

VAN GÖLÜ VE ÇEVRESİNİN 3-BOYUTLU (1-B) KABUK HIZ MODELİNİN BELİRLENMESİ

Bülent Kaypak¹, M.Feyza Akkoyunlu^{2,3}, Doğan Kalafat², Kerem Barı³

¹ Jeofizik Müh. Bölümü, Ankara Üniversitesi, Tandoğan

² Bozüyükçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Çengelköy

³ Jeofizik Müh. Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Umuttepe

Email: kaypak@eng.ankara.edu.tr

ÖZET:

23 Ekim 2011 tarihinde meydana gelen Mw=7.2 büyüklüğündeki Van Depremi sonrası, merkez üssü ve dolayında binlerce artçı sarsıntı olmuştur. Bu artçı deprem etkinliği, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'ne (KRDAE) ait kalıcı ve ana ok sonrası bölgeye kurulan geçici istasyonlar ile AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı'na bağlı mevcut kalıcı sismik istasyonlar tarafından kaydedilmiştir. Bölgede meydana gelen bu deprem etkinliğinden faydalanarak Van Gölü ve çevresinin 3-boyutlu sismik yapısının belirlenmesi amaçlanmıştır. 3-B tomografi çalışmaları referans bir model olması amacıyla, öncelikle bölgenin 1-boyutlu hız yapısının ortaya çıkarılmasına gerek duyulmuştur. Dolayısıyla bu çalışmada, Van Depremi artçılarına ait seyahat zamanı verileri kullanılarak bölgeye ait 1-B hız modelinin belirlenmesi için yapılan analizler kapsamaktadır. Bu analiz çalışmalarında, artçı sarsıntılara ait P ve S dalgaları seyahat zamanlarının VELEST algoritması ile ters çözümü yapılmıştır. Van Gölü'nün yakın çevresindeki istasyonlar ile kaydedilmiş yedi binden fazla artçı sarsıntı arasından en az 10 P- ve 5 S-dalga fazı okuması olan ve aynı zamanda GAP 180° koşulunu sağlayan depremler seçilerek bölgenin 1-B kabuk hız modeli belirlenmiş ve depremler yeniden konumlandırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER : Van Depremi, 1-B hız modeli, kabuk hız yapısı

1. GİRİŞ

Doğu Anadolu Bölgesi, Türkiye'deki aktif tektonik hareketlerin başlangıç noktası olarak sayılabilecek bir konumdadır. Günümüzde bölge tektonik sıkılaşma rejimine bağlı olarak depremsellik açısından etkinliğini hala sürdürmektedir. Tarihsel süreç içerisinde birçok büyük depremin meydana geldiği bölgede, en son büyük ve yıkıcı deprem 23 Ekim 2011 tarihinde Van Gölü'nün doğusunda, Tabanlı'ya yakın bir noktada olmuştur. Moment büyüklüğü (Mw) 7.2 olarak hesaplanan ana oktan hemen sonra bölgede aylarca devam eden artçı sarsıntılar olmuştur.

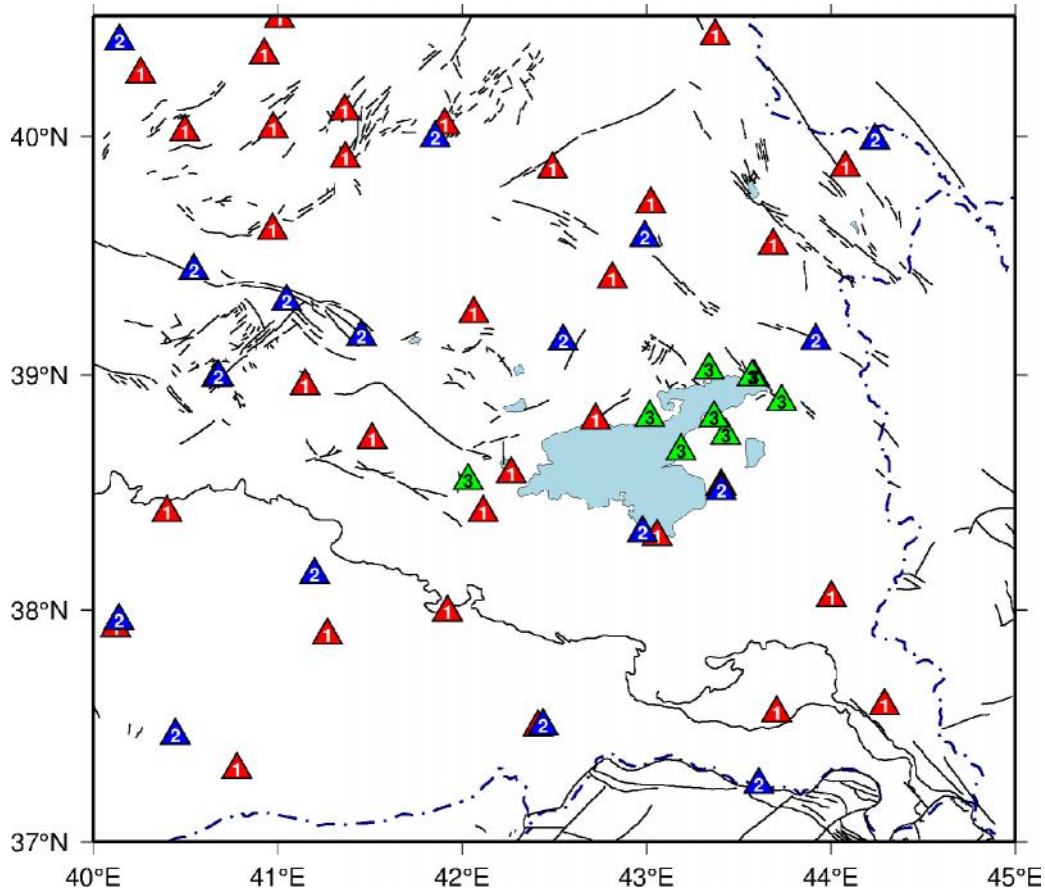
Ana okla başlı olarak bölgede oluşan çok sayıda artçı sarsıntı verisini kullanarak yerel ölçekte Van Gölü ve civarının 1-B yeraltı sismik hız yapısının belirlenmesi, bu çalışmanın temel amacını oluşturmaktadır. Van Gölü ve yakın çevresinin kabuk hız yapısı ayrıntılı olarak henüz belirlenmemiştir. Bunun en önemli nedenlerinden biri bugüne kadar bölgede böylesi yoğunlukta bir artçı deprem kaydı alınamamış olması ve bölgedeki sismik istasyon yoğunluğunun yetersizliği dır. Güvenilir bir sismik hız modeli elde etmek için yoğun istasyon ağını yanı sıra yüksek kalitede veri olması gerekli bir özelliktir. Bu çalışmada, bölgenin bir boyutlu (1-B) P- ve S-

sismik dalga hızı modelinin belirlenmesi için 23 Ekim 2011 Van depremine ait artçı depremlerin seyahat zamanı verileri ve bir çe it ters çözüm algoritması içeren VELEST (Kissling, 1988; Kissling ve di .,1994) yazılımı kullanılmıştır. Bu model, iç-merkez (hiposantr) parametrelerinin, istasyon düzeltmelerinin ve katman hızlarının bir dizi yinelemeli ve e -zamanlı ters çözümü sonucunda elde edilmiştir. Ters çözüm i lemlerinin ardından en düşük RMS hata de erine sahip model “minimum 1-B hız modeli” olarak kabul edilmiştir ve artçı depremlere ait odaksal parametreler yeniden hesaplanmıştır.

2. VERİ VE YÖNTEM

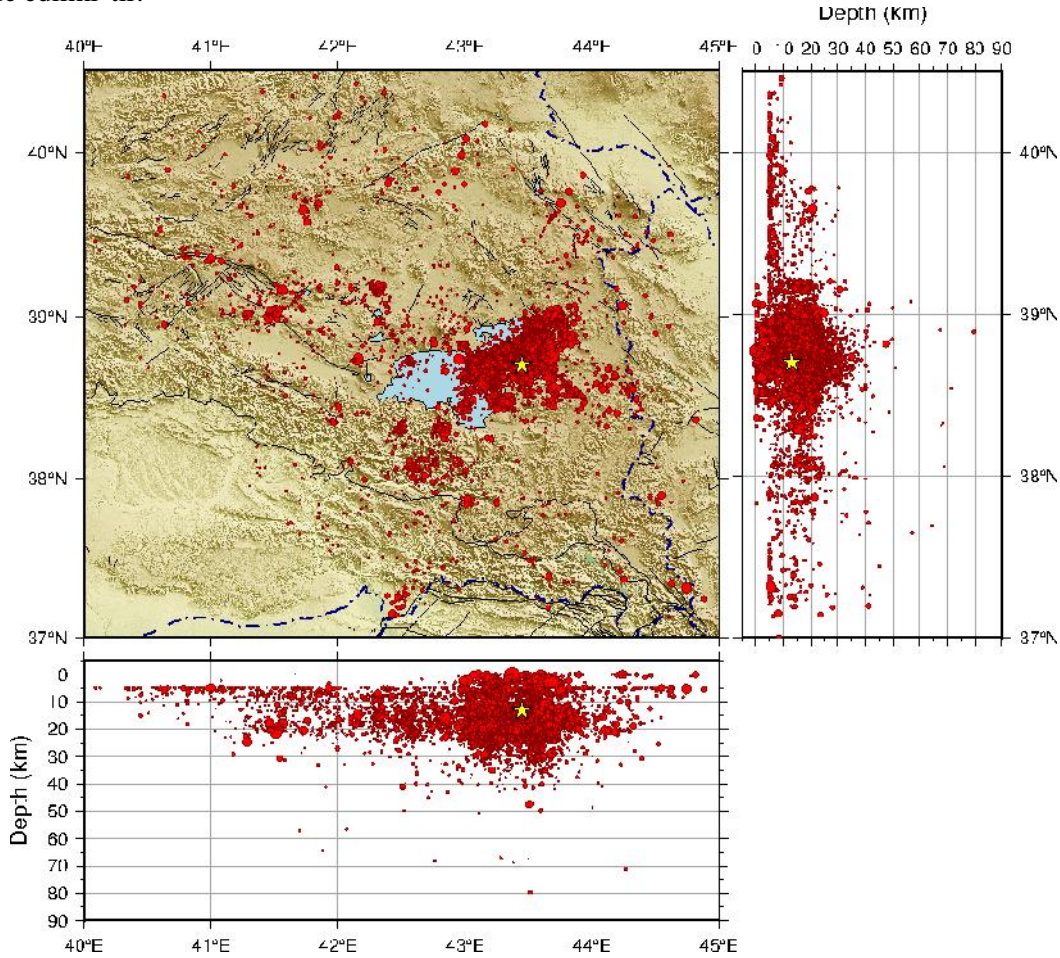
2.1. Veri

23 Ekim 2011 Van depremi ve sonrasında oluşan artçı deprem etkinliği, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE) ile Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı (AFAD-DAD) bölgedeki mevcut kurulu istasyonları tarafından kaydedilmiştir. Ana ok sonrası artçı deprem oluşumlarını izlemek amacıyla KRDAE tarafından bölgeye geçici istasyonlar yerleştirilmiş ve belirli bir süre işletilmiştir. İstasyonların tamamı geniş bantlı sismometrelerden oluşmaktadır. Bölgedeki mevcut ve geçici olarak kurulan istasyonların konumları ekil 1’de görülmektedir.



ekil 1. Van Gölü ve çevresindeki mevcut (AFAD (1) ve KRDAE (2)) ve geçici (KRDAE(3)) deprem gözlem istasyonlarının dağılımı.

23 Ekim 2011-21 Ocak 2015 tarihleri arasında, bölgede 10 bin dolayında deprem kaydedilmiştir ve bu depremler Kalafat ve diğ. (1987) kabuk hız modeli ile Hypo71 (Lee ve Lahr, 1972) programı kullanılarak yeniden konumlandırılmıştır. Ekil 2’de Van depreminin ardından 21 Ocak 2015 tarihine kadar bölgede meydana gelen deprem dağılımları görülmektedir. 1-B hız modelinin belirlenmesi çalışmaları için sadece Van Gölü çevresindeki istasyonlar tarafından kaydedilen, ana odak ve dolayında meydana gelmiş ve maksimum diğ. merkez uzaklığı 1350 km olan 7643 deprem kullanılmıştır. Bu depremlere ait toplam 48387 P- ve 26913 S- fazı seyahat zamanı bilgileri elde edilmiştir.



Ekil 2. 23 Ekim 2011-21 Ocak 2015 tarihleri arasında, Van Gölü çevresi ve daha geniş alanda gözlenen deprem etkinliği.

2.2.Yöntem

1-B hız modelinin elde edilmesi, odak parametreleri ve istasyon düzeltmelerinin hesaplanması amacıyla eş zamanlı ve yinelemeli ters çözüm yapan VELEST (Kissling ve diğ., 1994, Kissling ve diğ.,1995) yazılım programı kullanılmıştır. Bu algoritmanın temelini oluştururan kuramsal esaslar izleyen paragraflarda verilmiştir.

Bir deprem odakından çıkarak istasyona ulaşan sismik dalgaya ait seyahat zamanı ($t_{göz}$), istasyon koordinatlarının (s), oluşum zamanı ile odakla ait koordinatları içeren odaksal parametrelerin (h) ve sismik hızların (m) doğrusal olmayan bir fonksiyondur (Kissling ve diğ., 1994).

$$t_{\text{göz}} = f(s, h, m) \quad (1)$$

Bir depremden elde edilen veri zamanlarına ait veri seti ile tahmini odak yerinin ve bir ba langıç hız modelinin kullanılmasıyla,

$$t_i = \partial f / \partial t \cdot \Delta t_0 + \partial f / \partial x \cdot \Delta x_0 + \partial f / \partial y \cdot \Delta y_0 + \partial f / \partial z \cdot \Delta z_0 + \sum_{k=1}^n \partial f / \partial m_k \cdot \Delta m_k \quad (2)$$

gibi bir denklem sistemi elde edilir. Burada t_i ($i=1, \dots, n_{\text{göz}}$), i .nci seyahat zamanı rezidüelini, $n_{\text{göz}}$ ise bu deprem için toplam gözlem sayısını vermektedir. Bir deprem için elde edilen bu denklem sistemi, matris gösterimi ekinde yazılabilir

$$\mathbf{t} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{d} \quad (3)$$

Burada \mathbf{t} , seyahat zamanı rezidüelleri vektörü; \mathbf{A} , kısmi türevler matrisi; \mathbf{d} ise odaksal ve hız modeli parametrelerinin düzeltme vektörüdür. Hız parametrelerinin, (2) e itli ine fazladan bir bilinmeyen olarak girmesi, denklem sisteminin depremler için e zamanlı olarak çözülmesini gerektirmektedir. Bu formülasyon, toplam gözlem sayısının ($n_{\text{göztop}}$) toplam bilinmeyen sayısından fazla oldu u durumlar için geçerlidir. Yöntemin ayrıntıları, Kissling (1988) ve Kissling ve di . (1994)'de verilmektedir.

3. VAN GÖLÜ VE ÇEVRESİNİN 1-B HIZ YAPISI

Bu çalışmada kapsamında, Van Gölü ve dolayına ait 1-B sismik hız yapısının belirlenebilmesi için toplanan verilere belirli bir akı içerisinde a amalı yöntemler uygulanmıştır. Bu yöntemlerin ilk a amasını deprem verilerinin yeniden konumlandırılıp, belirli ölçütlere göre seçilmesi lemi, ikinci a amasını ise 1-B hız yapısının belirlenmesi amacıyla yinelemeli ve e -zamanlı hesaplamalar yapan ters çözüm i lemleri oluşturmaktadır.

3.1. Yeniden Konumlandırma

Artçı depremler yeniden konumlandırılması a amasında sadece Van Gölü çevresindeki 16 istasyon kullanılmıştır. Bölgenin kabuk hız yapısını temsili açısından Pınar ve di . (2007) hız modeli referans alınarak, odaksal parametreleri önceden belirlenmiş 10010 adet deprem, VELEST programı ile yeniden konumlandırılmıştır. Bu a amada hem P- hem de S- fazı okumaları hesaplamaya katılmış ve sadece 350 km'lik dı -merkez uzaklığı ölçütü olarak alınmıştır. Bu i lem sonucunda 16 istasyon tarafından kaydedilen 7643 depremin odak parametreleri yeniden saptanmıştır.

3.2. 1-B Hız Yapısının Belirlenmesi

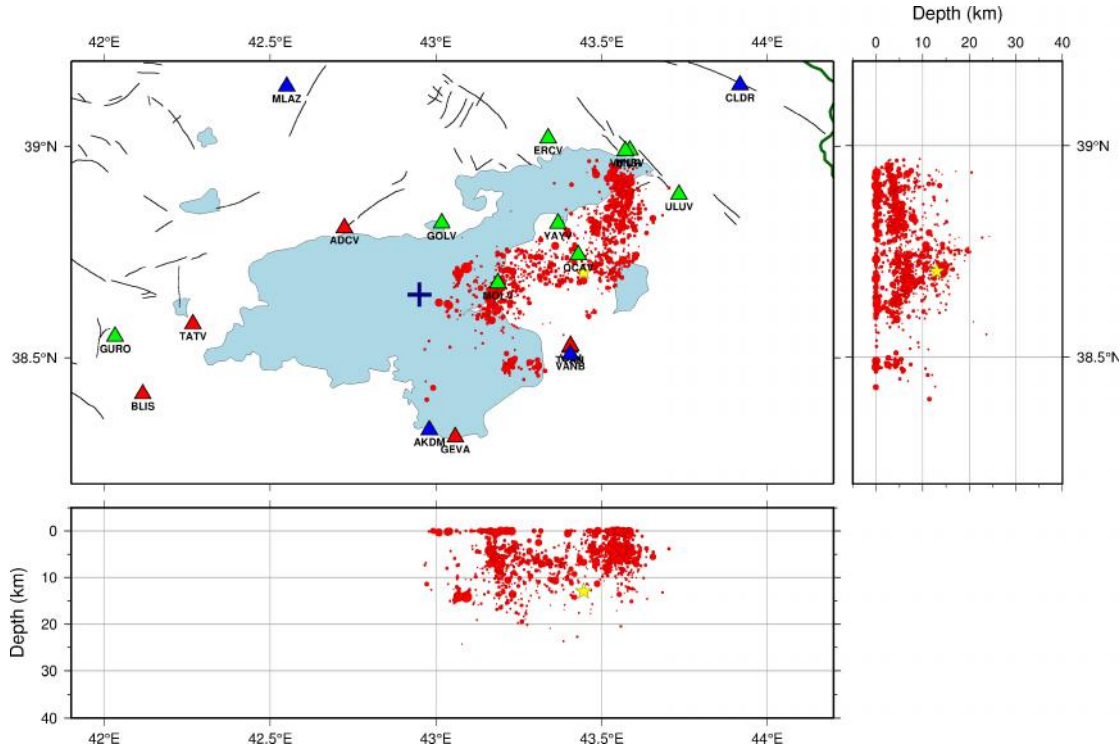
VELEST algoritması ile çalışmada alanının 1-B P- ve S- hız yapısını belirlemeden önce, güvenilir bir veri setinin oluşturulması gerekmektedir. Yani, azimutal bo luklarının (GAP) yeterince küçük ve gözlem sayısının çok fazla olması, veri kalitesinin belirlenmesinde ilk ve temel ölçüt olmaktadır. Ancak, böyle bir veri seti ile güvenilir ve kararlı bir hız yapısı tespit edilebilir. İlgili algoritma ile analiz çalışmalarını gerçekle tirebilmek için üç önemli veri grubuna gereksinim vardır. Bunlar;

- 1) Odak-istasyon arası seyahat zamanları,
- 2) stasyon düzeltmeleri,
- 3) Ba langıç hız modeli.

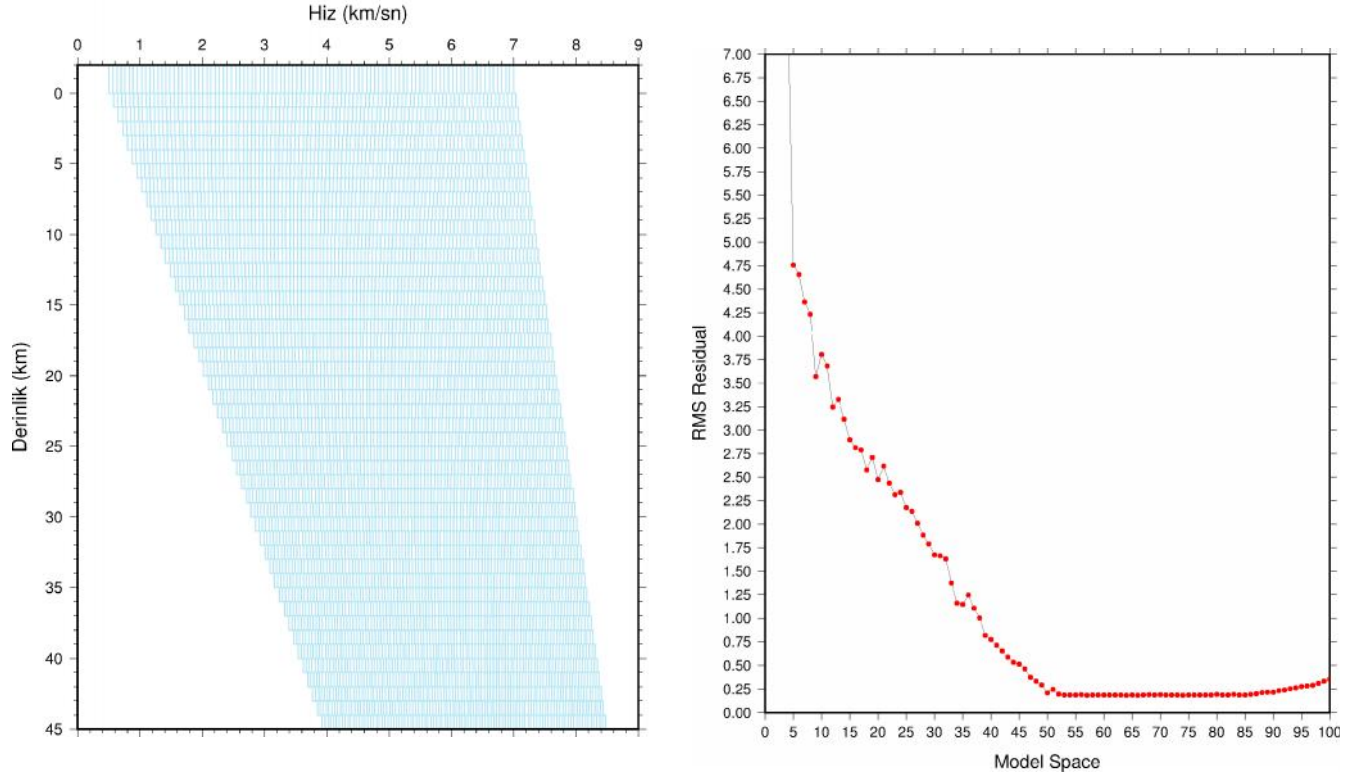
Bu veri gruplarının oluşturularak bölgenin 1-B P- ve S- yapısının nasıl belirlendiği izleyen alt başlıklarda anlatılmaktadır.

3.2.1. P- hız yapısı: P- hız yapısının belirlenebilmesi amacıyla öncelikle yeniden konumlandırılmış 7643 depreme ait seyahat-zamanı verisi içerisinde en az 10 istasyonda gözlenmiş ve GAP derinliği 180° 'den küçük olan depremler seçilmiştir. Bu eleme sonucu gerekli ölçütleri sağlayan 1193 deprem ve bunlara ait toplam 12638 P-fazı okuması ters çözüm problemleri için belirlenmiştir (ekil 3). İlem adımlarının başlangıcında her bir istasyon için düzeltme değerleri sıfır olarak alınmıştır. Ters çözüm problemleri için en önemli giriş verisi olan başlangıç hız modelinin belirlenmesi için ise sistematik bir yol izlenmiştir. Bu kapsamda $-3 - 45$ km kalınlığında bir model yapı içerisinde, P- dalga hızlarının yüzeyde $0.5 - 7$ km/s, en derin katmanda ise $4 - 8.5$ km/s arasında değiştiği ve her biri 1 km kalınlığına sahip 100 model oluşturulmuştur (ekil 4). Her bir hız modeli ayrı ayrı ters çözüm problemlerine sokulmuş ve bunlar arasından en küçük RMS değerini veren model, başlangıç hız modeli olarak alınmıştır (ekil 4). Başlangıç modelinin belirlenmesinden sonra her bir ters çözüm adımı sonucu hesaplanan parametrelerin (hız, odaksal parametreler ve istasyon düzeltmeleri), bir sonraki işlem adımına giriş verisi olarak sokulduğu bir dizi ardışık işlem adımları uygulanmıştır. Tüm bu işlem adımlarından sonra elde edilen yeni model "güncellenmiş 1-B P- hız modeli" olarak adlandırılmaktadır.

Elde edilen son güncellenmiş 1-B P- hız modeli ve istasyon düzeltmeleri kullanılarak, VELEST algoritmasının deprem konum hesaplaması modunda çalıştırılmasıyla tekrar yer bulma ve seçme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda ilk veri setinden biraz daha fazla sayıda (1214 adet) depremin veriye katıldığı görülmüştür. Bu işlem sonrası elde edilen 1214 depremden oluşan yeni veri seti, bu kez esas bulunmak istenen "minimum 1-B P- hız modelini" hesaplamak için, eş zamanlı yineleme problemlerine sokulmuştur. Yaklaşık 10 işlem adımı sonunda en düşük RMS değerini veren model "1-B minimum P-hız modeli" olarak kabul edilmiştir (ekil 5).



ekil 3. Van Gölü ve çevresinin 1-B kabuk hız yapısını belirlemek amacıyla seçilmiş depremler (kırmızı daireler) ve sismik ağı (üçgenler). Ana odak yıldız, sismik ağına ait orta nokta ise (+) işaretleri ile gösterilmiştir.



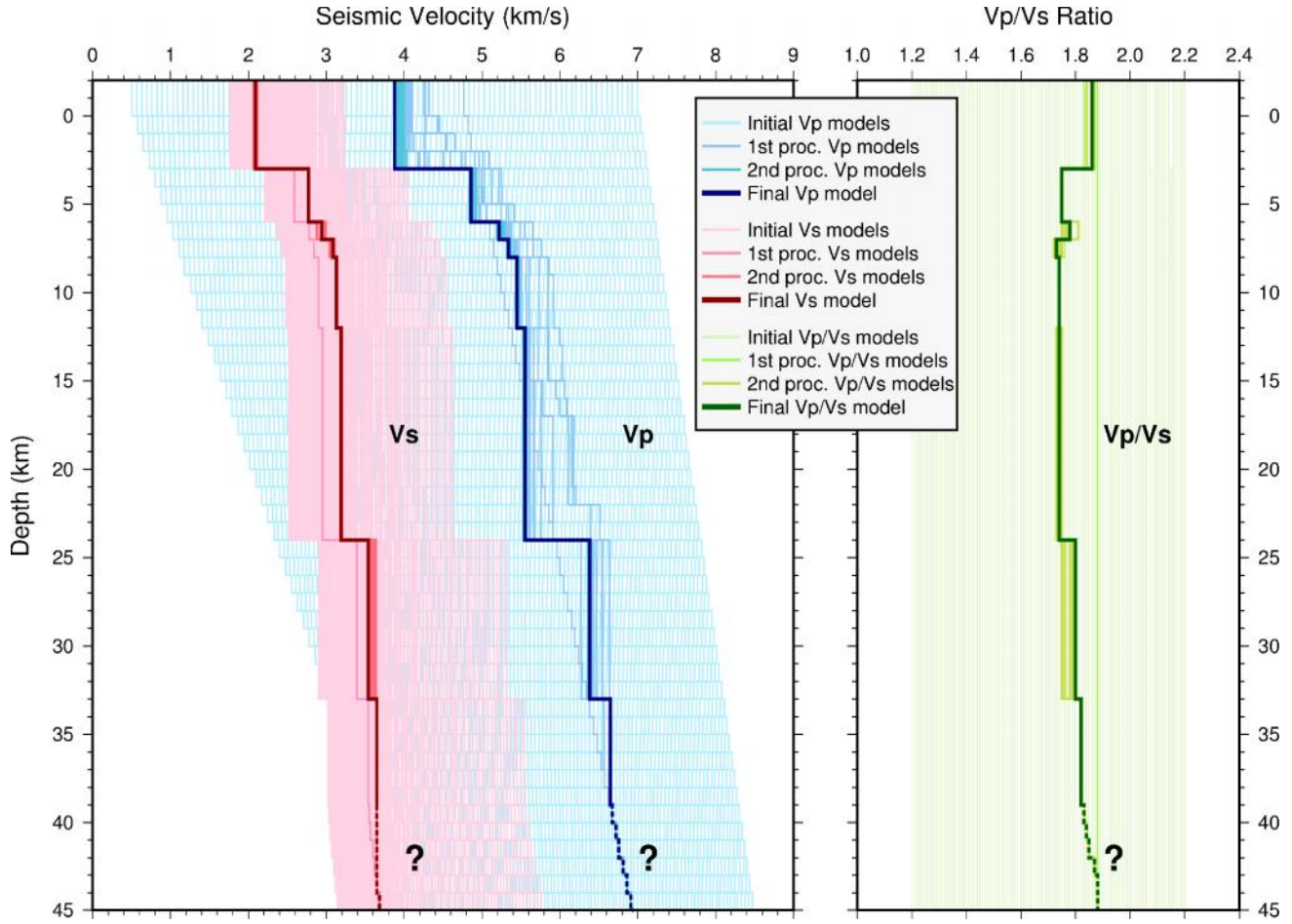
ekil 4. 1-B P- dalgası hız yapısı ters çözümünde ba langıç modelinin belirlenebilmesi için sistematik olarak olu turulmuş hız modelleri (sol panel). Bu modellerin yinelemeli ters çözümleri sonucu elde edilmiş RMS grafi i (sa panel).

3.2.1. S- hız yapısı: Bölgeye ait 1-B P- hız modeli hesaplandıktan sonra ise yine aynı bölgenin 1-B S- hız yapısı elde edilmiştir. Buradaki işlem adımları için de P- hız modelinde uygulanan benzer yollar izlenmiştir. Ancak, veri seti ve ba langıç modelleri olu turulurken farklı ölçütler kullanılmıştır. Seyahat zamanlarına ilişkin veri olu turulurken en az 10 P- ve 5 S- fazı okuması olan ve GAP de eri yine 180°'den küçük depremler seçilmiştir. Bu ölçütleri sağlayan 858 deprem ters çözüm i lemleri için belirlenerek, bunlara ait 9167 P- ve 5753 S- fazı okuması elde edilmiştir. S- hız modelinin belirlenebilmesi için gerekli ba langıç hız modeli için yine sistematik bir yol izlenmiştir. Bunun için 1-B P- hız modeli referans alınarak, V_p/V_s oranının 1.2 -2.2 arasında de i ti i toplam 100 adet ba langıç hız modeli elde edilmiştir. Yine bu modellerin her birinin tek tek ters çözüme sokulmasıyla en küçük RMS de erini veren model, S- hızı yapısı için ba langıç hız modeli olarak alınmıştır. S- hızı modeli hesaplamaları için uygulanan tüm ters çözüm i lemlerinde daha önce belirlenen minimum P- hızı modeli, ters çözüm i lemleri boyunca sabit tutularak de i memesi sağlanmıştır. Tüm i lemler sonucunda elde edilen bölgeye ait 1-B P- ve S- hız modeli ekil 5'de verilmiştir.

4. BULGULAR VE YORUMLAR

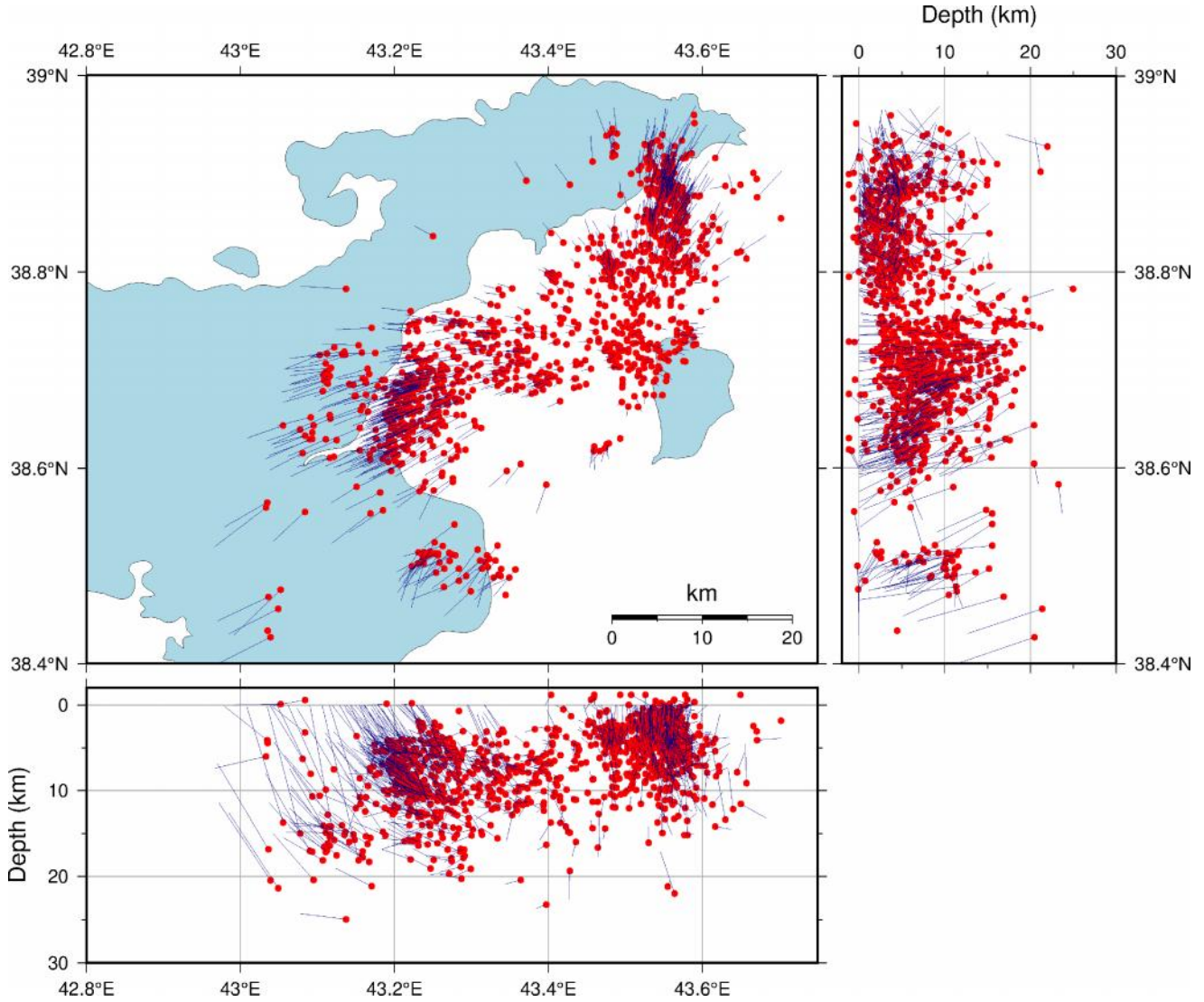
Kaliteli veri seçimi ve sistematik ba langıç modellerinin olu turulması ile ba lanılan ters çözüm i lemleri sonucunda, Van Gölü ve yakın çevresine ait 1-B V_p , V_s ve V_p/V_s modelleri elde edilmiştir. Verinin izin verdiği ölçüde, yaklaşık 39 km derinliğe kadar 1-B hız yapısı çözülebilmeye, daha derinlere ait hız yapısı ise ba langıç modellerinde verilen kestirimsel de erlerde kalmıştır (ekil 5). Tüm i lemler sonucunda, çözülebilen ilk 39 km derinliğe kadar toplam 8 farklı hız katmanının olduğu saptanmıştır. Havza özelliğindeki bölgelerde rastlanan 1-B

hız modellerinin tersine bu bölgede 3.88 km/s gibi daha yüksek bir P- dalgası yüzey katman hızı elde edilmiştir. Bu hız değerinin, bölgenin yüzey katmanını oluşturan volkanik ve metamorfik kayalara karşılık geldiği şeklinde yorumlanmaktadır. İlk yüzey katmanı için 1.86 olarak hesaplanan V_p/V_s oranı da yine beklenen değerlere oranla daha düşük çıkmıştır. Bu yüzey katmanı yaklaşık olarak 6 km bir kalınlığa sahiptir. Daha derin katmanlar ise belirli bir hız gradyenti içerisinde 39 km'ye kadar artışı göstermektedir.



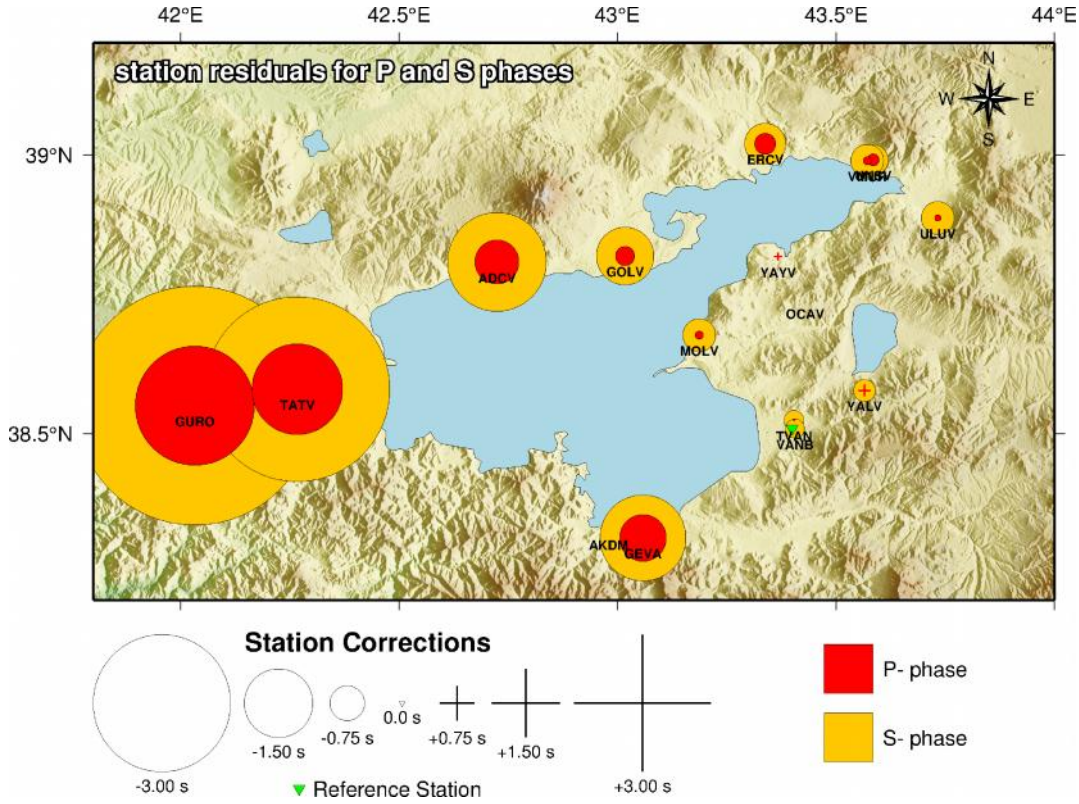
Şekil 5. Van Gölü ve çevresinin 1-B kabuk hız yapısının belirlenmesi amacıyla uygulanan ters çözüm yöntemlerinin her aşamasında oluşturulan ve/veya hesaplanan tüm hız modellerinin gösterimi. En son karar verilen hız modelleri kalın çizgilerle gösterilmiştir. Soru işaretleri ile gösterilen katmanlar hesaplamalar sonucu çözümsüz olarak kalan derinlikleri işaret etmektedir.

1-B ters çözüm sonucu hesaplanan depremlerin yeni konumlarının, başlangıçtaki konumlarına göre değişimleri Şekil 6'da görülmektedir. Bu değişimlere göre ana okun kuzeyinde ve batısında bulunan depremlerin ana okun bulunduğu bölgeye doğru kaydıkları gözlenmektedir. Ayrıca, derinlik kesitlerinden de batıda yer alan depremlerin daha derinlere doğru göç ettiği anlaşılmaktadır. Elbette bunun tek nedeni bölgeye ait uygun bir kabuk hız modelinin hesaplanarak depremlerin bu hız modeline göre yeniden belirlenmesi olarak açıklanabilir.



ekil 6. 1-B P- dalga hızı ters çözümü sonucu elde edilen odaksal koordinatların ilksel konumlarına göre yatay ve dikey yöndeki ötelenme miktarları ve doğrultuları. Daireler, 1-B ters çözümle bulunan odak koordinatlarını; çizgisel vektörler ise başlangıç odak koordinatlarını göstermektedir.

Ters çözüm sonuçları sonucunda, depremlerin kaydedildiği istasyonlara ait rezidüel değerleri de hesaplanmıştır. Hem P- hem de S- fazı için hesaplanan düzeltme değerleri ekil 7’de verilen harita üzerinde gösterilmiştir. Ters çözüm süreci boyunca VANB istasyonunun referans istasyon olarak alındığı bu çalışmada, birçok istasyonda negatif rezidüel değerleri hesaplanmıştır. Özellikle VANB istasyonunun batısında ve kuzeyinde yer alan istasyonlarda büyük rezidüel değerleri gözlenmektedir. Bunun anlamı, bu bölgelerde sismik dalgaların istasyonlara olması gerekenden daha geç zamanlarda ulaşmasıdır.



ekil 7. Ters çözüm sonucu elde edilen minimum 1-B hız modeline ait P- ve S- fazı için istasyon düzeltmeleri. Ters çözüm i lemleri boyunca VANB istasyonu (ters üçgen) referans istasyonu olarak alınmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Van Gölü ve yakın çevresine ait kesin bir üst kabuk hız bilgisi olmaması, bölgede meydana gelen depremlerin hatalı konumlandırılmasına ve dolayısıyla farklı sismolojik de erlendirmelere neden olmaktadır. Bu soruna yönelik yapılan ters çözüm çalışmaları sonucu, bölgeye ait daha kararlı bir üst kabuk hız yapısı elde edilerek 23 Ekim 2011 Van depremi ve artçı sarsıntıları daha doğru bir şekilde konumlandırılmıştır. Sistemik olarak

oluşturulan çok sayıda basit hız yapılarından yola çıkılarak, yinelemeli ve e zamanlı 1-B ters çözüm tekniklerinin uygulanması sonucu, bölgenin -3 – 39 km derinlikler arasındaki Çizelge 1.'den de görüleceği üzere, sekiz farklı hız katmanından oluştuğu bulunmuştur. Başlangıçta yüksek RMS değerlerine, yatay ve dikey yönde büyük hata miktarlarına sahip olan artçı sarsıntılar, yinelemeli ve e zamanlı ters çözüm yöntemi sonrası ilgili parametreler açısından kabul edilebilir sınırların altına indirilmiştir.

Bu çalışmanın bir sonraki ve esas hedefi Van Gölü Havzası'nın 3-B sismik hız yapısının belirlenmesi olacaktır. Bu nedenle, ara tırma bölgesi için elde edilen 1-B kabuk hız yapısı, hem bir sonraki 3-B deprem tomografisi çalışması için hem de bölgede diğer ara tırmaçılar tarafından gelecekte yapılacak sismolojik çalışmalar için temel referans bir model olacaktır.

KAYNAKLAR

- Kalafat, D., Gürbüz, C., ve Üçer, S. B. (1987). Batı Türkiye’de kabuk ve üst manto yapısının ara tırılması. *Deprem Ara tırma Bülteni*, **59**, 43-64.
- Kissling, E., 1988. Geotomography with local earthquakes, *Rev. Geophys.*, **26**, 659-698.
- Kissling, E., Ellsworth, W.L., Eberhart-Phillips, D., ve Kradolfer, U., (1994). Initial reference models in local earthquake tomography. *Journal of Geophysical Research* **99**, 19,635–19,646.
- Kissling, E., Solarino, S., ve Cattaneo, M. (1995). Velest users guide. Int. Report, Inst. Geophys., ETH, Zurich, 1-26.
- Lee, W. H. K. ve Lahr, J. C. (1972). HYPO71: A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes (No. 72-224). *US Geological Survey*.
- Pınar, A., Honkura, Y., Kuge, K., Matsushima, M., Sezgin, N., Yilmazer, M., & Ö ütçü, Z. (2007). Source mechanism of the 2000 November 15 Lake Van earthquake (Mw= 5.6) in eastern Turkey and its seismotectonic implications. *Geophysical Journal International*, **170(2)**, 749-763.