde kaldığı şeklinde yorumlayabiliriz

Bu değerlerin yanında, çalışılan bölgenin gerilme tensörünün de bilinmesi gereklidir. Kullanılan bölgesel gerilme eksenlerinin doğrultu ve dalımları Sezgin ve diğ., (2005)'den alınmıştır. Isparta büklümünde meydana gelmiş toplam 52 adet depremin P ve T eksenleri kullanılarak bu bölgenin gerilme tensörü elde edilmiştir (Sezgin ve diğ., 2005). Bu değerler en büyük asal gerilme bileşeninden en küçük asal gerilme bileşine doğru şu şekilde gösterilmiştir. Bölgesel Gerilim Bileşenleri σ_1 (170° , 45°); σ_2 (291° , 27°); σ_3 (40° , 33°) Lokal Gerilim Bileşenleri σ_1 (158° , 38°); σ_2 (297° , 44°); σ_3 (49° , 22°).



Şekil 6: 3 Şubat 2002 Depremine (Mw=6.5) ait Coulomb gerilme dağılımı. Daireler artçı şokları gösterilmektedir.

Figure 6: Coulomb stress change of 2002 event (Mw=6.5). The circles represent aftershock epicenters



Şekil 7: 3 Şubat 2002 09:36 (Mw=5.8) depreminin Coulomb gerilme dağılımı.

Figure 7: Coulomb stress change of the 2002 event at 09:36 (Mw=5.8).

Çalışılan depremler oblik normal faylanma gösterdiklerinden dolayı bu üç deprem için ayrı ayrı eğim atım bileşeni yanında az miktarda doğrultu atım bileşeni olmasından dolayı bu bileşenlerde bulunmuş ve giriş verisi olarak girilmiştir. Yine eğim atım göstermesinden dolayı depremlerin modellenmesinde fay parçalarının alt kısımları belli oranlarda derinleştirilerek elde edilen Coulomb gerilme dağılımın daha iyi sonuçlandığı görülmüştür. Elde etmiş olduğumuz gerilim dağılımlarına bakıldığında ise 15 Aralık 2000 depreminin Columb gerilme dağılımı kendisinden yaklaşık olarak bir buçuk sene sonra oluşan 3 Şubat 2002 M_w :6.5 depremine 1.5 bar yüklemiş olduğu söylenebilmektedir. 3 Şubat 2002 tarihli ve büyüklüğü M_w =6.5 olan depremin Coulomb gerilme dağılımının yaklaşık olarak 2 bar artış gösterdiği bölge içerisinde bu depremden yaklaşık iki saat sonra meydana gelen 5.8 büyüklüğündeki ikinci bir deprem yer almaktadır. Bu sonuçtan yararlanarak 3 Şubat 2002 tarihinde saat 07:11(GMT) itibariyle meydana gelen depremin aynı gün saat 09:36 (GMT)'da oluşan depremi tetiklediğini söyleyebiliriz. 3 Şubat 2002 M_w : 5.8 büyüklüğündeki depremin gerilim artışı gösterdiği yerler Sultandağ fayının kuzeybatı kesimi olarak görülmektedir. İlerde olabilecek bir depremin muhtemel yeri olarak bu kesim gösterilebilir. Bu kesime yaklaşık olarak 0.75 bar kadar gerilim biriktiği Şekil 6 'den görülebilmektedir.

SUMMARY

Three earthquakes occurred at 16.44.51 GMT on 15 December 2000 (M_s =5.8 NEIC), and two years later, at 07.11.28 GMT on 02 February 2002 (M_s =6.4 NEIC) that is a moderate size earthquake, and at 09.26.43 GMT on 02 February 2002 (M_s =5.6 NEIC) where the places are in Afyon province. We have evaluated another mainshock, the second earthquake, that occurred at 09.26.43 (GMT) in northwest of first earthquake. The mainshock was followed by aftershocks larger than $M_w \geq 5.0$.

The interaction between three earthquakes, one in 2000 and two in 2002, occurred in Afyon-Sultandag region are investigated through Coulomb Failure Criterion. The Coulomb stress changes associated with the 2000 main shock sequence reveal that the February 3rd, 2002 main shock occurred in a stress increased region. Our interpretation suggests that the 2000 Sultandag earthquake triggered it. Similar relation was identified between the 07:11 (M =6.5) and 09:36 (M =5.8) large shocks occurred on February 3rd, and then, we inverted teleseismic body waves of two earthquakes were inverted to their sources to obtain a rupture process for each event. In generally, the teleseismic waveforms contain information on the overall moment release rate and depth range of the rupture area (Table 2, Figure 3,4). In this study, we used

teleseismic data and the waveform inversion technique developed by Kikuchi and Kanamori (1991).

We think also infer, the earthquakes of 2002 occurred that trigged by 2000 earthquake in this study.

DEĞİNİLEN BELGELER

- Ambraseys, N.N., 1988**, "Engineering Seismology Earthquake Engineering And Structural Dynamics" 17,1-105,
- Atalay, İ., 1975**, "Tektonik Hareketlerin Sultandağının Jeomorfolojisine Olan Etkileri" Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 18, 21-26,
- Boray, A., Şaroğlu, F. ve Emre, Ö., 1985**, "Isparta Büklümünün Kuzey Kesiminde Doğu-Batı Daralma İçin Bazı Veriler", Jeoloji Mühendisliği, 9-20,
- Demirtaş, R., İravul, Y., ve Yaman M., 2002**, "3 Şubat 2002 Eber Ve Çay Depremleri" Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı (Http://Sismo.Deprem.Gov.Tr/Turknet/Raporlar/Eber rson.Pdf)
- Emre, Ö. Duman, Y.T., Doğan, A., Özalp, S., Tokay F. ve Kuşçu İ., 2002**, "3 Şubat 2002 Sultandağ Depremi Ön Değerlendirme Raporu" [Http://Www.Mta.Gov.Tr/Deprem/Afyon.Asp](http://www.mta.gov.tr/depem/afyon.asp)
- Harris, R. A., and Simpson, R. W., 1992**, "Changes In Static Stress On Southern California Faults After The 1992 Landers Earthquake", Nature, 360 251-254,
- Hudnut, K. W., Seeber, L., and Pacheco, J., 1989**, "Cross-Fault Triggering In The November 1987 Superstition Hills Earthquake Sequence, Southern California", Geophys. Res. Lett., 16, 199-202,
- Jaumé, S.C. and Sykes L.R., 1992**, "Change In The State Of Stress On The Southern San Andreas Fault Resulting From The California Earthquake Sequence Of April To June 1992, Science, 258, 1325-1328,
- Kikuchi, M., Kanamori, H., 1991**, "Inversion Of Complex Body Waves" ,In. Bull. Seismo. Soc. Am. 81, 2335-2350
- King, G.C.P., Stein R.S., and Lin J., 1994**, "Static Stress Changes And The Triggering Of Earthquake", Bull.Seism. Soc. Am. 84, 935-953,
- Koçyiğit, A., Bozkurt, E., Kaymakçı, N. ve Şaroğlu, F., 2002**, "3 Şubat 2002 Çay (Afyon) Depreminin Kaynağı Ve Ağır Hasarın Nedenleri: Akşehir Fay Zonu" Orta Doğu Teknik Üniversitesi Tektonik Araştırma Birimi Jeolojik Ön Rapor. (Http://Www.Metu.Edu.Tr/Akoc/Afyon.Pdf)
- Koçyiğit, A., Ünay, E. and Saraç, G., 2000**, "Episodic Graben Formation And Extensional Neptectonic Regime İn West Central Anatolia And Isparta Angle: A Case Study İn The Akşehir-Afyon Graben, Turkey. Tectonics And Magmatism İn Turkey And The Surrounding Area (Editors: Bozkurt, E.,

- Winchester, J.A. And Piper, J.D.A.), Geological Society, London, Special Publications”, 173, P.405-421.
- Nurlu, M., Kuterdem K., (2002),** “Çay (Afyon) Depreminin Tektonik Açından Değerlendirilmesi” Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi Laboratuvarlar Şube Müdürlüğü ([Http://Www.Deprem.Gov.Tr/Rapor/Afyon/Afyon1.Pdf](http://www.deprem.gov.tr/Rapor/Afyon/Afyon1.Pdf))
- Oppenheimer, D. H., Reasenberg P.A. and Simpson R.W., 1998,** “Fault Plane Solution For The 1984 Morgan Hill, California, Earthquake :Squence: Eidence For The State Of Stress On The Calavaras Fault, J. Geophys. Res.93,9007-9026.
- Özer, N., Altınok, N., and Kolçak, D., 2002,** “Is Afyon (Cay-Eber) Earthquake (February 2002) Triggered By Sultandağı-Akşehir Earthquake (December 2000), Turkey ?” Ninth International Symposium On Natural And Human – Made Hazards October 3-6, 2002 Antalya Turkey Book Of Abstracts P.79
- Özçelik, S., Kalafat, D., Sezgin., N, Pınar A., 2005,** “2000 – 2002 Afyon Bölgesindeki Büyük Depremlerin Kaynak Kırılma Mekanizmaları ve Birbirleri Arasındaki Etkileşim, Deprem Sempozyumu, Kocaeli 2005, tam Metinler CD’si (Poster sunum).
- Reasenberg, P.A. And Simpson, R.W., 1992,** “Responce Of Regional Seismicity To Static Stress Change Produced By The Loma Prieta Earthquake”, Science 225, 1687-1690,
- Pınar, A., Honkura, Y. And Kuge, K., 2001,** “Seismic Activity Triggered by The 1999 Izmit Earthquake And Its Implications For The Assessment of Future Seismic Risk”, Geophys. J. İnt. 146,F1-F7,
- Sezgin, N., Pınar, A, Özçelik, S., 2005,** “Isparta Büklümünde Etkin Olan Tektonik Rejim, Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi, C.5, S. 1, Ocak – 2005, Kocaeli.
- Stein, R.S. and Lisowski, M.J., 1983,** “The Homestead Valley Earthquake Squance, California Control Of After Shocks And Postseismic Deformation”, J. Geophys. Res., 88, 6477-6490,
- Stein, R. S., King, G. C. P., And Lin, J., 1996,** “Change In Failure Stress On The Southern San Andreas Fault System Caused By The 1992 Magnitude = 7.4 Landers Earthquake, Science, 258, 1328-1332,
- Stein, R.S., Barka A.A., and Dieterich J.H., 1996,** “Progressive Failure On The North Anatolian Fault Since 1939 By Earthquake Stress Triggering”, Geophys. J. İnt. 128, 594-604.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö., ve Aydoğan, B., 1987,** “Türkiye’nin Diri Fayları Ve Depremsellikleri”, MTA Derleme Rapor No .8174, 228-230,
- Şengör, A., Görür, N. And Şaroğlu, F., 1985,** “Strike-Slip Faulting And Related Basin Formation In Zones Of Tectonic Escape: Turkey As A Case Study, In Biddle, K.T. And Christie-Blick, N. (Eds.), Strike Slip Formation And Sedimentation, Soc. Economic Paleontologist And Mineralogists, Special Publication, 37, 227-265,
- Tapırdamaz M.C., Tarancioğlu, A., Özalaybey, S., Ergin M., Selvi, O., Yörük, A., Biçmen F., Aktar, M., 2002,** “Sultandağ (Afyon) Depremi 3 Şubat 2002 Mw = 6.2 Artçı Deprem Çalışması” ([Http://Nemrut.Mam.Gov.Tr/Gruplar/Sismoloji/Yayin/Atak.Pdf](http://Nemrut.Mam.Gov.Tr/Gruplar/Sismoloji/Yayin/Atak.Pdf)).
- Taymaz, T., Tan, O., 2001,** Source Parameters Of June 6, 2000 Orta-Çankırı (Mw = 6.0) And December 15, 2000 Sultandağ-Akşehir (Mw = 6.0) Earthquakes Obtained From Inversion Of Teleseismic P- And Sh-Body-Waveforms. Symposia On Seismotectonics Of The North-Western Anatolia-Aegean And Recent Turkish Earthquakes. May 8, 2001-Turkey, Atlas, 96-107.

Yayına Geliş - Received : 10.03.2006

Yayına Kabul - Accepted : 16.05.2006