



Üçgen Alan Değişimi Yönteminin Deprem Ön Kestiriminde Kullanılabilirliği: 23.10.2011-13:41 Mw=7.2 Van Depremi Örneği

Usability of Triangular Area Change Method in Earthquake Prediction: 23.10.2011-13: 41 Mw = 7.2 Van Earthquake Example

Ahmet Yücel Ürüsan^{1*}

¹ İstanbul Gelişim Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE
Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: ayurusan@gelisim.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 19.10.2019

Kabul Tarihi / Accepted: 13.05.2020

Atıf şekli/ How to cite: URUSAN, A.Y.,(2020). Üçgen Alan Değişimi Yönteminin Deprem Ön Kestiriminde Kullanılabilirliği: 23.10.2011-13:41 Mw=7.2 Van Depremi Örneği. DEUFMD 22(66), 813-824.

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2020226616

Öz

Plaka tektoniği nedeniyle meydana gelen depremler beklenmeyen olaylardır. Depremler, öncesinde hareket, eğilme, gerilme, elektromanyetik dalga emisyonu gibi stres nedeniyle yerüstü veya yeraltında meydana gelen bazı öncü işaretler verirler. Bunlar çeşitli metotlarla algılanırlar. Fakat bu işaretler her zaman depremlerle ilişkilendirilemez. Bu nedenle bilim adamları daha fazla nicelik araştırarak deprem tahminini iyileştirmeye çalışmaktadırlar. Özellikle son yıllarda bu konuda anlamlı sonuçlar elde edilmiştir. Üzerinde fazla tartışılmamasına rağmen en iyi metotlardan biri, eğer deprem dışmerkezi etrafında sabit GPS referans istasyonları varsa, bu istasyonlar arasında oluşturulacak üçgenlerin alanlarında bir değişim olup olmadığının araştırılmasıdır. Yöntem, bu çalışmada, 23 Ekim 2011 – 13:41'de 7.2 M büyüklüğünde meydana gelen Van depremi öncesi ve deprem anındaki zemin hareketlerini incelemede kullanılmıştır. Bu amaçla, sürekli gözlem yapabilen sabit GPS referans istasyonları ağı (TUSAGA-Aktif, Continuously Operating Reference Station-CORS-TR) verisinden yararlanılmıştır. Van depreminin olduğu fay düzleminin her iki yanında yer alan yakın plandaki 14 istasyon verisi ele alınmış ve günlük hareket vektörleri incelenmiştir. İstasyonlar arası uzaklıkların değişimi ile bunların oluşturduğu üçgen alanlarındaki günlük değişim oranları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar deprem öncesi yer değiştirmede anomalilerin yakalandığı, bunların depremin öncü işaretleri olabileceği, ancak esas yer değiştirmenin deprem esnasında olduğunu göstermektedir. Ardından, bu çözümler deprem öncesi sismik veri ile karşılaştırılmıştır. Sismik verisine göre deprem öncesinde büyüklüğü $2 \leq M \leq 4$ arasında olan birçok minör depremin meydana geldiği, bu depremlerin CORS verisinden elde edilen üçgenlerin günlük alan değişim oranlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Deprem tahmini, Üçgen alanlar, Plaka Tektoniği, Mikro sismik hareketler, GPS

Abstract

Earthquakes caused by plate tectonics are unexpected events. Earthquakes give some precursor signals that occur above ground or underground due to stress such as movement, bending, stress, electromagnetic wave emission. They are detected by various methods. But these signs can not be always associated with earthquakes. Therefore, scientists are trying to improve the earthquake

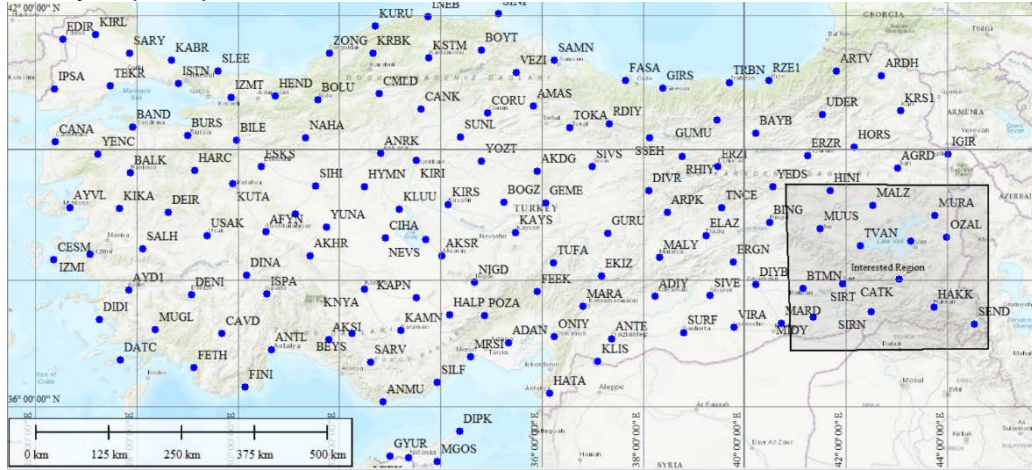
prediction by searching for more quantity. Significant results have been obtained especially in recent years. Although not discussed much, one of the best methods is to investigate if there is a changing in the area of triangles to be created between these stations if there are fixed GPS reference stations around the earthquake epicenter. In this research, this method has been used to investigate the ground movements before and during the Van earthquake which occurred 7.2 M magnitude at 13:41 on 23rd October 2011. For this purpose, the data of Continuously Operating Reference Station (CORS-TR) was used. The data of 14 stations in the near plan located on both sides of the fault plane where the Van earthquake occurred has been taken into consideration and daily motion vectors have been examined. The variation of the distances between the stations and the daily change rates in the triangular areas formed by them have been calculated. The results show that pre-earthquake displacement anomalies have been detected and these may be the precursor signs of the earthquake, but it has also been seen that the biggest displacement was during the earthquake. Then, these solutions have been compared with the seismic data that belong before the earthquake. According to the seismic data, many minor earthquakes with magnitudes between $2 \leq M \leq 4$ occurred before the earthquake, and this case is absolutely coherent with the daily area change rates of the triangles which have been obtained from CORS data.

Keywords: Earthquake prediction, Triangular fields, Plate tectonic, Micro seismic motions, GPS

1. Giriş

Antik çağlardan beri insanoğlu deprem gibi doğa olaylarından her zaman etkilenmiştir. Ancak her zaman depremin zararının en aza indirilmesi için çaba harcamıştır. Diğer taraftan, pek çok parametrik olguya sahip depremin ne zaman ve nerede olacağı konusunda kesin bir tahmin yürütmek de çok zordur. Teknolojinin, bilimin ve yeni, etkili araştırma olanaklarının gelişmesi ile birlikte, incelenen ve takip edilebilen parametre sayısı artmış ve bu çalışmalardan güne güne daha anlamlı sonuçlar elde edilmeye başlanmıştır.

Deprem tahmininde göz önüne alınan bazı yaygın yöntemler; yeraltı suyu sıcaklığındaki değişimler, deniz suyu seviyesi, mikro sismik hareketler, yer manyetik alanındaki değişimler, Troposferdeki sıcaklık, basınç, nem anomalileri, iyonosferdeki toplam elektron yoğunluğu değişimi (Total Electron Content-TEC), radyo dalgaları üzerindeki elektromanyetik bozulmalar, hayvanların alışılmadık davranışları, yer yüzeyinin eğilmesinin takibi, faylardan çıkan radon gazı artışı, vb. gibi sıralanabilir.



Şekil 1. Deprem bölgesi ve TUSAGA-Aktif istasyonları.

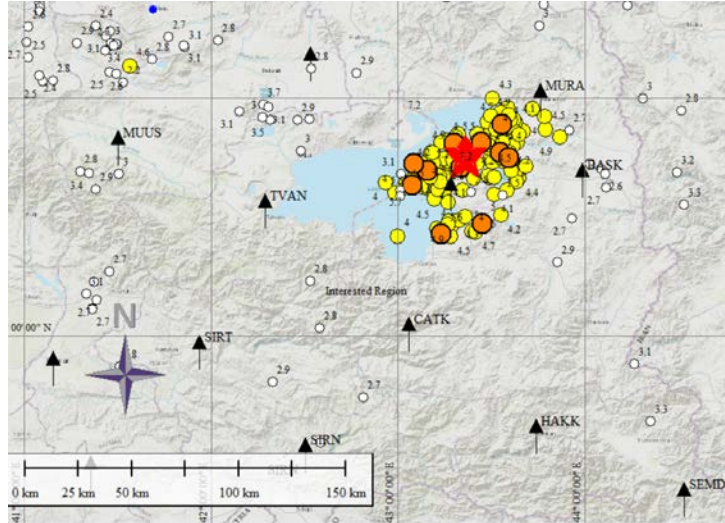
Deprem tahminine yönelik yapılan bazı TEC değeri çalışmalarında, örneğin; 2011 Thoko-Oki ($M_w 9.0$), 2010 Chile ($M_w 8.8$), 2004 Sumatra-

Andaman ($M_w 9.2$) ve 1994 Hokkaido-Toho-Oki ($M_w 8.3$) depremleri M_9 büyüklüğünde olup, büyüklüklerine göre, meydana geleceklere

konusunda en az bir saat önceden tahmin edilebilecekleri görülmüştür. [1][2].

İyonosferdeki TEC değişimi yoluyla, Van depremi için 2014 yılında yapılan deprem tahmin çalışmasında depremden 50 dakika önce TEC değerlerinde nasıl bir düşüş yaşandığı, bunun ilk işaretlerinin günler öncesinden GPS verisine ne şekilde yansdığı ortaya konulmuştur [3]. Bu çalışmada deprem bölgesindeki 14 TUSAGA-Aktif (CORS-TR) istasyonu göz önüne alınmış ve günlük plaka hareketleri incelenmiştir. Böylece deprem sırasında oluşan fayın ne tip bir fay olduğu, depremin mekanizması ve CORS istasyonlarının deprem öncesi ve deprem anında kaç mm ve hangi yönde deplasmana uğradıkları (bu yön ve deplasman "hız vektörleri" şeklinde ifade edilmektedir)

konusunda sonuçlara varılmıştır [3]. Şekil 1'de, Türkiye'nin doğusunda yer alan gölgelendirilmiş bölge, 23 Ekim 2011'de meydana gelen Van deprem bölgesini ve mavi noktalar ise Türkiye genelinde ve bölgede 2009 yılında kurulmuş olan, sürekli gözlem yapan sabit GPS referans istasyonlarını TUSAGA-Aktif göstermektedir. Şekil 2'de ise deprem bölgesi ve bölgede deprem gününü de içine alan 4 aylık bir zaman dilimi içinde meydana gelen depremler gösterilmektedir. Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi'nden edinilen aylık raporlarda bölgeye özel olarak filtrelenen sismik veriye göre beyaz noktalar $2 \leq M \leq 4$, Sarı noktalar $4 \leq M \leq 4.9$, turuncu noktalar $5 \leq M \leq 6$ ve Kırmızı yıldız işareti ise 7.2M büyüklüğünde depremleri işaret etmektedir. Burada $5 \leq M \leq 6$ depremlerin tamamı ana şoktan sonra meydana gelmiştir.



Şekil 2. Deprem bölgesi. Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesinden alınan ve deprem gününü de içeren 4 aylık sismik veri şekilde gösterilmiştir. Burada, beyaz noktalar $2 \leq M \leq 4$, Sarı noktalar $4 \leq M \leq 4.9$, turuncu noktalar $5 \leq M \leq 6$ ve Kırmızı yıldız işareti ise 7.2M büyüklüğünde depremleri işaret etmektedir.

GAMIT/GLOBK [4] programı kullanılarak 118 günlük (dört aylık) veri (Jülyen gününe göre 235-353) işlenmiş ve zaman serileri elde edilmiştir. Van depremi Jülyen günü olarak 296. günde meydana gelmiştir ve incelenen günler dahilindedir.

Araştırmadan elde edilen bulgulara göre bölgede, deprem dış merkezinin kuzeyinde kalan MURA (Muradiye) ve güneyindeki BASK(Başkale) ve HAKK (Hakkâri) gibi bazı istasyonlar birbirlerine yaklaşmıştır. Elde edilen bu sonuç ile bölgede bir ters faylanma olup

olmadığı araştırılmıtır. Literatür taraması ve raporlar incelendiğinde ters faylanmanın deprem dış merkezinin güneyinde, Van ve Erçek gölleri arasında daha önce varlığı bilinmeyen ve Şekil 3'de kırmızı ile gösterildiği şekilde meydana geldiği anlaşılmıştır [1] [3].



Şekil 3. Van depreminin bir sonucu olarak oluşan daha önce varlığı bilinmeyen fay (hayalet fay) kırmızı ile gösterilen ters faylanma meydana geldiği anlaşılmıştır. Yapılan literatür taramasında bu durumun arazi incelemeleriyle de uyumlu olduğu görülmüştür [1] [3].

2. Materyal ve Metot

2.1. Üçgen alanlar yöntemi

Başta topoğrafik haritalar ve eğri yüzeyler olmak üzere pek çok alanda kullanılan üçgenlere bölme yöntemi deprem tahmini konusunda ilk kez Tokachi, Nigata, West Fukuoka, Kwasaki-Fujisawa-Ninomiya ve Sumatra depremleri için kullanılmıştır [2][5]. Çalışma, deprem öncesi mekanizma bilinmediğinden ötürü, 3 boyutta X, Y, Z'nin bütün kombinasyonları için Japonya'da bulunan GPS sabit referans istasyonlarının verileri kullanılarak yapılmıştır. Burada istasyonlar arasında oluşturulan üçgen alanlarının günlük değişim oranları araştırılmış ve bunun için (1) formülü kullanılmıştır. Birimi ppm dir[2].

$$DCR = \frac{ACD - APD}{APD} \quad (1)$$

Burada;

DCR: Daily Change Ratio – Günlük değişim oranı

ACD: Area of Current Day – İçinde bulunulan gün için üçgen alanı

APD: Area of Previous Day – Önceki gün hesaplanan üçgen alanı.

Deprem tahmini açısından sonuçlar çok anlamlı olarak değerlendirilebilir. Hangi üçgen alanlarının değiştiği, potansiyel deprem tehlikesinin nerede olduğu konusunda da bir fikir verebilir [2].

Tokachi depremi için merkez üssü etrafındaki CORS istasyonlarının köşe noktalarını oluşturduğu üçgenleri meydana getirilmiştir ve bunların alanlarındaki günlük değişim oranları

hesaplanmıştır. Sonuçlara bakıldığında 26 Eylül'de meydana gelen 8.0 M büyüklüğündeki depremden günler önce, tam 11 gün, ilk öncü işareti alınmıştır.Yine bu araştırma gurubu tarafından Nigata, West Fukuoka, Kwasaki-Fujisawa-Ninomiya ve Sumatra depremleri için yapılan diğer çalışma sonuçlarına bakıldığında, herhangi bir depremin ilk sinyallerinin, seçilen sismik bilgi temelinde, depremden minimum üç gün önce GPS istasyon verisinden ortaya çıkarılabildiği görülmüştür [2][5].

Benzer bir çalışmada, Van depremi için üçgen alanlar yöntemi kullanılmış ve anlamlı sonuçlar elde edilmiştir [6].

2.2. GAMIT/GLOBK yazılımı ile verilerin değerlendirilmesi

GAMIT programı, GLOBK ve Track programları ile birlikte bir paket olarak MIT, Scripps Oşinografi Enstitüsü ve Harvard Üniversitesi tarafından Ulusal Bilim Vakfı desteğiyle ABD'de geliştirilmiş bir programdır. Bu program kabuk deformasyonunu incelemek amacıyla GNSS verilerini işlemek için kullanılır. Program, yer istasyonlarının ve uydu yörüngelerinin, atmosferik zenit gecikmelerinin ve yer oryantasyon parametrelerinin üç boyutlu göreceli konumlarını tahmin etmek için faz verilerini işleyecek kodlardan oluşmuştur ve UNIX işletim sisteminde çalışacak şekilde tasarlanmıştır.

Uydudan sabit yer istasyonuna gelen GNSS sinyalleri çeşitli baskın hatalar nedeniyle istenilen doğrulukta olamamaktadır. Bu hataların kaynakları; uydu-yer istasyonu arasındaki iyonosfer ve troposfer tabakalarında meydana gelen gecikme, uydu ve yer istasyonu arasındaki saat farkı, gibi sıralanabilir. Bunları giderebilmek için geliştirilen modelleri (iyonosfer için tek tabaka modelini, troposfer için Saastamonien modeli ve küresel haritalama fonksiyonları, vb) içeren program, yer istasyonu ve uydu arasındaki bu hata kaynaklarından dolayı meydana gelen ve metreler mertebesine varan faz kaymalarını, uluslararası sabit GPS istasyonlarını da referans alarak çözer. Böylece günlük bazda ilgili istasyonun koordinatlarını en hassas şekilde çözümlenmeye çalışır.

GAMIT/GLOBK ile günlük çözülen bu koordinat değişimleri Şekil 4'de bir örneği görülen [3] zaman serisine dönüştürülür ve bu günlük koordinatlar o istasyona ait haftalık, aylık, yıllık hareket vektörleri haline getirilir.

Track programında ise istasyondan gerçek zamanlı olarak alınan veri kullanılır ve hızlı uydu yörünge verisiyle birleştirilerek istasyon koordinatındaki anlık değişimler izlenebilir ve sebepleri araştırılabilir.

Bu çalışmada, toplanan verinin sonradan işlenmesi anlamına gelen, post process de denilen (gerçek zamanlı olmayan), veri değerlendirme yöntemi uygulanmıştır. Depremin meydana geldiği 2011 yılında ITRF2005 datumunda veri sağlayan deprem merkez üssünü çevreleyen 14 TUSAGA-Aktif istasyonu ve Türkiye ve çevresindeki 19 IGS referans istasyonu (ANKR, GLSV, GRAS, GRAZ, ISTA, KIT3, KOSG, MATE, NICO, NOT1, ONSA, POTS, RAMO, SOFI, TUBI, VILL, WTZR, ZECK, ZWEZ) günlük verileri GAMIT/GLOBK programında işlenmiş ve Şekil 5'de de istasyonlara ait hız-zaman çizelgeleri elde edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Giriş bölümünde, 2014 yılında yapılan ve Van depremi öncesinde ionosferdeki anormallikleri araştırmaya ilişkin açıklanan sonuçlar ve bu sonuçların bölgede büyük deprem öncesi meydana gelen mikro depremlerle uyumu ortaya konmuş ve özetle Tablo 1 ve Şekil 4'de MURA istasyonu için gösterilmiştir. Sismik veri ile bu istasyona ait deplasman verisi Şekil 4 ve Şekil 5'de görüldüğü üzere sırasıyla 237 241, 254, 266, 271, 275, 286, 292, 293, 295 ve deprem günü olan 296 günlerinde uyumludur [3]. Şekil 5'deki zaman serilerinde özellikle MURA istasyonunun Doğu-Batı ve Kuzey-Güney doğrultularında deplasmanının anlamlı olduğu görülmüştür. Burada, yatay eksenler yılın günlerini ve düşey eksenler milimetrik olarak

istasyon hareketini göstermektedir. Serilere göre MURA istasyonu (a) deprem öncesi hareketler gösterse de en büyük taşınmayı deprem günü yapmış ve 30.6 mm güneye doğru hareket etmiştir. HAKK istasyonuna ait zaman serinde ise (b) özellikle deprem günü 10.5 mm kuzey yönünde hareket etmiştir. Her iki istasyonun da doğu batı yönünde hemen hemen elastik bir hareket yaptığı görülmekte. MURA istasyonunun yüksekliğinin azaldığı bununda ters faylanmayı ifade eden Şekil 3 ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Şekil 5'de MURA ve HAKK istasyonları için elde edilen zaman serileri diğer 11 istasyon için de elde edilmiştir. Bu zaman serileri Şekil 6'da görülen hareket vektörlerine dönüştürülerek harita üzerinde görselleştirilmiştir.

Bütün bu sonuçlar üçgen alanlarının nasıl değiştiği sorusunu akla getirmiştir. Bu araştırmanın amacı, özellikle yatay düzlemde bu sorunun cevabını bulmak ve elde edilen çözümleri bu bölgeden alınan mikro sismik veriyile karşılaştırmaktır. Bu anlamda araştırmada elde edilen bazı değerler aşağıda öncelikli olarak gözden geçirilmiştir.

Bu çalışmada, 2014 yılında yapılan çalışmada olduğu gibi 14 TUSAGA-Aktif istasyonuna ait Tapu Kadastro Genel Müdürlüğü'nün araştırma için kullanıma açtığı dört aylık veri göz önüne alınmıştır[3]. Öncelikle istasyonların hizmete başladığı ilk pozisyonuna göre günlük düzeltme değerleri ve ardından her bir istasyon çifti arasındaki günlük uzaklıklar hesaplanmış ve Şekil 7'deki grafik elde edilmiştir. Çalışmada yükseklik değerlerindeki değişimler göz önüne alınmamış, sadece yatayda, enlem ve boylamlar üzerinden hesaplar gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. 23 Ekim 2011 Van depreminden önce meydana gelen depremler ve büyüklükleri [3].

Nu	Jülyen Günü	Tarih	Açıklama	Enlem	Boylam	Mw
1	296	23.10.2011	TABANLI-- (VAN)	38.7578	43.3602	7.2
2	295	22.10.2011	GOZTEPE-BULANIK (MUŞ)	38.9735	42.2817	3.7
3	291	18.10.2011	BALVEREN-- (ŞIRNAK)	37.5475	42.5875	3
4	286	13.10.2011	KIRIKKAYA-AHLAT (BİTLİS)	38.9095	42.317	3.5
5	282	09.10.2011	GUNYURDU-BULANIK (MUŞ)	38.9173	42.2778	3
6	275	02.10.2011	ATADAMI-DIYADIN (AĞRI)	39.2992	43.7583	3
7	272	29.09.2011	YEMİŞEN-BULANIK (MUŞ)	38.9443	42.1523	3.1
8	271	28.09.2011	VAN GÖLÜ	38.682	43.018	3.1
9	266	23.09.2011	YARLISU-VARTO (MUŞ)	39.2578	41.4395	3.1
10	265	22.09.2011	ÇOBANDAĞIVARTO (MUŞ)	39.2283	41.4668	3.1

DEÜ FMD 22(66), 813-824, 2020

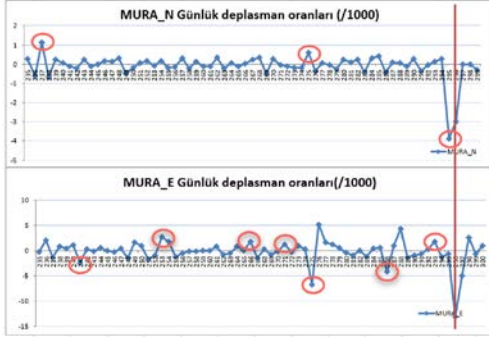
11	265	22.09.2011	ÇOBANDAĞI-VARTO (MUŞ)	39.2282	41.4673	3
12	264	21.09.2011	MUŞ	38.6825	41.5063	3
13	262	19.09.2011	BEKİRHAN-KOZLUK (BATMAN)	38.1167	41.3643	3
14	257	14.09.2011	ÇUKURTARLA-AHLAT (BİTLİS)	38.913	42.5293	3
15	254	11.09.2011	ALANIÇI (MUŞ)	38.6873	41.347	3.4
16	246	03.09.2011	TOPÇUDEĞİRMENİ-GÜRPINAR (VAN)	37.91	43.64	3.1
17	245	02.09.2011	YAMANYURT-SARAY (VAN)TÜRKİYE-İRAN SINIR BÖLGESİ	38.5347	44.3215	3.3
18	241	29.08.2011	TÜRKİYE-İRAN SINIR BÖLGESİ	38.624	44.5253	3.2
19	240	28.08.2011	TÜRKİYE-İRAN SINIR BÖLGESİ	38.9963	44.4467	3
20	240	28.08.2011	TÜRKİYE-İRAN SINIR BÖLGESİ	37.8802	44.2228	3.1
21	238	26.08.2011	AHLAT (BİTLİS)	38.7785	42.4817	3

Şekil 3'te ortaya çıkan hayalet fayın her iki yanındaki 7 istasyon, bunlar MURA, MUUS, VAN, SIRT, HAKK, SIRN, SEMD istasyonlarıdır, köşe noktalarını oluşturmak üzere Şekil 6'de görülen üçgenler oluşturulmuştur.

Şekil 6'da fayın kuzeyindeki bazı CORS istasyonlarının güneye ve güneydeki bazı istasyonlarında kuzeye doğru hareket ettiklerini göstermektedir. Burada özellikle MURA istasyonu güneye doğru 33 mm ve HAKK kuzeye doğru 10.5 mm hareketlendikleri görülmektedir. Yine BASK istasyonunun Kuzey-batı yönünde 15 mm'lik bir hareketi söz konusudur.

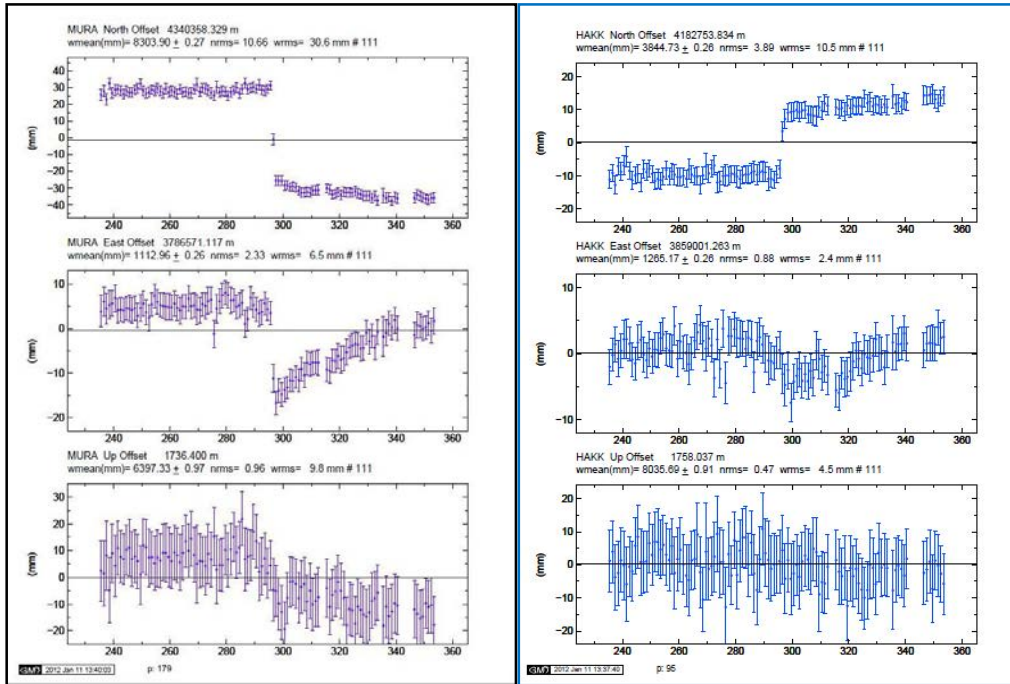
İstasyonlar arasındaki uzaklıkların hesaplanan günlük değerleri ve bu değerlerin bir önceki güne göre değişimleri metre cinsinden sırasıyla Tablo 2, ve Tablo 3'te gösterilmiştir. Şekil 7'de ise, Tablo 3'te verilen bu günlük değişimlerin nasıl bir esneklik gösterdikleri açıkça görülmektedir. Ancak depremin meydana geldiği 296. gün öncesinde bazı günler var ki, 286, 287, 290, 293 gibi, bu günlerde değişim değerlerinin oransal olarak daha büyük olduğu aşıkardır. Bu durum, ilk bölümde anlatılan ve Şekil 2'de gösterilen deprem gününü de içeren 4 aylık Kandilli Rasathanesi raporlarından bu bölge için elde edilen sismik veri ile de örtüşmektedir. Uzaklık değişim oranları, MURA-MUUS, MURA-HAKK, MURA-SIRT, MURA-TVAN, HAKK-SIRN, SIRN-SIRT çiftleri için 286, 287, 290, 293 Jülyen günlerinde benzer yönde değişim göstermektedirler. Bazı diğer istasyon çiftleri için ise (MUUS-SIRT, MUUS-TVAN, HAKK-SEMD, SIRT-TVAN) bu değişimler 1. gruba göre aksi şekildedir. Bu gruptaki istasyonların uzaklık değerleri günlük değişim oranları olarak 1. Gruba göre, 293 ve 294 günleri dışında, zıt yönde, yani, bazı günler için büyürken bazı

günler için ise küçülmektedir. 293. ve 294. günlerde bütün uzaklık oranları, sırasıyla, maksimum 0.005 m (+) veya 0.005 m (-) yönde değişmektedir. İstasyonlar arası deplasman değerlerinin toplamda, sırasıyla, 0,012 m ve 0,01 m şeklinde değiştiği 286-287 ve 289-290 günleri, yaklaşmakta olan depremin ilk sinyalleri ve dolayısıyla deprem tahmini açısından çok önemlidir. Bu öncü işaretler ve meydana gelen birçok düşük aletsel büyüklüğe sahip depremler yeraltında büyük bir stresin oluştuğunun ve yakın gelecekte büyük bir depremin olacağını işaretçisidir. Sonuç olarak Şekil 7, 296. günde meydana gelen büyük depremde (7.2M) istasyon çiftleri arasındaki uzaklığın da nasıl değiştiğini ortaya koymaktadır. Buna göre; kuzey-güney doğrultusunda istasyonlar arası uzaklıkların 0,045 m'ye kadar kısalma (- yönde olduğundan bu anlaşılmaktadır) değişiklik gösterdiğini göstermektedir. Başka bir deyişle, istasyonlar birbirine yaklaşmışlardır. Bu da bize bölgede bir ters faylanma olduğunu net olarak ispat eder ki bu sonuç Şekil 3'deki sonuçla örtüşmektedir. Burada başka bir sonuç olarak da faylanmanın doğu-batı yönünde ve istasyonlar arası mesafenin azaldığı, dış merkeze göre kuzeyde MURA ve güneyde BASK, HAKK, SIRN, SIRT, SEMD arasında, özellikle, zaman serisi ve hız vektöründen de anlaşılacağı gibi MURA istasyonuna yakın bir bölgede olduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen hız vektörleri ayrıca Anadolu plakasında meydana bu sıkışma sonucunda özellikle MUUS istasyonunun batıya doğru bir deplasmana sahip olduğunu göstermektedir. Bu da Anadolu plakasının çok bilinen batı yönündeki hareketi ile uyumlu bir çıktıdır

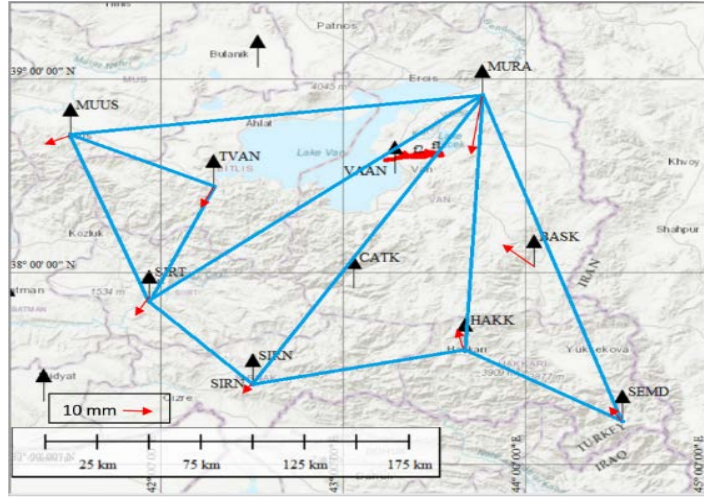


Şekil 4. MURA istasyonu için GPS ve sismik veri

ilişkisi. Bu istasyona ait Şekil 5'te zaman serilerinde görülen deplasman verisi, kırmızı dairelerle gösterilen sırasıyla 237 241, 254, 266, 271, 275, 286, 292, 293, 295 ve deprem günü olan 296 günlerindeki sismik veriyle (Tablo 1) uyumludur. [3]



Şekil 5. GNSS verisi kullanılarak GAMIT/GLOBK programından MURA ve HAKK istasyonları için elde edilen (a) Kuzey-Güney, (b) Doğu-Batı ve (c) Yükseklik zaman serileri [3].



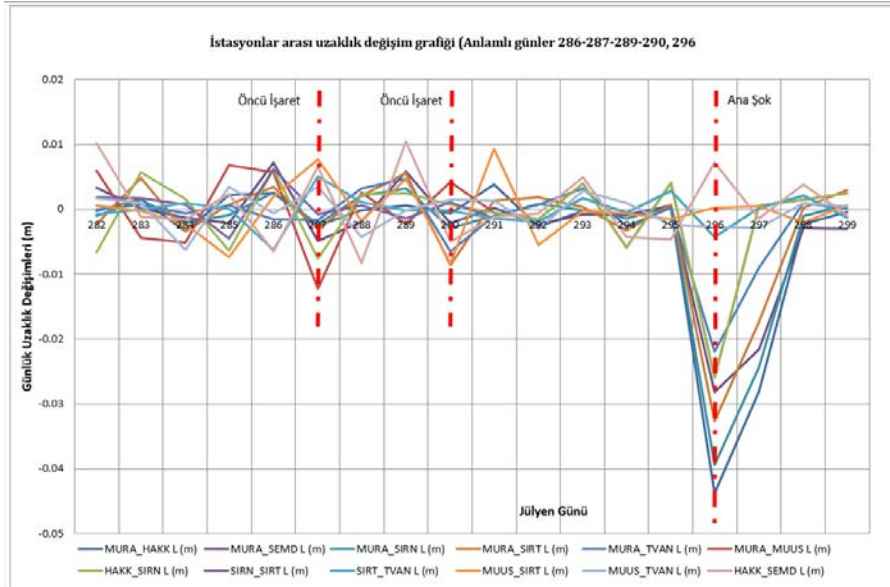
Şekil 6. 7 referans istasyonunun köşe noktaları olarak kullanılmasıyla elde edilen 5 üçgen.

Tablo 2. CORS istasyonları arasındaki uzaklıklar (m)

OLUŞTURULAN İSTASYON ÇİFTLERİ ARASINDAKİ UZAKLIK DEĞERLERİ - L (m)										
MURA-HAKK	MURA-SIRM	HAKK-SIRM	MURA-SIRT	SIRM-SIRT	MURA-MUUS	MUUS-SIRT	SIRT-TVAN	MUUS-TVAN	HAKK-SEMD	MURA-SEMD
157207.962	198829.0793	113470.0845	198120.6522	64443.0371	197404.8852	102857.717	73268.73817	74615.57105	79704.80291	200115.4944
157207.9618	198829.0783	113470.0778	198120.6499	64443.03895	197404.8912	102857.7176	73268.73739	74615.57282	79704.81308	200115.4978
157207.9634	198829.0799	113470.0835	198120.6548	64443.04068	197404.8868	102857.7173	73268.73736	74615.57381	79704.81191	200115.4979
157207.96	198829.0779	113470.0851	198120.6513	64443.04145	197404.8817	102857.715	73268.73839	74615.56751	79704.81042	200115.4967
157207.9623	198829.077	113470.0787	198120.6521	64443.03689	197404.8885	102857.7077	73268.7321	74615.571	79704.81274	200115.4946
157207.9648	198829.0795	113470.0849	198120.6556	64443.0431	197404.8943	102857.7097	73268.73715	74615.57041	79704.80627	200115.5018
157207.9622	198829.0772	113470.0773	198120.6526	64443.04236	197404.8821	102857.7174	73268.7383	74615.57385	79704.81282	200115.4969
157207.9621	198829.0793	113470.0796	198120.6546	64443.043	197404.8847	102857.7156	73268.73813	74615.56962	79704.80462	200115.495
157207.9627	198829.0825	113470.082	198120.6603	64443.04159	197404.8825	102857.7204	73268.7379	74615.56943	79704.81505	200115.5008
157207.9621	198829.0796	113470.0828	198120.6516	64443.04274	197404.8867	102857.712	73268.73783	74615.57093	79704.80999	200115.4988
157207.9659	198829.0786	113470.0802	198120.6529	64443.04139	197404.8861	102857.7213	73268.74035	74615.57223	79704.8089	200115.499
157207.9633	198829.0794	113470.0846	198120.6549	64443.03948	197404.8846	102857.7158	73268.74086	74615.56928	79704.80824	200115.4966
157207.963	198829.0794	113470.0812	198120.6552	64443.04123	197404.8885	102857.7155	73268.73729	74615.57207	79704.81325	200115.4958
157207.9623	198829.0779	113470.083	198120.652	64443.04067	197404.8827	102857.715	73268.73608	74615.57311	79704.80905	200115.4949
157207.9626	198829.0783	113470.082	198120.6527	64443.04347	197404.8868	102857.7135	73268.7372	74615.57072	79704.80448	200115.4955
157207.9187	198829.0389	113470.0792	198120.62	64443.03917	197404.8609	102857.7138	73268.73359	74615.56798	79704.81168	200115.4672
157207.8906	198829.0146	113470.0769	198120.6027	64443.03944	197404.8614	102857.7143	73268.73191	74615.56515	79704.8103	200115.4457
157207.8884	198829.0136	113470.0763	198120.6028	64443.04149	197404.8629	102857.7122	73268.73038	74615.56616	79704.81414	200115.4428
157207.8881	198829.0143	113470.0752	198120.6058	64443.04025	197404.8654	102857.7128	73268.73327	74615.56663	79704.81329	200115.4398

Tablo 3. CORS İstasyonları arasındaki uzaklıkların günlük değişim değerleri (m)

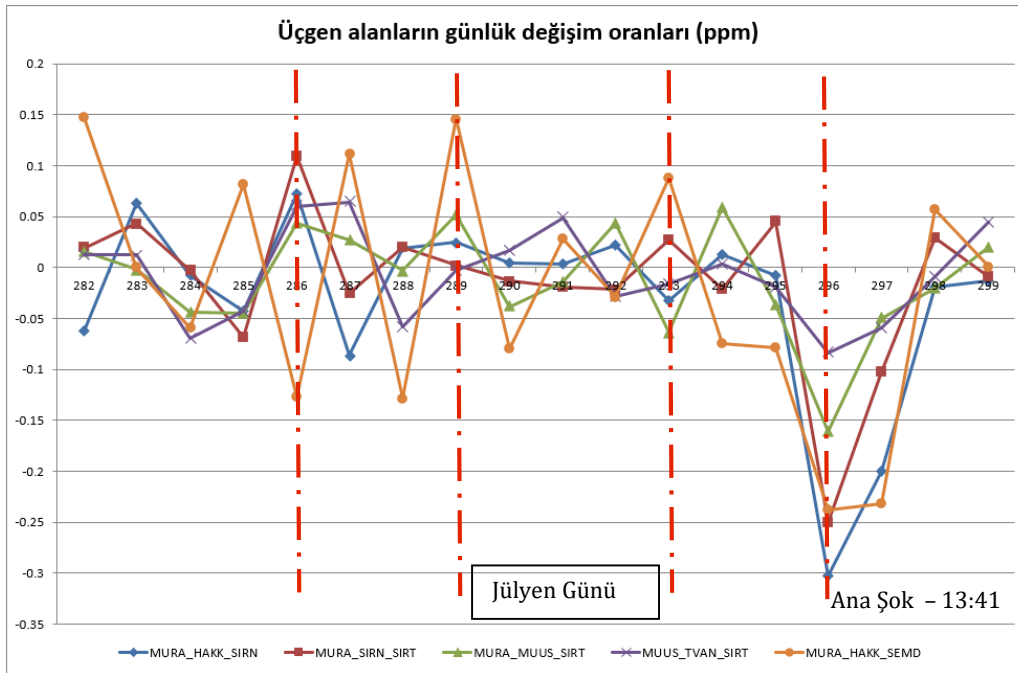
Jülyen Günü	OLUŞTURULAN İSTASYON ÇİFTLERİ ARASINDAKİ UZAKLIKLARIN GÜNLÜK DEĞİŞİM DEĞERLERİ (m)										
	MURA_ HAKK	MURA_ SEMD	MURA_ SİR N	MURA_ SİR T	MURA_ MUU S L	HAKK_ SİR N	SİR N_ SİR T	SİR T_ TVAN	MUUS_ SİR T L	MUUS_ TVAN	HAKK_ SEMD
282	-0.00026	0.00337	-0.001	-0.00226	0.00599	-0.00666	0.00185	-0.00078	0.00056	0.00177	0.01017
283	0.00166	0.00015	0.00152	0.00483	-0.00441	0.00574	0.00173	-0.00003	-0.00029	0.00099	-0.00117
284	-0.00338	-0.00124	-0.00195	-0.00343	-0.00512	0.00156	0.00077	0.00103	-0.00227	-0.0063	-0.00149
285	0.00224	-0.00213	-0.00093	0.00078	0.00685	-0.00638	-0.00456	0.00008	-0.00733	0.00349	0.00232
286	0.00248	0.00722	0.00254	0.00348	0.00576	0.00618	0.00621	-0.00629	0.00203	-0.00059	-0.00647
287	-0.00256	-0.00491	-0.00228	-0.00301	-0.01219	-0.00763	-0.00074	0.00505	0.00765	0.00344	0.00655
288	-0.0001	-0.00189	0.00208	0.00205	0.00261	0.00231	0.00064	0.00115	-0.00176	-0.00423	-0.0082
289	0.00055	0.00586	0.0032	0.00564	-0.0022	0.00247	-0.00141	-0.00017	0.00477	-0.00019	0.01043
290	-0.00058	-0.00208	-0.00291	-0.00864	0.00421	0.00074	0.00115	-0.00023	-0.00839	0.0015	-0.00506
291	0.00386	0.0002	-0.00105	0.00132	-0.00056	-0.00056	-0.00135	-0.00135	0.0093	0.0013	-0.00109
292	-0.00267	-0.00238	0.00089	0.00191	-0.00155	-0.00155	-0.00191	-0.00191	-0.00548	-0.00295	-0.00066
293	-0.00022	-0.00078	-9E-05	0.00039	0.00395	0.00395	0.00175	0.00175	-0.00026	0.00279	0.00501
294	-0.00072	-0.00089	-0.00143	-0.00324	-0.00587	-0.00587	-0.00056	-0.00056	-0.00058	0.00104	-0.0042
295	0.00024	0.00056	0.00036	0.00067	0.00411	0.00411	0.0028	0.00280	-0.00147	-0.00239	-0.00457
296	-0.04382	-0.02824	-0.03938	-0.03265	-0.02591	-0.02591	-0.0043	-0.00430	0.00029	-0.00274	0.0072
297	-0.02811	-0.02154	-0.0243	-0.01737	0.00055	0.00055	0.00027	0.00027	0.00047	-0.00283	-0.00138
298	-0.00221	-0.00288	-0.00096	0.00018	0.0015	0.0015	0.00205	0.00205	-0.00203	0.00101	0.00384
299	-0.00035	-0.00304	0.00065	0.00298	0.00245	0.00245	-0.00124	-0.00124	0.00062	0.00047	-0.00085



Şekil 7. TUSAGA-Aktif istasyonları arasındaki uzaklık değişim grafiği. Deprem öncesi iki öncü işaret 286-287 ve 289-290 günlerinde görünmektedir. Deprem günü (296) 4.5 cm'ye varan sıkışma da grafikte ortaya konulmuştur.

Yukarıda anlatıldığı üzere başlangıç değerlerine göre hesaplanan istasyon koordinatlarındaki değişimler ve buna bağlı değişen istasyonlar arası uzaklıklar, tanımlanan üçgen alanlarının değerlerine değişim olarak yansımıştır. Bu adımda ise (1) bağıntısı kullanılarak önceki güne göre üçgen alanlarındaki değişim oranları hesaplanarak Tablo 4'te listelenmiştir. Sonuçta jülyen günleriyle ilişkili olan üçgen alanları değişim oran grafiği, deprem gününü de içerecek şekilde Şekil 8'de gösterilmektedir.

Grafik gözden geçirildiğinde büyük depremin anlamlı öncü sinyalleri dikkat çekmektedir ve grafiklerden deprem öncesi yerin ne kadar depresif olabileceği böylelikle, tıpkı giriş bölümünde bahsedilen diğer bazı yöntemlerde olduğu gibi, bir kez daha vurgu yapılmaktadır. Bu grafiklerden çıkarılacak bir başka sonuç ise, değişimlerin olduğu üçgen kenar çizgileri ve üçgen alanlarından hareketle büyük depremin hangi bölgede olabileceğinin yaklaşık olarak tespit edilebileceğidir.



Şekil 8. Üçgen alanlarının günlük değişim oranları grafiği

Burada özellikle MURA istasyonu ile ilişkili MURA-HAKK-SEMD, MURA-HAKK-SIRN, MURA-SIRT-SIRN (Şekil 6) gibi üçgen alanlarının 286-287, 289-290 ve 293 günlerinde ve elbette büyük depremin olduğu 296 gününde, Şekil 6'da hız vektörlerinden de görüleceği üzere, nasıl beklenmeyen anomalilerin meydana geldiğine dikkat edilmelidir. Bu iki üçgene (MURA-HAKK-SEMD, MURA-HAKK-SIRN) ve oluşan fayla bakıldığında (Şekil 3) fay tam da bu iki üçgenin sınırında meydana gelmiştir. SIRN ve SIRT

istasyonlarını hız vektörleri her ne kadar güney-batı yönünde olsa da MURA istasyonunun deplasmanı daha fazladır ve HAKK ve BASK istasyonları da bu sıkışmayı fazlaştıracak şekilde kuzey-batı yönünde yer değiştirmişlerdir.

Bunlar yöntemin deprem tahmininde ne kadar tutarlı olabileceğini özellikle ortaya koyan sonuçlardır.

Tablo 4. Üçgen alanlarının günlük değişim oranları

GÜNLÜK DEĞİŞİM ORANLARI – DCR (ppm)					
Jülyen Günü	MURA_HAKK_SIRN	MURA_SIRN_SIRT	MURA_MUUS_SIRT	MUUS_TVAN_SIRT	MURA_HAKK_SEMD
281					
282	-0.062	0.019	0.016	0.013	0.148
283	0.063	0.043	-0.002	0.012	0.000
284	-0.008	-0.003	-0.044	-0.069	-0.059
285	-0.043	-0.069	-0.045	-0.042	0.081
286	0.072	0.110	0.044	0.060	-0.127
287	-0.086	-0.025	0.027	0.065	0.112
288	0.019	0.020	-0.003	-0.058	-0.128
289	0.025	0.002	0.052	-0.003	0.146
290	0.005	-0.013	-0.038	0.017	-0.080
291	0.003	-0.019	-0.014	0.049	0.028
292	0.022	-0.021	0.044	-0.029	-0.029
293	-0.033	0.027	-0.064	-0.016	0.088
294	0.013	-0.021	0.059	0.003	-0.075
295	-0.008	0.045	-0.036	-0.020	-0.078
296	-0.303	-0.250	-0.161	-0.083	-0.238
297	-0.200	-0.103	-0.050	-0.059	-0.232
298	-0.020	0.029	-0.020	-0.009	0.057
299	-0.013	-0.009	0.020	0.045	0.001

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, CORS istasyonlarının köşe noktalarını oluşturduğu üçgen alanlarındaki değişim oranları kullanılarak 23 Ekim 2011’de meydana gelen 7.2 M aletsel büyüklüğe sahip Van depreminin bazı öncü işaretleri elde edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen özel ve genel sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

Özel sonuçlar:

CORS istasyonlarından alınan veriden elde edilen günlük üçgen alan değişim oranlarının sismik veriyle uyduğu görülmüştür. Özellikle depremden 10 gün önce 186-187 de öncü işaretin alındığı sonrasında 189-190 ve 193 günlerinde anlamlı sonuçlar elde edilmiştir.

İstasyonların hareket vektörlerinden hareketle istasyonlar arası uzaklıklar ve üçgen alanlarındaki günlük değişimlerin hesabıyla, gerilmenin veya başka deyişle stresin nerede olduğu görülmekte ve olası depremin nerede meydana gelebileceği anlaşılabilir.

Stres bölgesinin hesaplanabildiği gibi deprem öncesi oluşan mikro depremlerle de birleştirilerek olası faylanma bölgesinin tespit edilebildiği ve bunun deprem sonrası yapılan saha incelemesiyle örtüştüğü görülmüştür. Burada özellikle MURA-HAKK-SEMD, MURA-HAKK-SIRN, MURA-SIRT-SIRN gibi üçgen alanlarının 286-287, 289-290 ve 293 günlerinde öncü işaretleri verdiği ve büyük depremin olduğu 296 gününde anlamlı ve gerçekçi değerler elde edilmiş ve grafikleştirilmiştir.

Üçgen alanlarından ikisine (MURA-HAKK-SEMD, MURA-HAKK-SIRN) ve oluşan faya bakıldığında fay tam da bu iki üçgenin sınırında meydana gelmiştir. SIRN ve SIRT istasyonlarını hız vektörleri her ne kadar güney-batı yönünde olsa da MURA istasyonunun deplasmanı daha fazladır ve HAKK ve BASK istasyonları da bu sıkışmayı fazlalaştıracak şekilde kuzey-batı yönünde yer değiştirmişlerdir. Böylece sıkışma ve dolayısıyla ters faylanmanın bu iki üçgen sınırında Van-Erçek gölleri arasında olduğu ve bu bulgunun saha gözlemleriyle de uyduğu gerçeği ortaya çıkmaktadır.

Genel Sonuçlar:

Büyük depremler öncesinde meydana gelen mikro depremlerin deprem tahminindeki önemi, Bölgede yer alan CORS istasyonları ile sismik verinin nasıl anlamlı bir şekilde örtüştüğü,

CORS istasyonları ile oluşturulan üçgenlerin kenar çizgilerinin ve dolayısıyla bu üçgenlerin alanlarının günlük değişim oranlarının deprem tahmininde çok anlamlı sonuçlar verdiği, hatta depremin olacağı yaklaşık bölgeyi bu hareketlerden tahmin edebilme olasılığının bulunduğu,

CORS istasyon verilerinin sürekli olarak işlenmesi ve araştırmada yapılan hesaplamaların 3 boyutta sürekli olarak yapılabildiği ve gerekli merkezleri otomatik olarak uyaracak yazılımın geliştirilmesi ihtiyacının olduğu sonuçları anlamlıdır.

Burada mevcut CORS ağı ile ilgili bir iyileştirme anlamında, bu ağın özellikle fay hatları civarında, fayın her iki tarafında

Makalenin özet bölümünde değinildiği gibi pek çok yol ile deprem tahmin çalışmaları yapılmaktadır. Deprem öncesinde elde edilebilen bu bölgesel çıktılar iyi değerlendirmek ve deprem tahmininde araştırılan diğer parametreler arasındaki entegrasyonu sağlamak tahmin sonuçlarının daha güçlü, isabetli ve anlamlı olmasını sağlayacaktır.

Son olarak; CORS sistemi geliştirilmeye uygun, esnek bir sistemdir. Kurulduğu dönemde 147 olan istasyon sayısı, bugün 10 adet eklemeye 157'ye çıkmıştır. Fay bölgeleri için yapılacak yeni projelerle, fayın her iki yakasında mühendislik veya sismolojik anakayasası üzerine belirli bir sıklıkla yeni sabit istasyonlar

kurulabilir ve CORS ile entegre edilebilir. Bu istasyonlardan elde edilecek deplasman verilerinin, yapılacak disiplinlerarası bir çalışmayla diğer tahmin parametreleriyle entegrasyonunu sağlayabilecek yeni yazılımların geliştirilmesi yoluyla anlamlı ve tutarlı deprem tahmin değerleri elde edilebilir.

Teşekkür

Yazar, yöntemin geliştiricisi ve ilk uygulayıcısı Profesör Shunji Murai tarafından 2007'de İstanbul'da verilen seminer ve paylaşımları için Profesör Murai'ye özellikle teşekkürlerini sunar. Ek olarak, Tapu Kadastro Genel Müdürlüğü'ne ve Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'ne, Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı (AFAD), Massachusset Institute of Technology (MIT)'ye sırasıyla sağladıkları GPS, Van bölgesi sismik verisi ve akademik GAMIT/GLOBK programından dolayı teşekkür eder.

Kaynakça

- [1] Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H. 2011. 23 Ekim 2011 Van Depremi Saha Gözlemleri Ve Kaynak Faya İlişkin Ön Değerlendirmeler, Jeoloji Etütleri Dairesi Yer Dinamikleri Araştırma Ve Değerlendirme Koordinatörlüğü Aktif Tektonik Araştırmaları Birimi, Maden Tetkik Ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- [2] MURAI, S., ARAKI, H. 2003. Earthquake Prediction Using GPS-A New Method Based on GPS Network Triangles, GIM Volume 17, October 2003.
- [3] Ürüşan, A.Y. 2015. Relations between the GNSS, InSAR, and the other techniques for prediction of earthquakes. *Arab J Geosci* 8, 7631-7642 <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1670-x>
- [4] GAMIT/GLOBK Programı download and documentation (Son Erişim: 06/01/2020) <http://geoweb.mit.edu/gg/docs.php>
- [5] Earthquake Prediction: New Findings, Challenges in a difficult Science, [Erişim Tarihi: 29.05.2009] <https://www.gim-international.com/content/article/earthquake-prediction-new-findings>,
- [6] Tiryakioğlu, İ., Yavaşoğlu, H., Uğur, M. A., Özkaymak, C., Yılmaz, M., Kocaoğlu, H., Turgut, B. 2017. Analysis of October 23 (Mw 7.2) and November 9 (Mw 5.6), 2011 Van Earthquakes Using Long-Term GNSS Time Series, Earth Science Research Journal, Cilt 21, No.3, September 2017, s. 147-156. DOI: <https://doi.org/10.15446/esrj.v21n3.62812>