**ESKİŞEHİR TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLİM VE TEKNOLOJİ DERGİSİ B- TEORİK BİLİMLER**

Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology B- Theoritical Sciences

**2018, Cilt:6 - syf. 234 - 243, DOI: 10.20290/aubtdb.488978**
**4.Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı Özel Sayısı**

# 20 ARALIK 2007 BALA DEPREMİ (Mw 5.4) VE ARTÇILARININ ORTA ANADOLU İÇİN YENİ BİR-BOYUTLU SİSMİK HIZ YAPISI MODELİ İLE YENİDEN KONUMLANDIRILMASI

**Begüm ÇIVGIN [1,*], Bülent KAYPAK [2]**

[1, 2] Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye

## ÖZET

Sismoloji çalışmalarında araştırma bölgesi için belirlenmiş yüksek doğruluktaki yer yapısı modellerinin kullanılması araştırma bulgu ve sonuçlarının güvenirliği açısından önemlidir. 20 Aralık 2007 tarihinde Bala, Ankara'da olan 5.4 moment büyüklüklü depremin ve çok sayıdaki artçısının konumunun belirlenmesi için bölgenin doğru bir sismik hız yapısı modeline ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla, Orta Anadolu'da kurulmuş olan 13 adet deprem kayıt istasyonu verisi kullanılarak bir-boyutlu sismik hız yapısı belirlenmiştir. Model belirlenirken 30 km derinliğe kadar inen 652 depremden okunan 2955 P- ve S-dalga fazı kullanılmıştır. Yeni modelin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla iki tip doğruluk testi uygulanmıştır. Bunlardan biri, depremlerin enlem, boylam ve derinliklerini farklı yön ve miktarlarda kaydırarak çok sayıda yapılan kaydırma testleri. Diğeri ise, model belirlenmesi için uygulanan ters çözüm öncesi ve sonrasında seyahat zamanı artık zamanlarının karşılaştırılmasıdır. Doğruluk testleri ile değerlendirilerek kabul edilen yeni model Bala depremlerinin yeniden konumlandırılması için kullanılmıştır. Yeni modelin belirlendiği yinelemeli ters çözüm sürecinde deprem konumları da eşzamanlı hesaplanmaktadır. Bölge için daha önce belirlenmiş olan hız modelleri ile hesaplanan depremlerin ilksel konum parametreleri ters çözümde ön kestirim olarak kabul edilmiştir. Yeni bir-boyutlu modele göre deprem konum parametreleri, deprem çiftleri için gözlenen ve teorik seyahat zamanlarının farkları arasındaki artık zamanların en küçüklenmesi esasına dayanan çift-farklar yöntemi ile yeniden hesaplanmıştır. Diğer sismik hız modelleri ile karşılaştırıldığında ortalama konum hatalarının yeni modelde daha düşük olduğu gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Orta Anadolu, 1-B sismik hız yapısı, Bala, Yeniden konumlandırma

## ABSTRACT

The use of highly accurate ground structure models in seismological studies has importance for the reliability of research findings and results. A seismic velocity structure of the region with high accuracy was required for the determination of the locations of Mw 5.4 Bala, Ankara earthquake (December 20th, 2007) and its aftershocks. In order to provide this requirement, one-dimensional seismic velocity structure was determined by using data of 13 seismograph stations deployed in Central Anatolia. 2955 P- and S-wave phases read from 652 earthquakes down to 30 km depth were used to determine the model. Two accuracy tests have been applied to check the accuracy of the new model. One of them is the numerous shifting tests which are performed by shifting the earthquake's latitude, longitude and depth in different directions and quantities. The other one is the comparison of the travel time residuals before and after the inversion for the model determination. The new model, assessed by accuracy tests, was used to relocate the Bala earthquakes. Earthquake locations are also calculated simultaneously in the iterative inversion process in which the new model is identified. The preliminary location parameters of the earthquakes calculated by using the previous velocity models introduced by other researchers were accepted as the initial parameters for the inversion. The double difference method which is based on the minimization of the residuals between the differences of the theoretical and observed travel times for earthquake pairs was performed to relocate the earthquakes by using the new one-dimensional model. The average location error is observed to be lower in the new model when compared to other seismic velocity models.

**Keywords:** Central Anatolia, 1-D Seismic velocity structure, Bala, Relocation

## 1. GİRİŞ

Başta sismik tomografi ve deprem odak parametrelerinin belirlenmesi olmak üzere çoğu sismoloji çalışmasında çalışma alanında yer içinin bir-boyutlu (1-B) sismik hız yapısı büyük önem taşımaktadır. Buna karşılık, yüksek doğrulukta bir 1-B sismik hız yapısı modeli elde edilebilmesi için, iyi çözülmüş deprem konum parametreleri gerekmektedir. Yani, deprem konum parametreleri ile 1-B sismik hız

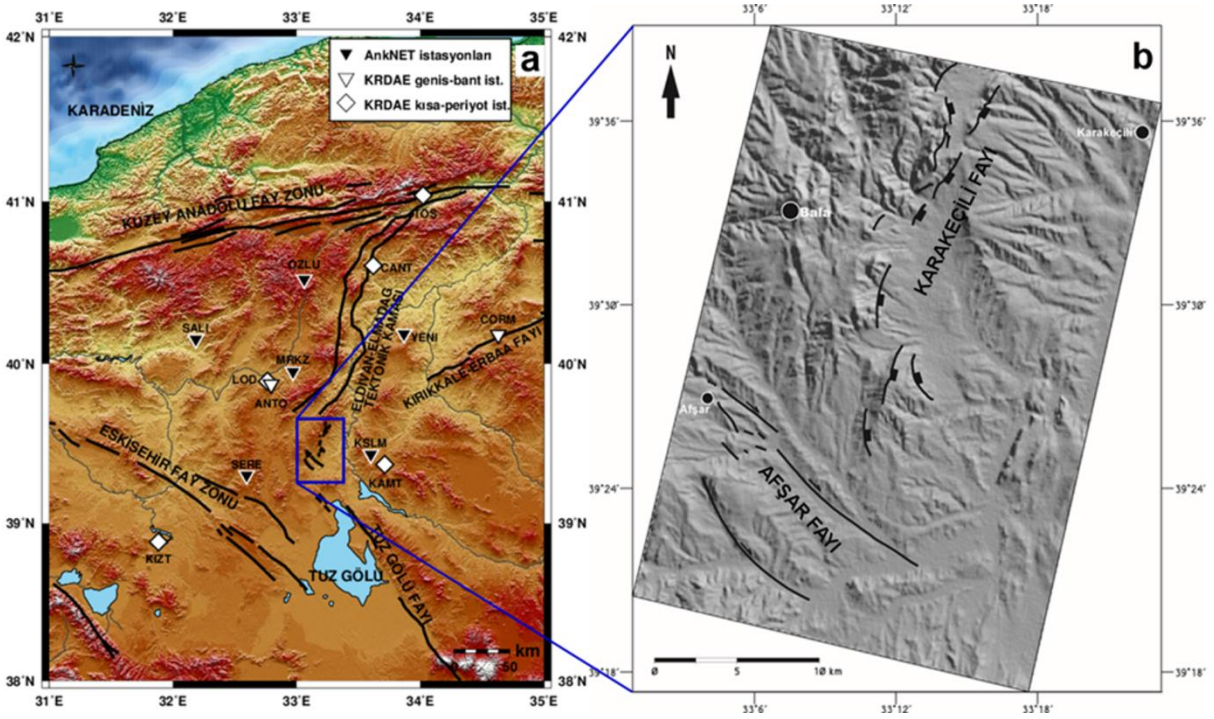
*SorumluYazar: bkoca@eng.ankara.edu.tr
Geliş: 29.03.2018 Kabul:29.06.2018

modeli birbiri ile doğrudan ilişkilidir. Bu çalışmada yeniden konumlandırılan 20 Aralık 2007 Bala depremi ve artçıları için öncelikle çalışma alanı olarak belirlenen Orta Anadolu'nun kuzey kesiminde yer alan 39º K ve 41º K enlemleri ile 32º D ve 34º D boylamları arasında kalan alanın Çıvgın ve Kaypak[1] tarafından üretilmiş olan 1-B sismik hız modeli kullanılmıştır. Bu model, Orta Anadolu'da olmuş depremlerin bölgede kurulmuş olan sismograf ağlarının kayıtlarından belirlenmiştir. Bu ilksel konum parametreleri hesaplanırken Toksöz vd.[2] tarafından yayınlanmış olan 1-B kabuk hız modeli kullanılmış ve çift-farklar yöntemi[3] uygulanmıştır. Bu konum parametreleri kullanılarak önce bir başlangıç modeli belirlenmiş, daha sonra ise yeni 1-B sismik hız modeli ve konum parametreleri yinelemeli ters çözüm ile elde edilmiştir. Belirlenen yeni modele uygulanan çok sayıda doğruluk testi sonucunda, elde edilebilecek en iyi 1-B sismik hız modeli olduğu kabul edilmiştir. Bu kabul ile yeni model 2007 Bala depremi ve artçılarının yeniden konumlandırılmasında kullanılmıştır. Bu noktada, daha önce bölge için yayınlanmış olan Ergin vd.[4] ve Toksöz vd.[2] hız modelleri ile de aynı depremlerin konumları yeniden hesaplanmış ve üç modelin ürettiği sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada, en düşük ortalama konum hatasını yeni üretilen modelin verdiği gözlenmiştir.

### 1.1. Çalışma Alanı ve Diğer Çalışmalar

Bala, Ankara kentinin güney doğusunda yer alan büyük ilçelerinden biridir. İlçeye yakın başlıca neotektonik yapılar Kuzey Anadolu, Kırıkkale-Erbaa, Eskişehir ve Tuz Gölü Fay Zonları ile Eldivan-Elmadağ Tektonik Kamasıdır (Şekil 1a). Birçok araştırmacı Bala'da sağ ve sol yanal doğrultu atımlı eşlenik fayların aktif olduğunu ileri sürmüştür[5 - 8]. Kasapoğlu vd.[9] 30 Temmuz 2005 ana şokundan sonra yaptıkları arazi gözlemleri sonucunda depremin küçük bir sol yanal doğrultu atım bileşeni olan normal faylarla ilişkili olduğunu açıklamıştır. Tan vd. [10] 2005 deprem aktivitesinin KD – GB doğrultulu sol yanal atımlı fay zonu ile, 2007 depremlerinin ise KB – GD doğrultulu Afşar fay zonu ile ilişkili olduklarını belirtmiştir. Esat vd.[11, 12] bölgede aktif olan Karakeçili fayının normal ve Afşar fayının sağ yanal doğrultu atımlı fay olduğunu belirlemişlerdir (Şekil 1b). Yine aynı araştırmacılara göre, 2007 depremleri Afşar fayı ile ilişkilidir.

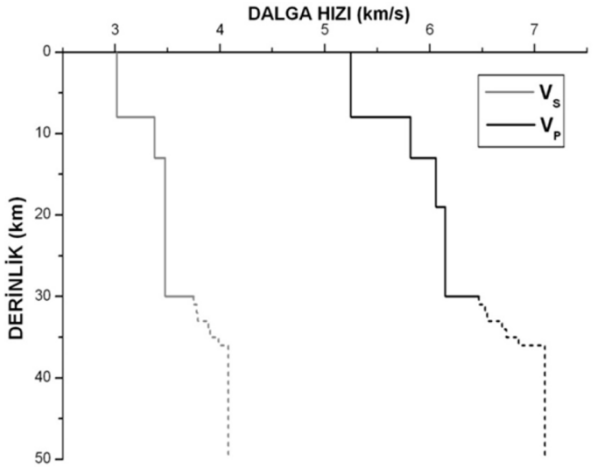
Tarihsel kayıtlarda aktivitesi olmayan Bala'da, 4 Temmuz 1978 (Mb=4.9) ve 21 Nisan 1983 (Mw=4.7) tarihli depremlerden sonra 30 Temmuz 2005 (Mw=5.3) tarihine kadar sismik aktivite kaydı bulunmamaktadır [12]. 30 Temmuz 2005 depreminden sonra çok sayıda artçı deprem meydana gelmiştir. Bu tarihten itibaren genellikle küçük depremlerin ($2.2 \leq M \leq 4.6$) kaydedildiği bölgede, 2007 yılında, biri 20 Aralık (Mw=5.4) ve diğeri 26 Aralık'ta (Mw=5.3) olmak üzere iki orta büyüklükte deprem meydana gelmiştir. Bu iki depremin de çok sayıda artçısı kaydedilmiştir. Bölgenin kabuksal 1-B sismik dalga hızı yapısı üzerine yapılmış çalışmalardan Gürbüz vd.[13, 14], Toksöz vd.[2, 15], Ergin vd.[4] ve Çıvgın ve Kaypak[1] sıralanabilir. Bu çalışmada Çıvgın ve Kaypak[1] modelinin belirlenme yöntemi ve 2007 Bala depremlerinin yeniden konumlanması ele alınmaktadır.




**Şekil 1.** (a) Bölgenin aktif tektonik yapıları ile çalışmada kullanılan geniş-bant sismoloji istasyonları; (b) Bala ve civarındaki aktif faylar[11].

## 2. VERİ VE 1-B HIZ MODELİ

Çıvgın ve Kaypak[1], bölge için yeni bir 1-B model belirlenmesi amacıyla AnkNET (Ankara Deprem İzleme Ağı)[16, 17] sismik istasyon ağının 10.09.2007 – 08.02.2008 tarihleri arasındaki yerel deprem kayıtları ile çalışma alanının incelenmesi açısından büyük önem taşıyan 2005 Bala depremlerinin KRDAE-UDİM (Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü – Ulusal Deprem İzleme Merkezi) veri bankasından alınmış olan deprem kayıtlarını değerlendirmiştir. Kayıtları değerlendirilen istasyonlar (Şekil 1a) bu çalışmada gerçekleştirilen yeniden konumlandırmada da kullanılmıştır. Çıvgın ve Kaypak[1], en az dört istasyonda kaydedilmiş ve azimutal boşluk (GAP) değerleri 200°'den küçük depremleri kullanmışlardır. Toksöz vd.[2] tarafından ortaya konmuş olan 1-B kabuk P-dalga hızı modeli ve Wadati diyagramından hesaplanan Vp/Vs=1.72 kabulü ile hesaplanan S-dalga hızı modelini başlangıç modeli olarak kullanmışlardır[1]. Elde ettikleri 11 katmanlı 1-B hız modeline göre, P-dalga hızları 5.38 km/s ile 7.46 km/s ve S-dalga hızları 3.02 km/s ile 4.19 km/s arasında değişmektedir (Şekil 2)[1]. Ayrıca, bu 1-B dalga hızı modeli durağanlığının test edilmesi amacıyla; I) depremlerin başlangıç enlem, boylam ve derinliklerinin farklı yön ve miktarlarda kaydırılması ve ters çözümün yinelenmesi ile kaydırma testi, II) deprem odak konum parametreleri ve istasyon gecikmelerinin eşzamanlı olarak yinelemeli ters çözüme dâhil edilmesi ile ters çözüm öncesi ve sonrasında seyahat süresi artık zamanlarını karşılaştırma ve III) bölge için daha önce yayınlanmış olan 1-B dalga hızı modellerini yeni model ile karşılaştırma testlerini uygulamışlardır [1]. Bu çalışma kapsamında P- ve S-sismik dalga fazlarının varış zamanları kullanılarak Geiger yönteminin uygulandığı Hypo71[18] yazılımı ile ilksel odak konum parametreleri belirlenmiş ve deprem çift-farklar yöntemini uygulayan HypoDD[3] yazılımı ile deprem konum parametreleri iyileştirilmiştir.




**Şekil 2.** Bir-boyutlu P- ve S-dalga hızı modelleri[1].

## 2.1. Çift-farklar Yöntemi

HypoDD[3] yazılımının temelini oluşturan, ilk olarak Waldhauser ve Ellsworth[3] tarafından uygulanmış olan çift-farklar yönteminde, deprem çiftleri için gözlenen ve kuramsal seyahat zamanı farkları arasındaki artık zamanların en küçük değere ulaştığı odak konumu yinelemeli bir yordam ile belirlenerek deprem odak parametreleri elde edilir. Yöntemin esası, iki deprem arasındaki uzaklık ortak kayıt edilen istasyona olan uzaklıklarından küçükse kaynaktan istasyona ışın yolları benzerdir ve iki depremin seyahat zamanları farkı depremlerle istasyon arasındaki uzaklıkların farkını tanımlar [3] kabulüne dayanmaktadır. Bir istasyonda kaydedilmiş iki deprem arasındaki gözlenen ve hesaplanan seyahat zamanları arasındaki artık zamanın farkı (deprem çifti farkı), her depremin seyahat zamanlarının bilinmeyene göre kısmi türevleri ile odak konumu ve oluş zamanı düzeltmeleri ile ilişkilidir. Deprem çiftleri arasındaki konum vektörleri farkı yinelemeli düzeltilerek bir en küçük kareler çözümü bulunur. Gözlenen ve hesaplanan seyahat zamanı artık zamanlarının iki deprem arasındaki farkı *deprem çifti farkıdır*. Deprem çifti farkı hesaplanırken sabit yavaşlık vektörü kabulü yapılmaktadır ve yakın depremler için geçerlidir. Odak parametreleri düzeltme vektörü, konum parametreleri ve oluş zamanındaki değişimleri içermektedir. Odak parametreleri düzeltme vektörü, modelin veriye daha iyi çakışmasını sağlamak için gerekli odak parametresi değişimleridir. Bütün odak çiftleri ve bütün istasyonlar için çözüm izleyen doğrusal denklemler sistemi ile elde edilir.

$$\mathbf{WGm=Wd} \tag{1}$$

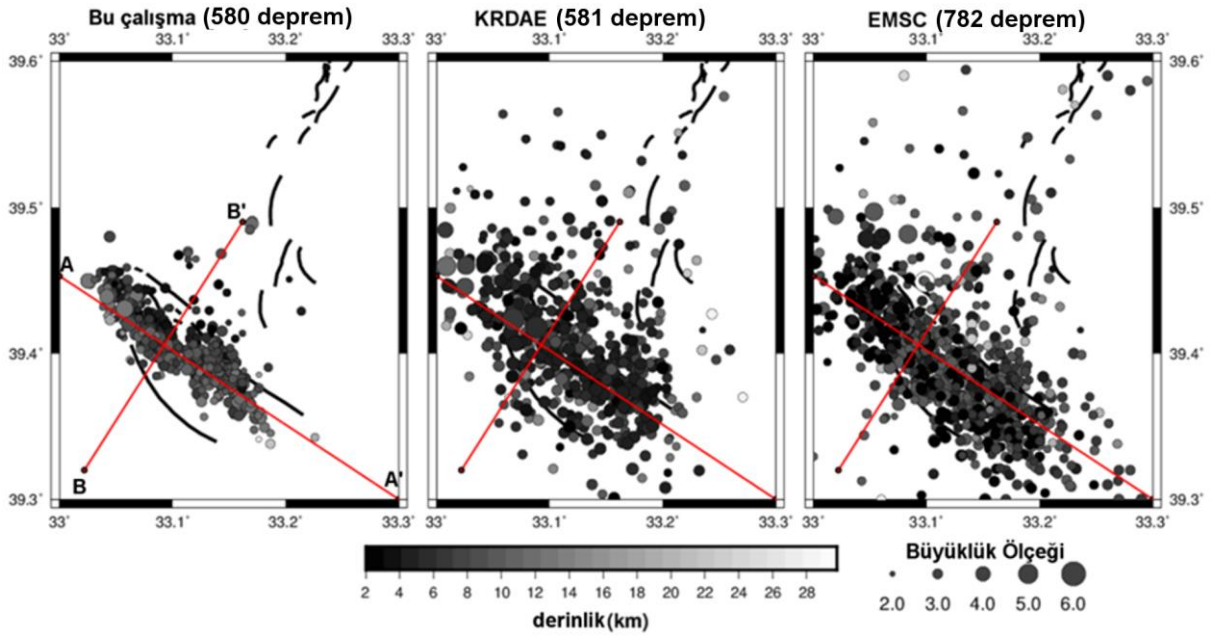
Yukarıdaki bağıntıda, **G**,(Mx4N) boyutlu kısmi türevler matrisidir, M, deprem çifti farkı sayısı ve N, deprem sayısıdır. Deprem çifti farklarını **d** veri vektörü içerir. 4N boyutlu vektör **m**, belirlenmek istenen odak parametreleri değişimlerini içerir. **W**, ağırlık katsayılarını içeren köşegen matristir. (1) bağıntısı ile verilen doğrusal denklemler sisteminin için bir başlangıç çözümü, başlangıç odak parametreleri ve önsel kalite ağırlıkları kullanılarak bulunur. Daha sonra, odak parametreleri, artık değerler ve kısmi türevler güncellenerek duraylı bir çözüm bulunana kadar yineleme yapılır. Duraylı bir çözüm, genellikle, SVD (tekil değer ayrışımı) ile 2-3 yinelemede, LSQR [19] (eşlenik gradyan) ile 5-6 yinelemede elde edilir. Bu çalışmada büyük denklemler sistemlerinin çözümünde tercih edilen LSQR ters çözüm yöntemi kullanılmıştır. Bir sonraki adım veriye yeniden ağırlık atanmasıdır. Bu ağırlık, verinin bir önceki yinelemeden çakışmazlık değerlerine ve depremler arasındaki açıklığa bağlı ağırlıkların çarpımından elde edilir. Yineleme, belirli bir yineleme sayısına ulaşıldığında veya RMS değeri belirlenen bir kesme değerine ulaştığında durur. LSQR yöntemi sonucunda elde edilen konum hatalarının yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir [3]. Bunun için Waldhauser ve Ellsworth (2000) [3] çeşitli teknikler önermişlerdir. Bu çalışmada kullanılan teknik, tekrarlı yeniden konumlandırma

yapılması ve her tekrarda bir istasyonun çıkartılmasıdır. Son olarak SVD kullanılarak yeniden konumlandırma yapılır ve elde edilen en küçük kareler hataları konum hatası olarak kabul edilir.

## 3. 20 ve 26 ARALIK 2007 BALA DEPREMLERİ VE YENİDEN KONUMLANDIRMA

Bala'da (Ankara) 20 Aralık (M=5.4) ve 26 Aralık (M=5.3) 2007 tarihlerinde iki adet ana şok ve bu depremlerin çok sayıda artçı şoku son on yılda bölgedeki deprem etkinliğinin büyük kısmını oluşturmaktadır. Söz konusu depremler ve artçıları AnkNET deprem izleme ağı istasyonları ile kaydedilmiştir ve yukarıdaki kabulle Çıvgın ve Kaypak[1] modeli ile yeniden konumlandırılmıştır. Uygulanan testler ile doğruluğu desteklenen 1B dalga hızı modeli[1] Ankara ve civarı için belirsizlikleri düşük bir yeni 1B hız modeli kabul edilebilir. Bu yeni model ve istasyon gecikmeleri ile hesaplanan deprem odak parametreleri bölge depremleri için iyileştirilmiş konum ve oluş zamanı parametreleri olarak kabul edilebilir. VELEST[20] yazılımında konum parametreleri haricindeki tüm parametreler (model, oluş zamanı ve istasyon gecikme zamanları) sabitlenerek yeni hız modeli ve istasyon gecikme zamanları kullanılarak depremler yeniden konumlandırılmıştır. Bu yöntemle belirlenen konum parametreleri HypoDD[3] programında ön kestirim olarak kullanılmış ve en son konumlar belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında 580 depremin AnkNET ağı kayıtları kullanılarak konumları belirlenmiştir. Ayrıca, 20 ve 26 Aralık 2007 depremlerinin öncüleri ve artçılarını kapsayan zaman aralığı (01.09.2007-30.10.2008) için KRDAE ve EMSC (European-Mediterranean Seismological Centre) kataloğunda yayınlanan deprem konumları da incelenmiştir (Şekil 3). Aynı zaman aralığı ve bölge için KRDAE kataloğunda 581 ve EMSC kataloğunda 782 deprem yayınlanmaktadır. EMSC kataloğu farklı deprem araştırma merkezlerinin verisini de içerdiğinden (Ör, Afet Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı, EMSC kodu: DDA) raporlanan deprem sayısı KRDAE kataloğundakinden fazladır.

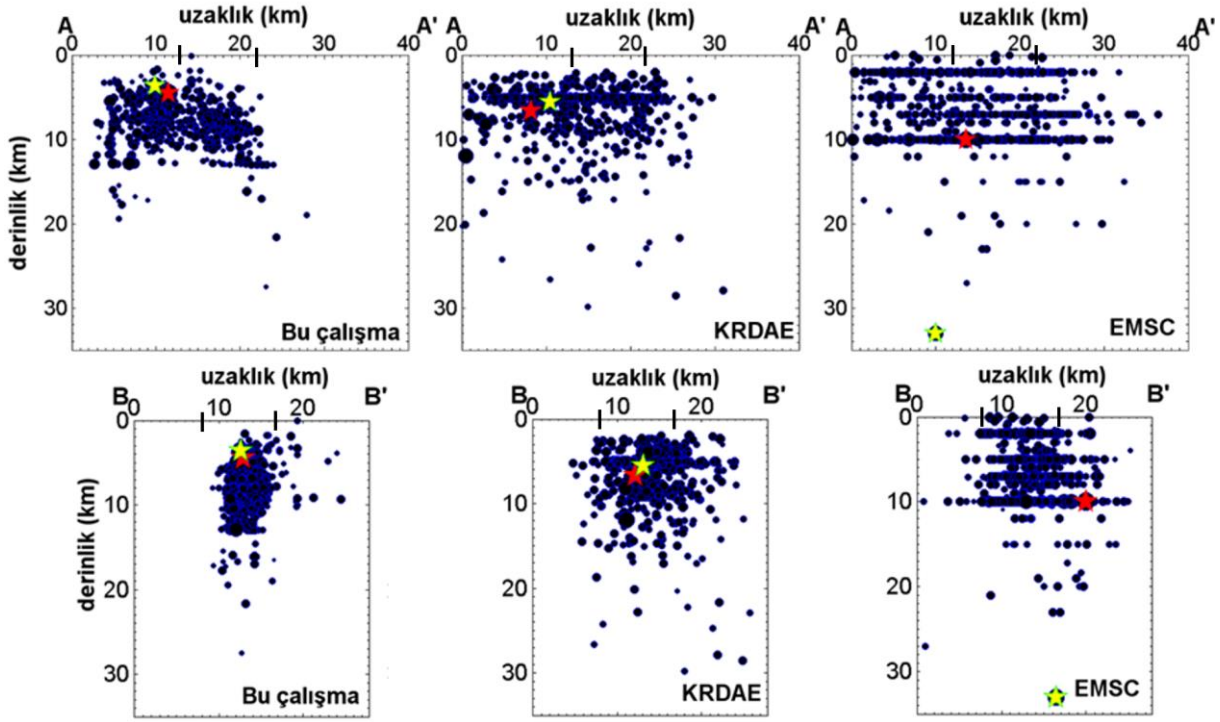



**Şekil 3.** Bu çalışmada belirlenen, KRDAE ve EMSC kataloglarında yayınlanan 2007 Bala depremlerinin konumları

Yapılan yeniden konumlandırma sonucunda depremlerin hemen hepsinin Afşar fayı üzerinde olduğu görülürken, KRDAE ve EMSC konumlarının daha geniş bir alana yayıldığı ve bazı depremlerin de Karakeçili fayı üzerinde konumlandığı görülmektedir. Aynı katalog verisinin Şekil 3'de kırmızıçizgilerle gösterilen AA' ve BB' doğrultularındaki düşey kesitlerine bakıldığında, KRDAE ve

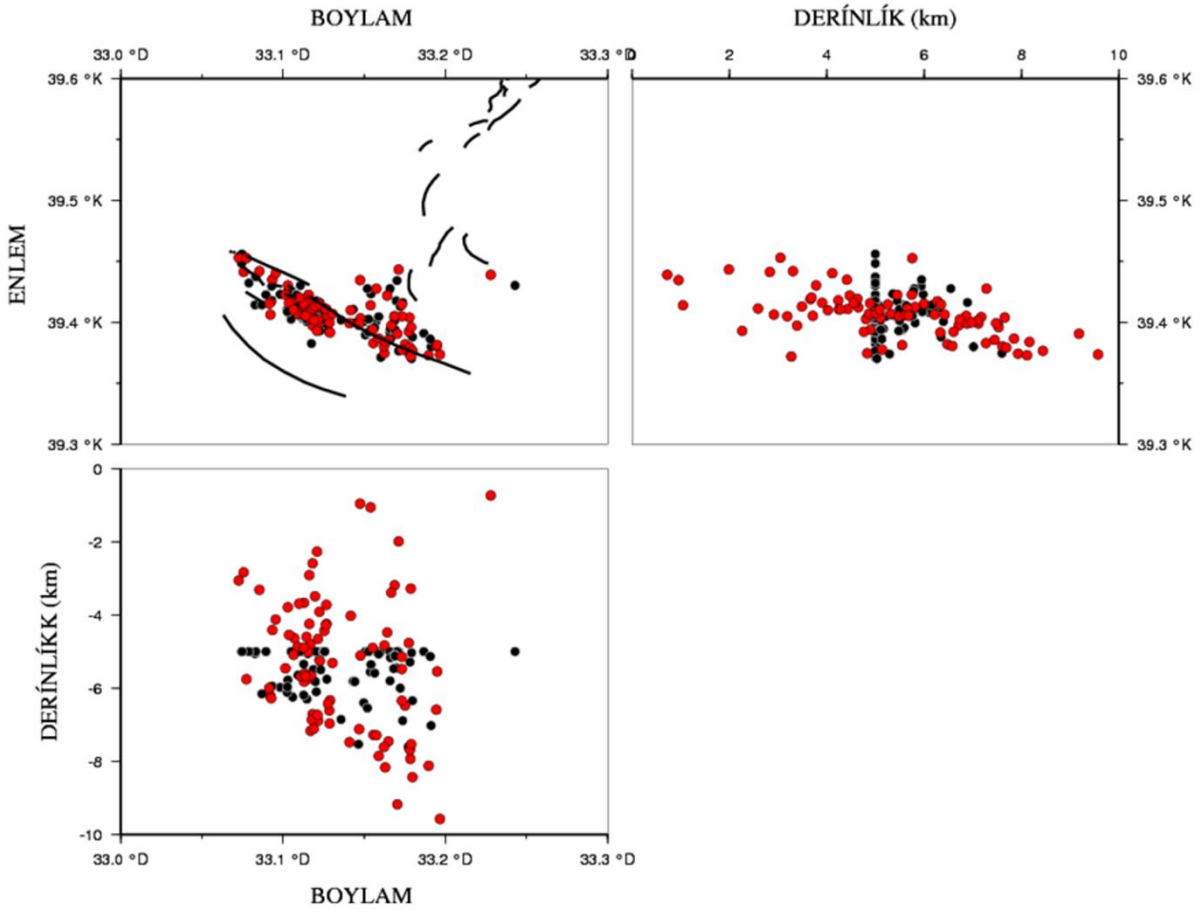
EMSC kataloglarında derinliklerin pek çok depremde sabitlendiği görülmektedir (Şekil 4). Bu durumun olası pek çok nedeninden bazıları; konumlandırmada kullanılan yer modelinin bu bölgeyi iyi tanımlamıyor olması, sabitlenen derinliklerde tabaka tanımlanmış olması ve konumlandırma yöntemindeki yetersizlikler şeklinde sıralanabilir.

Şekil 4'de 20 Aralık 2007 depremi (kırmızı yıldız) ve 26 Aralık 2007 (sarı yıldız) depremi için EMSC'nin yayınladığı derinliklerin kabul edilemez olduğu açıktır. KRDAE kesitleri aynı depremlerin bu çalışmada belirlenenden yaklaşık 2 km daha derinde olduğunu göstermektedir. Afşar fayına paralel olan AA' kesitine bakıldığında, depremlerin yaklaşık 2 km ile 13 km arasında homojen dağılım gösterdiği söylenebilir. Afşar fayına dik ve Karakeçili fayına paralel olan BB' kesiti, depremlerin tamamına yakınının Afşar fayı ile ilişkili olduğunu göstermektedir.




**Şekil 4.** Bu çalışmada belirlenen, KRDAE ve EMSC kataloglarında yayınlanan deprem konumlarının Afşar fayına paralel AA' ve dik BB' doğrultularında düşey kesitleri. AA' kesitlerinin yatay ekseni üzerinde Karakeçili fayı, BB' kesitlerinde ise Afşar fayı konumu siyah çizgilerle belirtilmektedir.

Bu çalışmada ayrıca deprem konumlandırmada yaygın olarak kullanılmakta olan Geiger yöntemi[21] (Hypo71[18]) ile çift-farklar yöntemi (HypoDD[3]) karşılaştırılmıştır. Geiger Yöntemi, Gauss-Newton optimizasyonu ile deprem odak parametrelerini belirleyen yinelemeli bir yöntemdir. Karşılaştırma için, Hypo71 ve HypoDD yazılımları kullanılarak 20.12.2007 Bala depremi ve çalışma başlangıcında faz okumaları tamamlanmış olan bazı artçılarının konumları, aynı hız modeli kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 5). Özellikle bu çalışmada olduğu gibi kaynakları yakın veya aynı olan deprem grupları söz konusu olduğu zaman çift-farklar yöntemi iyi çalışmaktadır[3], Geiger yönteminde deprem derinliklerinin yaklaşık %50 sinin çözülemediği ve bu nedenle tabaka sınırlarında sabitlendiği gözlenmektedir.

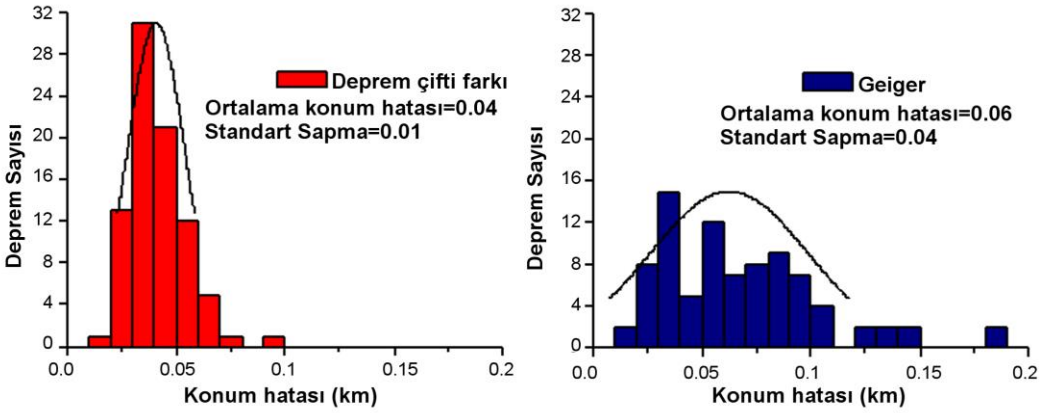



**Şekil 5.** Geiger yöntemi ile (siyah) ve çift-farklar yöntemi ile (kırmızı) belirlenen deprem konumları ve KG/DB kesitleri.

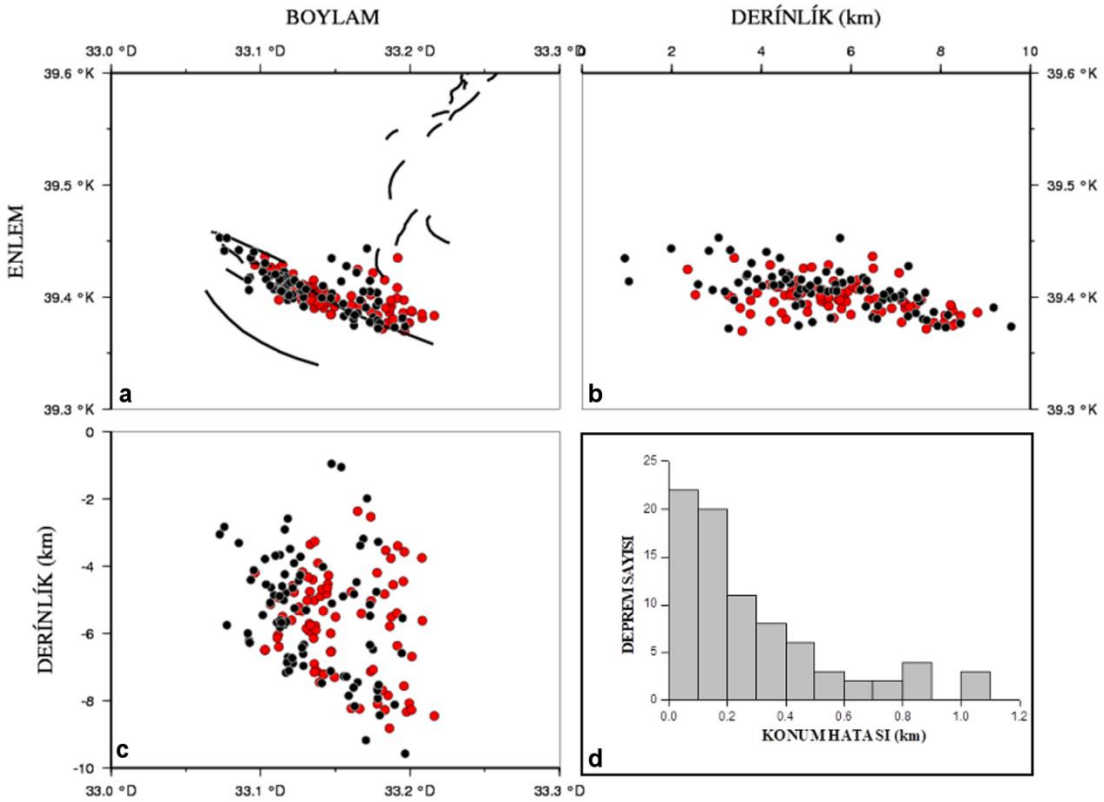
Geiger yöntemi ve çift-farklar yönteminin uygulanması sonucunda depremlerin konum hataları dağılımları Şekil 6'da verilmektedir. Çift-farklar yönteminde konum hataları yaklaşık 0.04 ortalama değer ve 0.01 standart sapmalı Gauss dağılımı göstermektedir. Geiger yöntemi konum hatası dağılımı standart sapması çift-farklar yönteminin yaklaşık 1.5-2 katıdır.

Çift-farklar yöntemini uygulayan HypoDD yazılımı konum hatalarını üç doğrultuda ayrı ayrı vermektedir (doğu-batı, kuzey-güney, düşey), burada grafiklenen değerler bu üç hata değerinin kareleri toplamının karekköküdür. Geiger yönteminin kullanıldığı Hypo71 yazılımı ise yatay ve düşey olmak üzere iki hata değerini çıktı olarak vermektedir. Yatay hata, enlem ve boylamdaki hataların kareleri toplamının karekköküdür. Şekil 6'da verilen Geiger yöntemi konum hataları yatay ve düşey hataların kareleri toplamının karekköküdür.

Çift-farklar yöntemini test etmek amacıyla uygulanan son test ise, her deprem için sabit enlem, boylam, derinlik (39.40N, 33.15E, 5.0km) değerlerinin önkestirim olarak kullanılmasıdır (Şekil 7). Önkestirim konum parametreleri olarak hem Hypo71 programı çıktıları hem de sabit konum kullanılarak test gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, her bir deprem için tek bir sabit başlangıç konumu da verilse oldukça küçük hatalar ile yeniden konumlandırmanın çift-farklar yöntemi ile yapılabildiği gözlenmiştir (Şekil 7.d).




**Şekil 6.** Çift-farklar ve Geiger yöntemleri ile aynı deprem grubunun konumlandırmaları sonucu hesaplanan konum hatası değerleri.




**Şekil 7.** Sabit enlem, boylam, derinlik (kırmızı) ve Geiger yöntemi çıktılarının (siyah) önkestirim verisi olarak kullanıldığı çift-farklar yöntemi ile (a) hesaplanan konumlar, (b, c) derinlik kesitleri; (d) sabit önkestirim konum parametreleri ile yeniden konumlandırma sonucu konum hataları.

## 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bala (Ankara)'da 20 ve 26 Aralık 2007 tarihlerinde moment büyüklükleri sırası ile 5.4 ve 5.3 iki depremin ve bu depremlerin artçılarının konumlandırılması için Çıvgın ve Kaypak (2012) tarafından yayınlanmış olan 1-B sismik hız modeli kullanılmıştır. İlk olarak VELEST[20] yazılımı ile Çıvgın ve Kaypak[1] modeli kullanılarak konumlar belirlenmiş, bu konumlar HypoDD[3] programında önkestirim olarak kullanılmış ve yeniden konumlandırma tamamlanmıştır. Son hesaplamalarda konum hatalarının % 96.14'ü 0.1'den küçüktür. Doğruluğu uygulanan testler ile kanıtlanmış ve bölge için uygunluğu tespit

edilmiş olan bu modelle belirlenen deprem konumları KRDAE ve EMSC kataloglarında yayınlanan konumlar ile karşılaştırılmıştır. Her iki katalogda da derinliklerin belirli düzeylerde sabitlendiği gözlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan modelin bölge depremlerinin derinlik çözümünde diğerlerinden üstün olduğu anlaşılmaktadır. Depremlerin, bölgedeki aktif faylara dik ve paralel doğrultulardaki düşey kesitleri incelenmiş ve 2007'de Bala'da meydana gelen depremlerin tamamına yakınının Afşar fayı ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, Tan vd.[11] ve Esat vd.[12] tarafından tanımlanan fay sistemi ve odak mekanizması çözümleri ile uyum içerisindedir. Ayrıca deprem konumlandırmada yaygın olarak kullanılan çift-farklar ve Geiger yöntemleri karşılaştırılmış ve bazı testler uygulanmıştır. Çift-farklar yönteminin güvenilir sonuçlar ürettiği, Geiger yönteminin özellikle derinlik çözümünde yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir.

## TEŞEKKÜR VE KATKI BELİRTME

Bu çalışma 11-13 Ekim 2017 tarihleri arasında Eskişehir'de düzenlenen 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı (4. UDMSK) kapsamında 4016 bildiri numarası ile sunulmuştur. Yazarlar, çalışmayı makale olarak basılmaya uygun gören Bölüm Editörü Sayın Yrd. Doç. Dr. Muammer TÜN'e teşekkür ederler. Bu araştırmada, Ankara Üniversitesi Deprem Araştırma ve Uygulama Merkezi'ne destek veren Tektonik Araştırma Grubu'nun yürütmüş olduğu, 2007 – 2010 yılları arasında Ankara Üniversitesi tarafından desteklenen, 20060745052 numaralı "Ankara civarında Anadolu levhasının iç deformasyonunun jeolojik ve sismolojik yöntemlerle araştırılması" konulu proje kapsamında toplanan ve KRDAE – UDİM tarafından işletilen istasyonlardan alınan sismolojik veriler kullanılmıştır. Yazarlar, AnkNET deprem izleme ağının işletilmesi ve veri toplanmasında emeği geçen Prof. Dr. Gürol Seyitoğlu (Ankara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü) ve Dr. Korhan Esat'a (Ankara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü) teşekkür ederler. Yazarlar, makalenin geliştirilmesinde emeği geçen değerli hakemlere katkılarından dolayı teşekkür ederler.

## KAYNAKLAR

[1] Çıvgın B, Kaypak B. Ankara ve dolayında kabuğun bir-boyutlu sismik hız yapısının araştırılması. Yerbilimleri 2012; 33: 131–150.

[2] Toksöz MN, Kuleli S, Gürbüz C, Kalafat D, Bekler T, Zor E, Yılmazer M, Öğütçü Z, Schultz CA, Harris DB. Calibration of regional seismic stations in the Middle East with shots in Turkey. Proceedings of the 25th Annual Seismic Research Review 2003; Volume I: 162-171.

[3] Waldhauser F, Ellsworth WL. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault. Bull Seism Soc Am 2000; 90: 1353-1368.

[4] Ergin M, Özalaybey S, Aktar M, Biçmen F, Tapırdamaz MC, Yörük A, Tarancıoğlu A, Belgen A, Yüce H, Erkan B et al. Kazan-Trona Maden Yatağı'nın Depremselliği. TÜBİTAK MAM Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü, Araştırma projesi raporu, Proje Kodu: 5037101, Gebze, Kocaeli, 2003.

[5] Dirik K, Erol O. Tuzgölü ve Civarının Tektonomorfolojik Evrimi, Orta Anadolu-Türkiye. Türkiye Petrol Jeologları Derneği Özel Sayı 2000; 5: 27-46.

[6] Kalafat D, Kekovalı D, Deniz P, Güneş Y, Pınar A, Horosan G. 31 Temmuz 2005 – 1 Ağustos 2005 ve 20 - 27 Aralık 2007 Afşar-Bala (Ankara) Deprem Dizisi. İstanbul Yerbilimleri Dergisi 2008; 21: 47-60.

[7] Çubuk Y, Taymaz T. Time Domain Momet Tensor Analysis of 2005-2008 Sırapınar–Bala (Ankara) Earthquakes. In: 62nd International Geological Congress of Turkey, 13-17 April 2009; Ankara, Turkey. Book of Abstracts-II. pp. 780-781.

[8] Koçyiğit A. Ankara'nın depremselliği ve 2005-2007 Afşar (Bala-Ankara) depremlerinin kaynağı. Harita Dergisi 2009; 141: 1-12.

[9] Kasapoğlu KE, Öztürk E, Tetik Ç, Bay A. 31 Temmuz 2005 Bala (Ankara) depreminin saha inceleme raporu. Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye, 2005.

[10] Tan O, Tapırdamaz MC, Ergintav S, İnan S, İravul S, Saatçılar R, Tüzel B, Tarancıoğlu A, Karakısa S, Kartal RF, Zünbül S, et al. Bala (Ankara) Earthquakes: Implications for Shallow Crustal Deformation in Central Anatolian Section of the Anatolian Platelet (Turkey). Turkish Journal of Earth Sciences 2010; 19: 449-471.

[11] Esat K, Çıvgın B, Kaypak B, Işık V, Seyitoğlu G. Jeolojik ve sismolojik veriler ışığında Bala (Ankara) depremlerine neden olan fayların nitelikleri ve bunların genel neotektonik çerçevedeki anlamı. 62. Türkiye Jeoloji Kurultayı; 13-17 Nisan 2009; Ankara, Türkiye. pp. 810-811.

[12] Esat K, Çıvgın B, Kaypak B, Işık V, Ecevitoğlu B, Seyitoğlu G. The 2005 – 2007 Bala (Ankara, central Turkey) earthquakes: a case study for strike-slip fault terminations. Geol Acta 2014; 12: 71-85.

[13] Gürbüz C, Bekler T, Toksöz MN, Kuleli S, Kalafat D, Schultz CA. Seismic refraction studies and crustal structure in Anatolia. Commission on Controlled-Source Seismology. In: 12th International Workshop; 7-11 October, 2003; Mountain Lake, Virginia. pp.74-78.

[14] Gürbüz C, Kalafat D, Bekler T, Zor E, Yılmazer M, Öğütçü Z, Gürel M, Ertürk O, Gönülalan AU, Güreli O, et al. Türkiye ve Çevresindeki Deprem İstasyonlarının Yapay Patlatmalarla Kalibrasyonu ve Kabuk Yapısının Araştırılması, TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Türkiye 15. Jeofizik Kurultayı ve Sergisi; 20-24 Ekim 2003; İzmir, Türkiye. p. 73.

[15] Toksöz MN, Kuleli S, Schultz C, Harris D, Gürbüz C, Kalafat D, Işıkara A. Calibration of regional seismic stations in the Middle East with shots in Turkey. In: Proceedings of the 24th Seismic Research Review-Nuclear Explosion Monitoring: Innovation and Integration; 17-19 September 2002; Ponte Vedra Beach, Florida. Volume I, pp. 200-208.

[16] Seyitoğlu G, Kaypak B, Işık V, Esat K, Çıvgın B. Ankara Deprem İzleme Ağı (AnkNET). Uluslararsı Deprem Sempozyumu Kocaeli 2009; 17-19 Ağustos 2009; Kocaeli, Türkiye. p. 102.

[17] Çıvgın B. Ankara ve dolayının sismik hız yapısı ve tektonik deformasyonunun sismolojik verilerle kestirilmesi. PhD, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.

[18] Lee WHK, Lahr JC. HYPO71 (REVISED): A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. Open File Report 75-311, 1975.

[19] Paige CC, Saunders MA. LSQR: Sparse linear equations and least squares problems. ACM T Math Software; 1982; 8(2): 195-209.

[20] Kissling E, Ellsworth WL, Eberhart-Phillips D, Kradolfer U. Initial reference models in local earthquake tomography. J Geophys Res; 1994; 99(19): 635-646.

[21] Geiger L. Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only (translated from Geiger's 1910 German article). Bulletin of St. Louis University; 1912; 8(1): 56-71.