

31 TEMMUZ 2005 BALA (ANKARA) DEPREMİ, $M_D=4.9$, ARTÇI ŞOK DİZİSİNİN İSTATİSTİKSEL OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ ve ARTÇI ŞOK PARAMETRELERİNİN BÖLGESEL DEĞİŞİMLERİ

Serkan ÖZTÜRK¹, Yusuf BAYRAK¹

ÖZET

Bu çalışmada, yerel saat itibarıyla 00:45'te meydana gelen 31 Temmuz 2005 Bala, $M_D=4.9$, depreminden sonra yaklaşık üç aylık zaman dilimi içerisindeki artçı şok dizisi istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve artçı şokları karakterize eden parametrelerin bölgesel değişimleri incelenmiştir. KOERİ ve AFET İşleri Genel Müdürlüğü web sayfasından temin edilen artçı şok katalogu magnitüdü $M_D \geq 2.3$ olan 436 artçı şoku içermektedir. Artçı şokların dağılımı bölgedeki çapraz fay sisteminin geometrisine uygun olup KD-GB uzanımında yoğunlaşmaktadır. b -değeri tamamlılık magnitüdü $M_c=2.9$ alınarak 1.35 ± 0.07 olarak hesaplanmıştır. Dizideki en büyük artçı şok nispeten küçüktür ve 4.6'dır. $M_D > 4.6$ olan artçı şokları içermeyen sınırlı artçı şok katalogu nedeniyle nispeten büyük b -değeri hesaplanmıştır. p -değeri $M_D \geq M_c (=2.9)$ ve $T_{başlangıç}=0.01$ alınarak 1.15 ± 0.09 olarak nispeten büyük bir değer hesaplanmıştır. Buda, Bala depreminden sonraki sismik aktivitenin nispeten hızlı bir şekilde azaldığına işaret eder. b -değerleri bölgesel dağılımı 1.2–1.9 arasında, p -değerleri ise 1.0–1.4 arasında dağılım göstermektedir. Tüm bölgede genel olarak yüksek değerler hesaplanmıştır. Yüksek b -değerleri Bala civarında ve güneyinde gözlenirken, düşük b -değerleri ana şok civarında ve dizinin KD kısmında hesaplanmıştır. Dolayısıyla, yüksek b -değerleri genel olarak büyük olaylara kıyasla küçük olayların olduğu bölgelerde, yüksek b -değerlerinin ise büyük artçı şokların olduğu bölgelerde gözlendiği söylenebilir. Ayrıca, yüksek b -değerli bölgelerin düşük, küçük b -değerli bölgelerin ise yüksek bir gerilme alanıyla ilişkili olduğu düşünülebilir. Yüksek p -değerleri ana şokun güneyinde ve Bala civarında gözlenirken, düşük p -değerleri dizinin KD kısmında gözlenmiştir. Düşük p -değerli bölgeler düşük, yüksek p -değerli bölgeler ise daha büyük bir ısı akısıyla ilişkilendirilebilir. Artçı şok parametrelerinin bölgesel değişimleri ile ilişkili olarak yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, en küçük b ve p -değerleri bölgesi gelecekte olası bir deprem bölgesi olarak düşünülebilir. Sonuçta, Bala depremi artçı şok bölgesindeki sismosite parametrelerinde gözlenen değişimlerin daha iyi anlaşılabilmesi için atım, gerilme, ısı akısı ve hız gibi fiziksel parametrelerin bölgesel değişimlerini içeren daha detaylı çalışmalara ihtiyaç vardır.

Anahtar Kelimeler: Bala depremi, Artçı şok, Gutenberg-Richter ilişkisi, Omori yasası.

1. GİRİŞ

Artçı şoklar, bölgesel dağılımları ve zamana bağlı davranışlarında gözlenen değişimlerle kullanılabilir bilgiler sağlaması nedeniyle son yıllarda sismolojik araştırmaların en önemli konularından biri haline gelmiştir. Artçı şok dizileri, yer kabuğu ve büyük depremlerin kaynak özellikleri hakkında zengin bir bilgi kaynağı sunar. Çünkü küçük bir alanda ve kısa bir zaman içerisinde on binlerce deprem meydana gelir. Artçı şokların bölgesel dağılımı, ya maksimum yer değiştirme bölgesinin dışında devamlı bir hareketi ya da ana şok kırık sınırını çevreleyen alandaki yardımcı fayların hareketini yansıtır. Odak bölgesindeki heterojen malzemenin neden olduğu büyük miktardaki sismik enerji artçı şoklarla açığa çıkar. Artçı şokların sayısı, bölgesel değişimleri ve dizilerin zamanla azalma oranları istatistiksel ve bölgesel analizler için detaylı bilgiler ortaya koyar. Yüzey fayının özellikleri yanında, tektonik oluşumlar ve faylanma şekilleri artçı şok davranışlarını kontrol eden diğer etkenler-

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

Tel: +90 462 377 2783 e-mail: s_ozturk@ktu.edu.tr

dir. Birçok araştırmacı deprem tahmini için artçı şok dizilerinin sistematik araştırmalarının önemini ifade etmiş ve zaman, bölge ve magnitüde bağlı olarak artçı şok dizilerinin sistematik değişimlerini ortaya koyabilmek için çok sayıda istatistiksel model geliştirilmiştir [1,2,3,4] Artçı şok oluşumlarını çalışmak, oluşabilecek sonraki büyük depremlerin kıyaslanmasına imkan verir ve kırık ölçeğini, zamanlamayı, depremlerin konumunu ve uzun vadeli deprem aktivitesini kontrol eden mekanizmanın daha iyi anlaşılmasını sağlar [5,6].

Artçı şok dizilerini karakterize eden iki temel ilişki mevcuttur. Birincisi, depremlerin büyüklük dağılımını tanımlayan Gutenberg-Richter [7] ilişkisi, ikincisi de artçı şok aktivitesinin zamanla azalma oranını ifade eden tanımlı Omori yasasıdır [8].

Depremlerin magnitüd dağılımı Gutenberg-Richter (G-R) ilişkisi ile tanımlanır ve aşağıdaki bağıntıyla verilir:

$$\log_{10} N(M) = a - bM \quad (1)$$

Burada $N(M)$ magnitüdü M veya daha büyük depremlerin kümülatif sayısı, a ve b ise sabitlerdir. b ; depremlerin magnitüd dağılımına ait eğimi tanımlar ve a ; bölgedeki deprem sayısı veya sismisite oranıyla orantılı olarak değişir. b -değeri sismolojideki en önemli parametrelerden biridir. Wiemer ve Katsumata [9]' ya göre tahmini b katsayısı 0.6 ile 1.4 arasında değişim gösterir. Ayrıca Utsu [1], farklı bölgelere bağlı olarak b -değerlerinin kabaca 0.3 ile 2.0 arasında değiştiğini ifade etmiştir. Birçok faktör b -değerinin normalden sapmasına neden olabilir. Yüksek malzeme heterojenitesi veya çatlak yoğunluğu yüksek b -değerlerine neden olur. Uygulamalı kayma gerilmesindeki artış veya sınırlı basınçtaki azalış b -değerlerinde bir düşüşe neden olurken [10], ısı dağılımındaki bir yükselim b -değerlerinde bir artışa neden olabilir [9]. Ayrıca Bayrak ve Öztürk [11], düşük b -değerlerinin yüksek gerilme alanlarıyla ilişkili olduğunu ve en yüksek b -değerlerinin ise genellikle alüvyon yapıyla ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir. Bununla birlikte b -değerinin fiziksel anlamı tam olarak belli değildir.

Artçı şokların zamana bağlı azalışları tanımlı Omori yasası kullanılarak aşağıdaki formülle açıklanabilir:

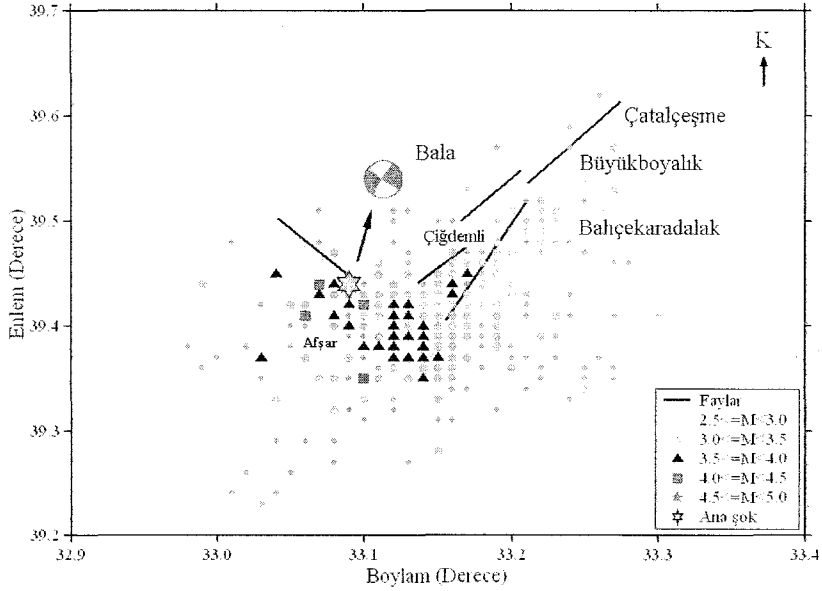
$$n(t) = \frac{K}{(t + c)^p} \quad (2)$$

Burada $n(t)$ ana şoktan sonra t zamandaki artçı şokların oluşum oranıdır. K , c , ve p ise sabitlerdir. K ; dizideki olayların toplam sayısına ve c -değeri de dizinin başlangıcındaki aktivite oranına bağlıdır. c sabiti, dizinin başlangıcındaki küçük artçı şokların tam olarak kayıt edilememesinden güçlü bir şekilde etkilenir. Bu üç parametre içerisinde p azalış parametresidir ve en önemli olanıdır. Olsson [12]'a göre, p -değeri genellikle 0.5–1.8 aralığında değişim gösterir ve bu indeks diziden diziye bağlı olarak genellikle $p=0.9$ –1.5 aralığındadır [13]. Bu değişim kaynak bölgesindeki kabuksal heterojenite, gerilme, sıcaklık veya kabuksal ısı akısı gibi tektonik koşullarla ilişkili olabilir [13,14]. Bayrak ve Öztürk [11], p -değerinin ana şok boyunca oluşan atımla ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, jeolojik açıdan daha yüksek p -değerlerini daha düşük hızlara sahip olan alüvyon yapılarla ilişkilendirmişlerdir. Bayrak ve Öztürk [15], yüksek p -değerlerinin daha düşük hızla sahip nispeten sığ alüvyon yapılar üzerinde, daha düşük değerlerin ise, alüvyonlu bölgelere göre daha sert malzemedan oluşan yüksek hızlı ve topografya değerlerinin daha yüksek olduğu bölgelerle ilişkili olduğunu göstermişlerdir. Bununla birlikte p -değerini kontrol eden en önemli faktörün hangisi olduğu net değildir.

2. DEPREMİN GENEL ÖZELLİKLERİ ve KULLANILAN ARTÇI ŞOK VERİSİ

31 Temmuz 2005 tarihinde yerel saat itibarıyla 00:45'te meydana gelen Bala depreminin ana şok koordinatları Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü (KOERİ) tarafından $39.438^{\circ}\text{K}-33.089^{\circ}\text{D}$ olarak verilmiştir. Depreme ait farklı magnitüd değerleri ise farklı kurumlar tarafından $M_W=5.3$ (USGS), $M_L=5.3$ (KOERİ), $M_D=4.9$ (AFET İşleri), $M_b=4.7$ (ETHZ) olarak verilmiştir. Ankara'nın ilçelerinde şiddetlice hissedilen bu deprem ayrıca Kırıkkale, Kırşehir, Niğde ve Yozgat illerinde de hissedilmiştir. Deprem dış merkezi Bala ilçesinin 12 km güneybatısına rastlar. Ana şokun Ankara'ya olan uzaklığı ise yaklaşık 50 km'dir [16]. Deprem odak derinliği için 5 km–12.8 km arasında değerler önerilmektedir. Yapılan fay düzlemi çözümleri ise depremin doğrultu atımlı faylanmayla geliştiğine işaret etmektedir. 31 Temmuz 2005 Bala depremi Türkiye neotektoniğinin önemli yapılarından olan Tuzgölü fayının kuzey batı ucuna yakın bir bölgeden kaynaklanmıştır. Yaklaşık 180 km uzunluğunda sağ yönlü doğrultu atımlı olan Tuzgölü fayı KB-GD genel uzanımlıdır. Maden Tetkik Arama (MTA) Genel Müdürlüğü tarafından üretilmiş olan Türkiye Diri Fay Haritasında fayın sonlandığı bu bölgede KD-GB ve KB-GD uzanımında birbirine çapraz uzanan ve uzunlukları 5-10 km arasında değişen bir fay sistemi yer alır. Çapraz fay sisteminde her iki doğrultuda da uzanan faylar sağ yönlü doğrultu atımlıdır. Bu fay sisteminde KB-GD doğrultusundaki fayın uzunluğu 7 km'dir. KD-GB uzanımındaki faylar ise daha baskın olup toplam uzunluğu 25 km'dir. 31 Temmuz Bala depreminin ana şoku bu fay sisteminin bulunduğu alana rastlar. Kandilli rasathanesi UDİM verilerine göre artçı şokların dağılımı çapraz fay sisteminin geometrisine uygun olup KD-GB uzanımında yoğunlaşma gösterirler [16].

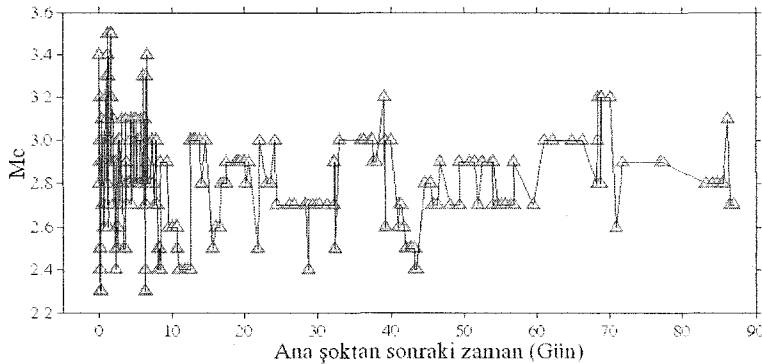
Bu çalışmada, 31 Temmuz 2005 Bala depremi artçı şok dizisini istatistiksel olarak değerlendirmek ve bölgesel değişimlerini analiz etmek için, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi tarafından hazırlanmış veriler ile Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü Sismoloji laboratuvarı tarafından hazırlanan ve internette kullanıcının hizmetine sunulmuş kataloglardan derlenmiş olan artçı şok verisi kullanılmıştır. Katalog, süre magnitüdü M_D 'ye göre homojendir ve 31 Temmuz–27 Ekim 2005 tarihleri arasında yaklaşık 3 aylık bir zaman dilimindeki magnitüdü $M_D \geq 2.3$ olan 436 artçı şoku içermektedir. Artçı şok dizisi $M_D=2.3-4.6$ arasında değişim göstermektedir ve $M_D \geq 4.6$ olan artçı şokların olmayışı dikkate değerdir. Son yıllarda Tajima ve Kanamori [17], büyük depremlere ait artçı şokların 1 yıla kadar uzanabileceğini ifade etmişlerdir. Eğer bir deprem ana şoktan sonraki 100 gün içerisinde oluşursa bunun bir artçı şok olduğu düşünülür [18]. Bölgedeki sismik aktivite incelendiğinde, ana şoktan sonraki ilk bir ay içerisinde 343 olan artçı şok sayısının 3 ayın sonunda 30'a kadar düştüğü görülür. Bu değerlendirmeler ve bölgedeki sismik aktivite göz önüne alınarak, bölgesel değişimlerin değerlendirilmesinde ana şoktan sonraki 3 aylık zaman dilimindeki artçı şok aktivitesi kullanılmıştır. Bala depremi artçı şok dizisinin episantr dağılım haritası Şekil 1'de gösterilmiştir. Ayrıca mevcut tektonik yapı ve faylanma mekanizması da harita üzerinde gösterilmiştir [16,19].



Şekil 1. Bala depremi artçı şok aktivitesinin episantr dağılım haritası ve başlıca tektonik yapılar. Sembol büyüklükleri magnitüde orantılıdır. Ana şok episantrı yıldızla gösterilmiştir.

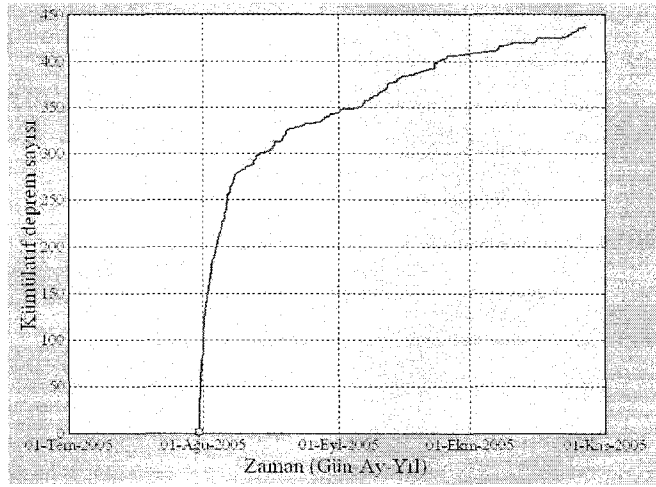
3. ANALİZ YÖNTEMİ ve İSTATİSTİKSEL DEĞERLENDİRMELER

b ve p -değerlerinin hesabı için tüm magnitüd bantlarında tam bir veri setinin kullanılması önemlidir. Tamamlılık magnitüdü Mc 'nin tahmini G-R ilişkisine dayanır. Mc , zaman ve bölgenin bir fonksiyonu olarak değişim gösterir ve zamana bağlı değişimler yalnız b ve p -değerleri tahminine neden olabilir [9]. Çünkü doğru sonuçların elde edilebilmesi için maksimum sayıda olayın kullanılması gerekir. Bala depremi için, ana şok zamanından başlayarak zamanın bir fonksiyonu olarak Mc değişimlerini hesaplayabilmek için hareketli pencere tekniği kullanılmıştır [20]. Pencere başına 5 olay alınmıştır. Şekil 2, artçı şok dizisi için zamanla Mc değişimlerini göstermektedir. Başlangıçta (ilk on saate içinde) $Mc \geq 2.2$ iken, ana şoktan iki gün sonra 2.7–3.0 arasında değişim göstermektedir. Mc 'nin örnekleme aralığına bağlılığını gözleyebilmek için pencere aralığı 10, 15, 20 olay seçilerek hesaplanmıştır ve örnekleme aralığının sonuçları etkilemediği görülmüştür. Sonuçta, Şekil 2'de gözlenen saçlımlar örnekleme aralığına bağlı değildir ve deprem sayısı-magnitüd dağılımı için $Mc=2.9$ olarak alınmıştır.



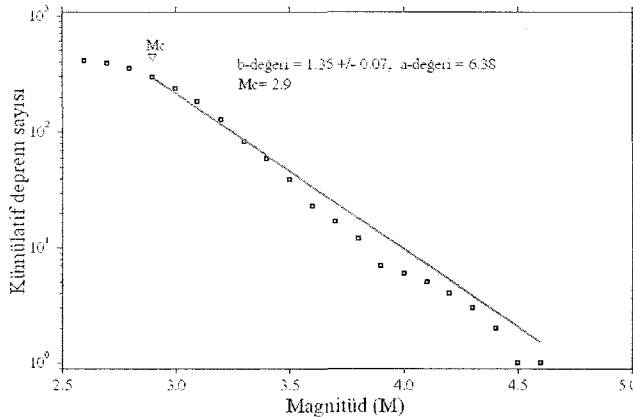
Şekil 2. Zamanın fonksiyonu olarak tamamlılık magnitüdü Mc 'nin değişimi.

Ana şoktan sonra yaklaşık 3 aylık zaman dilimi içerisindeki artçı şokların kümülatif sayısının zamanla olan değişimleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Genel olarak, ana şokun olduğu ve çok sayıda artçı şokun kaydedildiği ilk birkaç gün ile daha sonraki aylarda meydana gelen sismik aktivitedeki değişimler göz önüne alınırsa, Şekil 3 iki bölgeye ayrılabilir. Birinci bölge ana şokun olduğu ilk bir ay, ikinci bölge ise sonraki aylar olarak düşünülebilir. Ana şokun meydana geldiği ilk birkaç hafta içerisinde, sismik aktivitenin hızlı bir biçimde arttığı gözlenir. Buna karşın ikinci bölge olarak düşünülen zaman diliminde, artçı şokların kümülatif sayısının ilk günlere nazaran daha yavaş bir artım gösterdiği ve üç ayın sonunda hemen hemen sabit kaldığı görülür. Buda, Bala depremi artçı şok aktivitesinin nispeten hızlı bir azalım oranı sergilediğini ortaya koyar.



Şekil 3. Bala depremi artçı şok dizisinin zamanla kümülatif sayısındaki değişim.

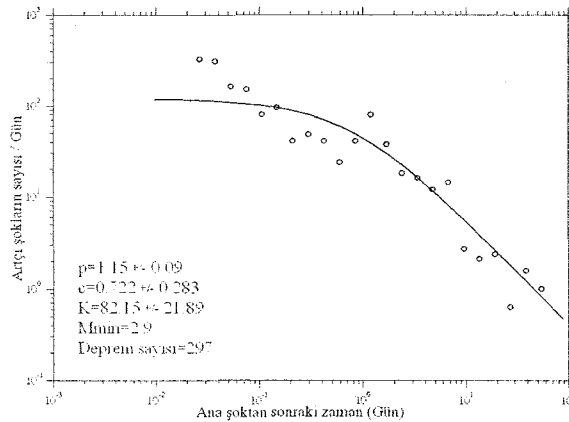
Artçı şokların magnitüd-kümülatif deprem sayısı ilişkisi Şekil 4'te gösterilmiştir. a -değeri ile birlikte b -değeri ve standart sapması, tamamlılık magnitüdü $M_c=2.5$ alınarak maksimum olasılık yöntemiyle hesaplanmıştır. b -değeri 1.35 ± 0.07 olarak bulunmuştur. b -değerinin maksimum magnitüde, örnekleme aralığına, aralık boyutuna ve kullanılan yöntemle bağlılığı sonuçları etkileyebilir. b -değerindeki önemli hatalar yanlış yorumlara neden olan tam olmayan kataloglardan kaynaklanabilir veya hesaplamalarda yüksek magnitüd değerleri kullanılmadığında b -değerleri belirgin olarak artabilir. Şekil 1' de görüldüğü gibi dizinin magnitüd aralığı 2.3 ile 4.6 arasındadır. En büyük artçı şok ise $M_D=4.6$ 'dır ve nispeten küçüktür. Veri setindeki magnitüd aralığı ve maksimum magnitüd nedeniyle, Bala depremi artçı şok dizisi için nispeten yüksek bir b -değeri hesaplanmıştır.



Şekil 4. Bala depremi artçı şok dizisi için deprem sayısı-magnitüd dağılımı. Gutenberg-Richter ilişkisindeki b -değeri, standart sapması ve a -değeri şekilde verilmiştir.

Çalışmalarda tamamlılık analizi için iki parametrenin düzenlenmesi gerekir: (1) minimum magnitüd başlangıcı M_{min} ve (2) minimum zaman başlangıcı $T_{başlangıç}$. En kısa $T_{başlangıç}$ için M_{min} değerinin seçilmesi en basit yaklaşımdır ve bu durumda dizinin başlangıcındaki en yüksek Mc değeri kullanılır. Bala dizisi için artçı şok azalım parametreleri $M_{min}=2.9$ ve $T_{başlangıç}=0.01$ alınarak hesaplanmıştır. c -değeri göz önüne alınırsa, özellikle büyük depremlerden sonra artçı şok dizilerinde bazı azalmalar olur ve buda artçı şokların zamanla azalma eğrilerinde gözlenir. Bununla birlikte artçı şok dizisinin hemen başlangıcında büyük bir saçılım vardır ve dolayısıyla yüksek c -değeri elde edilebilir. c -değeri için bir üst sınır olamamakla birlikte, bu değer 0.01 kadar küçük olabilir. Hamaguchi ve Hasegawa [21], Iwetaken-Oki depremi için $c=0.01-0.99$ arasında değişen değerler hesaplamışlardır. $M_{min}=2.9$ ve $T_{başlangıç}=0.01$ kabul edilerek tahminlerdeki bu belirsizlikler ortadan kaldırılmıştır.

Artçı şok dizisinin zamanla azalma oranı Şekil 5'te gösterilmiştir. p , c ve K parametreleri maksimum olasılık yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. $M_D \geq Mc$ ($=2.9$) ve $T_{başlangıç}=0.01$ alınarak $p=1.15 \pm 0.09$ ve $c=0.722 \pm 0.283$ olarak hesaplanmıştır. Özellikle az sayıda artçı şoklar için hesaplanacak p -değerleri, kataloglardaki mevcut sismik aktivite etkisini içerebilir. c -değerinin büyük olması, sonraki periyotlarda katalogun tamam olmayışından kaynaklanmaktadır. Hirata [22], küçük p -değerine sahip artçı şok dizilerinin daha uzun bir sismik aktiviteye, yüksek p -değerine sahip dizilerin ise daha kısa bir aktiviteye sahip olduğunu ifade etmiştir. Sonuç olarak, Bala depreminden sonraki sismik aktivite nispeten hızlı bir azalım göstermektedir.



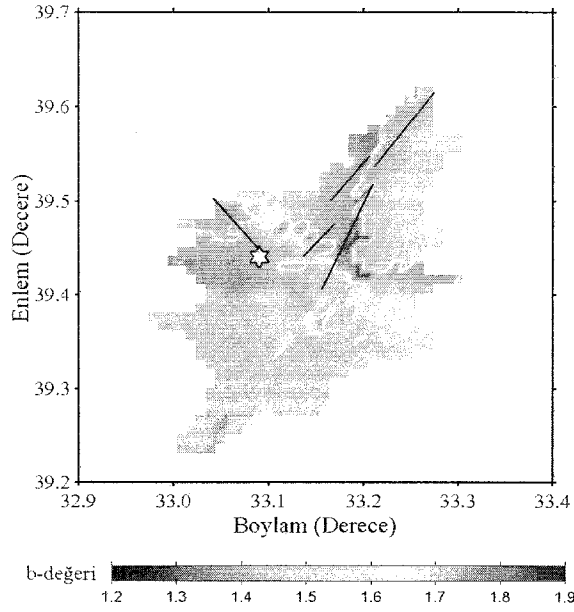
Şekil 5. Ana şoktan sonraki zamana bağlı olarak $M_D \geq 2.9$ olan olaylar için artçı şokların azalma oranı. p , c ve K -değerleri, minimum magnitüd ve hesaplamada kullanılan artçı şokların sayısı şekilde verilmiştir.

4. ARTÇI ŞOK PARAMETRELERİNİN BÖLGESEL DEĞİŞİMLERİ

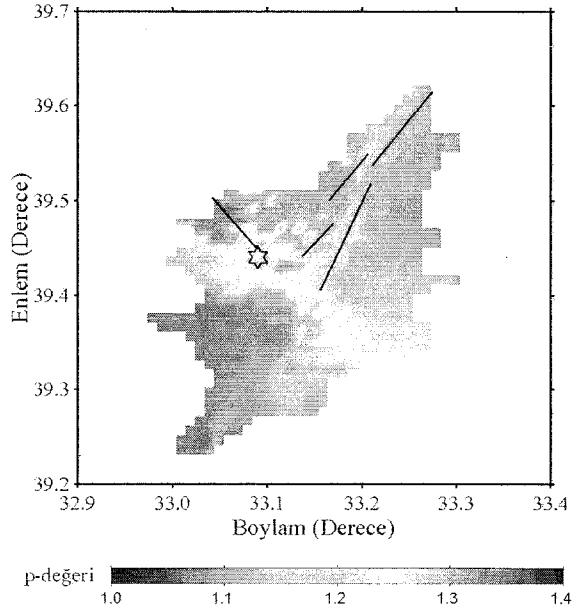
G-R ilişkisindeki b -değeri maksimum olasılık yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Çünkü bu yöntem en küçük kareler yaklaşımından daha doğru bir değer ortaya koyar. Ayrıca, tanımlı Omori formülündeki parametreler tam olarak maksimum olasılık yöntemiyle tahmin edilebilir. Hesaplamalar ZMAP bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır. Deprem sayısı-magnitüd dağılımı ve artçı şokların azalma oranlarına ait bölgesel haritaları oluşturmak için, gridleme tekniği kullanılmış ve her bir grid noktası için en yakın episantrlar düşünülmüştür. Algoritma, uyum kalitesinin %95'e eşit veya daha fazla olduğu durumlarda minimum başlangıç magnitüdünü hesaplar. Eğer verilen güvenilir aralıkta çok fazla magnitüd yoksa bunun yerine %90'lık bir uyum kalitesi ile hesaplamalar yapılır. Bununla birlikte, eğer herhangi bir başlangıç magnitüdü için uyum kalitesi %90'dan daha az ise, deprem sayısı-magnitüd dağılımının maksimum eğime sahip olduğu magnitüd belirlenir. Bu magnitüdlere bir tanesi, seçilen grid noktası için tamamlılık magnitüdü M_c 'ye atfedilir. Eğer $M_D \geq M_c$ olan artçı şokların sayısı en yakın episantrların minimum sayısına eşit veya daha fazla ise, b ve p -değerleri yalnızca $M_D \geq M_c$ olan olaylar kullanılarak bu grid aralığı için hesaplanır. Aksi takdirde b ve p -değerleri hesaplanmaz. Daha sonra, her bir grid için hesaplanan bu değerler renkli bir moda dönüştürülür.

31 Temmuz 2005 Bala depremi artçı şok dizisi için b ve p -değerleri bölgesel değişim haritaları Şekil 6 ve 7'de verilmiştir. Artçı şok dizisi için bölgesel değişim haritalarının oluşturulmasında 0.01° 'lik bir grid aralığı kullanılmış ve her bir grid noktası için en yakın episantrlar (depremlerin sayısı) düşünülmüştür. Sonra, maksimum olayların sayısı $N_e=300$ ve minimum olayların sayısı $N_{e_{min}}=100$ alınarak haritalar oluşturulmuştur. p -değeri değişim haritasını oluşturmak için önemli bir kabullenme olarak $c=0.722$ alınmıştır, çünkü bu değer değişim haritasını oluşturmak için daha anlamlıdır. Tamamlılık magnitüdü bölgesel olarak değişim göstermesine rağmen bu değer ZMAP tarafından 2.9 alınarak b -değeri haritası oluşturulmuştur. Eğer $M_D \geq M_c$ olan depremlerin sayısı her bir grid aralığında $N_{e_{min}}$ 'e eşit ise, b ve p -değerleri yalnızca $M_D \geq M_c$ olan olaylar için hesaplanır. Aksi takdirde b ve p -değerleri hesaplanmaz. Sonuçta, her grid noktası için parametre değerleri haritalar üzerinde renkli bir gösterimle sunulmuştur.

Şekil 6 ve 7 sırasıyla b ve p -değerleri bölgesel değişim haritalarını göstermektedir. b -değeri 1.2-1.9 aralığında, p -değeri ise 1.0-1.4 arasında değişmektedir. Genel olarak, b ve p -değerleri tüm bölgede büyük değişimler sergilemektedir. b -değerleri dağılımı iki gruba ayrılabilir: (1) daha düşük b -değerleri (<1.4) ana şok civarında ve artçı şok dizisinin KD kısmında (Çatalçeşme-Bahçekaradalak arasında), (2) daha yüksek b -değerleri ise (>1.7) Bala civarında ve güneyinde gözlenmiştir. Orta değerler ise (1.2-1.3) ana şokun GB ve GD kısımlarında gözlenmiştir. Genel olarak daha düşük b -değerleri büyük artçı şokların ($M>3.5$) olduğu bölgelerde gözlenirken, daha yüksek b -değerleri genellikle küçük artçı şokların olduğu alanlarda gözlenmiştir. Yüksek p -değerleri (>1.3) ana şokun güneyinde ve Bala civarında hesaplanmıştır ve bu bölgedeki aktivite nispeten hızlı bir azalım göstermektedir. Buna karşılık, daha düşük p -değerleri (<1.1) artçı şok dizisinin KD kısmında (Çatalçeşme-Bahçekaradalak arasında) hesaplanmıştır. Dolayısıyla, dizinin güney kısmındaki sismik aktivite KD kısmına oranla daha hızlı bir azalım gösterir.



Şekil 6. Bala depremi artçı şok dizisi için 0.01° grid aralığı ile hesaplanan b -değeri bölgesel değişim haritası.



Şekil 7. Bala depremi artçı şok dizisi için 0.01° grid aralığı ile hesaplanan p -değeri bölgesel değişim haritası.

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bir artçı şok dizisi için b ve p -değerlerinin bölgesel ve zamana bağlı değişimleri artçı şok bölgesinin kırık mekanizması ve malzeme özelliklerini açıklamada önemli bilgiler sunar. Bu parametrelerdeki değişimler deprem bölgesinin kabuksal heterojenite, gerilme, yüzey ısı akısı ve atım gibi tektonik özelliklerine bağlıdır, fakat hangisinin daha önemli olduğu açık

değildir. Eaton vd., [23], Parkfield deprem dizisi için b ve p -değerinin bölgesel değişimlerini çalışmışlardır. Daha sonra artçı şok dizileri için bu parametrelerdeki değişimler birçok araştırmacı tarafından analiz edilmiştir [20,24,11]. Wiemer ve Wyss [25], San Andreas fayı üzerinde yüksek gerilmeli asperitlerin daha düşük b -değerlerli anomaliler gösterdiğini ifade etmiştir. Guo ve Ogata [2], 1971–1995 yılları arasında Japonya’da gözlenen 34 artçı şok dizisi için artçı şok parametrelerinde ki değişimleri incelemişler ve plaka içi olaylar için artçı şok parametrelerinin bölgedeki ısı akısından veya kabuksal heterojeniteden oldukça etkilendiğini, plakalar arası depremlerde ise bu parametrelerin derinliğe bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Westerhaus vd., [26], en düşük b -değerleri bölgesinin büyük bir deprem için olası bir bölge olarak düşünebileceğini ifade etmişlerdir. Öztürk ve Bayrak [27] yaptıkları çalışmada, düşük b -değerlerinin yüksek gerilme alanlarıyla ilişkili olduğunu ve en yüksek b -değerlerinin ise genellikle alüvyon yapıyla ilişkili olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, düşük b -değerleri bölgesinin en büyük artçı şokların olduğu bölgelerle, yüksek b -değerleri bölgelerinin ise genellikle küçük artçı şokların olduğu alanlara ilişkili olduğu ifade edilmiştir [28]. Bayrak ve Öztürk [11], 1999 İzmit ve Düzce depremleri artçı şok dizilerinin bölgesel ve zamana bağlı değişimlerini incelemişler ve b -değerinin ana şoktan sonraki gerilme ile p -değerinin ise ana şok boyunca oluşan atımla ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, jeolojik açıdan daha yüksek b ve p -değerlerini daha düşük hızlara sahip olan Holocene alüvyon yapılarla ilişkilendirmişlerdir. Bayrak ve Öztürk [15] ve Öztürk ve Bayrak [29], yüksek p -değerlerinin daha düşük hızla sahip nispeten sığ alüvyon yapılar üzerinde, daha düşük değerlerin ise, alüvyonlu bölgelere göre daha sert malzemedeki oluşan yüksek hızlı ve topografya değerlerinin daha yüksek olduğu bölgelerle ilişkili olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca Hirata [22], p -değerlerinde gözlenen bir düşüşün büyük depremlerin tahmininde kullanışlı olabileceğini ifade etmiştir. Sonuç olarak bu çalışmalar şöyle özetlenebilir: (1) Ana şok süresince ki kırık mekanizması b ve p -değişimlerini kontrol eder (2) Bu iki parametre artçı şok alanındaki malzeme özelliklerine oldukça bağlıdır.

Şekil 6’da görüldüğü gibi, daha düşük b -değerleri ana şok civarında ve artçı şok dizisinin KD kısmında gözlenirken, daha yüksek b -değerleri Bala civarında ve güneyinde gözlenmiştir. Bala ve civarı için gerilme değişimleri ifade edilmemesine rağmen, yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, düşük b -değerlerinin gözlendiği alanların yüksek bir gerilme dağılımına işaret ettiği düşünülebilir. Ayrıca, yüksek b -değerlerinin gözlendiği diğer bölgeler de daha düşük gerilme dağılımıyla açıklanabilir. Şekil 7’de görüldüğü gibi yüksek p -değerleri ana şokun güneyinde ve Bala civarında hesaplanmıştır. Deprem raporlarında yüzey kırıklarının oluşup oluşmadığına dair herhangi bir bilgi yoktur. Ayrıca, artçı şok bölgesinin KD kısmı düşük bir ısı akısıyla (düşük p -değeri) ve ana şokun güneyi ile Bala civarı ise daha büyük bir ısı akısı (daha yüksek p -değeri) veya daha düşük hızla ilişkilendirilebilir. Dolayısıyla, Bala depremi artçı şok bölgesindeki artçı şok parametrelerinde gözlenen değişimleri daha iyi anlayabilmek için atım, gerilme, ısı akısı ve hız gibi fiziksel parametrelerin bölgesel değişimlerini içeren daha detaylı çalışmalara ihtiyaç vardır. Sonuç olarak, bir artçı şok dizisi için b ve p -değerleri bölgesel değişimleri ana şokun kırılma mekanizmasına bağlıdır ve deprem bölgesinin jeolojik yapısıyla ilişkilidir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 31 Temmuz 2005 Bala depremi artçı şok dizisinin istatistiksel analizi yapılmış ve deprem sayısı-magnitüd dağılımı ile zamanla azalma oranının bölgesel değişimleri incelenmiştir. Bu amaçla, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi tarafından hazırlanmış veriler ile KOERİ tarafından

hazırlanan ve internette kullanıcının hizmetine sunulmuş kataloglardan derlenmiş olan artçı şok verisi kullanılmıştır. 436 artçı şok verisini içeren katalog kullanılarak b ve p -değerleri hesaplanmıştır. $M_c=2.9$ alınarak $b=1.35\pm 0.07$ olarak hesaplanmıştır. Bu büyük değer, hata limitinden veya $M_D \geq 5.0$ magnitudlü olayları içermeyen artçı şok katalogunun sınırlı olmasından kaynaklanabilir. Artçı şok dizisi $M_D=2.3-4.6$ arasındadır ve en büyük artçı şokun nispeten küçük oluşu yüksek bir b -değeriyle sonuçlanabilir. p -değeri $M \geq M_c (=2.9)$ ve $T_{başlangıç}=0.01$ alınarak 1.15 ± 0.09 olarak hesaplanmıştır. Sismik aktivite nispeten hızlı bir azalım gösterdiği için nispeten büyük bir p -değeri hesaplanmıştır. b -değerleri bölgesel değişimleri 1.2–1.9 arasında dağılım göstermektedir. Yüksek b -değerleri Bala civarında ve güneyinde gözlenirken, düşük b -değerleri ana şok civarında ve dizinin KD kısmında gözlenmiştir. Orta değerler ise ana şokun GB ve GD kısımlarında gözlenmiştir. Yüksek b -değerleri büyük olaylara kıyasla küçük olayların sayısında nispeten bir artış olduğunu gösterirken, düşük b -değerleri büyük artçı şokların olduğu bölgelerde gözlenmiştir. p -değerleri ise 1.0–1.4 arasında değişim göstermektedir. Yüksek p -değerleri ana şokun güneyinde ve Bala civarında gözlenirken, düşük p -değerleri dizinin KD kısmında gözlenmiştir. Düşük b -değerli bölgelerin yüksek, yüksek b -değerli bölgelerin ise düşük bir gerilme alanıyla ilişkili olduğu düşünülebilir. Ayrıca, düşük p -değerli bölgeler düşük, yüksek p -değerli bölgeler ise daha büyük bir ısı akısıyla ilişkilendirilebilir. Artçı şok parametrelerinin bölgesel değişimleri ile ilişkili olarak yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara bağlı olarak, en küçük b ve p -değerleri bölgesi gelecekte olası bir deprem bölgesi olarak düşünülebilir. Sonuçta, Bala depremi artçı şok bölgesindeki artçı şok parametrelerinde gözlenen değişimlerin daha iyi değerlendirilebilmesi için atım, gerilme, ısı akısı ve hız gibi fiziksel parametrelerin bölgesel değişimlerini içeren daha detaylı çalışmalara ihtiyaç vardır.

KAYNAKLAR

- [1] Utsu, T., 1971, "Aftershocks and earthquake statistic (III): Analyses of the distribution of earthquakes in magnitude, time and space with special consideration to clustering characteristics of earthquake occurrence (1)", *J. Faculty Sci., Hokkaido University*, Ser. VII (Geophys.), 3, 379-441.
- [2] Guo, Z. ve Y. Ogata, 1997, "Statistical Relation between the Parameters of Aftershocks in Time, Space, and Magnitude", *J. Geophys. Res.*, 102 (B2), 2857-2873.
- [3] Felzer, K. R., Becker T. W., Abercrombie R. E., ve Ekström, G., 2002, "Triggering of the 1999 M_w 7.1 Hector Mine earthquake by aftershocks of the 1992 M_w 7.3 Landers earthquake", *J. Geophys. Res.*, 107, B9, doi:10.1029/2001JB000911.
- [4] Shcherbakov, R., Turcotte, D. L., ve Rundle, J. B., „2005. Aftershock Statistics", *Pure and Applied Geophysics*, 162, 1051-1076.
- [5] Ogata, Y., (2001), "Increased probability of large earthquakes near aftershock regions with relative quiescence", *J. Geophys. Res.* 106, 8729-8744.
- [6] Ogata, Y., Jones, L. M., ve Toda, S., 2003, "When and where the aftershock activity was depressed: contrasting decay patterns of the proximate large earthquakes in southern California", *J. Geophys. Res.* 108 (B6), 2318.
- [7] Gutenberg, R. ve Richter, C.F., 1944, "Frequency of earthquakes in California", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 34, 185-188.
- [8] Utsu, T., 1957, "Magnitude of earthquakes and occurrence of their aftershocks", *Zisin, Ser. 2*, 10, pp. 35-45.
- [9] Wiemer, S. ve Katsumata, K., 1999, "Spatial variability of seismicity parameters in aftershock zones", *J. Geophys. Res.*, 104 (B6), 13,135-13,151.
- [10] Urbancic, T. I., Trifu, C. I., Long, J. M. ve Toung, R. P., 1992, "Space-Time correlations of b-value with stress release", *Pure Appl. Geophys.*, 139, 449-462.
- [11] Bayrak, Y., ve Öztürk, S., (2004), "Spatial and temporal variations of the aftershock sequences of the 1999 İzmit and Düzce earthquakes", *Earth Planets Space*, 56, 933-944.

- [12] Olsson, R., 1999, "An estimation of the maximum b-value in the Gutenberg-Richter relation", *Geodynamics*, 27, 547-552.
- [13] Utsu, T., Ogata, Y. ve Matsu'ura, R. S., (1995), The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity, *J. Phys. Earth.*, 43, 1-33.
- [14] Kisslinger, C. and Jones, L.M., 1991, "Properties of aftershock sequences in Southern California", *J. Geophys. Res.*, 96(B7), 11,947-11,958.
- [15] Bayrak, Y., ve Öztürk, S., 2005, "1999 İzmit ve düzce depremlerinin artçı şok dizilerinin zamanla azalma oranlarının bölgesel jeoloji ve topoğrafya ile ilişkisi", *Deprem Sempozyumu Kocaeli 2005*, sayfa 258, 23-25 Mart, 2005, Kocaeli, Türkiye.
- [16] Emre, Ö., Doğan, A., Özalp, S., Yıldırım, C., ve Albayrak H., "2005, 31 Temmuz 2005 Bala depremi'nin değerlendirilmesi", Jeoloji Etütleri Dairesi Yer Dinamikleri Araştırma ve Değerlendirme Koordinatörlüğü Aktif Tektonik Araştırmaları Birimi.
- [17] Tajima, F. ve Kanamori, H., 1985, "Global survey of aftershock area expansion patterns", *Phys. Earth Planet. Inter.*, 40, 77-134.
- [18] Tsapanos, T., Papazachos, C., Moutafi, Z., Gabrielides, J., ve Syrou, T., 1994, "Properties of the Globally Distributed Aftershock Sequences: Emphasis in the Circum-Pacific Belt", *Bulletin of the Geological Society of Greece*, vol., XXX/5, 151-158.
- [19] Baran, B., Köksal T. S., Erkmen C., ve Kuran F., 2005, "31 Temmuz 2005 Bala-Ankara depremi raporu", Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı.
- [20] Wiemer, S., Mcnutt, S. R., ve Wyss, M., 1998, "Temporal and three dimensional spatial analysis of the frequency-magnitude distribution near Long Valley Caldera, California", *Geophys. J. Int.*, 134, 409-421.
- [21] Hamaguchi, H., ve Hasegawa, A., 1970, "An investigation on the aftershocks of the Tokachi-oki earthquake of 1968, (2) Statistical study on time distribution", *Sci. Rep. Thoku Univ.*, Ser. 5, 20, 119-133.
- [22] Hirata, T., 1987, "Omori's power law aftershock sequences of microfracturing in rock fracture experiment", *J. Geophys. Res.*, 92 (B79), 6215-6221.
- [23] Eaton, J., M. O'Neil, ve Murdock, J., 1970, "Aftershocks of the 1966 Parkfield-Cholame, California, earthquake: A detailed study", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 60, 1151-1197.
- [24] Enescu, B. ve Ito, K., 2002, "Spatial analysis of the frequency distribution and decay rate of aftershock activity of the 2000 Western Tottori earthquake", *Earth Planets Space*, 54, 847-859.
- [25] Wiemer, S. ve Wyss, M., 1997, "Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: An improved technique to calculate recurrence times", *J. Geophys. Res.*, 102, 15, 115-15, 128.
- [26] Westerhaus, M., Wyss, M., Yılmaz, R., ve Zschau, J., 2000, "Correlating variations of b values and crustal deformations during the 1990s may have pinpointed the rupture initiation of the $M_w=7.4$ İzmit earthquake of 1999 August 17", *Geophys. J. Int.*, 148, 139-152.
- [27] Öztürk, S., ve Bayrak, Y., 2005a, "1 Mavis 2003 Bingöl depremi artçı şok aktivitesinin deprem sayısı-magnitüd dağılımının ve zamanla azalma oranının bölgesel değişimleri", *Deprem Sempozyumu Kocaeli 2005*, sayfa 254, 23-25 Mart, 2005, Kocaeli, Türkiye.
- [28] Öztürk, S., ve Bayrak, Y., 2003, "Spatial analysis of aftershock sequences of the İzmit, $M_w=7.4$, and Duzce-Bolu, $M_w=7.2$, (Turkey) earthquakes", *International Conference on Earth Sciences and Electronics (ICESE-2003)*, p. 59-65, 23-24 October, İstanbul University, İstanbul, Turkey.
- [29] Öztürk, S., ve Bayrak, Y., 2005b, "28 Mart 2004 Erzurum depremi, $M_p=5.3$, artçı şok aktivitesi için sismosite parametreleri b ve p-değerlerinin bölgesel değişimleri", *II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi, MBGAK 2005*, sayfa 68, 17-19 Kasım 2005, İstanbul, Türkiye.

<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/>:Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Ulusal Deprem İzleme Merkezi.

<http://www.seismo.ethz.ch/>: ETHZ

<http://sismo.depem.gov.tr/VERITABANI/turknetkatalog.php>

http://neic.usgs.gov/neis/FM/neic_tsat_q.html/: USGS-NEIC