

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 055803 (1210-1222)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 055803 (1210-1222)

DOI: 10.35414/akufemubid.931365

Araştırma Makalesi / Research Article

3 Aralık 2020 Siirt-Kurtalan Depremi (Mw5.1) Kaynak Parametreleri ve Fay Çözümlerinin Araştırılması, Güneydoğu Anadolu

Nihan HOŞKAN¹¹ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşai, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul.e-posta: nihan@iuc.edu.tr. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5507-9818>

Geliş Tarihi: 02.05.2021

Kabul Tarihi: 29.09.2021

Öz

3 Aralık 2020 tarihinde Bitlis-Zagros Bindirme Kuşağı yakınında uzun zamandır sismolojik olarak suskun olan bölgede, Siirt-Kurtalan Depremi meydana gelmiştir. Bu çalışmada, Siirt-Kurtalan depreminin (Mw5.1) odak mekanizma çözümleri P-dalgası polaritelerinden hesaplanıp, diğer deprem veri merkezleri tarafından yapılan çözümlerle karşılaştırılmalı olarak irdelenmiş ve depremin spektral kaynak özellikleri ortaya konmuştur. Bunların yerel tektonik yorumlamaya katkısı sunulmuştur. Buna göre depremin dış merkezi 38.048oK enlemi, 41.746oD boylamı olarak bulunmuştur. S dalga yer değiştirme spektrumu üzerinde köşe frekansı 0.571 (± 0.098) Hz olarak hesaplanmıştır. Buna bağlı olarak, kaynak yarıçapı=1.973 (± 0.088) km, momenti (Mo)=5.015*10¹⁶ (± 0.062) Nm, moment büyüklüğü(Mw)=5.098 (± 0.093), gerilim boşalımı=27.487 (± 0.304) bar olarak bulunmuştur. HASH yazılımı kullanılarak birinci ve ikinci düğüm düzlemleri için (doğrultu, eğim ve kayma) sırasıyla (326, 84, 178) ve (56, 88, 6) olarak bulunmuştur. Buna göre ikinci düğüm düzlemi yerel tektoniğe uygun sol yönlü doğrultu atımlı fay karakteristiğini göstermektedir. Sismotektonik etkinlik bakımından önemli olan Bitlis-Zagros Kenet Kuşağı sürekli gözlemlenmelidir. Bunun için ek deprem istasyonları kurulmalı ve bölgede detaylı sismotektonik çalışmaların yapılması sağlanmalıdır.

Anahtar kelimeler

3 Aralık Siirt-Kurtalan Depremi; Deprem Kaynak Parametreleri; FPFIT Yazılımı; Gerilim Boşalması; HASH Yazılımı; Yayınım Paterni

Investigation of the Source Parameters and Fault Mechanism Solutions of the December 3rd, 2020 Mw5.1 Siirt-Kurtalan Earthquake, Southeast Anatolia

Abstract

On December 3rd, 2020, the Siirt-Kurtalan Earthquake occurred near the Bitlis-Zagros Suture Zone that has been seismologically quiet for a long time. In this study, the focal mechanism solutions of the Siirt-Kurtalan earthquake (Mw5.1) were determined from P-wave polarities, analyzed in comparison with the solutions provided by other earthquake data centers, and the spectral source characteristics of the earthquake were revealed. Accordingly, the epicenter of the earthquake was found 38.048°N, 41.746°E. On the S-wave displacement spectrum, corner frequency was calculated 0.571 (± 0.098) Hz. Consequently, source radius=1.973 (± 0.088) km, the moment (Mo)=5.015*10¹⁶ (± 0.062) Nm, the moment magnitude (Mw)=5.098 (± 0.093), and the stress drop=27.487 (± 0.304) bar were found. Using the HASH code, for the first and second nodal planes (strike, dip, rake) were found as (326, 84, 178) and (56, 88, 6), respectively. Therefore, the second nodal plane shows a left-lateral strike-slip fault characteristic in accordance with local tectonics. The Bitlis-Zagros Suture Zone, which is important in terms of seismotectonic activity, should be constantly observed. For this purpose, additional earthquake stations should be established and detailed seismotectonic studies should be carried out in the region.

Keywords

December 3rd, 2020 Siirt-Kurtalan Earthquake; Earthquake Source Parameters; FPFIT Code; Stress Drop; HASH Code; Radiation Pattern

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

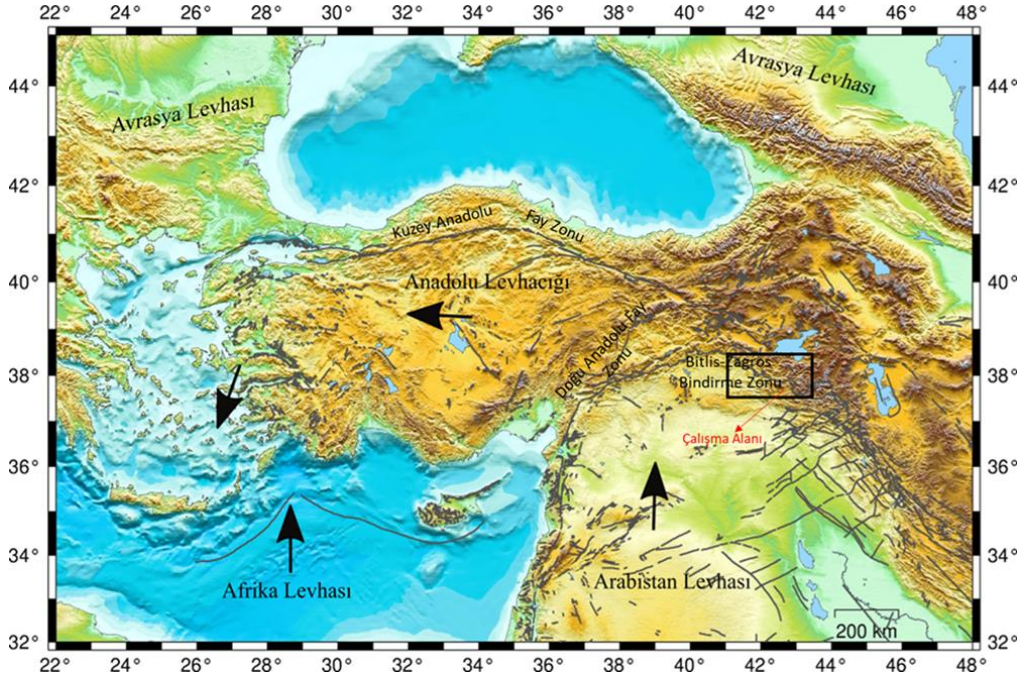
1. Giriş

Deprem odak mekanizması çözümlerinin analizi, bir bölgedeki mevcut deformasyonu anlamak için

sismolojik açıdan temel bir araçtır ve depremin meydana geldiği fayın karakterini tayin etmede

önemli rol oynar (Gomberg and Ellis 1994, Hsu and Sibuet 1995, Carena and Suppe 2002, Rundquist and Sobolev 2002, Bilek *et al.* 2003, Steacy *et al.* 2005, Janutyte and Lindholm 2017). Ayrıca, deprem kaynak parametrelerinin incelenmesi, sismotektonik süreçlerin anlaşılması ve potansiyel sismik tehlikenin değerlendirilmesine de katkıda bulunur (Hardebeck and Shearer 2002). Kaynaktaki deprem gerilim enerjisinin boşalım (stress drop) hesaplamaları ve yayılım paterninin bulunması da depremin meydana geldiği bölgenin tektoniğinin incelenmesinde önemli bilgiler sunar. Bu kapsamda, Bitlis-Zagros Bindirme Kuşağının doğu kanadı üzerinde Siirt'in Kurtalan İlçesi'nde 3 Aralık 2020 tarihinde yerel saatle 08.45'te meydana gelen Mw5.1 büyüklüğünde deprem incelenmiştir.

Bilindiği gibi Bitlis-Zagros, dünyanın önemli kenet kuşaklarından birisidir ve Siirt-Kurtalan Depremi, bu bölgedeki son 107 yıllık sessizliği bozmuştur (Eyidoğan 2020). Bölgede, yılda yaklaşık olarak 18 mm hızla K-KB yönünde ilerleyen Arabistan Levhası, Bitlis-Zagros Bindirme Zonu boyunca Avrasya Levhası ile çarpışmıştır (McKenzie 1972, Şengör 1980, Eyidoğan 1983, Barka and Reilinger 1997, Reilinger *et al.* 2006). Bu çarpışma nedeniyle, sırasıyla kayma hızları yaklaşık olarak yılda 25 mm ve 9 mm olan Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu Fay Zonları arasında kalan Anadolu Levhası saatin tersi yönünde batıya doğru kaçar (Şengör and Yılmaz 1981, Şengör *et al.* 1985, Yılmaz 2000, Barka and Reilinger 1997, McClusky *et al.* 2000, Allen *et al.* 2004) (Şekil 1).



Şekil 1. Türkiye'nin ana fay hatları, levha sınırları ve levhaların hareket yönleri (Fay çizgileri Emre vd. (2013)'ten uyarlanarak ve harita GMT (Wessel and Smith 1998) kullanılarak oluşturulmuştur).

Söz konusu tektonik ortamda meydana gelen Siirt-Kurtalan depreminin sismik kaynağıyla ilgili farklı görüşler bulunmaktadır. Emre *et al.* (2013), depremin Bitlis-Zagros Kenet Zonuna paralel, Siirt ili güneydoğusundaki KB-GD sağ yanal doğrultu atımlı faydan kaynaklandığını ileri sürerken, Seyitoğlu (2020), dış merkezi Garzan Ters/Bindirme Fayları yakınında olan depremin, USGS'e ait fay düzlem çözümleri ve artçı etkinlik dağılımını dikkate alarak,

iki farklı cephe arasında meydana gelmiş sol yanal makaslama üzerinde gerçekleşebileceğini düşündüğünü söylemiştir.

Bu çalışmada, Siirt-Kurtalan depreminin (Mw5.1) odak mekanizma çözümleri P-dalga (ilk varış) polaritelerinden hesaplanıp, diğer veri merkezleri tarafından yapılan çözümlerle karşılaştırmalı olarak irdelenmiş ve depremin kaynak özellikleri (spektral

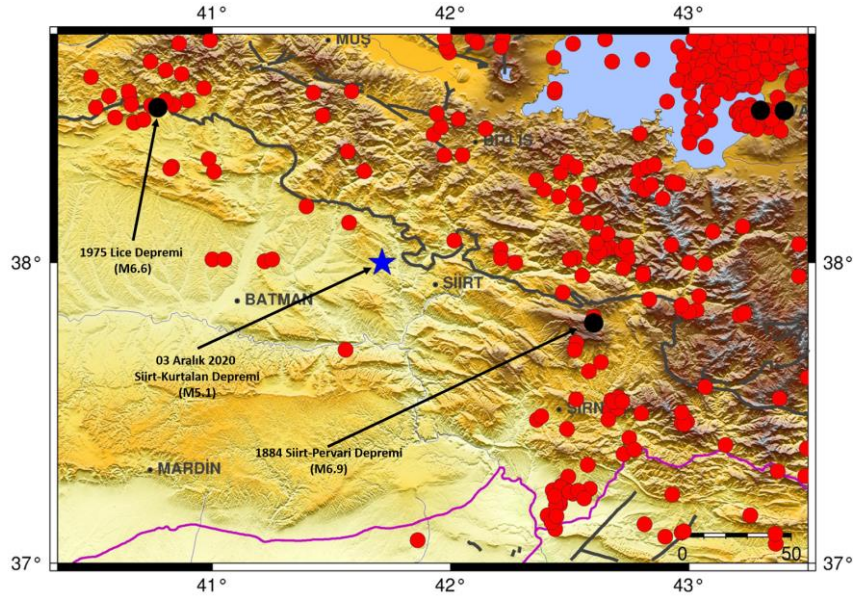
ve yayılım paterni) ortaya konmuştur. Bunların yerel tektonik yorumlamaya katkısı sunulmuştur.

1.1. Bölgenin Sismotektonik Özellikleri

Bitlis-Zagros Bindirme Zonu (BZBZ) Arabistan Arabistan Levhası ile Avrasya Levhası'nın Oligosen-Erken Miyosen'de kıta-kıta çarpışması sonucu meydana gelmiştir (McKenzie 1972, Hall 1976, Şengör 1980, Eyidoğan 1983, Yılmaz 1993, Rowley 1996, Barka and Reilinger 1997, Reilinger *et al.* 2006, Seyitoğlu *et al.* 2018, Seyitoğlu 2020). İran'da Zagros Bindirme Zonu olarak başlayan kuşak, Türkiye'de Hakkari'den başlayıp güneybatı yönüne doğru iç bükey bir yay çizip, Kahramanmaraş batısına kadar uzanarak Bitlis Bindirme Zonu ya da Güneydoğu Anadolu Bindirmesi adını alır (Şengör 1980, Baştuğ 1976, Şaroğlu vd. 1987). Yaklaşık 800 km uzunluğunda ve 60 km genişliğinde olan bu zon aynı zamanda (Arpat 1977, Eyidoğan 1983, Seyitoğlu vd. 2019) Doğu Anadolu ile Güneydoğu Anadolu bölgelerinin coğrafik sınırına karşılık gelir (Şaroğlu vd. 1987) (Şekil 1). Levhaların geçmiş hareketlerinin incelenmesi sonucunda, Arap ve Avrasya levhaları arasındaki yakınsamanın, sağ yanallı doğrultu atımlı faylarla gerçekleşen Zagros segmentine kıyasla Bitlis segmenti boyunca daha ortogonal olduğunu göstermektedir (McQuarrie *et al.* 2003, Allen *et al.* 2004). Bitlis Bindirme Zonu boyunca meydana gelen

depremlerin kaynağı, çoğunlukla levhaların K-G yönünde günümüzde de birbirlerine yaklaşma sürecinin devam etmesinin bir sonucudur (İmamoğlu ve Çetin 2007). Günümüzde Zagros segmenti kısalma ile karakterize edilirken, Bitlis segmenti doğrultu atımlı faylanma ile karakterize edilmektedir ve Bitlis Bindirme zonu boyunca mevcut kabuk hareketleri, batıda ağırlıklı olarak doğrultu atımdan, doğuda ortogonal kıalmaya doğru değişmektedir (Reilinger *et al.* 2006, Okay *et al.* 2010).

Tarihsel dönemde 1884 Siirt-Pervari (M6.9) (Soysal vd. 1981), aletsel dönemde 1975 Lice Depremi (M6.7) (Jackson and McKenzie 1984), bu çalışmada incelenen Siirt-Kurtalan depremi civarında meydana gelmiş önemli depremlerdir (Şekil 2). 1975 Lice depreminin Ergani-Silvan Kör Bindirmesinden (Blind Thrust) kaynaklandığı düşünülmüştür (Seyitoğlu *et al.* 2017). Şekil 2'de Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı Deprem Dairesi (AFAD) tarafından hazırlanan deprem kataloğu kullanılarak 1900-2021 tarihleri arasında $3.5 \leq M \leq 6.7$ büyüklükleri arasında meydana gelmiş depremler, ve ayrıca, tarihsel dönemde çalışma alanında oluşmuş depremler gösterilmiştir. Son meydana gelen 3 Aralık 2020 Siirt-Kurtalan Depremi (Mw5.1), Bitlis Bindirme Kenet Kuşağı içinde değerlendirilmektedir (Şekil 2).

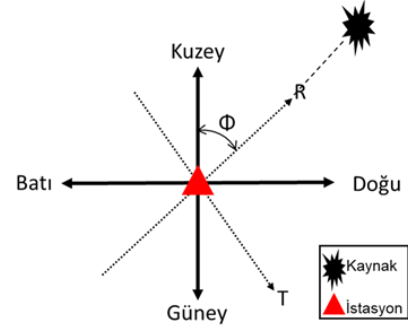


Şekil 2. Bölgede 1900-2021 yılları arasında meydana gelmiş, büyüklüğü $3.5 \leq M \leq 6.7$ olan aletsel depremler (Kırmızı daireler ile (AFAD), tarihsel depremler (Soysal vd. 1981, Jackson and McKenzie 1984) siyah daireler ile ve Siirt-Kurtalan depremi mavi yıldız ile gösterilmiştir).

2. Materyal ve Metot

Siirt-Kurtalan depremi (Mw5.1) odak mekanizma çözümleri için fullseed (fseed) formatında kayıt edilmiş olan olay bazlı veriler, Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı Deprem Dairesi (AFAD), Türkiye Deprem Veri Merkezi (TDVM) web sayfasından indirilerek kullanılmıştır (Int Kyn. 1). Çalışma için, alet düzeltmesi ve istasyon hakkındaki bilgilerin olduğu metadata dosyasını içerdiği için fullseed formatındaki veri tercih edilmiştir.

AFAD-TDVM'den indirilen 100 Hzlik üç bileşenli kayıtlara alet düzeltmesi, gerçek yer hareketi değerlerini bulmak amacıyla yapılmıştır. Alet düzeltmesi, aletin çıktısı (örn: dijital sayaç değeri) yerine fiziksel birimler (yüzeyle hareketin hızı (örn:metre/saniye) veya yer değiştirme (örn:metre)) olarak sismogramların analizinin gerçek yer hareket değerleri ile yapılmasına izin verir (Haney vd., 2012). Alet düzeltmesi yapıldıktan sonra, üç bileşenli sismogramların KG (kuzey güney), DB (doğu batı) yatay bileşenleri back azimut yönünde döndürülerek R (radial=ışımsal) ve T (transverse=teğetsel) bileşenleri olarak elde edilmiştir. Sismometreler düşey (Z) ve yatay (KG ve DB) olmak üzere üç bileşenli kayıt alırlar. P-Sv-Rayleigh dalgalarının, Sh-Love dalgalarından ayrıldığı R-T bileşenlerine döndürülmesi, deprem P-S ve yüzey dalgalarının fazlarının ayırt edilebilmesini mümkün kılar. Bileşen dönüşümü yapılırken istasyondan depreme olan back azimut (BAZ) açısı kullanılmaktadır (Scherbaum ve Jonnson 1992) (Şekil 3).



Şekil 3. Back azimut açısının gösterimi (Sholtz et al. 2016).

Burada,

$$A = \begin{bmatrix} \cos\Phi & \sin\Phi \\ -\sin\Phi & \cos\Phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

ve

$$\begin{bmatrix} R \\ T \end{bmatrix} = A * \begin{bmatrix} KG \\ DB \end{bmatrix} \quad (2)$$

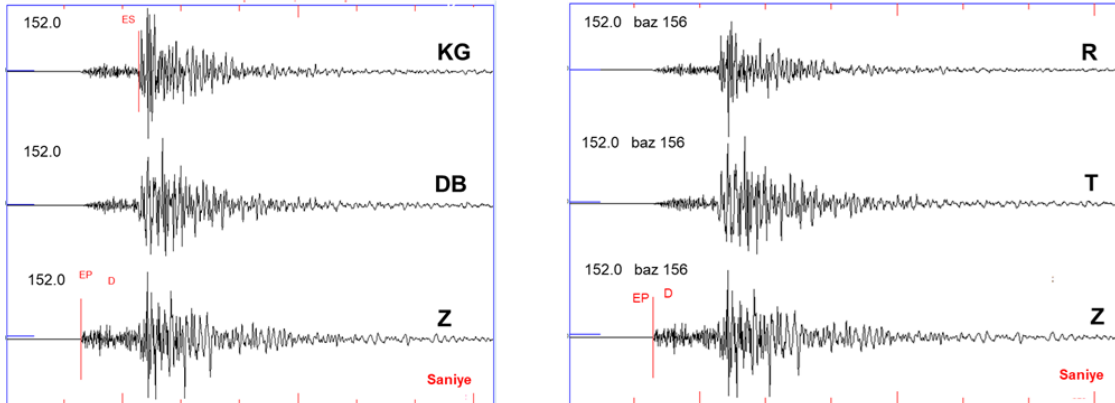
olur. Buradan,

$$R = \cos\Phi \cdot KG(t) + \sin\Phi \cdot DB(t) \quad (3)$$

$$T = -\sin\Phi \cdot KG(t) + \cos\Phi \cdot DB(t)$$

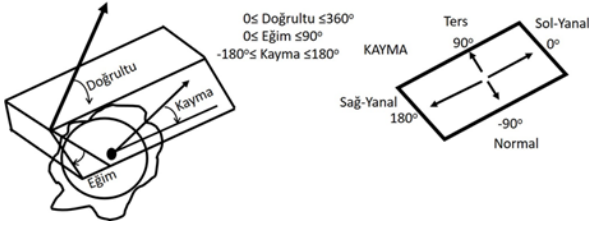
olarak Kuzey-Güney (KG) ve Doğu-Batı (DB) bileşenleri R ve T'ye döndürülmüş olur (Sholtz et al. 2016).

Örnek olarak deprem dış merkezine 152 km uzaklıktaki KARO istasyonu verisi Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. AFAD-TDVM'den indirilen 152 km uzaklıktaki KARO istasyonu (a) ham veri KG, DB, Z bileşenleri (b) Hesaplanan geri azimut açısı (back azimuth) baz=156° ile rotasyon uygulanmış R-T-Z bileşenleri. EP, ES, D sırasıyla Z bileşen üzerinden ayırt edilen P dalgası, yatay bileşen üzerinde belirlenen S dalgası varış zamanlarını ve düşey bileşen üzerindeki P dalgası polarizasyonunu (D=dilatasyon) gösterir.

Siirt-Kurtalan depremi kaynak özellikleri, Aki and Richards (1980) şeması (Şekil 5) göz önüne alınarak irdelenmiş ve FPFIT ile HASH yazılımları kullanılarak fay düzlemi çözümü ile odak mekanizması belirlenmiştir. Bunun yanı sıra depremin Gerilim Boşalımı (stress drop) ile yayılım paterni değerlendirilmiştir.



Şekil 5. Deprem parametreleri Aki and Richards 1980 şematik gösterimi (Toda et al. 2011).

2.1 FPFIT

FPFIT yazılımı (Reasenber and Oppenheimer 1985), bir deprem için gözlemlenen P dalgası polarite (yukarı + (compression), aşağı - (dilatation)) kümesine en iyi uyum çift kuvvet bileşenli fay düzlemi çözümünü hesaplar. Bu hesaplama, ters çözüm ile normalleştirilmiş, ağırlıklı toplam ilk hareket polarite farklılıklarını en aza indirgeyen kaynak modelini bulan iki aşamalı grid arama işlemi ile gerçekleştirilir. Minimizasyona iki ağırlık faktörü dahil edilmiştir: biri verilerin tahmini varyansını yansıtır ve teorik P dalgası yayılım genliğinin mutlak değerine dayanır (Aki and Richards 1980). İkinci ağırlıklandırma, yayılım loblarına (düğüm düzlemleri) yakın gözlemlere daha fazla (ya da daha az) ağırlık verir ve hata miktarında önemli göreceli minimum değerlere karşılık gelen alternatif çözümler arar.

2.2 HASH

HASH yazılımı, kabul edilebilir tüm çözümleri bulmak için grid aramasıyla ilk hareketi kullanarak odak mekanizmalarını belirler (Hardebeck and Shearer 2002, 2003). Odak mekanizması belirsizliği, polarite hataları, olay yeri hataları ve sismik hız yapılarının etkilerinin dikkate alınmasında, FPFIT ile karşılaştırıldığında, önemli avantajlar sunar. Yazılım, kaynak konumunu değiştirerek ve bu değerlendirme için hız modelini seçerek yinelemeli çözümler yapar. Çözüm için, uyumsuzluk, RMS (Root Mean Square) farkı, istasyon dağılım oranı ve olasılık çözümü

olmak üzere dört parametre kullanılarak değerlendirilir.

2.3 Gerilim Boşalımı (Stress Drop)

Gerilim boşalımı, fay kaymasından hemen önce ve kaymanın durmasından hemen sonraki makaslama gerilmesi arasındaki farka denir ve faylanma sürecinin dinamiklerinde belirlenebilen en önemli parametredir (Lay and Wallace 1995). Depremlerde gerilim enerjisinin ne kadarının açığa çıktığını bilmek önemlidir. Uzun süre suskun ve fakat tektonik bakımdan aktif olduğu bilinen bölgelerde meydana gelen bir deprem için yüksek gerilim boşalımı beklenebilir.

Gerilim boşalımı ile kaynak yarıçapı arasındaki ilişki, spektral yöntem kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir (Brune 1970, Ottomoller and Haskov 2017):

$$Sr = 0.37 * V / fo \quad (4)$$

burada, Sr=kaynak yarıçapı, fo=köşe frekansı, V=P veya S dalgası durumuna göre kaynaktaki P veya S hızıdır. Dolayısıyla, gerilim boşalımı (σ) aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$\sigma = 0.44 * Mo / (Sr)^3 \quad (5)$$

burada Mo; moment (Newton-metre (Nm))'tir.

2.4 Yayılım Paterni (Radiation Pattern)

Faylanma mekanizması ile ilgili olan yayılım paterni, fay kırılma sürecinin neden olduğu yer hareketinin coğrafi asimetrisidir. Kaynak yırtılma yönü (rupture direction), iyi bilinen bir sismolojik özelliktir (Lay and Wallace 1995) ve kuvvetli yer hareketi ve genlik ilişkisini kontrol eden faktördür (Campbell 2003a, Campbell 2003b). Kaynak yırtılma yönünün sonucu olarak, kırılma yayılımı ileri yönündeki yer hareketi genlikleri artarken, geri yöndekiler azalır (Lay and Wallace 1995). Dolayısıyla, yayılım paterni kaynaktan yayılan enerjinin (P, S ve yüzey dalgaları) yönü ve genlikleri ile ilgili bilgi verir.

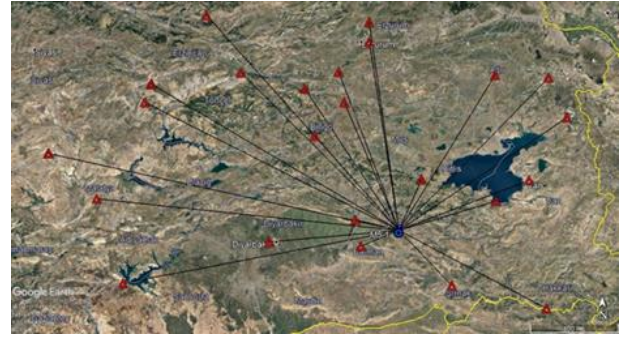
3. Bulgular

Siirt-Kurtalan Depremi odak mekanizması çözümü için, AFAD-TDVM 100 Hzlik sismogramlar, SEISAN (Ottomoller and Havskov 2017) formatına çevrilerek, P ve S dalgalarının varışları işaretlenmiştir. Kullanılan istasyonların yeri,

yüksekliği ve bölgesel 1-B hız modeli (Int Kyn. 2) (Çizelge 1), HYPO71 (Lee and Lahr 1972) formatında hazırlanmıştır. İşaretlenen dalga faz bilgileri ve hazırlanan formatlı istasyon verisi yardımıyla HYPOINVERSE (Klein 2014) yöntemi SEISAN paketi yardımıyla, depremin yeri 38.048°K enlemi, 41.746°D boylamı olarak tespit edilmiştir (Şekil 6).

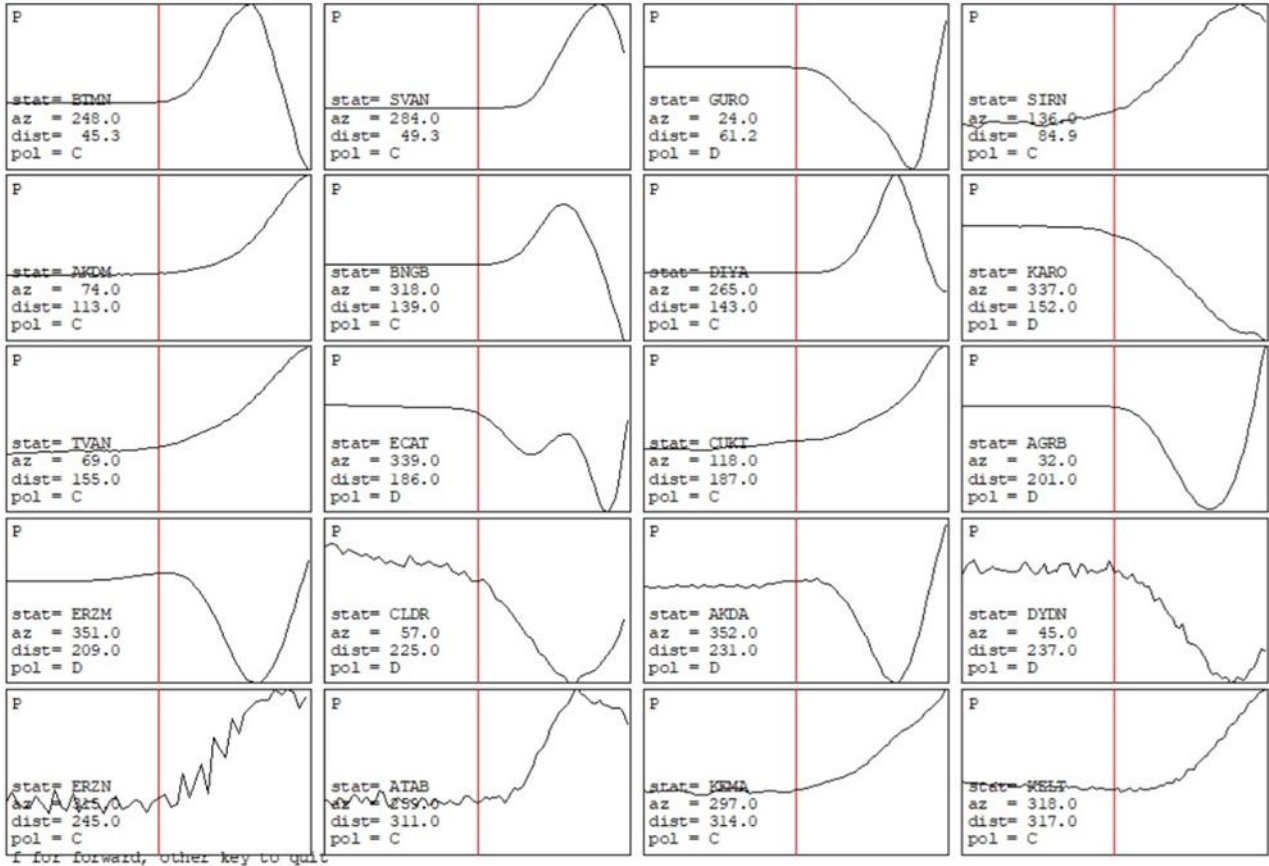
Çizelge 1. Kullanılan Hız Modeli ($V_p/V_s=1.78$) (Int Kyn. 2).

V_p (m/sn)	V_s (m/sn)	Derinlik(km)
3.55	1.99	0
3.57	2.01	0.5
3.7	2.08	1
5.35	3.01	2
5.67	3.19	3
5.9	3.31	5
6.02	3.38	7
6.07	3.41	10
6.1	3.43	14
6.18	3.47	18
6.67	3.75	30
8	4.49	50



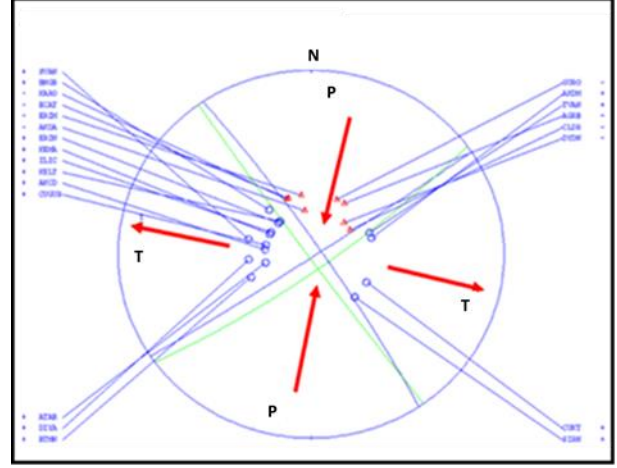
Şekil 6. Kullanılan AFAD istasyonlarının yerleri ve HYPOINVERSE ile bulunan Siirt-Kurtalan depremi üst merkezi (38.048°K enlemi, 41.746°D boylamı) (Altlık harita; Google Earth Pro, 2021).

Odak mekanizması çözümleri için, P dalgası polariteleri (ön set yönleri) kullanılarak FPFIT (Reasenberg and Oppenheimer 1985) ve HASH (Hardebeck and Shearer 2002, 2003) yazılımları SEISAN (Int Kyn. 3) altında çalıştırılmıştır. Şekil 7’de düşey bileşen üzerinde işaretlenen P dalgası polariteleri gösterilmiştir.



Şekil 7. Düşey bileşen üzerinde işaretlenen P dalgası polariteleri; stat=istasyon adı, dist=istasyon uzaklığı (km), az=depremin azimutu (derece) ve pol=polarite yönleri (C=itme (+) (pressure), D= çekme (-) (dilatation)).

HASH ve FPFIT yazılımının çalıştırılması için istasyon listesi, hız modelleri, P dalga polarite verileri; giriş parametreleri olarak derlenmiştir. P dalgası polariteleri kullanılarak Siirt-Kurtalan depremi I. Düzüm düzleminin doğrultu, eğim ve kayma değerleri sırasıyla HASH ile (326, 84, 178) ve FPFIT ile (144, 89, -170) olarak hesaplanmıştır (Şekil 8) ve Çizelge 2’de karşılaştırmalı olarak özetlenmiştir. FPFIT ile elde edilen kayma değerindeki farkın nedeninin azimutal gap değerinin yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. FPFIT yazılımının büyük azimutal gap değerine hassas olduğu bilinmektedir. HASH yazılımı FPFIT’in geliştirilmiş versiyondur. Bu nedenle HASH ile elde edilen sonuçların, diğer deprem veri merkezleri ile elde edilmiş sonuçlar ile daha uyumlu olduğu görülür (Çizelge 2.)



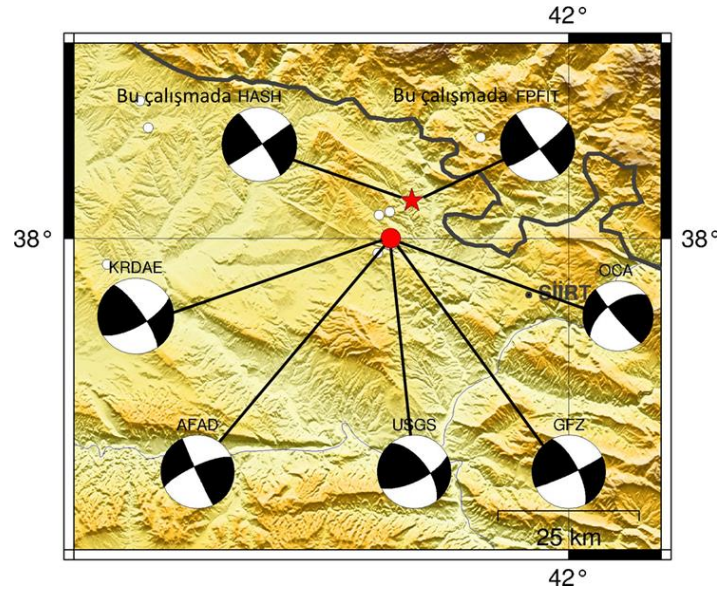
Şekil 8. FPFIT (yeşil) ve HASH (mavi) fay çözümleri. P=itme ve T=çekme yönleri ((+) ve (-) ler her bir istasyon için polarite yönlerini gösterir). P ve T eksenlerinin yönleri kırmızı oklarla gösterilmiştir.

Çizelge 2. 3 Aralık 2020 Siirt-Kurtalan depreminin bu çalışmada ve farklı sismoloji merkezleri tarafından elde edilen parametreleri: KRDAE; Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü, AFAD; Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, USGS; United States Geological Survey, GFZ; German Research Centre for Geosciences, OCA; The Côte d’Azur Observatory; Der=Derinlik (km), D=Doğrultu, E=Eğim, K=Kayma ve Yntm=Parametrelerin elde edilmesi için kullanılan yöntem. Parametre indisleri 1 ve 2 sırasıyla birinci. ve ikinci. düğüm düzlemlerini temsil eder. Koyu siyah ile gösterilen değerler, farklı veri merkezleri ile bu çalışmada bulunan uyumlu fay çözümlerini göstermektedir.

Çöz.	Mw	Der (km)	D ₁	E ₁	K ₁	D ₂	E ₂	K ₂	Yöntem
Bu çalışma	5.1	10	326	84	178	56	88	6	HASH
Bu çalışma	5.1	10	144	89	-170	54	80	-1	FPFIT
KRDAE	5.1	18	325	76	158	60	69	14	MT
AFAD	5	14.2	155	88	166	245	76	2	MT
USGS	5	18	322	61	156	64	69	30	MT
GFZ	5	12	333	69	174	65	84	20	MT
OCA	4.8	7	140	85	148	233	58	6	MT

Şekil 9’da HASH ve FPFIT bulguları diğer veri merkezlerinin çözümleri ile karşılaştırmalı olarak (Çizelge 2) gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 9’de Siirt-

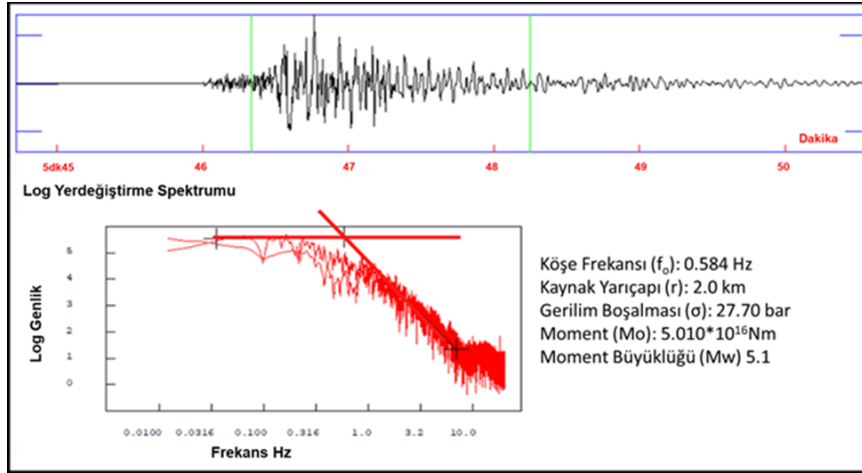
Kurtalan depremi sonrası meydana gelen artçı şoklar ($2.0 \leq M_L \leq 2.6$) verilmiştir. Deprem sonrası meydana gelen en büyük artçı şok $M_L=2.6$ büyüklüğündedir.



Şekil 9. Siirt-Kurtalan depremi (için bu çalışmada bulunan ve diğer sismoloji merkezleri tarafından hesaplanan odak mekanizma çözümleri (kırmızı:AFAD tarafından, yıldız:bu çalışmada bulunan üst merkez yeri, beyazlar; artçı şoklar ($2.0 \leq M_L \leq 2.6$)).

Siirt-Kurtalan depremi için yüksek kaliteli S/G (sinyal/gürültü) oranı iyi olan istasyonların T bileşeni kullanılarak S dalgası yer değiştirme spektrumu ile köşe frekansı, kaynak yarıçapı, gerilim boşalması, momenti ve moment büyüklüğü elde edilmiştir (Brune 1970, Ottomoller and Haskov 2017). Seçilen istasyonlar için bulunan sonuçların ortalaması alınıp, standart sapmaları hesaplanmıştır. Buna göre

standart sapmaları ile, köşe frekansı $0.571 (\pm 0.098)$ Hz, kaynak yarıçapı $1.973 (\pm 0.088)$ km, gerilim boşalması (σ) $27.487 (\pm 0.304)$ bar, Momenti (M_0) $5.015 \cdot 10^{16} (\pm 0.062)$ Nm ve moment büyüklüğü (M_w) $5.098 (\pm 0.093)$ olarak hesaplanmıştır (Çizelge 3). Deprem üst merkezine 237 km uzaklıktaki DYDN istasyonu, T bileşeni ve yer değiştirme spektrumu örneği Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. DYDN istasyonu, HHT (Transverse) bileşeninin S-dalgası penceresindeki (yeşil çizgiler arası) (üstte) yarı logaritmik yer değiştirme spektrumu örneği (altta).

Kaynak yarıçapı yaklaşık 2 km olarak alınırsa, Wells and Coppersmith (1994) tarafından verilen

$$\log(YA) = -3.42 + 0.90 * M \quad (6)$$

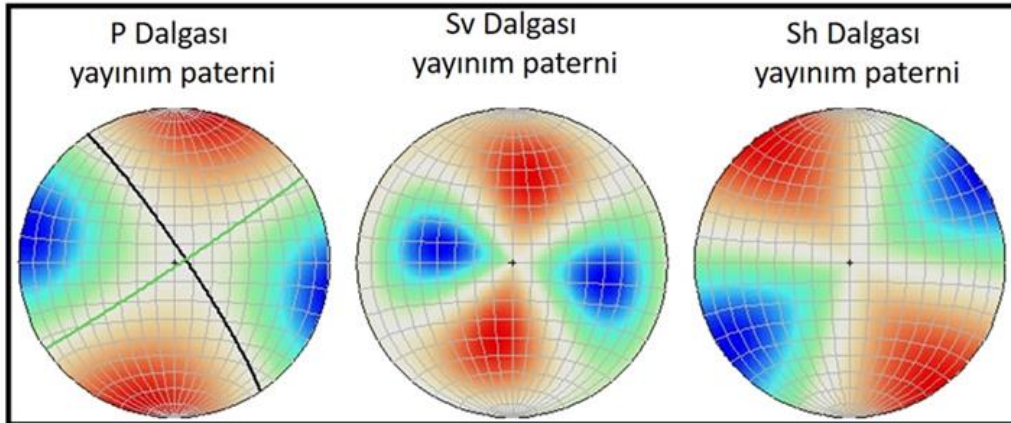
ampirik bağıntısı kullanılarak $M_w=5.02$ olduğu yaklaşık olarak bulunabilir. (6) bağıntısında YA, dairesel yırtılma alanı (Şekil 5) ve M, depremin moment büyüklüğüdür.

Çizelge 3. Seçilen istasyonlardaki T bileşenleri üzerinde hesaplanan kaynak spektrum parametreleri.

İstasyon Adı	Moment ($10^{16} \cdot \text{Nm}$)	Gerilim Boşalması (bar)	Köşe Frekansı (Hz)	Kaynak Yarıçapı (km)	Moment Büyüklük (M_w)
BTMN	5.039	27.9	0.615	1.9	5.155
SVAN	4.898	27.4	0.56	1.9	5.102
SIRN	5.048	27.6	0.686	2.1	5.156
DIYA	4.998	27.9	0.589	1.9	5.19
TVAN	5.029	27.4	0.551	1.9	5.253
ECAT	5.048	27	0.557	1.9	4.945
CMKT	4.998	27.1	0.588	2.1	5.112
CLDR	5.119	27.7	0.715	2.1	5.142
AKDA	4.998	27.6	0.271	2	4.944
DYDN	5.012	27	0.584	2	5.1
ATAB	5.016	27.6	0.536	1.9	5.09
KEMA	5.109	27.4	0.596	2	5.12
KELT	4.886	27.8	0.598	2.1	5.118
AKCD	5.012	27.7	0.513	1.9	4.99
CUGUR	5.012	27.2	0.604	1.9	4.979
Aritmetik Ortalama	5.015	27.487	0.571	1.973	5.098
Standart Sapma	0.062	0.304	0.098	0.088	0.093

Ayrıca, HASH çözümü yardımıyla RFOC (Lees 2012) kullanılarak Siirt-Kurtalan depremi P, Sv ve Sh

dalgaları yayılım paterni grafiksel olarak elde edilmiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Birinci düğüm HASH çözümü olan (326, 84, 178) siyah kalın çizgi, ikinci düğüm düzlemi yeşil çizgi, P dalgası yayılım paterni (sol), ortadaki ve sağda verilen projeksiyon ağları sırasıyla Sv ve Sh dalgası yayılım paternleridir. P, Sv ve Sh yayımları için kırmızı kısımlar çekme, mavi ise itme yönlerini gösterir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bitlis-Zagros Kenet Kuşağı içinde meydana gelen Siirt-Kurtalan depremi, bölgenin uzun zamandır suskun olması nedeniyle dikkat çekicidir. Bu çalışmada 3 Aralık 2020 tarihinde yerel saatle 08.45'te Bitlis-Zagros Kenet Kuşağı yakınında meydana gelen Siirt-Kurtalan depreminin kaynak özellikleri (spektral ve yayılım paterni) incelenmiş ve odak mekanizma çözümleri P-dalgası polaritelerinden hesaplanıp diğer deprem veri merkezleri tarafından yapılan çözümlerle karşılaştırılmıştır.

Buna göre, depremin dış merkezi HYPOINVERSE (Klein 2014) yöntemi kullanılarak Kozlu-Narlık Fayı (Perinçek 1983) yakınında (38.048°K enlemi ve 41.746°D boylamında) bulunmuştur. P- dalgası ilk hareket yönleri kullanılarak depremin fay düzlemi çözüm parametreleri olan doğrultu, eğim ve kayma değerleri sırasıyla HASH yazılımı ile 326, 84, 178 derece olarak hesaplanmıştır. Buna göre, kaynak parametreleri diğer sismoloji merkezlerinin yayınladığı değerlerle uyumlu olarak elde edilmiştir.

Yüksek kaliteli S/G (sinyal/gürültü) oranı iyi olan istasyonların T (transverse) bileşeni kullanılarak hesaplanan S dalgası yer değiştirme spektrumu ortalamaları ve standart sapmaları ile depremin köşe frekansı 0.571 (± 0.098) Hz, gerilim boşalması (σ) 27.487 (± 0.304) bar, kaynak yarıçapı 1.973 (± 0.088) km, momenti (M_0) $5.015 \cdot 10^{16}$ (± 0.062) Nm (Newton-metre) ve moment büyüklüğü (Mw) 5.1 olarak tespit edilmiştir. Gerilim boşalması 27.487 (± 0.304) bar olarak hesaplanmıştır ve bu değer Mw5.1 büyüklüğündeki bir deprem için beklenen limitlerdedir (Ali ve Shieh 2013). Ayrıca yine HASH yazılımı ile elde edilen sonuçlar kullanılarak, P-Sv ve Sh dalgaları yayılım paternleri RFOC (Lees 2012) yazılımı yardımıyla gösterilmiştir. Yayılım paterni, S dalga spektrum parametrelerinin hesaplanmalarını güvenilir olarak vermiştir.

Bindirme sistemlerinde, bindirme düzlemlerine ait yan yüzeylerin verev atımlı bindirmeler veya bindirme bileşenli doğrultu atımlı faylar olarak

davranabilecekleri bilinmektedir (Morley 2009). Bu çalışmada elde edilen kaynak mekanizma çözümü, Seyitoğlu (2020)'de önerilen Siirt-Kurtalan depreminin sol yanal atımlı bir fayda meydana gelmiş olabileceği görüşünü desteklemektedir. Buna göre, HASH yazılımı ile bulunan ikinci düğüm düzlem çözümü, sol yanal atımlı fay için doğrultu, eğim ve kayma değerleri (derece olarak) 56, 88 ve 6'dır. Ayrıca, Mw5.1 büyüklüğündeki bir deprem sonrasındaki artçı depremler incelendiğinde $M_L 2.6$ 'dan daha büyük artçı etkinliğin gözlenmemesi ilginç sayılabilir. Bu deprem için beklenen en büyük artçı çok (yaklaşık M4 ve civarı) henüz oluşmamıştır.

Uzun zamandan beri suskun olan Bitlis-Zagros Kenet Kuşağı üzerinde bulunan bölgede, Siirt ili güneyinde fazla deprem istasyonu olmaması önemli bir sorun olarak görülmektedir. Bu nedenle söz konusu bölgede istasyonlar kurulması ve olası depremlerin etkinliğinin gözlenmesi yararlı olabilir. Ayrıca, bölgenin detaylı kabuk hız yapısı çalışmalarının da yapılması, hassas deprem parametrelerinin hesaplanması ve aktif fayların detaylı izlenebilmesi açısından önemlidir.

Teşekkür

Bu makalenin gelişmesinde görüşleri ile katkıda bulunan hakemlere ve Dr. Recep ÇAKIR'a teşekkür ederim.

5. Kaynaklar

- Aki, K. and P. G. Richards, 1980. Quantitative Seismology, 1st ed., W. H. Freeman and Company, San Francisco, 932.
- Ali, W. and Shieh, S., 2013. Earthquake Repeat Time, Stress Drop, Type of Slip and Earthquake Magnitude, *Journal of Geology & Geosciences*, Volume 2, Issue 2, 1-8.
- Allen M., Jackson J. and Walker R., 2004. Late Cenozoic Reorganization of the Arabia-Eurasia Collision and the Comparison of Short-Term and Long-Term Deformation Rates. *Tectonics*, 23: doi:10.1029/2003TC001530.
- Arpat, E., 1977. 1975 Lice Depremi, *Yeryuvarı ve İnsan*, 15-27.

- Barka, A. and Reilinger, R., 1997. Active Tectonics of the Eastern Mediterranean Region: Deduced from GPS, Neotectonic and Seismicity Data, *Annali di Geofisica*, XL **3**, 587-610.
- Baştuğ, C., 1976. Bitlis Napının Stratigrafisi ve Güneydoğu Anadolu Sütur Zonunun Evrimi, *Yeryuvarı ve İnsan*, **1/3**, 55–61.
- Bilek, S. L., Schwartz, S.Y. and DeShon, H.R., 2003. Control of Seafloor Roughness on Earthquake Rupture Behavior, *Geology*, **31**, 455–458.
- Brune, J.N. 1970. Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, **75**, 4997–5009.
- Campbell, K.W., 2003a. Prediction of Strong Ground Motion Using the Hybrid Empirical Method: Example Application to Eastern North America, *Bulletin of Seismological Society of America*, **93**, 1012–1033.
- Campbell, K.W. and Bozorgnia, Y., 2003b. Updated Near-Source Ground Motion, Attenuation Relations for the Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration and Acceleration Response Spectra, *Bulletin of Seismological Society of America*, **93**, 314–331.
- Carena, S. and Suppe, J., 2002. Three-dimensional imaging of active structures using earthquake aftershocks: the Northridge thrust, California, *Journal of Structural Geology*, **24**, 887–904.
- Emre, Ö., Duman, T., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş., Şaroğlu, F., 2013. Active fault map of Turkey with and explanatory text. *Special Publication Series*, **30**, General Directorate of Mineral Research and Exploration.
- Eyidoğan, H., 2020. *bilimvegelecek.com.tr*, 3 Aralık-2020 Kurtalan-Siirt Depremi Mw 5.0 Türkiye'nin Doğusunda Tektonik Sıkışmanın Canlı Olduğunu Gösteriyor.
- Eyidoğan, H., 1983. Bitlis-Zağros bindirme ve kıvrımlı kuşağının sismotektonik özellikleri. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, 112.
- Gomberg, J.S. and Ellis, M.A., 1994. Topography and tectonics of the central New Madrid Seismic zone: results of numerical experiments using a three-dimensional boundary-element program, *Journal of Geophysical Research*, **99**, 20, 299–310.
- Hall, R., 1976. Ophiolite emplacement and the evolution of the Taurus suture zone, southeastern Turkey: *Geological Society of America Bulletin*, v. **87**, 1078–1088.
- Haney, M.M., Power, J., West, M., Michaels, P., 2012. Causal Instrument Corrections for Short-Period and Broadband Seismometers, *Seismological Research Letters*, Volume **83**, Number 5, 834-845.
- Hardebeck J.L. and Shearer P.M., 2002. A new method for determining first-motion focal mechanisms. *Bulletin of Seismological Society of America*, 92:2264–2276. <https://doi.org/10.1785/0120010200>.
- Hardebeck J.L. and Shearer P.M., 2003. Using S/P Amplitude Ratios to constrain the Focal Mechanisms of Small Earthquakes, *Bulletin of Seismological Society of America*, **93**, 2434–2444.
- Hsu, S. K. and Sibuet, J.C., 1995. Is Taiwan the result of arc-continent or arc-arc collision? *Earth Planetary Science Letters*, **136**, 315–324.
- İmamoğlu, M.Ş. ve Çetin, E., 2007. Güneydoğu Anadolu Bölgesi ve Yakın Yöresinin Depremselliği, *D.Ü.Ziya Gökalp Eğitim Fakültesi Dergisi*, **9**, 93-103.
- Jackson, J. and McKenzie, D., 1984. Active tectonics of the Alpine- Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, **77**, 185–264.
- Janutyte, I. and Lindholm, C., 2017. Earthquake source mechanisms in onshore and offshore Nordland, northern Norway. *Norwegian Journal of Geology* **97**, 227–239.
- Klein, F., 2014. User's Guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran Program to Solve for Earthquake Locations and Magnitudes, *United States Department of the Interior Geological Survey*, Open File Report 02-171 revised June 2014, Version 1.40.
- Lay, T. and Wallace, T.C., 1995. Modern Global Seismology, Volume 58, Academic Press, San Diego. 1st Edition, 536.
- Lee, W.H.K. and Lahr, J.C., 1972. HYPO71: a computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes, USGS Numbered Series, Open-File Report, 72-224, 10.3133/ofr72224.
- Lees, J.M., 2012. Open and Free: Software and Scientific Reproducibility, opinion, *Seismological Research Letters*, Vol. **83**, 751-752.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Georgiev, I., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A.,

- Paradis, D., Peter, Y., Prilepi, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksoz, M.N., Veis, G., 2000. GPS Constraints on Crustal Movements and Deformations in the Eastern Mediterranean, 1988-1997: Implications for Plate Dynamics, *Journal of Geophysical Research*, Vol. **105**, No.B3, 5695-5719.
- McKenzie, D.P., 1972. Active Tectonics of the Mediterranean Region, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **30**, 109-185.
- McQuarrie, N., Stock, J.M., Verdel, C. & Wernicke, B.P., 2003. Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions, *Geophysical Research Letters*, **30**, doi:10.1029/2003GL017992.
- Morley, C., 2009. Geometry of an oblique thrust fault zone in a deepwater fold belt from 3D seismic data, *Journal of Structural Geology*, **31**, 1540-1555.
- Okay, A.I., Zattin, M. and Cavazza, W., 2010. Apatite fission-track data for the Miocene Arabia-Eurasia collision, *Geology*, v. **38**, 35-38, <https://doi.org/10.1130/G30234.1>.
- Ottomoller V. and Havskov J., 2017. SEISAN earthquake analysis software for Windows, Solaris, Linux and MacSx.
- Perinçek, D. ve Kozlu, H., 1983. Stratigraphy and structural relations of the units in the Afşin-Elbistan-Doğanşar region (Eastern Taurus) In Tekeli, O. and Göncüoğlu, M.C. (eds), *Geology of the Taurus Belt*. Ankara-Turkey, 181-197.
- Reasenber, P. and Oppenheimer, D., 1985. FPFIT, FPLOT, and FPPAGE: FORTRAN computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions, U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 85-739, 109 Pp.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., Arrajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrova, 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*, **111**, B05411, doi: 10.1029/2005JB004051, 1-26.
- Rowley, D.B., 1996. Age of initiation of collision between India and Asia: A review of stratigraphic data: *Earth and Planetary Science Letters*, v. **145**, 1-13.
- Rundquist, D. V., and Sobolev, P.O., 2002. Seismicity of mid oceanic ridges and its geodynamic implications: a review. *Earth-Science Reviewer*. **58**, 143-161.
- Scholz, J.-R., Barruol, G., Fontaine, F. R., Sigloch, K., Crawford, W. C., Deen, M., 2016. Orienting Ocean-Bottom Seismometers from P-wave and Rayleigh wave Polarizations, *Geophysical Journal International*, **208**, 1277- 1289.
- Seyitoğlu G., Esat K. and Kaypak B., 2017. The neotectonics of southeast Turkey, northern Syria and Iraq: the internal structure of the South East Anatolian Wedge and its relationship with the recent earthquakes. *Turkish Journal of Earth Sciences*, **26**, 105-126.
- Seyitoğlu G, Esat K, Kaypak B, Tooric M, Aktuğ B., 2018. The Neotectonics of Eastern Turkey, Northwest Iran, Armenia, Nahçıvan and Southern Azerbaijan: the rhomboidal cell model in the internal deformation of Turkish – Iranian Plateau. In: *71st Geological Congress of Turkey Proceedings*, 661-664.
- Seyitoğlu, G., 2020. 2020.12.03 (Mw=5.0) Kurtalan (Siirt) depreminin kaynağı üzerine bir tartışma, *Technical Report*, Ankara Üniversitesi.
- Seyitoğlu G., Esat K., Kaypak B., Toori M., Aktuğ B. 2019. Internal deformation of the Turkish-Iranian Plateau in the hinterland of Bitlis-Zagros Suture Zone. In: *Tectonic and Structural Framework of the Zagros Fold-Thrust Belt* (Ed. Farzipour Saein, A.) Elsevier, 161-244. ISBN: 978-0-12-815048-1.
- Soysal, H., Sipahioğlu, S., Koçak, D., Altınok, Y., 1981. Türkiye ve çevresinin tarihsel deprem kataloğu , MÖ 2100-MS 1900. TÜBİTAK, Proje No. TBAG 314, 87s., Ankara.
- Stacy, S., Gombert, J. and Cocco, M., 2005. Introduction to special section: stress transfer, earthquake triggering, and time-dependent seismic hazard, *Journal of Geophysical Research*, **110**, B05S01.
- Scherbaum, F., Johnson, J., 1992. Programmable Interactive Toolbox For Seismology Analysis. IASPEI Software Library, *Bulletin of Seismological Society of America*, **5**, 269.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Boray, A., 1987. Türkiye'nin diri fayları ve depremsellikleri, *MTA Derleme* No:8174, 394, 136, 269-282.
- Şengör, A.M.C., Görür, N. and Şaroğlu, F., 1985. Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study, in *Strike-slip Deformation, Basin Formation and Sedimentation*, edited by K. T. Biddle and N. Christie-Blick, *Society of*

- Economic Paleontologists and Mineralogists (Tulsa)*, Sp. Publ. **37**, 227–264.
- Şengör, A.M.C., 1980. Türkiye'nin Neotektoniğinin Esasları, *Türkiye Jeoloji Konferanslar Serisi Yayınları* No: **2**.
- Şengör, A.M.C. and Yılmaz, Y., 1981. Tethyan Evolution of Turkey: A Plate Tectonic Approach, *Tectonophysics*, c. **75**, s. 81-241.
- Toda, S., Stein, R.S., Sevilgen, V. and Lin, J., 2011. Coulomb 3.3 Graphic-rich deformation and stress-change software for earthquake, tectonic, and volcano research and teaching—user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1060, 63 p., available at <http://pubs.usgs.gov/of/2011/1060/>.
- Yılmaz, Y., 1993. New evidence and model on the evolution of the southeast Anatolian orogen. *Geological Society of American Bulletin*, **105**: 251-271.
- Yılmaz, Y., Genç, S., Gürer, Ö.F., Bozcu, M., Yılmaz, K., Karacık, Z., Altunkaynak, S. and Elmas, A., 2000. When did Western Anatolian Grabens Begin to Develop? In: Bozkurt, E., Winchester, J.A., Piper, J.D.A. (Eds.), *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area*, *Geological Society of London, Spec. Publ.*, 353–384.
- Wells, D. L. and Coppersmith, K. J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bulletin of Seismological Society of America*, **84(4)**, 974-1002.
- Wessel, P. and Smith, W.H.F., 1998. New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. American Geophysical Union*, vol. **79** 47, 579.
- İnternet kaynakları**
- 1-<https://tdvms.afad.gov.tr> (15.12.2020)
 - 2-<https://depem.afad.gov.tr/sondepremler> (15.12.2020)
 3. <http://seisan.info/> (15.12.2020)