

DAF'IN PALU BÖLGESİNDE DEPREM TEHLİKESİNİN, GÜNCEL TEKNİKLERLE ARAŞTIRILMASI

*Investigation of Seismic Hazard in Palu Region of EAF with State-of-Art
Techniques*

Prof. Dr. Semih ERGİNTAV¹
Prof. Dr. Uğur DOĞAN³
Selver ŞENTÜRK⁵
Fuat ŞAROĞLU⁷
Doç. Dr. Ümit DİKMEN⁹
Wumiti JULAITI¹¹

Prof. Dr. Ziyadin ÇAKIR²
Arş. Gör. Seda ÇETİN⁴
Prof. Dr. Hayrullah KARABULUT⁶
Arş. Gör. Alpay ÖZDEMİR⁸
Prof. Dr. Roger BILHAM¹⁰
Prof. Dr. Haluk ÖZENER¹²

Özet

Bu çalışmada, çok disiplinli olarak, DAF'ın Hazar-Palu segmentinde kripin varlığı sistematik olarak sorgulanmıştır. Öncelikle, SAR verileriyle DAF'ın doğu kesimi boyunca gelişen intersismik deformasyon incelenmiştir. Krip olasılığı olan yerlerde GPS noktaları tesis edilerek DAF'ı dik kesen GPS profilleri oluşturulmuş ve kampanya ölçmeleri yapılmıştır. GPS noktaları sık krip varlığını gözlemlemeye uygun şekilde, DAF'a yakın bölgelerde tesis edilmiştir DAF'a uzak alanda yer alan sürekli ve kampanya GPS istasyonlarına ait hızlar hesaplanmış ve sonuçlar, krip hızları ile karşılaştırılmıştır. Yerdeğiştirme modellemesi yapılmış, çalışma alanında yüzeydeki krip hızı değişimi ve krip eden zonun derinlikle değişimi kestirilmiştir. Palu'da yerin yaklaşık 50 m altından geçen ve 1950'li yıllarda yapılan bir demiryolu tünelinin DAF tarafından kesildiği belirlenmiş, tünel duvarlarında 10-20 cm büyüklüğünde ötelemeler ölçülmüştür. Tünel içine, kripmetre istasyonu kurulmuştur. Bölgeye ait sismolojik veriler de değerlendirilmiş ve krip bulgularını destekleyecek sonuçlar elde edilmiştir. Çok disiplinli verilerden elde edilen sonuçlar, DAF'ın Sivrice-Palu kısmında (~100 km) kripin varlığını ortaya koymaktadır. Krip hızı, bölge boyunca değişmekte olup, yer yer uzak alan levha hızına erişmektedir. Sonuçlarımız, DAF üzerindeki asismik kaymayı doğrulayan ilk bulgulardır.

Anahtar Kelimeler: DAF, Krip, InSAR, GPS, Sismoloji

Abstract

In this study, we study the eastern section of the EAF to explore the evidences on the creep. A new GPS network was established along fault perpendicular profiles

¹ Boğaziçi Üniversitesi Jeodezi Mühendisliği Bölümü semih.ergintav@boun.edu.tr

² İstanbul Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü ziyadin.cakir@itu.edu.tr

³ Yıldız Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümü dogan@yildiz.edu.tr

⁴ Yıldız Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümü sdacetin@yildiz.edu.tr

⁵ İstanbul Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü selver.senturk@gmail.com

⁶ Boğaziçi Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü kara@boun.edu.tr

⁷ Jeolojik Miras Koruma Derneği (JEMIRKO), Ankara

⁸ Yıldız Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümü alpayoz@yildiz.edu.tr

⁹ Boğaziçi Üniversitesi, Deprem Mühendisliği Bölümü umit.dikmen@boun.edu.tr

¹⁰ Colorado Boulder Üniversitesi Jeoloji Bilimleri roger.bilham@colorado.edu

¹¹ Boğaziçi Üniversitesi Jeodezi Mühendisliği Bölümü wumiti@gmail.com

¹² Boğaziçi Üniversitesi Jeodezi Mühendisliği Bölümü ozener@boun.edu.tr

crossing fault segments, identified to be creeping from SAR analysis. The closest GPS sites were setup within 2 km from the surface of EAF (East Anatolian Fault) in order to constrain the possible shallows creep. Far-field continuous GPS sites permit us to determine the long-term slip rate and hence the depth of creep on the fault using dislocation models. In the meantime, a creepmeter was also installed to monitor fault creep in a railway tunnel crossing the fault at ≈ 50 m depth below the village of Palu, at a location where the walls of the tunnel have been offset by 10-20 cm since its construction during 1947. To confirm these results, earthquake data were also re-analyzed. The results reveal that the 100-km-long Sivrice-Palu segment in the Elazığ-Bingöl seismic gap is exhibiting aseismic creep at the shallow depths. The surface creep rate is varying along the fault locally attaining the far field plate velocity, implying that significant portion of the elastic strain has been released aseismically. Preliminary modelling with elastic dislocations suggests that some sections of the fault may be creeping from the surface down to the entire seismogenic crust. These are the first results to confirm aseismic slip on the EAF.

Keywords: EAF, Creep, InSAR, GPS, Seismology

1. Giriş

Depremlerin nedenlerinin ve meydana getirdikleri tehlikelerin anlaşılabilmesi için fayların maruz kaldıkları gerilmeler karşısında göstermiş oldukları davranışların incelenmesi gerekmektedir. Aktif fayların önemli bir kısmı, üzerinde yıllar boyunca biriktirdiği enerjiyi ani bir şekilde bir depremle saniyeler içerisinde boşaltmakta ve zaman içinde tekrardan kilitlenerek deprem öncesi durumuna gelmektedir. Bazı faylar ise sürekli olarak, anlık sismik enerji boşalımı olmadan, tamamen veya kısmen sessizce kaymakta, diğer bir deyişle krip etmektedir. Bu bakışla bir fay üzerinde gözlenen bir “sismik boşluk” varlığı, o bölgede gerilme artışı olmadığını, fayın krip hareketi yaptığını, tehlike üreteceğini veya o bölgede bir depreme neden olacak şekilde fayın kilitli olduğunu, bu kısmı kırabilecek boyuta gelene kadar enerji artışı olacağını, bir tehlikenin var olduğunu belirtmektedir.

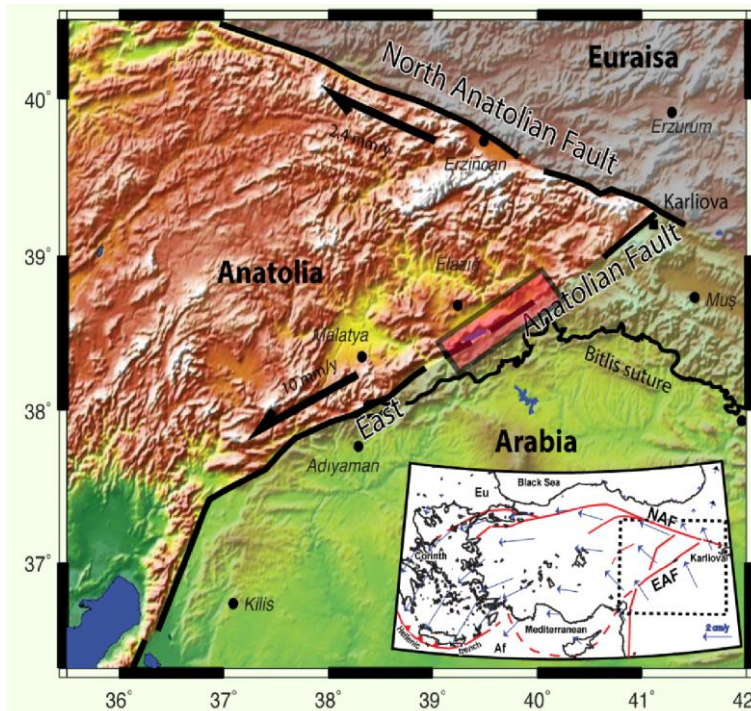
Nalbant ve diğ. (2002), 1822'den günümüze kadar olan Doğu Anadolu Fayı (DAF) üzerindeki 6.7 ve üstü 11 depremi kullanarak bölgedeki sismik tehlikeyi analiz etmişlerdir. Analizleri, DAF'ın Palu-Hazar Gölü arasında bir sismik boşluk olduğunu ve bölgede 7 ve üstü bir depremin olma olasılığı olduğunu göstermiştir. Farklı araştırmacılar da jeoloji, paleosismoloji, tarihsel deprem aktivitesi ve GPS verilerini kullanarak, bölgenin $M > 7.4$ büyüklüğünde bir deprem üreteceğine yönelik bu bulguyu desteklemişlerdir. (Çetin ve diğ., 2003; Duman ve Emre, 2013, Aktuğ ve diğ., 2016).

Bu çalışmada Palu-Hazar Gölü arasında farklı yerbilimleri disiplinlerine ait farklı teknikleri kullanarak, bugüne kadar yapılmış çalışmalarda belirtilen $M > 7$ üstü bir depremin meydana gelebileceğini belirten çalışmaların geçerliği kontrol edilmiştir.

İzleyen bölümlerde öncelikle kullanılan teknikler ve bunlarla elde edilen bulgular tanıtılacak olup, son kısımda tüm sonuçlar toplu halde değerlendirilerek bölgedeki deprem tehlikesi sorgulanacaktır.

2. Yöntem

DAF üzerinde olduğu varsayılan krip olayına ait krip hızı değişimini, derinliğini, kripin başladığı ve bittiği yerleri kestirmek amacıyla ölçmeler gerçekleştirilmek, modellemek ve DAF'ın mekanik davranışına yönelik sorgulamalar yapmak amacı ile çok disiplinli bir araştırma yaklaşımı uygulanmıştır. Şekil 1'deki dikdörtgen içindeki bölge çalışma alanını göstermektedir.



Şekil 1. Arap-Avrasya çarpışma zonunu gösteren çalışma bölgesinin tektonik haritası. Kalın siyah çizgiler Türkiye'nin iki büyük fayını göstermektedir; Kuzey Anadolu Fayı (KAF) ve Doğu Anadolu Fayı (DAF). Sağ alt köşedeki ek harita Türkiye'nin aktif fay haritasını (Emre ve diğ., 2013) ve Avrasya referanslı GPS hızlarını (Reilinger et al., 2006) göstermektedir.

2.1. Krip'e Yönelik Bulgu Saptama Amaçlı Arazi Çalışmaları

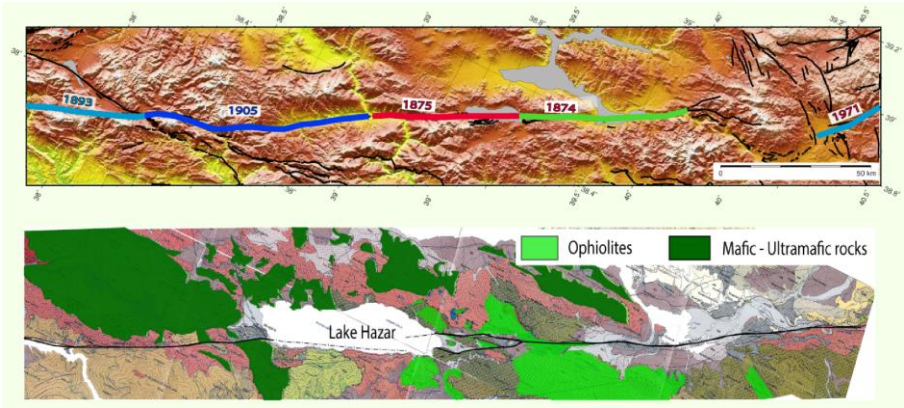
Burada amaç, arazi çalışmaları ile krip varlığına yönelik morfolojik belirtileri, krip olayının yüzeye kadar gelip gelmediğini sorgulamak, bulunan bulguları sistematik olarak kayıt altına almak olup, çalışmalar sırasında, krip olayının fiziksel nedenini anlayabilmek amacı ile krip eden alandaki jeolojik özellikler de sorgulanmıştır (Şekil 2). Bu kapsamda elde edilen bulgular, GPS (Küresel Konumlama Sistemi) ölçüm noktalarının yerlerinin belirlenmesi için referans bilgi de sağlamıştır.

Ayrıca, Colorado Boulder Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Dr. Roger Bilham'den uzun dönem kesintisiz gözlem sağlamak ve krip hareketlerini mikron boyutunda ölçmek için, bedelsiz olarak temin edilen bir adet kripmetre istasyonu, krip gözlenen Palu demiryolu tüneline yerleştirilmiş ve verisi, krip davranışının zaman içindeki değişimini görmek amacı ile analiz edilmiştir (Şekil 3). Şekil 4'te kripmetreye yansıyan bir krip hareketi gösterilmektedir.

2.2. InSAR (Yapay Açıklıklı Radar Uydu Analizi) Çalışmaları

PsInSAR (Yapay açıklıklı radar uydusu görüntülerinin kalıcı saçıcılarla analizi) tekniği ile bölgeye ait deformasyonların zamanla değişimini gösteren zaman serilerinin oluşturulması (Çakır ve diğ., 2012) ve uzun dönem (2001-proje süresi) var olan deformasyonların tespiti için ESA'nın C bandında çalışan Envisat uydusuna ait veriler kullanılarak analizler yapılmıştır. Ayrıca, 2014 yılı içinde devreye giren ve C bandında çalışan Sentinel 1A uydusuna ait verilerin de analizinin yapılması amacı ile kod geliştirilmiş ve bu uydunun 11 günlük veri toplama sıklığından ve 250 km genişliğindeki alanları gözleyebilme olanaklarından yararlanılmıştır (2016 yılında devreye alınan Sentinel 1B ile veri toplama sıklığı 6 güne düşmüştür).

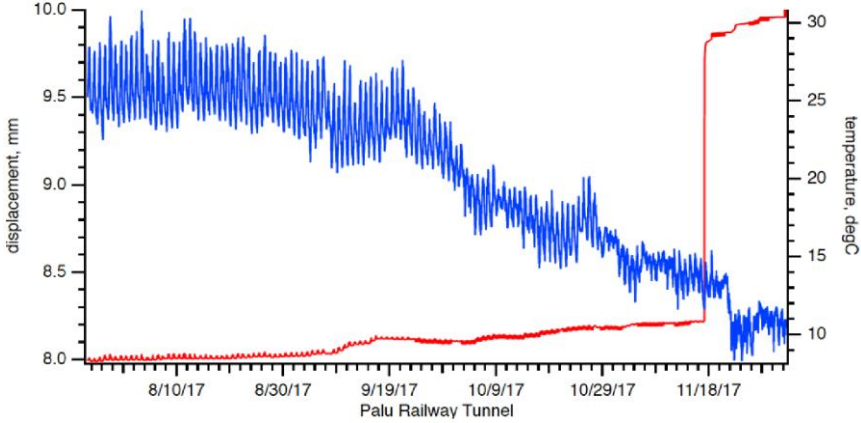
Bu çalışmanın amacı, Hazar-Palu arasını dik kesen profiller ile krip hızı ve uzanımındaki değişimlere yönelik bulgular elde etmektir. Krip gözlenen yerler, GPS noktalarının seçiminde referans bilgi olarak kullanılmıştır.



Şekil 2. Üstteki şekilde, renkli çizgilerle $M > 7$ olan tarihi depremlerin yüzey kırıkları (Ambraseys, 1989; Nalbant et al., 2002); alttaki şekilde, Doğu Anadolu Fayı boyunca bölgenin jeolojisi (MTA'nın Türkiye Jeolojik Harita veri tabanından alınmış) gösterilmektedir.



Şekil 3. (a) Google Earth görüntüsü üzerinde tünel güzergahı. Numaralı kırmızı noktalar, tünel içinde yapılan konum okumalarını göstermektedir. 1947 yılında yapılan ve derinliği 50m olan tünelin genişliği 4.90m, yüksekliği 5.87m ve uzunluğu 787m'dir. Beyaz çizgi, DAF'ın konumunu belirtmektedir. (b) Fayın tüneli kestiği yerin tünel içinden alınan fotoğrafı. (c) Fay tarafından kesilen duvara yerleştirilen kriptometre istasyonunun detay görüntüsü. Ayrıca, (b) ve (c) üzerinde kriptometre konumları da görülmektedir. Kırmızı oklar, fay tarafından etkilenen konumları işaretlemek için kullanılmıştır.



Şekil 4. Kriptometrede kaydedilen ve fay üzerinde var olan krip hareketine ait yer değiştirme anomalisi. Kırmızı çizgi kriptometre olayını, mavi çizgi ise sıcaklık değişimini göstermektedir. Aralarında doğrusal ilişki bulunmaması, kriptometre olayının tümüyle gözlenen yerdeki deformasyondan kaynaklandığı kanıtlanmaktadır.

2.3. GPS Çalışmaları

Arazi çalışmaları ve InSAR çalışmaları ile elde edilen bulguları, faya yakın alanda yersel olarak yüksek doğrulukla sınamak amacı ile bölgeyi dik kesen GPS profilleri oluşturulmuş ve her bir profilde, proje süresi içinde toplam 5 periyot ölçme yapılmıştır. Proje kapsamında GPS ölçüm noktaları, beton pilye

olarak tesis edilmiştir. Ölçme noktalarının, onlarca yıl boyunca ölçülebilecek şekilde korunması ve ölçme hatalarının en aza indirgenmesi için pilye kullanımı tercih edilmiştir.

Uzak alan kontrol amacı ile faya uzak noktaların sayısını artırmak ve bölgeye ait güncel hız alanı ile bulguları eşleştirmek için, çalışma bölgesinde mevcut TUSAGA-AKTİF GPS Ağı'na ait veriler, Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü'nden bedelsiz temin edilerek kullanılmıştır. Bu veriler ve profiller boyunca ölçülen GPS verileri, MIT (ABD) tarafından geliştirilen GAMIT/GLOBK yazılımı (Herring ve diğ., 2010) ile analiz edilerek temel hız alanı oluşturulmuştur.

Bu yöntemin amacı, yersel olarak zamansal ve uzaysal değişimleri yüksek duyarlılıkla kontrol altına almaktır. Yakın ve uzak alan değişimleri, PSInSAR verileri ile ilişkilendirilerek yapılan elastik modellemeler sayesinde, krip eden zonun uzaysal değişimi ve derinliği hakkında da kestirim yapma olanağı elde edilmiştir.

2.4. Sismoloji Çalışmaları

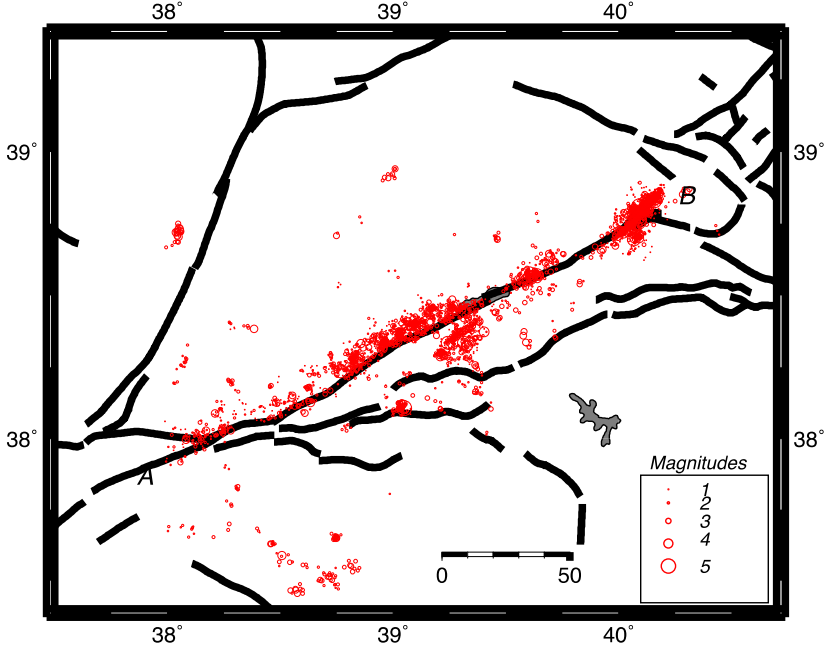
Boğaziçi Üniv. Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enst., Ulusal Deprem İzleme Merkezi ile Afet ve Acil Durum Başkanlığı Türkiye Deprem Veri Merkezi üzerinden araştırmacılara açık olan ve çalışma bölgesi civarında olan (Palu, Elazığ gibi) ulusal deprem istasyonlarına ait veriler kullanılarak, bölgeye ait deprem kataloğundaki lokasyon hatalarını azaltmak amacıyla çift farklar (double-difference) (Waldauser ve Ellsworth, 2000; Waldauser, 2001) yöntemi kullanılmış, krip eden zon boyunca olan deprem aktivitesi yüksek çözünürlükle belirlenmiştir (Şekil 5). Ayrıca, krip eden zonlarda gözlenen benzer dalga biçiminde deprem üreten kümelerin konumları ve deprem üretme sıklıkları kestirilmiştir.

Jeodezik ve sismolojik veriler karşılaştırılarak, çalışma alanında açığa çıkan enerjinin sismik veya asismik olup olmadığı, oranları belirlenmiştir. Bu sayede, krip olayına yönelik jeodezik veriler dışında, farklı bir disiplinden de bilgi sağlanmıştır.

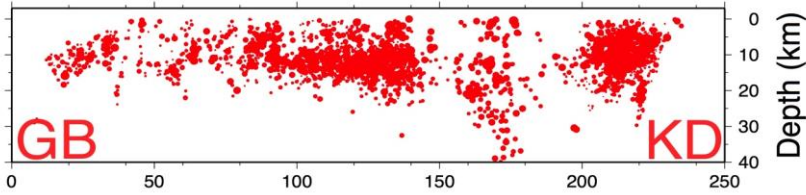
2.5. Kinematik Modelleme ve Gerilme Analizi Çalışmaları

InSAR ve GPS ile elde edilen bilgiler elastik yer değiştirme ve Coulomb gerilmesi yöntemleriyle modellenmiştir (Okada, 1985; Savage, 1990). Modelleme sonucunda, krip eden zon boyunca ve derinliğe bağlı olarak krip hızı değişimi, arazi gözlemleri ile ilişkilendirilerek, ortaya konmuştur. Bu analiz sonuçları ile USGS (ABD) tarafından geliştirilen Coulomb gerilme kodu kullanılarak (Stein ve diğ., 1997), krip zonu civarındaki faylar üzerindeki gerilme değişimleri analiz edilmiş, bölgeye ait gerçekçi bir deprem tehlike modeli, sismoloji çalışmalarının sonuçları ile doğrulanarak kestirilmiştir.

Sonuçların bölgedeki tarihsel depremlerle ilişkisi de irdelenmiş ve arazi gözlemleri ile sorgulanması yapılmıştır



(a)



(b)

Şekil 5. Çalışma kapsamında oluşturulan katalogdaki depremlerin HypoDD ile değerlendirilmesi sonrası elde edilen (a) mekansal dağılımı ve (b) DAF boyunca derinlikle değişimi. Altılık aktif fay haritası Emre ve diğ. (2013)’den alınmıştır.

3. Sonuçlar

DAF’ın Palu-Hazar Gölü segmenti boyunca TUBITAK 1001 projesi desteğinde (Proje no: 114Y250), yeni teknikleri kullanan jeodezi, jeofizik, jeoloji disiplinlerinden uzmanlar bir araya gelerek, bölgenin güncel deprem tehlikesini detaylı olarak araştırmışlardır. Güncel tekniklerle (GPS, InSAR, sismoloji) yapılan detay araştırmalar, bugüne kadar yapılan çalışmalardan tümüyle farklı olarak, DAF’ın Palu-Hazar Gölü kısmının (~100km) tümüyle

kilitli olmadığını, krip ettiğini somut olarak belgelemiştir. Bu bulgular, arazi gözlemleri ile de desteklenmiştir. Palu'da tarihi köprü, yeni köprü ve demiryolu tüneline kripin derinlerden yüzeye kadar geldiği somut şekilde saptanmıştır. Fay tarafından doğrudan kesilen ve Palu kalesinin bulunduğu kısımda yaklaşık 50m derinlikte yer alan Palu demiryolu tüneline yerleştirilen ve krip hızını ölçen kripmetrede gözlenen bulgular, krip hızının anlık olarak hızlanıp yavaşladığını göstermiştir. Palu kalesi civarından alınan örneklerle uygulanan yaşlandırma amaçlı radyokarbon analizleri, bölgedeki en son M>7 büyüklüğündeki depremin, 1779-1887 yılları arasında olduğunu göstermiştir.

Gözlenen krip hızı, bölge boyunca değişmekte olup, yer yer Doğu Anadolu Fayı'nın kayma hızı'na (~10 mm/yıl) erişmektedir. Bu bulgu, elastik enerjinin, önemli bir bölümünün Palu-Hazar Gölü arasında asismik olarak serbest bırakıldığını göstermektedir. Bununla birlikte, krip nedeniyle, krip eden kısım üzerindeki gerilme birikimi azalırken (ve deprem olma olasılığı azalırken), uçlarda (Palu ve Sivrice) artmakta olup, olası bir depremin zamanı öne çekilmektedir.

Bölgedeki izlemenin kesintisiz yapılması, deprem tehlikesinin güvenilir olarak saptanmasını ve deprem tehlikesine yönelik karar vericilerin güvenilir bilgi almasını sağlayacaktır. Özellikle Palu demiryolu tüneli DAF tarafından doğrudan kesildiği için çok önemli bir bilgi kaynağıdır. Proje ekibi, halen bölgede aktif olarak çalışmaya devam etmekte, elde edilen sonuçlar, bölgedeki deprem riskini azaltmaya yönelik çalışmaları planlayanlara aktarmak için her olanak kullanılmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmaya finansal destek TÜBİTAK 1001 desteğinde yapılan 114Y250 nolu proje ile sağlanmıştır.

Kaynaklar

AKTUĞ, B., NOCQUET J. M., CİNGÖZ, A., PARSONS, B., ERCAN, Y., ENGLAND, P. C., LENK, O., GURDAL, M., KILICOĞLU, A., AKDENİZ H., TEKGUL, A. 2010. "Deformation of western Turkey from a combination of permanent and campaign GPS data: limits to block-like behavior", *Journal of Geophysical Research*, 114, B10404.

AMBRASEYS, N. N. 1989. "Temporary seismic quiescence", *Geophys. J.*, 96, 311-331.

ÇAKIR, Z., ERGİNTAV, S., ÖZENER, H. , DOĞAN, U., AKOĞLU, A., MEGHRAOUI, M., REILINGER, R. 2012. "Onset of aseismic creep on major strike-slip faults", *Geology*, 40 (12), 1115-1118.

ÇETİN, H., GUNAYLI, H., MAYER, L. 2003. "Paleoseismology of the Palu-Lake Hazar segment of the East Anatolian fault in Turkey", *Tectonophysics*, 374, 163-197.

DUMAN, T., EMRE, O., 2013. "The East Anatolian Fault; geometry, segmentation and jog characteristics (in Geological development of Anatolia and the easternmost Mediterranean region)", Special Publication - *Geological Society of London*, 372(1), 495-529.

HERRING, T. A., KING, R.W., MCCLUSKY, S. C. 2010. *Introduction to GAMIT/GLOBK, Release10.4*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, ABD: MIT Press.

NALBANT, S., MCCLOSKEY, J., STEACY, S. ve BARKA, A. 2002. "A., Stress accumulation and increased seismic risk in eastern Turkey", *Earth and Planetary Science Letters*, 195, 291-298.

OKADA, Y. 1985. "Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, No. 4, pp. 1135-1154.

REILINGER, R., MCCLUSKEY, S., VERNANT, P., LAWRENCE, S., ERGINTAV, S., ÇAKMAK, R., ÖZENER, H., KADIROV, F., GULIEV, I., STEPANYAN, R., NADARIYA, M., HAHUBIA, H., MAHMOUD, S., SAKR, K., ARRAJEHI, A., PARADISSIS, D., AL-AYDRUS, A., PRILEPIN, M., GUSEVA, T., EVREN, E., DMITROTSIA, A., FILIKOV, S. V., GOMEZ, F., AL-GHAZZI, R., KARAM, G. 2006. "GPS Constraints on Continental Deformation in the Africa-Arabia-Eurasia Continental Collision Zone and Implications for the Dynamics of Plate Interactions", *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 111 (B5), B004051.

SAVAGE, J. C. 1990. "Equivalent strike-slip earthquake cycles in half-space and lithosphereasthenosphere earth models", *J. Geophys. Res.*, 95, 4873-4879.

STEIN, R. S., BARKA, A., DIETRICH, J.J. 1997. "Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering", *Geophys. J. Int.*, 128, 594-604.

WALDHAUSER, F., ELLSWORTH, W. L., 2000. "A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, 1353-1368.

WALDHAUSER, F. 2001. "HypoDD: A computer program to compute double-difference earthquake locations", *USGS Open File Rep.*, 01-113.