



Gediz (Alaşehir) Grabeni'nde Gelişen A-Sismik Yüzeysel Deformasyonların Kökeni
Origin of a-Seismic Surface Deformations in the Gediz (Alaşehir) Graben

Semih Eski^{1,2*} , Hasan Sözbilir^{2,3} 

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uygulamalı Jeoloji, Tınaztepe Kampüsü, 35390 İzmir

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Tınaztepe Kampüsü, 35390 İzmir

³ Dokuz Eylül Üniversitesi, Deprem Araştırma ve Uygulama Merkezi, Tınaztepe Kampüsü, 35390 İzmir

• Geliş/Received: 14.08.2023 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 09.11.2023 • Kabul/Accepted: 16.11.2023
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 4: 0840245 • Baskı/Printed:

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey

Öz: Gediz (Alaşehir) Grabeni'nde 1969 Alaşehir depreminden sonra yüzeysel kırığı oluşturacak büyüklükte bir deprem olmamasına rağmen, Alaşehir-Sarıgöl arasında ciddi yüzeysel çatlakları ve çöküntüler meydana gelmektedir. Bölgede yapılan çalışmalarda, bu deformasyonların tektonik etkilerden mi yoksa yeraltı su seviyesi (YAS) değişimlerinden mi kaynaklandığı konusunda henüz bir fikir birliğine varılamamıştır.

Bu araştırma, PS-InSAR tekniği kullanılarak elde edilen 2B'li düşey ve yatay hız oranlarının jeolojik bilgiler ışığında değerlendirilmesini ve deformasyona neden olan tektonik modelin ortaya konmasını hedeflemiştir. Bunun için 2015-2023 yılları arasındaki Sentinel-1 uydu görüntüleri kullanılmıştır. Buna göre Sarıgöl Fayı'nın tavan bloğunda deformasyon hızı -26 mm/yıl, taban bloğunda +3 mm/yıl'dır. Bu da aktif tektonik rejim altında Bozdağ Horstu'nun yükselirken, grabenin sürekli çöktüğünü göstermektedir. Alınan Şerit profiller, graben kenar faylarının havzanın çöküntü geometrisini doğrudan kontrol ettiğini göstermektedir. Bulgularımıza göre 11 mm/yıl (batıya) ile 7 mm/yıl (doğuya) zıt yönlü yatay hareketlerin maksimum düşey deformasyon alanında gözlenmesi, çökmenin yatay düzlemde radyal yayılımla, düşeyde ise senformal geometride gerçekleştiğini gösterir. Yani, yatay hareket bölgedeki KB-GD yönlü sıkışmadan ziyade, havzanın çökme rejimini kontrol eden güney kenar faylarının geometrisi ve türüyle ilişkilidir. Güney kenara doğru artan, havzanın içine doğru azalan düşey deformasyonlar, listrik geometrili ana graben fayının tavan bloğundaki domino tarzı geri dönüşe işaret eder. Deformasyonların Alaşehir'in batısından itibaren gözükmemesi, literatürde bahsedildiği gibi Alaşehir ve Salihli alt havzalarının örtülü yarı düşey bir fayla sınırlanmış olmasından kaynaklanır. Bazı noktalarda düşey hız ve YAS değişimlerine ait tutarsızlıkların gözlenmesi ve bu noktaların Alaşehir depremi ile oluşmuş yüzeysel kırıklarına yakın olması, deformasyonların önemli bir bölümünün tektonik etkiler altında meydana geldiğini düşündürmektedir.

Sonuç olarak deformasyonlar, 1969 Alaşehir depreminin kosismik evresinde gelişen sismik atımlara ek olarak, intersismik dönemde meydana gelen a-sismik kaymalarla oluşmuştur. Bu nedenle mevcut deformasyonları tek başına yeraltı su seviyesi değişimlerine bağlamak hatalı modellemelere neden olabilir. YAS'taki ani değişimler, intersismik dönemde meydana gelecek a-sismik deformasyonun, tektonik kontrol altında gelişen sediman konsolidasyonu hızlandırmasına ve deformasyonların hızlı bir şekilde gerçekleşmesine neden olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Aktif tektonik, Gediz Grabeni, PS-InSAR, radar interferometri, Sarıgöl-Alaşehir/Manisa, StaMPS.

Abstract: Although there has been no earthquake in the Gediz (Alaşehir) Graben since the 1969 Alaşehir earthquake to cause a surface rupture, serious surface cracks and depressions occur between the Alaşehir and Sarıgöl area. Studies performed in the region have not reached a consensus on whether these deformations are due to tectonic effects or groundwater level changes.

Our research claims to evaluate the 2D vertical and horizontal velocity ratios obtained by using the PS-InSAR technique in the light of geological information and to establish the tectonic model that caused the deformation. For this, Sentinel-1 satellite images between 2015-2023 were used. Accordingly, the deformation rate in the hanging-wall of the Sarıgöl Fault is -26 mm/y and +3 mm/y in the footwall. This means that under the tectonic regime, the Bozdağ Horst is uplifting while the graben is continuously collapsing. The Swath profiles clearly show that the graben border faults directly control the subsidence geometry of the basin. The fact that we obtained 11 mm/y (westward) and 7 mm/y (eastward) horizontal movements in opposite directions in the area of the maximum vertical deformation area indicates that the subsidence occurred with radial bulging in the horizontal plane and in a synformal geometry vertically. That is, the horizontal movement is related to the geometry and type of the southern border faults that directly control the subsidence regime of the basin, rather than the NW-SE directional compression in the region. In addition, the vertical deformations, which increase towards the southern margin and decrease towards the interior of the basin, point that the main graben fault with listric geometry may have been caused by a domino-style reversal in the hanging-wall. The fact that the deformations are not visible from the west of Alaşehir is due to the fact that the Alaşehir and Salihli sub-basins mentioned in the literature are limited by a covered semi-vertical fault. The observations of inconsistencies in vertical velocity and groundwater level changes at some points and the fact that these points are close to surface ruptures caused by the Alaşehir earthquake suggest that a significant part of the deformations occurred under tectonic effects.

As a result, the deformations between Alaşehir and Sarıgöl occurred with a-seismic creep that occurred during the ongoing interseismic phase, in addition to the seismic pulses that developed in the coseismic phase of the 1969 Alaşehir earthquake. Therefore, attributing current deformations to groundwater level changes alone may lead to erroneous modellings. Sudden changes in the groundwater level cause the a-seismic deformation that will occur during the interseismic phase to accelerate the sediment consolidation developed under tectonic control and cause deformations to occur rapidly.

Keywords: Active tectonics, Gediz Graben, PS-InSAR, radar interferometry, Sarıgöl-Alaşehir/Manisa, StaMPS.

GİRİŞ

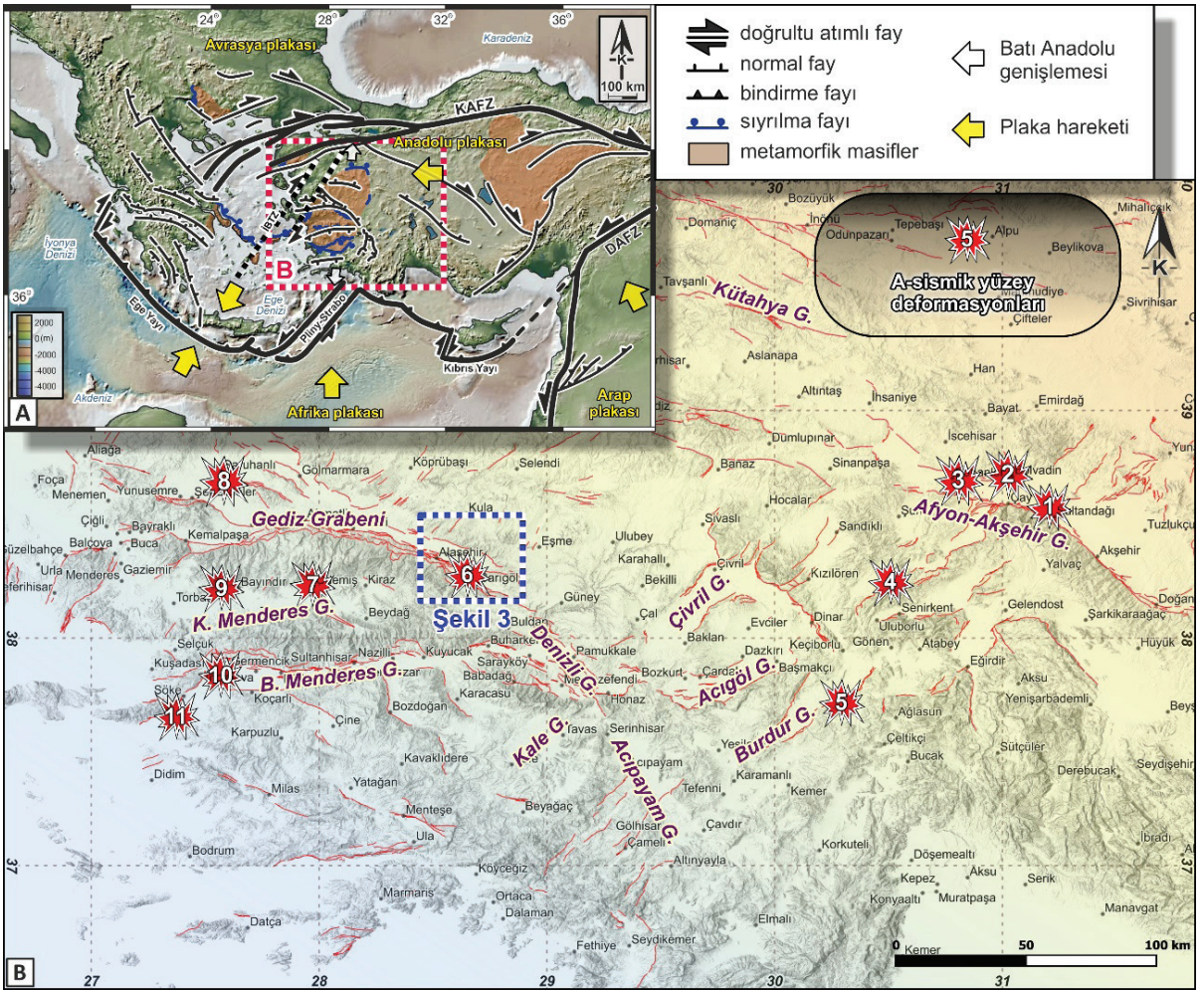
Son yıllarda özellikle Batı Anadolu'da gelişen a-sismik yüzey deformasyonlarının önemli bir bölümünün eski yüzey kırıklarını izlemesi dikkat çekicidir. Batı Anadolu Genişleme Bölgesi (BAGB)'nde (Eyidoğan ve Jackson, 1985; Şengör vd., 1985; Şengör, 1987; Jackson ve McKenzie, 1988; Ambraseys 1988; Reilinger vd., 1997; McClusky vd., 2000; Bozkurt, 2001a; Taymaz vd., 2007; Biryol vd., 2011) bulunan grabenler içerisinde meydana gelen ve son 30 yıldır rapor edilen a-sismik yüzey deformasyonlarının lokasyonlarını Gediz (Alaşehir), Küçük Menderes, Büyük Menderes, Burdur, Gülovası ve Afyon-Akşehir grabenleri olarak sıralamak mümkündür (Şekil 1). Örneğin Bolvadin (Afyon-Akşehir Grabeni)'nde yüzey deformasyonlarının Şekil 1b'de 2 numaralı yıldızla gösterilen Bolvadin Fayı'nın eski yüzey kırığı üzerinde geliştiğine dair jeodezik ve paleosismolojik veriler elde edilmiştir (Özkaymak vd., 2017). Bu çalışmaya konu olan

Gediz (Alaşehir) Grabeni içinde yer alan ve yüzey deformasyonlarının gözlemlendiği Alaşehir-Sarıgöl arasında kalan alanda, tıpkı Bolvadin Fayı örneğinde olduğu gibi, 1969 depreminin (M:6,9) yüzey kırığı bulunmaktadır (Şekil 2a). Bu nedenle, Özkaymak vd. (2017)'nin kurmuş olduğu benzer deformasyon-yüzey kırığı ilişkisini, Alaşehir-Sarıgöl arasında kalan alanda araştırmak amacıyla bu çalışmanın temelleri atılmıştır.

Bu çalışmada Gediz Grabeni'nin doğu ucunda yer alan Alaşehir ile Sarıgöl ilçeleri arasındaki bölgede *Persistent Scatterer-InSAR* (PS-InSAR) yöntemi kullanılarak yüzey deformasyonları incelenmiş, yapılan arazi çalışmaları ile bölgenin aktif tektoniği ve güncel deformasyonlarının nedenleri tartışılmıştır. Uzun periyotta elde edilen görüntüler ile 18 Ekim 2020'de yağın şiddetli yağmur ve dolu sonrası Sarıgöl'de gelişen yarıkların, 1969 Alaşehir depremi sonucu oluşan yüzey kırıkları ve grabenin çökme geometrisi ile ilişkisi tartışılmıştır. Sarıgöl Aşağı Koçaklar

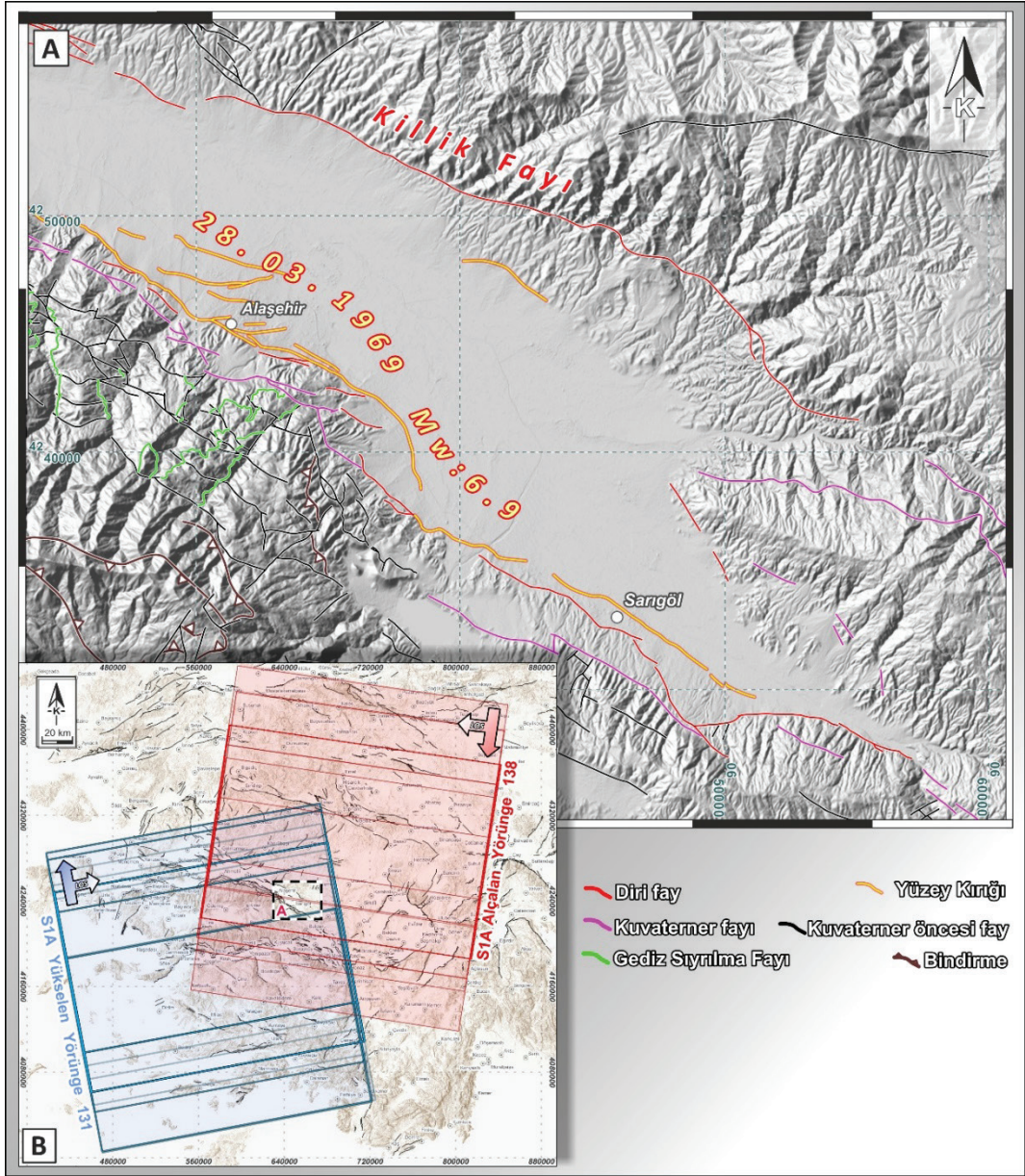
Mahallesi'nde gözlenen yıkımın boyutunu ve hızını ölçmek için arazi çalışmalarının yanı sıra, PS-InSAR yöntemi kullanılarak elde edilen tüm veriler, jeolojik, hidrojeolojik, jeofizik ve jeodezik çalışmalarla birlikte değerlendirilmiş, bölgede gelişen uzun periyotlu deformasyonun etkileri yorumlanmıştır. Tüm bu korelasyonlarla elde edilen bulgular birleştirilerek tektonik çökme modeli oluşturulmuştur. Bu çalışma, bölgenin

çökme geometrisi ile ilişkili tektonik modeli ilk kez ortaya koyarak, gelecekte yapılacak çalışmalara farklı bir bakış açısı kazandırmayı amaçlamıştır. Ayrıca bu çalışma ile aktif tektonik etkiler altında gelişen graben tipi havzalarda çökme geometrisinin, sadece yeraltı su seviyesi ve faylarla kontrol edilmediği, eskiden kalıtsal yapıların da deformasyondaki dağılımda büyük rol oynadığı anlaşılmıştır.



Şekil 1. A) Türkiye'nin ana tektonik hatları ve çalışma alanının Batı Anadolu tektoniğindeki konumu (Bozkurt (2001a)'den uyarlanmıştır). **B)** Batı Anadolu Genişleme Bölgesi'nin (BAGB) aktif havzalarını ve a-sismik yüzey deformasyonlarını gösteren basitleştirilmiş harita.

Figure 1. A) Main tectonic structures of Türkiye and location of study area in the Western Anatolian tectonics (adapted from Bozkurt (2001a)). **B)** Simplified map showing active basins and a-seismic surface deformations of Western Anatolian Extensional Province (WAE).



Şekil 2. A) Çalışma alanının yapısal elemanlarını gösteren COPDEM (30 m.)’den yararlanılarak oluşturulmuş 3 boyutlu Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) haritası (Diri faylar Emre vd. (2018)’den alınmıştır) ve **B)** bu çalışmada kullanılan Sentinel-1 görüntü çerçeveleri.

Figure 2. A) 3D DEM created using COPDEM (30m) showing structural elements of study area (active faults are taken from Emre et al. (2018)) and **B)** Sentinel-1 images frames used in this study.

BÖLGENİN TEKTONİK ÇATISI

Alaşehir ve Sarıgöl, Batı Anadolu Genişleme Bölgesi (BAGB)’nin (Şekil 1a) (Eyidoğan ve Jackson, 1985; Şengör vd., 1985; Şengör,

1987; Jackson ve McKenzie, 1988; Ambraseys 1988; Reilinger vd., 1997; McClusky vd., 2000; Bozkurt, 2001a; Taymaz vd, 2007; Biryol vd., 2011) içindeki önemli tektonik alanlardan biri

olan, iki kenarı faylarla sınırlı dar ve uzun bir geometrideki (Ketin, 1968) Gediz Grabeni (Alaşehir)'nin doğu ucunda yer alır (Şekil 1b). BAGB, farklı çalışmacılara göre; 13,5 mm/yıl (Eyidoğan, 1988), 11,7±5 mm/yıl (Le Pichon vd., 1995), 20 mm/yıl (Reilinger vd., 2006), 10 mm/yıl (Nocquet, 2012) hızla, K-G yönde genişleyen (McKenzie, 1978; Le Pichon ve Angelier, 1979; Taymaz vd., 1991; Price ve Scott, 1994; Seyitoğlu ve Scott, 1996; Genç vd., 2001; Lips vd., 2001; Sözbilir, 2001; Sözbilir vd., 2003a; Sözbilir vd., 2003b; Bozkurt, 2003, 2004; Purvis ve Robertson, 2005; Reilinger vd., 1997; Özkaymak ve Sözbilir, 2008; Nocquet, 2012; Sangu vd., 2020; Şaroğlu ve Güler, 2020; Weiss vd., 2020) ve bu harekete bağlı olarak oluşan yaklaşık D-B uzanımlı normal fay sistemleri ve K-G uzanımlı veriv ve doğrultu atımlı faylarla karakterizedir (Koçyiğit, 1984). Günümüzde BAGB'deki genişlemenin KD-GB yönde gerçekleştiğini belirten çalışmalar da mevcuttur (Dumont vd., 1979; Angelier vd., 1981; Zanchi ve Angelier, 1993; Saatçılar vd., 1999; Rojay vd., 2005; Poyraz vd., 2019). Güneydoğu Ege bölgesi Avrasya'ya göre, saat yönünün tersine ve güneybatı Ege'ye göre 10 ± 1 mm/yıl hızla Helen hendeğine doğru (yani GD'ye doğru) hareket ederek, bu tutarlı hareketten önemli ölçüde sapar (McClusky vd., 2000).

Ege genişleme rejimine (Şengör, 1979) neden olan olay, Dewey ve Şengör (1979)'a göre geç Miyosen sonrası, Şengör vd. (1985)'e göre erken Miyosen'de Anadolu'nun Avrasya ve Afrika'ya göre batıya doğru hareketidir. Helen Yayı'ndaki litosferik dalımın tavan bloğundaki evriminin neden olduğu genişleme, farklı hızlara sahip levhanın "yatay" gerilmesinden (*no slab pull break-off*) kaynaklanır (Innocenti vd., 2005). Ege'deki kabuk incelmesinin K-G genişleme yönünde bir örnek olmadığı da bilinmektedir (Zhu vd., 2006). BAGB içindeki Alaşehir (Gediz) ve Büyük Menderes grabeninin tavan bloğu çökellerinden elde edilen sporomorf tayinleri, D-B gidişli bu iki ana genişlemeli yapının

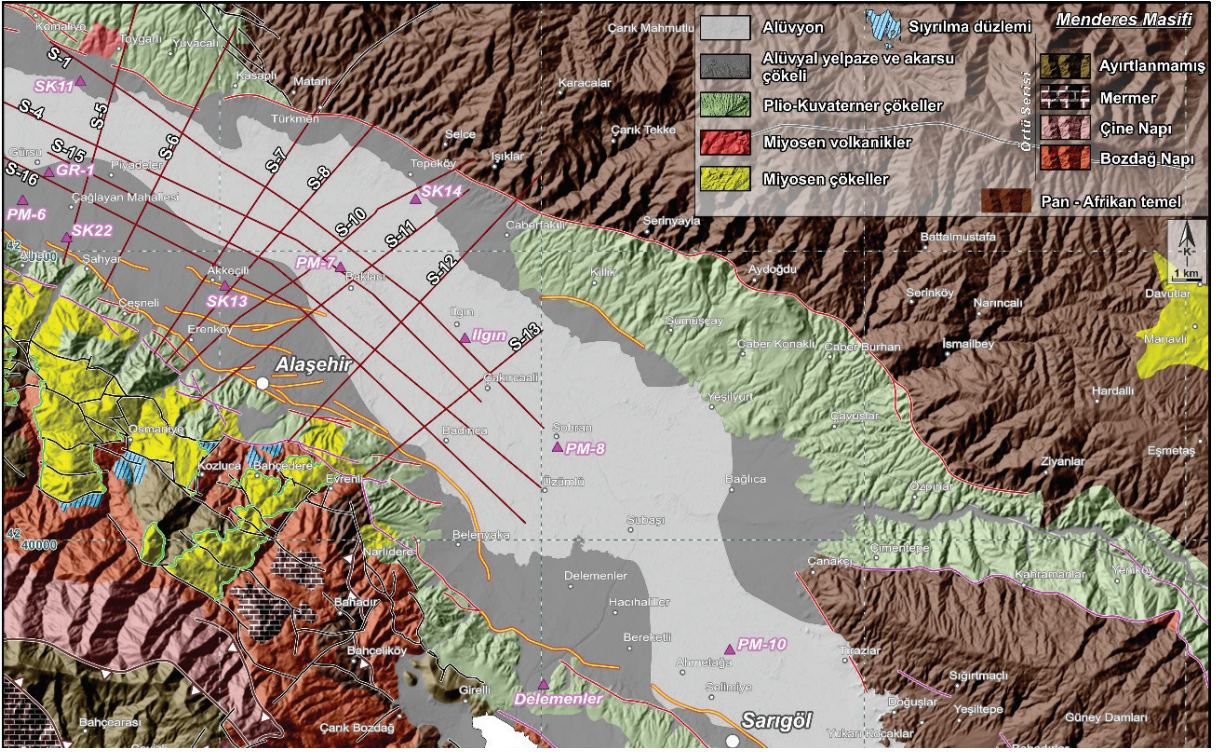
yaşının erken Miyosen olduğunu göstermektedir (Seyitoğlu ve Scott, 1996). Literatürdeki birçok çalışmada (Yılmaz vd., 2000; Hetzel vd., 1998; Seyitoğlu vd., 1992; Seyitoğlu ve Scott 1991, 1994, 1996; Seyitoğlu vd., 2002; Bozkurt, 2003; Ring vd., 2003; Purvis ve Robertson, 2004; Purvis vd., 2005; Thomson ve Ring, 2006; Sözbilir, 2002; Ersoy ve Helvacı, 2007; Çiftçi ve Bozkurt, 2009b; Öner ve Dilek, 2011; Gessner vd., 2013; Jolivet vd., 2013; Sümer vd., 2013; Uzel vd., 2015; Uzel vd., 2020) genişleme yaşının erken Miyosen olduğu konusunda hemfikirken, genişleme yaşını Oligosen dönemine kadar indiğini ifade eden çalışmalar da vardır (Lips vd., 2001; Işık ve Tekeli, 2001; Gessner vd., 2001a, 2001b; Bozkurt vd., 2006; Dilek vd., 2009; Forster ve Lister 2009; van Hinsbergen vd., 2010; Ersoy vd., 2010; Asti vd., 2018).

Aktif fay düzlemlerinde yapılan paleostres çalışmalarına göre, Gediz Grabeni geç Pliyosen'den beri K-G, KKD-GGB, KB-GD gibi ortalama K-G Neojen genişleme yönü göstermektedir (Temiz, vd, 1998; Bozkurt, 2001b; Bozkurt ve Sözbilir, 2006; Rojay, 2009; Çiftçi ve Bozkurt, 2009a ve b; Tekin vd., 2022). Koçyiğit vd. (1999), Gediz Grabeni'nin kısa bir sıkışma fazıyla ayrılan iki farklı genişleme aşamasıyla oluştuğunu belirtmektedir. Hali hazırda bu kanıtı destekleyen çok sayıda çalışma da (Bozkurt, 2000 ve 2001a; Yılmaz vd., 2000; Kaya vd., 2004; Bozkurt ve Rojay 2005; Beccaletto ve Steiner, 2005; Erkül vd., 2005; Bozkurt ve Sözbilir, 2004 ve 2006; Uzel ve Sözbilir, 2008; Emre ve Sözbilir, 2007; Gürer vd., 2009; Rojay, 2009; Gürboğa vd., 2013; Göktaş ve Hakyemez, 2015; Rojay vd., 2019) bulunmaktadır. Bunun yanında, Gediz Graben Sistemi Fayları (Emre vd., 2018) içerisinde yer alan Manisa Fayı ve Akçapınar Segmenti'nde görülen aktarım rampası (*relay ramp*), bölgesel genişleme yönüne dik gelişen lokal stres değişimlerini yansıtmaktadır (Bozkurt ve Sözbilir, 2006; Çiftçi ve Bozkurt, 2007). Grabeni sınırlayan normal fayların dağlara paralel

basamaklı bir yapı sunduğu (Arpat ve Bingöl, 1969; Koçman, 1985) ve aktif genişlemeli fay izlerinin baskın olarak grabenin güney kenarında izlendiği (Roberts, 1988) çok eski çalışmalardan beri bilinmektedir (Şekil 3). Bozdağ Horstu'nda bulunan akarsulardan alınan uzunluk profillerinde, en az 3 ayrı gençleşme seviyesi gösteren basamakları (Çelik, 1991), aynı zamanda kalın Neojen tortulları sınırlamaktadır (Paton, 1992). Buradaki basamak tipi normal faylar, tortul kayalarda 15°'lik dönüşle eğimlenmeye neden olmuştur (Hetzel vd., 1995). Bu dönüşün, Gediz Sıyrılma Fayı'nın tavan bloğunda meydana geldiği (Savaşçın vd., 1999) ve fayların re-aktivasyonu ile süreksiz olan ve örtüşen daha küçük basamaklı bitişik fayların etkileşimiyle birleşerek fay segmentlerini oluşturduğu bilinmektedir (Bozkurt ve Sözbilir, 2006) (Şekil 3). Sıyrılma fayı, 0,5°-1°/My oranda güneye devrilme (Buscher vd., 2013) nedeniyle, Yuvarlanan Reze (*Rolling Hinge*)'in bir sonucu olarak 40°-60°'lik başlangıç eğiminden günümüzde 0°-20°'lik daha düşük bir eğime gerilemiştir (Gessner vd., 2001b). Tavan bloğunda bulunan tüm yapıların ardışık gelişimi, grabenleşme modellerinden biri olan Yuvarlanan Reze Mekanizması (*flexural rotation/rolling hinge*) olarak adlandırılmıştır (Seyitoğlu vd., 2002). Havzaya doğru gençleşen basamak yapıları, rift sınırının havzaya doğru göçü olarak da yorumlanmaktadır (Çiftçi ve Bozkurt, 2010). Bodur vd. (2023)'ün jeodinamik modellerinde, bu basamak yapıları yüksek açılı normal fayların, kabuksal akışın barındırdığı yatay bir eksen etrafında giderek ~40° daha sığ eğimlere doğru döndüğünü göstermektedir.

Havzaya doğru ilerleyen bu basamak faylarının en son ürünü, 28.03.1969 tarihli Alaşehir depreminin yüzey kırığıdır (Şekil 2a ve 3). Depreme neden olan fay, ilk olarak Hancock ve Barka (1987) tarafından Alaşehir Fayı olarak adlandırılmış, günümüzde ise Gediz Graben Sistemi fayları içine dahil edilerek Alaşehir Segmenti (Emre vd., 2018) olarak tanımlanmıştır. Meydana gelen $M_s=6,5$ (6,9) büyüklüğündeki

deprem, 49 can kaybına ve 4651 konutun yıkılmasına veya ağır hasar görmesine neden olmuştur (Arpat ve Bingöl, 1969). Deprem sırasında Kent (2015)'e göre 30 km, Arpat ve Bingöl (1969)'a göre 12 km uzunluğunda yüzey kırığı meydana gelmiştir. Emre vd. (2018)'in haritası baz alınarak, bu çalışmada hesaplanan uzunluk ise yaklaşık 40 km'dir (Şekil 3). Koca vd. (2011) karotlu sondajlardan elde edilen bilgiler ışığında bölgede meydana gelen deformasyonların nedenlerini tartışmış, grabeni sınırlayan fayların yüzey hasarlarında etkili olduğu sonucuna varmıştır. Gediz Grabeninde GNSS (Poyraz vd., 2015; Poyraz vd., 2019; Tiryakioğlu vd., 2019; Doğan vd., 2022) ve InSAR (Poyraz ve Hastaoğlu, 2020; Hastaoğlu vd., 2023) yöntemleri kullanılarak yapılmış sınırlı sayıda çalışma bulunmakla birlikte, elde edilen sonuçlar genel olarak jeodezik temelde ve kısa periyotta elde edilen görüntüler ve ölçümler kullanılarak değerlendirilmiştir. 28.03.1969 tarihli Alaşehir depreminden sonra yüzey kırığı oluşturacak büyüklükte depremler olmamasına rağmen, bölgede hali hazırda ciddi yüzey çatlakları ve çöküntüler meydana gelmektedir. 1969 yüzey kırığı boyunca gözlenen güncel yüzey deformasyonlarının nedenleri, Koca vd. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada jeolojik haritalama, morfometrik ölçümler, karotlu zemin sondajı, konsolidasyon deneyleri gibi yöntemler kullanılarak detaylı olarak yorumlanmıştır. Fakat bugüne kadar yapılan birçok çalışmada deformasyonların nedenleri ile ilgili farklı görüşler bulunmaktadır. Bazı çalışmalar meydana gelen deformasyonları mikrosismik aktiviteye (Gürsoy vd., 1997) bağlamış, bazıları ise tektonik krip ile a-sismik olarak meydana geldiğini (Hodgkinson, 1996; Eravcı vd., 2009; Gören, 2016; Doğan vd., 2022) belirtmişlerdir. Koca vd., 2011 ve Poyraz vd., (2019) ise deformasyonların her iki nedenle de meydana geldiğini ifade etmektedir. Yapılan tüm çalışmalardan anlaşılacağı üzere bu deformasyonlar grabenin genişleme rejimi ile doğrudan ilişkilidir.



Şekil 3. Çalışma alanının SYM üzerine giydirilmiş jeoloji haritası. Analizlerde kullanılan yeraltı su seviyesi ölçümü yapılmış kuyuların lokasyonu ve Çiftçi ve Bozkurt (2009a)'da yer alan sismik profil hatları haritada gösterilmiştir. Diri faylar Emre vd. (2018)'den, metamorfik birim yüzlekleri ise Koralay vd. (2011)'den yararlanılarak çizilmiştir.

Figure 3. Geological map of study area overlaid on DEM. (The seismic profile lines in Çiftçi and Bozkurt (2009) and locations of wells used in analyzes, for which groundwater level measurements were performed, are shown on the map. Active faults taken from Emre et al. (2018) and metamorphic unit outcrops drawn using Koralay et al. (2011)).

Graben bazında yapılan GPS ve GNSS hızlarına göre genişlemenin hızı, grabenin batı ucu boyunca 11 mm/yıl ve doğu ucu boyunca 5 mm/yıl'dır (Hodgkinson, 1996). Barka ve Reilinger (1997) göre bu hız 10 ± 5 mm/yıl, Nocquet (2012)'ye göre 6 mm/yıl Öner ve Dilek (2011)'e göre ise Alaşehir Havzası'nda ortalama 6 ile 8-9 mm/yıl'dır.

MATERYALLER ve YÖNTEMLER

Aktif tektoniğin hâkim olduğu alanlarda yapılan ilk jeodezik araştırma 17 Mayıs 1892 Tapanuli-Sumatra depremiyle başlamış (Yeats vd., 2006), Reid (1910)'un 1906 San Francisco

depremi ile ilgili çalışmasıyla birlikte yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Son yıllarda, İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR), zemin deformasyonunu karakterize etmede (Dai vd., 2002; Shahabi ve Hashim, 2015; Anderson vd., 2016; Bozzano vd., 2019) ve levha sınırları boyunca gerinim birikimi ve gerilim oranını değerlendirmede yaygınlaşan bir araç haline gelmiştir (Cigna vd., 2012; Sarychikhina ve Glowacka, 2015; Dánişor vd., 2018; De Novellis vd., 2018; Kim ve Jung, 2018; Ali vd., 2019; Aslan vd., 2019; Blasco vd., 2019). Ancak bu yöntemlerin uygulanması sırasında ortaya çıkabilecek mekânsal ve zamansal kısıtlamaların elde edilecek sonuçlar üzerinde doğrudan veya dolaylı etkileri

bulunmaktadır. Daha doğru sonuçlar için, elde edilen verilerin jeolojik bilgilerle korelasyonunun yapılması gerekir. Böylece coğrafi tehlikelerin yönetimi için daha güvenli bir arazi planlaması ve koordinasyonu sağlanabilir (Zhang vd., 2016).

Türkiye'deki aktif tektonik alanlarda InSAR yönteminin ilk kullanımı (Çakır vd., 2003) 17 Ağustos 1999 İzmit depremi ile başlamış, yer kabuğunun tektonik etkiler altındaki hareketini anlamak adına günümüzde de birçok çalışmada (örn. Çetin vd., 2014; Akoğlu vd., 2018; Aslan vd., 2019; Çağlayan vd., 2019; Doğru, 2020; Tatar vd., 2020; Işık vd., 2021; Oktar vd., 2021; Taymaz vd., 2022; Saber, vd., 2023) kullanılan etkili bir yöntem haline gelmiştir. Tektonik alanların dışında baraj, köprü, elektrik santrali, yerleşim alanı gibi üst yapı, jeotermal alan, heyelan bölgesi vb. yeraltı su seviyesi değişimleri ile gelişen a-sismik çöküntü alanlarının takibi için yapılan sayısız çalışmada da (örn. Abdikan vd., 2014; İmamoğlu vd., 2019 ve 2022; Bayık vd., 2021; Gezgin, 2022) kullanılmaktadır. Günümüzde InSAR, kabuksal stres alanlarındaki deformasyon değişimlerini görüntülemenin yanı sıra, meydana gelen kayma dağılımlarını haritalayarak, sismik ve a-sismik olaylara yanıt vermek için kullanılan bir araç haline gelmiştir (Reid, 1910; Fialko, 2006; Walters, vd., 2011; Elliott vd., 2016; Ingleby ve Wright, 2017).

Yüksek oranda gerinim birikimi ile karakterize edilen alanlarda, uzun zaman serileri (on yıllık) ve zemin deformasyonuna ilişkin en doğru gözlemler sabit GNSS gözlem ağları ile sağlanmaktadır (Fattahi, 2015). GNSS veya nivelman yaklaşımları gibi geleneksel jeodezik yöntemlerin çoğu pahalıdır ve zaman açısından sürdürülebilirliği zordur. GNSS ölçümleri, esasen Dünya yüzeyindeki nokta ölçümlerine dayanır ve tüm alanda meydana gelen hareketin tam bir resmini elde etmeyi zorlaştırır (Maghsoudi vd., 2018). Buna karşın, Diferansiyel SAR interferometrisi (DInSAR), geniş bir uzamsal kapsama alanında ve birkaç metreye kadar

yüksek bir uzamsal çözünürlükle ana kaya deformasyonunu elde etmek için hızlı, ucuz ve eşsiz bir fırsat sağlayabilir (Rosen vd. 1996; Massonnet, 1997). Geleneksel DInSAR, heyelan ve deprem gibi ani olayların neden olduğu büyük yer değiştirmelerini incelemek için oldukça etkili bir yöntemdir. Ancak izleme yapılan dönem nispeten uzun bir periyodu kapsadığında, fazların de-korelasyonu ve atmosferik yapaylık nedeniyle sinyal almada bazı zorluklarla karşılaşır (Haghighi, 2019). Bu kısıtlamanın üstesinden gelmek için çok zamanlı radar (MT-SAR) veri yığını analiz ederken, Sabit Saçıcı İnterferometri (*Persistent Scatterer Interferometry* (PSI)) ve Küçük Temel Alt Kümesi (*Small Baseline Subset* (SBAS)) yöntemleri kullanılır (Lauknes vd., 2010; Shanker vd., 2011; Yen vd., 2011).

InSAR Veri Setleri

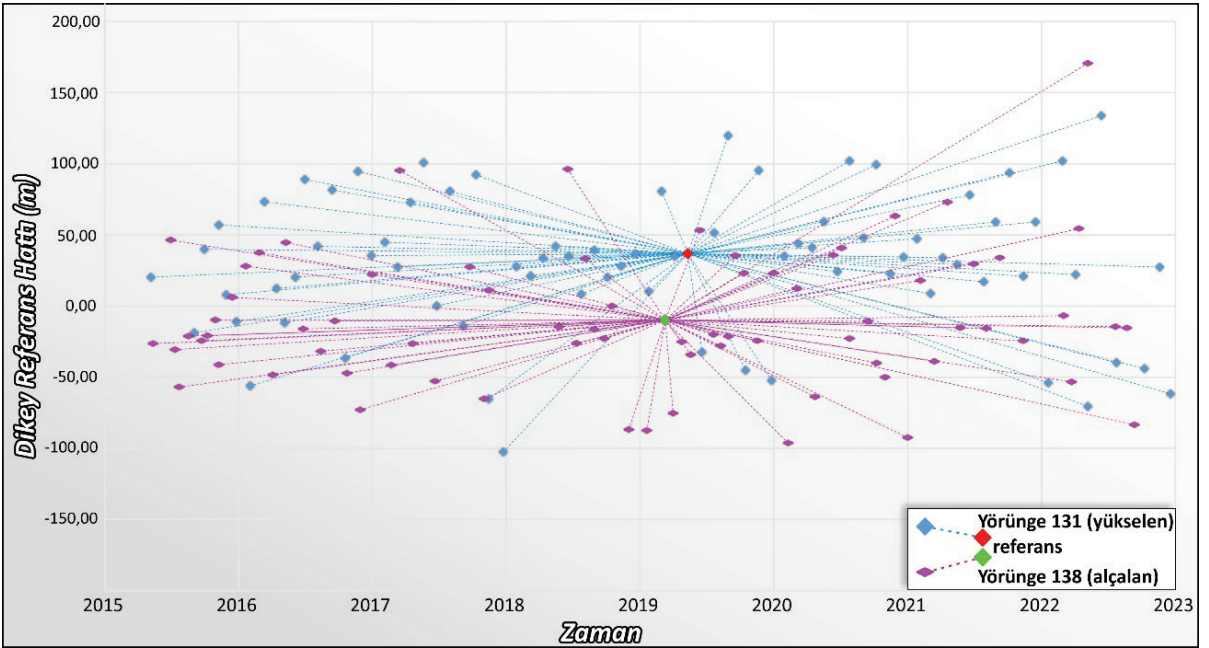
Copernicus Sentinel-1 (S-1) uydusunun günümüz misyonu, Avrupa Uzay Ajansı'na (ESA) veri sürekliliği sağlamak için, A ve B birimlerinden oluşan özdeş C-bandı sentetik açıklıklı radar (SAR) uydularından oluşan bir takım uydusuna dayanmaktadır (Yagüe-Martínez vd., 2016). Bu çalışmada kullanılan Copernicus Sentinel verileri [2015-2023], ESA tarafından işlenen ASF DAAC [03 Ocak 2023 veri erişimi]'den alınan Sentinel-1A (C-bandı: dalga boyu 5,6 cm) uydu görüntülerini (74 alçalan ve 76 yükselen yörünge) kapsamaktadır (Şekil 2b ve Şekil 4). Sentinel-1 göreviyle, Şerit Haritası Modu (SM), İnterferometrik Geniş Alan Modu (IW), Ekstra Geniş Alan Modu (EW) ve Dalga Modu (WM) olmak üzere dört farklı ölçüm modu ve görüntü özelliğine sahip veri ürünleri elde edilir. İnterferometrik geniş alan modu (IW) çoğu uygulamada yaygın olarak kullanılan bir moddur. Bu mod, geniş bir şerit (*swath*) genişliğini (250 km) orta düzeyde bir geometrik çözünürlükte (5m x 20m) interferogram görüntüleri elde etmek için kullanılır (Torres vd., 2012). Bu çalışmada kullanılan görüntüler, 2015 Mart ile 2023 Ocak

zaman aralığındaki, VV polarizasyonlu Tek Bakışlı Kompleks (SLC) İnterferometrik Geniş (IW) şerit modu ışınları olarak kaydedilmiştir. Görüntülerin dik referans hattı ± 200 m arasında değişmektedir (Şekil 4). SLC veri setinin ön işlemleri ve referans görüntü seçimleri Avrupa Uzay Ajansı tarafından sağlanan SNAP programıyla hazırlanmıştır. Yükselen yörüngede (Path 131) 20190509, alçalan yörüngede (Path 138) ise 20190311 tarihli referans görüntüler kullanılmıştır (Şekil 4). Radar fazındaki topografik katkıları düzeltmek için Copernicus DEM (GLO-30) Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) ile çalışılmıştır. Ön işlemde sonra, SLC verileri aynı alana kırılarak hem mesafede hem de azimutta ölçeklendirilmiş, böylece yardımcı görüntülerin ana geometriyle aynı ölçekte interferogramlar oluşturması sağlanmıştır. Sonuç olarak, radar pikselleri Cigna

vd. (2012) tarafından önerildiği gibi yarı boyuta (yani yaklaşık 2 m'ye 10 m) indirgenmiştir.

Çok Zamanlı InSAR İşlemleri

Zaman serisi analizi olarak da bilinen çok zamanlı InSAR (MTI) işleme, en iyi sinyali elde etmek için, aynı yörüngelerdeki birden fazla SAR görüntüsünü işleyerek sinyallerdeki bozulmaların (zamansal korelasyon ve atmosferik etkiler) üstesinden gelmeyi amaçlamaktadır (Hooper vd., 2012; Osmanoglu vd., 2016; Bayık vd., 2021; İmamoğlu vd., 2022). Çok zamanlı InSAR analizi yaklaşımları PS-InSAR ve SBAS olmak üzere iki genel kategoriye ayrılmıştır. Bu kategorilerin her biri, SAR görüntülerinde belirli bir saçılma mekanizması türü için optimize edilmiştir.



Şekil 4. Bu çalışmada kullanılan Sentinel-1A referans görüntüler (yükselen ve alçalan yörüngeler) için baz çizgi-zaman grafikleri. Kırmızı ve yeşil nokta, her bir yörünge için referans olarak kullanılan ana görüntüyü göstermektedir.

Figure 4. Baseline-time plots for the Sentinel-1A reference images (ascending and descending) used in this study. (Red and green dots show main image used as reference for each track.)

PS-InSAR olarak adlandırılan ilk yaklaşımda, önemli herhangi bir zamansal bozulma belirtisi göstermeden, uzun süre boyunca daha kararlı özellikler gösteren, dünya yüzeyindeki kalıcı saçıcılardan yararlanır (Ferretti vd., 2001; Hooper vd., 2004). İnterferogramlar, herhangi bir mekânsal/zamansal temel ölçüt olmaksızın, veri seti içindeki tek referanslı bir SAR görüntüsüne göre oluşturulur ve yalnızca kalıcı saçınım noktaları ölçüm noktaları olarak analiz edilir (İmamoğlu vd., 2022). İkinci yaklaşım olan SBAS, sadece küçük mekânsal/zamansal taban çizgileri ile interferogram oluşumunu zorlayarak zamansal dekorelasyonu azaltmayı amaçlar (Berardino vd., 2002; Hooper, 2008). PS-InSAR tekniği, nokta hedefleri olarak adlandırılan nesnelere odaklanır, yani muhtemelen küçük boyutlu ve köşe reflektörleri (örneğin binalar, kayalar) gibi çok iyi karakterize edilmiş bir geometriye sahip ve yüksek geri saçılma gösteren alanlarda kullanılır (Wang vd., 2009). SBAS tekniği ise açık alanlar veya çok geometrik olarak karakterize edilmemiş nesnelere gibi sözde dağıtılmış hedefler üzerine yoğunlaşmaktadır (Wang vd., 2009).

Yapılan arazi çalışmaları sonucu, sel felaketinin öncesinde ve sonrasında meydana gelen deformasyonların, genel olarak yerleşim alanlarına denk geldiği tespit edilmiştir. Bu nedenle bu çalışmada, deformasyon ölçümleri için PS-InSAR metodu kullanılmıştır. Elde edilen interferogram yığınları, StaMPS (Hooper, 2008; Hooper vd., 2012) kullanılarak işlenmiştir. PS seçim adımı birçok alt adım içerir ve PS noktaları genlik dağılım indeksi (DA) ile tanımlanır (Ferretti vd., 2001). Öncelikle noktaların gürültü özellikleri genlik analizi ile incelenir; ikinci olarak eşik değeri belirlenir. Aslan vd. (2019), rastgele genlik değişkenliğini en aza indirmek ve tarım alanları veya kar nedeniyle oluşan ilişkisiz pikselleri ortadan kaldırmak için eşik DA değerini 0,4 olarak önermiştir. Radar interferogram filtrelemesi (Goldstein & Werner, 1998), sonraki 2B'lu faz çözümünü iyileştirmek ve faz

gürültüsünü azaltmak için tüm interferogramlarda gerçekleştirilmiştir. Faz çözümü yaklaşımı için, SNAPHU (Chen ve Zebker, 2002) kullanılmıştır. Daha sonra atmosferik etkileri ortadan kaldırmak için Bekaert vd. (2015) tarafından geliştirilen açık kaynak kodlu Reducing Atmospheric InSAR Noise (TRAIN) programından yararlanılmıştır.

Sentinel-1 Verilerinin 2B Yer Değiştirme Oranlarına Ayrıştırılması

Yalnızca LOS (*Line of Sight*) bileşenlerini ölçen InSAR tekniğinin (İmamoğlu vd., 2022), düşey, D-B ve K-G yönlerinde üç boyutlu (3B) deformasyon vektörünü elde edebilmesi için en az üç bağımsız alım geometrisi gereklidir (Hu vd., 2014). Gediz Grabeni iki farklı yörüngeden gelen görüntüleme geometrisine sahip Sentinel-1 verileri içinde kaldığından sadece iki farklı görüntüleme geometrisi mevcuttur. Bu sebeple, gerçek deformasyon vektörünün üç bileşeninden yalnızca düşey ve D-B yönlü olanları, alçalan ve yükselen uydu görüntülülerinden elde edilen LOS verileriyle, denklem (1)'de verilen formül (Fernandez vd., 2018; Aslan vd., 2019; Pawluszek-Filipiak ve Borkowski, 2020; Bayramov vd., 2021) kullanılarak dönüştürülmüştür.

$$\begin{pmatrix} a_{LOS}^{asc} \\ a_{LOS}^{dsc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_{asc} & -\cos\alpha_{asc} \sin\theta_{asc} \\ \cos\theta_{dsc} & -\cos\alpha_{dsc} \sin\theta_{dsc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_{ver} (Up-Down) \\ d_{hor} (East-West) \end{pmatrix} \quad (1)$$

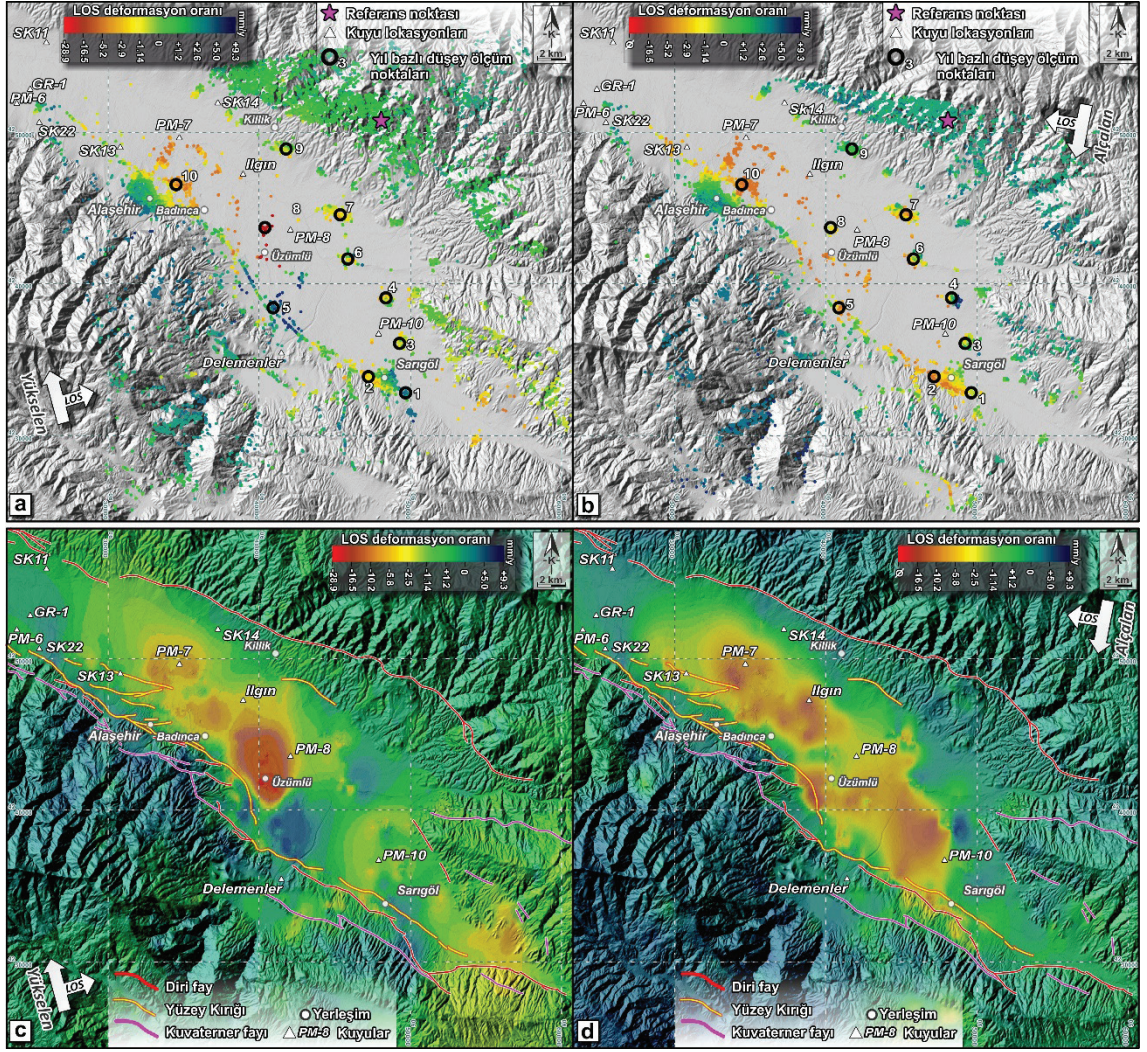
Bu denklemde θ_{asc} ve θ_{dsc} lokal geliş açılarını, α_{asc} ve α_{dsc} ise uyduların yön açılarını sembolize etmektedir. Elde edilen yıllık LOS hareket hızlarının mevsimsel yeraltı su seviyesi değişimi ile korelasyonu, deformasyonun gelecek dönem etkilerinin tahmin edilmesi ve önlem alınmasını sağlamanın yanı sıra, a-sismik deformasyonla gelişen çöküntü alanlarının dağılımının ortaya konması açısından önemlidir. Bu kapsamda, Hastaoğlu vd. (2023)'ün Devlet Su İşleri'ne ait ILGIN (2013-2018) ve Doğan vd. (2022)'de kullanılan DELEMENLER (2011-2019) kuyu

verileri ile, Şimşek ve Demirkesen (2022)'nin çalışma alanımız içinde kalan 9 adet kuyuda hesapladığı kısa dönem kuyu izleme sonuçları (2017-2019) kuyu künyeleri değiştirilmeden kullanılarak yeraltı su seviyesi değişimlerinin deformasyon üzerine etkisi değerlendirilmiştir (Şekil 3). Yeraltı su seviyesi ve düşey yönlü yer değişim grafikleri oluşturulurken, ölçüm yapılan zaman sıfır kabul edilerek kümülatif değişim oranlarına göre hesaplanmıştır. Pandemi döneminde ve sonrasında kuyu gözlemleri yapılmadığından (Hastaoğlu vd., 2023) son yılların verileri değerlendirilememiştir. Yükselen ve alçalan yörünge veri setlerinde görüntü edinim tarihleri eşit olarak örnekenemediğinden, LOS deformasyon zaman serisinde ortak bir zaman referansı kullanılmış, tüm noktalarını temsil edebilen bir fonksiyon ile ara değer hesabı yapmayı mümkün kılmak için, her iki veri setine İkinci Dereceden Bağ İnterpolasyonu (*Quadratic Spline Interpolation*) yöntemi uygulanarak yeniden haritalama yapılmıştır. Bu sayede PS yoğunluğunun düşük olduğu yerlerde (tarım ve sulak alan nedeniyle düşük tutarlılık değerinin olduğu yerlerde) deformasyon verileri hakkında bilgi edinme şansına sahip olunmuştur. Bu çalışma kapsamında jeolojik haritalama çalışmaları yapılmış (Şekil 3), Çiftçi ve Bozkurt (2009a)'da yer alan ve Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı'na ait (TPAO) sismik kesitlerinden (Şekil 3) yorumlanarak çizilen enine jeolojik kesit kullanılmış, yüzey deformasyonunun kaya birimleri ve yapısal hatlarla olan ilişkisinin ortaya konması amaçlanmıştır.

PS-InSAR SONUÇLARI

Alaşehir-Sarıgöl arasını kapsayan 1100 km²'lik alanda yapılan PS-InSAR işlemiyle, yükselen ve alçalan yörüngelerde sırasıyla 10508 PS ve 8508 PS veri noktası elde edilmiştir. Ortalama nokta yoğunluğu yükselen ve alçalan yörüngeler için

sırasıyla 9,5 ve 7,73 PS/km² olmuştur (Şekil 5a ve b). Her iki hattın benzer LOS hız noktaları düşey yönlü deformasyon gösterirken, farklı mekânsal model gösteren alanlar ise yatay yer değişimini ifade etmektedir (Şekil 5). Şekil 5a ve b'de gösterildiği gibi, yüksek zamansal uyumsuzluk nedeniyle, graben içinde tarımsal alanların yoğun olduğu kesimlerde PS-InSAR kullanarak zemin yer değiştirmesini tahmin etmek güçleşmektedir. İkinci Dereceden Bağ İnterpolasyonu ile yeniden modellenen LOS yıllık hız değerleri yükselen yörünge için -28,9 mm/yıl ile +9,3 mm/yıl, alçalan yörünge için -16,5 mm/yıl ile +9,3 mm/yıl arasındadır (Şekil 5c ve d). 2015-2023 dönemi boyunca LOS ölçümlerinin 2B ayrıştırılması ile elde edilen düşey yer değiştirmeler, graben üzerindeki yıllık ortalama düşey deformasyon hızının mm/yıl aralığında belirlenmesine olanak sağlamıştır. Yükselen ve alçalan yörüngelerde Denklem (1)'de verilen eşitlikle hazırlanan 2B'lu sonuçlar, düşey hız (Şekil 6a) ve D-B yönlü hızların (Şekil 6b) yıllık yer değişim miktarlarını yansıtmaktadır. Negatif değerlere sahip piksellerin sayısına dayanarak, Alaşehir-Sarıgöl'ün graben içerisinde bulunan alanlarında hâkim olan çökme süreçlerinin açıkça gözlemlendiğini söylemek mümkündür. Yansımaların yoğun olduğu alanlarda yıllık ortalama düşey deformasyon hızları, Alaşehir merkezinde -16,92 ile -6,94 mm/yıl arasında, Sarıgöl merkezinde ise -12,8 ile 0,8 mm/yıl arasındadır (Şekil 6a). Düşey deformasyon hızlarına bakıldığında, en yüksek çökme oranı -26 mm/yıl ile Alaşehir'e bağlı Üzümlü Köyü'nde tespit edilmiştir. LOS ölçümlerinin yatay doğu-batı yer değiştirmeye göre 2B ayrışımı, yıllık ortalama yatay deformasyon hızının 11 mm/yıl (batıya) ve 7 mm/yıl (doğuya) olduğunu göstermiştir (Şekil 6b). 18 Ekim 2020 tarihinde Sarıgöl'de meydana gelen yarıkların olduğu alanda ise 6-4 mm/yıl arası değişen hız oranlarıyla yatay yer değiştirmeler tespit edilmiştir.



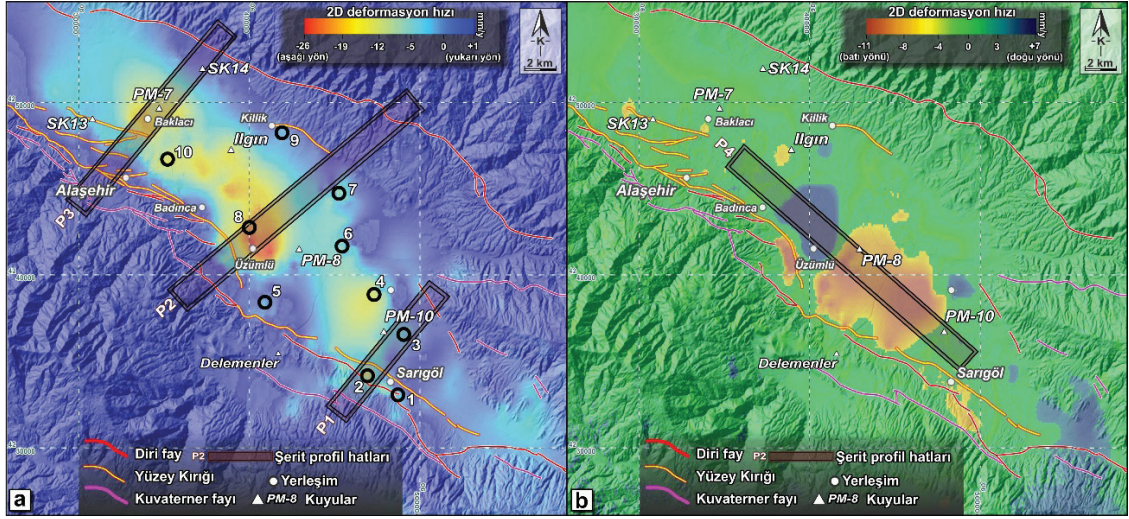
Şekil 5. Alaşehir-Sarıgöl civarının LOS deformasyon hızı: **A)** yükselen yörünge ve **B)** alçalan yörüngelere ait PS noktaları. **C)** yükselen ve **D)** alçalan yörüngelere ait İkinci Dereceden Bağ İnterpolasyonu ile yeniden haritalanmış LOS deformasyon haritası. Numaralandırılmış siyah yuvarlak işaretler ayrıştırma sonrası elde edilen düşey yönlü zaman serisi grafiklerin (Şekil 7) yerini göstermektedir.

Figure 5. LOS deformation rate of Alaşehir-Sarıgöl vicinity: PS points of **A)** ascending orbit and **B)** descending orbit. LOS deformation map remapped by Spline Interpolation for **C)** ascending and **D)** descending orbit (numbered black circles indicate location of vertical directional time series graphs (Figure 7) obtained after decomposition).

TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Bu çalışmada, Alaşehir-Sarıgöl arasında PS-InSAR sonuçlarından elde ettiğimiz LOS hızları 2B hızlara dönüştürülerek yatay ve düşey hız vektörlerine ayrılmıştır. 2015 Mart ile 2023 Ocak arasında hesapladığımız yıllık ortalama düşey hız değerleri interpolasyon işlemiyle alansal hız

değerlerine dönüştürülmüş, -26 mm/yıl ile +1 mm/yıl arası değişen düşey hızlar elde edilmiştir (Şekil 6a). Koca vd. (2011)'in 2000 yılının yaz aylarında, deforme olan üst yapılardan alınan arazi ölçümleri düşey yer değiştirme hareketinin 20-45 cm, 2010 yılında aynı hatta ölçülen yer değiştirme miktarlarının ise 1,00-1,25 m olduğunu göstermiştir.

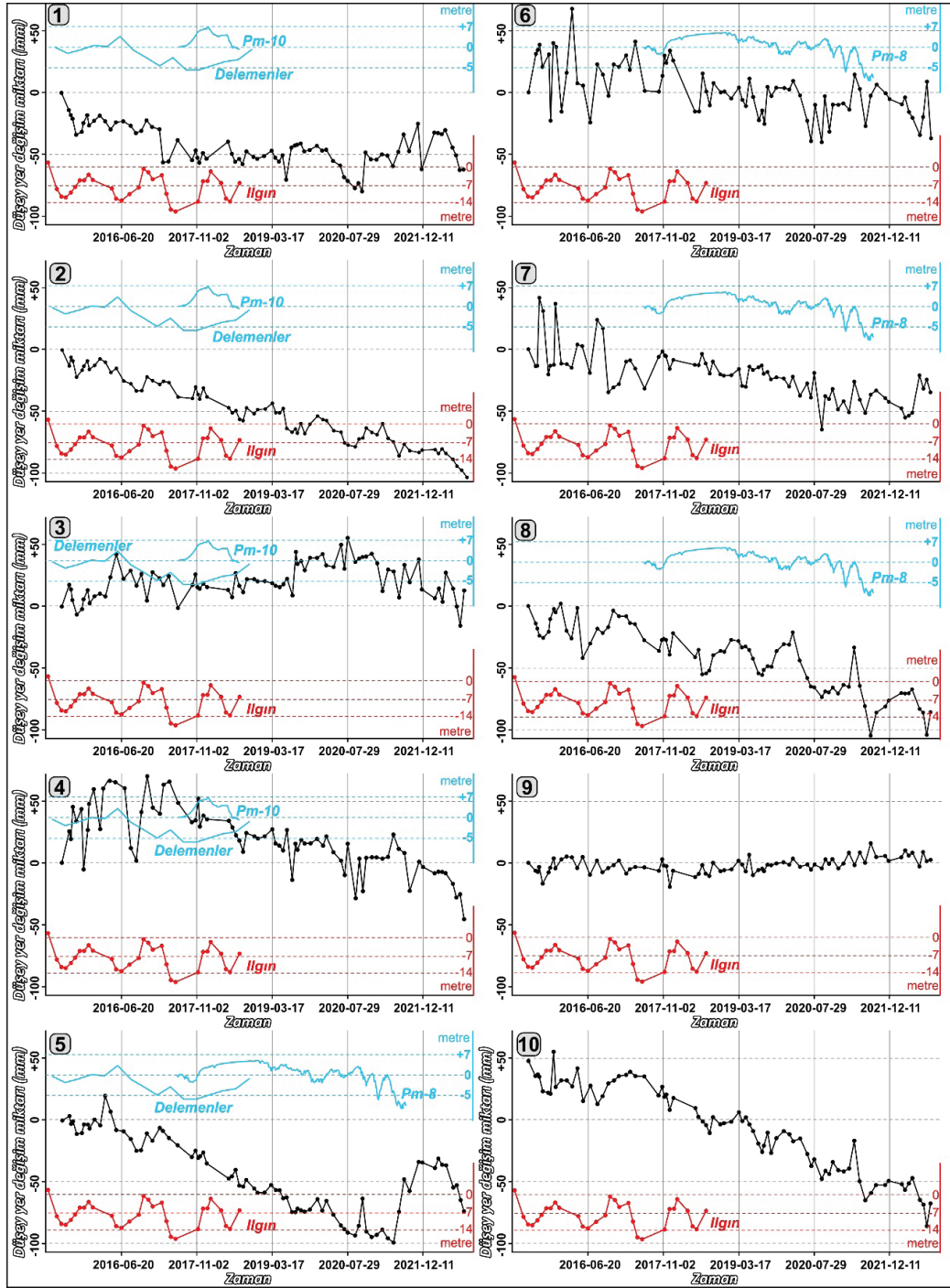


Şekil 6. Alaşehir-Sarıgöl civarının 2B ayrışmadan elde edilen **a)** düşey ve **b)** yatay (doğu-batı) deformasyon hızları. Numaralandırılmış siyah yuvarlak işaretler ayrıştırma sonrası elde edilen düşey yönlü zaman serisi grafiklerin (Şekil 7) yerini, dikdörtgenler ise ortalama hız değerleri ile topografyanın birlikte yorumlandığı Şerit Profil hatlarını (Şekil 8), üçgenler ise yeraltı su verilerinde kullanılan kuyu lokasyonlarını gösterir.

Figure 6. a) vertical and **b)** horizontal (east-west) deformation velocities of Alaşehir-Sarıgöl vicinity obtained from 2D decomposition. (Numbered black circles indicate location of vertical time series graphs (Figure 7) obtained after decomposition. Triangles represent well locations used in groundwater level of wells data. Rectangles indicate Swath profile lines (Figure 8), where average velocity values and topography are interpreted together).

Bu ölçümler, bina, duvar ve yol gibi ilksel formu bilinen üst yapılarda hesaplanmış ve toplam deformasyon miktarlarını yansıtmaktadır. Yazarların 2000 ve 2010 yılı arasındaki farklı deformasyon ölçümleri, bölgenin tarımsal faaliyetlerinin büyük bir ivmeyle artmasına ve sonuç olarak aşırı pompaj sonucu YAS düşmesine bağlanabilir. Yıllık deformasyon hızının en yüksek olduğu Sarıgöl merkezde dar bir zaman aralığında yapılan ölçümlere göre, çökme oranının maksimum 5,2 cm/yıl'a ulaştığı bilgisi de literatürde yer alan veriler arasındadır (Gören, 2016). Şekil 7'de yer alan grafiklerden de görüleceği üzere, mevsimsel döngülere denk gelen ve kısa dönemlerde yapılacak ölçümlerin 5 cm/yıl'ı aştığı görülmektedir. Sarıgöl mevkiinde GNSS ölçümleri 2013-2015 arası -90 mm/yıl (Poyraz vd., 2019), 2017-2020 arası 70-80 mm/yıl (Doğan vd., 2022) olan yıllık düşey hız değerleri sunar ve Alaşehir'e doğru gidildikçe sırasıyla -33 ve -13 mm/yıl'a düşmektedir

(Poyraz vd., 2019). Havzada gömülü Miyosen çökellerinin kalıtsal sınırı ile yüzey kırığının neden olduğunu düşündüğümüz alansal deformasyon arasındaki ilişkiyi anlamak amacıyla yaptığımız interpolasyon sonuçları (-26 mm/yıl ile +1 mm/yıl düşey hız), GNSS sonuçlarına göre farklı hız değerleri sunmaktadır. Bu farklılığın temel sebebi, interpolasyon öncesi toplanan verinin dağınık ve özellikle aşırı heterojen olduğu noktaları homojenize etmesinden kaynaklanır. PS-InSAR sonuçlarını Hızlı Fourier dönüşümü (*Fast Fourier transformation* (FFT)) algoritmasıyla hesaplayan bir çalışmada (Hastaoğlu vd., 2023) 60 mm/yıl (maksimum), başka bir çalışmada (Poyraz ve Hastaoğlu, 2020) ise LOS yönündeki -50 mm/yıl'lık çökme değeri elde edilmiştir. Bir diğer radar interferometri çalışmasında (Weiss vd., 2020) grabenin 20 mm/yıl hızla K-G doğrultuda genişlediği anlaşılmaktadır.



Şekil 7. 2B ayrışmadan elde edilen düşey yer değiştirme miktarları (siyah çizgiler) ve kuyulara ait yeraltı su seviyesi (mavi ve kırmızı çizgiler) grafikleri. Kuyu ve ölçüm lokasyonları için Şekil 6'ya bakınız. Veriler ilk ölçüm zamanları baz alınarak kümülatif olarak yerleştirilmiştir.

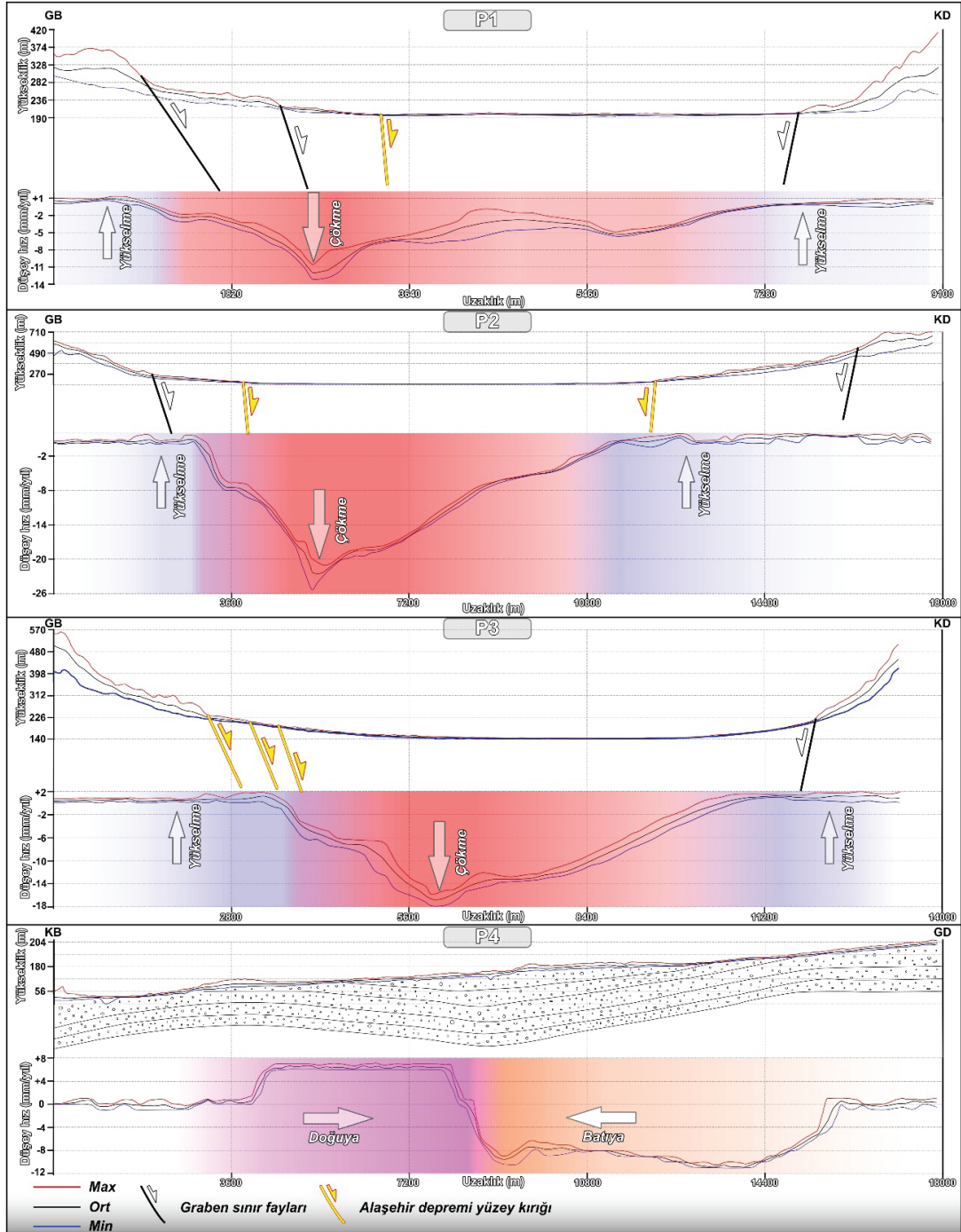
Figure 7. Graphs of vertical displacements obtained from 2D decomposition (black lines) and groundwater level (blue and red lines) of wells. (See Figure 6 for location of wells and measurements. Data are cumulatively placed based on times of first measurements).

Elde ettiğimiz 11 mm/yıl (batıya) ile 7 mm/yıl (doğuya) arasındaki yatay hareketler (Şekil 6b), Tiryakioğlu vd. (2019) tarafından 18 mm/yıl ile 29 mm/yıl arasında, Poyraz vd. (2019) da ise GB'ya 12 mm/yıl ile 27 mm/yıl arasında bulunmuştur. Hastaoğlu vd. (2023) genelde düşük miktarda yatay hareket ölçmesine rağmen, spesifik olarak Sarıgöl'ün KB'sinde küçük bir alanda 43 mm/yıl batıya hareket tespit etmiştir. Bu değerler arasındaki farklılıkların temel sebebi, daha önce yapılmış InSAR çalışmalarındaki ölçüm periyodları arasında zamansal farkın kısa olması ve GNSS ölçümlerinin doğası gereği yapılan göreceli plaka düzeltmeleri olarak düşünülmektedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, Poyraz vd. (2016; 2019; 2020)'nin sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde, bölgedeki aktif tektonik rejim altında Bozdağ Horstu'nun yükselirken, grabenin de eş zamanlı olarak çöktüğü anlaşılmaktadır.

Önceki çalışmalarda kullanılan YAS verilerinin zamana bağlı değişim grafiği, bu çalışmada elde edilen yer değiştirme miktarı ile zamansal ölçeklendirme yapılarak deneştirilmiştir (Şekil 7). Elde ettiğimiz sonuçlar, havza içerisinde deformasyon dağılımının her yerde eşit olmadığını (Şekil 6) ve buna nedenin ise yeraltı su seviyesinin alansal olarak değişkenlik göstermesi olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 7). Bu durumu araştırmak için, yeraltı su seviyesi değişimleri ile PS-InSAR kullanılarak elde edilen düşey hareket karşılaştırılmış, hidrojeolojik süreçlerin deformasyon üzerindeki etkisi anlaşılmasına çalışılmıştır (Şekil 7). Zaman çizelgesinde, yeraltı suyu seviyesindeki azalmanın, önceki çalışmalarda (Koca vd., 2011; Gören, 2016; Poyraz vd., 2015; 2016; 2019; Tiryakioğlu vd., 2019; Poyraz ve Hastaoğlu, 2020; Doğan vd., 2022; Hastaoğlu vd., 2023) da ifade edildiği gibi arazideki çökme hızıyla doğrudan ilişkili olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 7). Mevsimsel sezon değişikliklerinin meydana getirdiği yeraltı su seviyesi değişimleriyle, PS-InSAR sonuçları kullanılarak

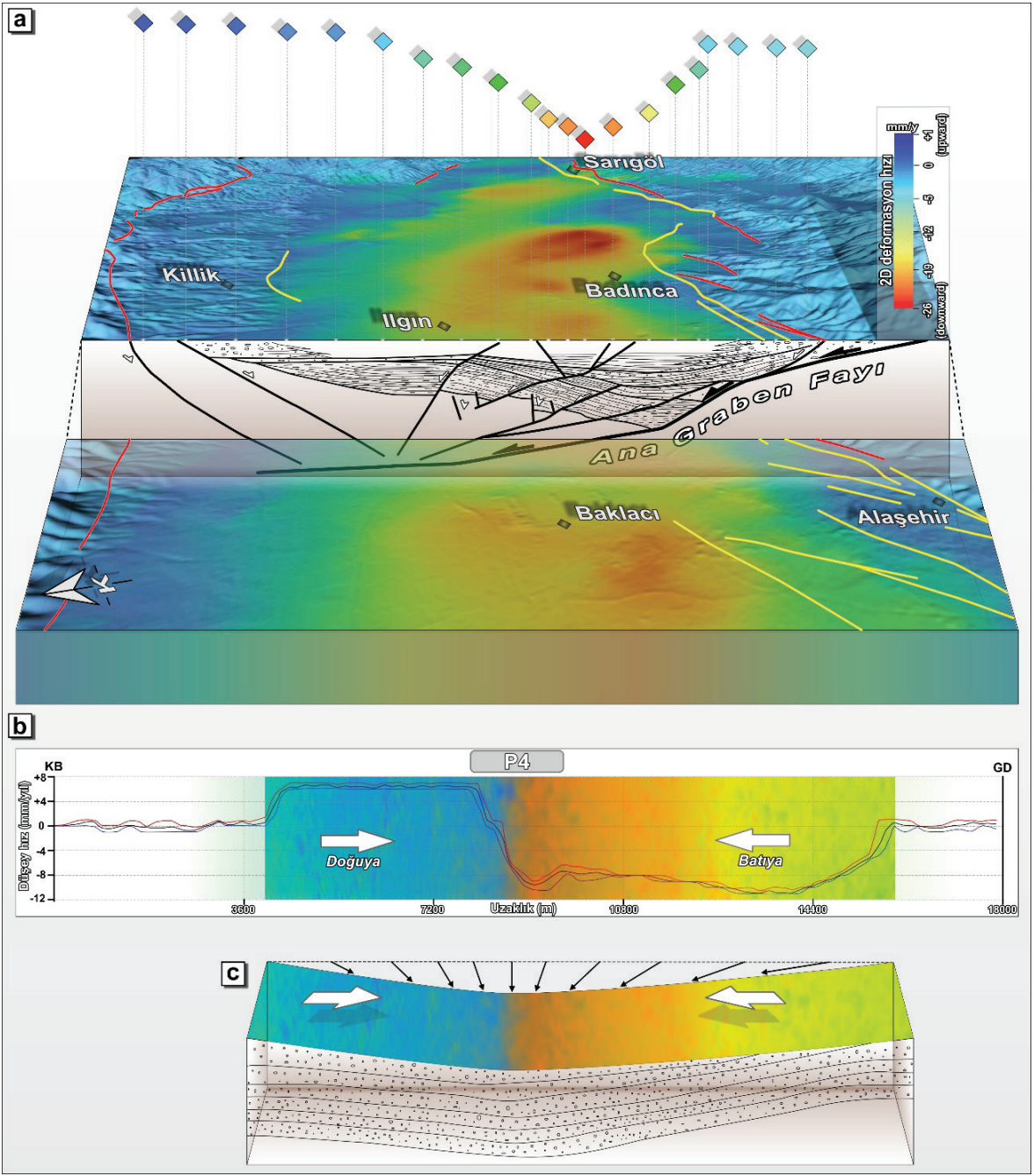
yapılan nokta bazlı zaman/hız değişim grafikleri genel olarak tutarlıdır. Grabenin kuzey kenarında yer alan Killik Fayı'ndaki aktivitenin, güney kenara göre göreceli olarak daha düşük olması da buna neden olan etmenlerden biridir. Bu durumu daha anlaşılabilir kılmak için, grabene dik ve paralel yönde alınan Şerit Profil (*Swath Profile*)'lerde (Şekil 8) bölgenin jeolojisi ve elde edilen sonuçlar birleştirilmiş, bu sayede fay geometrisinin neden olduğu deformasyon dağılımları yorumlanmıştır. Buna göre, Alaşehir'in batısı ile Sarıgöl'ün doğusu düşey yer değişimlerinin sifıra yaklaştığı alanlardır. Bu sınırlardan merkeze ve güneye gidildikçe düşey ve yanal hızlarda artış gözlenmektedir (Şekil 8).

Sarıgöl yerleşim alanınınından geçen faylardan biri olan Sarıgöl Fayı'nın, karotlu sondajlardan elde edilen veriler ışığında teorik olarak listrik normal fay geometrisine sahip olduğu belirtilmiştir (Koca vd., 2011). Şekil 9a'da da görüldüğü üzere, havzanın güney kenarından (-26 mm/yıl) kuzeye doğru gidildikçe (-3 mm/yıl) düşey yönlü deformasyon oranındaki azalma, listrik normal fay geometrisi teorisini desteklemektedir. Bu durum, havza içine ilerleyen listrik fay düzleminin eğiminin azalmasıyla birlikte deprem sonucu gelişen atım miktarının da azalmasıyla açıklanabilir. Bu da intersismik dönem sırasında çökel kayalardaki oturma miktarının, havza içine ve fayın bitim noktasına doğru azalması anlamına gelir. Bu nedenle grabenin güney kenarından kuzey kenarına doğru ortalama hız değerlerinin azaldığı düşünülmüştür. Havzanın listrik fay geometrili yapısal kontrol altında geliştiğini aktaran bir diğer çalışma da Çiftçi ve Bozkurt (2010)'a aittir. Alaşehir'in güneyinde, ana graben fayı olarak adlandırılan ve havza kenarında yer alan yüksek açılı faylarla birlikte çalışan bu fayın, çalışmacıların yorumladığı TPAO sismik kesitlerine göre de listrik geometriye sahip bir fay olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 9a).



Şekil 8. 2B ayrışmadan elde edilen düşey (P1, P2, P3) ve yatay (P4) yer değiştirme hızlarının, ana yapısal hatlarla birlikte çizilmiş enine kesitleri. Topografya ve PS-InSAR sonuçları 1 km genişlikteki şerit profil ile alınmıştır. Profil hatları için Şekil 6'ya bakınız.

Figure 8. Cross-sections of vertical (P1, P2, P3) and horizontal (P4) displacement velocities obtained from 2D decomposition, plotted with main structural lines. (Topography and PS-InSAR results were obtained with a 1 km wide swath profile. See Figure 6 for swath profile line locations).



Şekil 9. a) Gediz Grabeni'nin GD kesimindeki yapısal elemanlar ve düşey çökme hızı arasındaki ilişkiyi gösteren şematik tektonik model (model, bu çalışma kapsamında elde edilen 2B hız haritası ve Çiftçi ve Bozkurt (2010)'da verilen enine jeolojik kesitin korelasyonu ile çizilmiştir). **b)** Çökmenin yatay düzlemde radyal yayılımla olduğunu gösteren P4 kesiti ve **c)** şematik blok InSAR modeli.

Figure 9. a) Schematic tectonic model showing relationship between existing structural elements and vertical subsidence velocity in SE section of Gediz Graben (tectonic model was drawn by correlating the 2D velocity map obtained within scope of this study and geological cross-section given in Çiftçi and Bozkurt (2010)). **b)** P4 section and **c)** schematic InSAR model showing that the collapse occurred with radial bulging in horizontal plane.

Bu da Alaşehir-Sarıgöl arası meydana gelen yer hareketlerinin bu fayların geometrisi ile doğrudan ilişkili olma nedenini güçlendirir. Ayrıca güney kenara doğru artan, havzanın içine doğru azalan düşey deformasyonların, yüksek açılı fayların listrik geometri ile ana graben fayının tavan bloğundaki domino tarzı (Çiftçi ve Bozkurt, 2009b) bir geri dönüş sürecinden kaynaklanmış olacağı da düşünülebilir.

Literatürde yer alan yatay hareket hızları genellikle bölgenin KD-GB yönlü açılmasına eşlik eden KB-GD yönlü sıkışmalarla açıklanmaya çalışılmıştır (Tiryakioğlu vd., 2019; Poyraz vd., 2019). PS-InSAR sonuçlarından elde edilen 11 mm/yıl (batıya) ile 7 mm/yıl (doğuya) arasındaki yatay hareketler, batı bölümün doğuya ve doğu bölümünün de batıya doğru yer değiştirdiğini göstermektedir. Maksimum çökme hızının gözlemlendiği alanda zıt yönlü (D-B) yatay hareketlerdeki çakışma, çökmenin yatay düzlemde radyal yanıl yayılımla, düşeyde ise senformal geometride gerçekleştiğini düşündürür (Şekil 9b ve c). Bu nedenle yatay hareketin bölgedeki KB-GD yönlü sıkışmadan ziyade, havzanın çökme rejimini doğrudan kontrol eden güney kenar faylarının geometrisi ve türüyle ilişkili olduğu düşünülmüştür. Havza içinde olduğu düşünülen senformlar, genişleme kıvrımlarıyla doğrudan ilişkilidir. Bu kıvrımlar, Gediz Grabeni'nin genel eğilimine göre boyuna veya enine yapılar olarak meydana gelebilir (Çiftçi ve Bozkurt, 2008). Gediz Grabeni'nin yapısal evriminin Miyosen'den günümüze kadar, güney kenar fayları ile yakından ilişkili olduğu düşünülmektedir (Çiftçi ve Bozkurt, 2009b). Çiftçi ve Bozkurt (2010), Alaşehir ve Salihli alt havzalarının farklı tortul kalınlıklarına sahip olmalarını, oluşumları sırasındaki zamansal fark ile açıklamaktadır. Bu kapsamda ele alındığında, Şekil 6 ve 9'de görülen deformasyonların Alaşehir'in batısından itibaren gözükmemesi, bu iki alt havzanın, aralarında meydana gelen örtülü yarı düşey bir fayla

sınırlanmış (Çiftçi ve Bozkurt, 2010) olmasına bağlanabilir.

Aktif fayların konumları çökme modelinin konumsal dağılımıyla (Şekil 6) ve yeraltı su seviyesi değişimleri (Şekil 7) ile bazı yerlerde uyum içindedir. Uyumsuz olan alanlar bölgede tarımsal sulama amacıyla kullanılan yeraltı su çekimi dışında, zemin deformasyon süreçlerinin de doğal tektonik faktörler tarafından kontrol edildiği varsayımını güçlendirir. 1, 2, 5, 8 ve 9 numaralı ölçüm noktalarında (Şekil 6a ve Şekil 7) yeraltı su seviyesi değişimlerinde tutarsızlık gözlenmesi, bu noktaların Alaşehir depremi ile oluşmuş yüzey kırıklarına yakın olmasından, bu alanlarda meydana gelen deformasyonların önemli bir bölümünün ise tektonik etkiler altında meydana gelmesinden kaynaklanabilir. Ayrıca, düşey ve yatay yer değiştirmelerin, Gediz Grabeni'ni sınırlayan yüksek açılı faylar ve 1969 Alaşehir depreminde meydana gelen yüzey kırıklarıyla morfolojik olarak sınırlanmış olduğu da görülmektedir (Şekil 6). Bu da tespit ettiğimiz deformasyonların büyük oranda tektonik kökenli a-sismik deformasyonlar olduğunu göstermektedir. Eravcı vd. (2009) düşey yer değiştirmeleri, normal bileşenli fayın olağandışı a-sismik hareketlerine bağlamıştır. Fakat elde ettiğimiz sonuçlarla, deformasyonların sadece diri fayların yüzeye ulaştığı alanlarla kısıtlı olmadığı, fay düzleminin yatay ve düşey deformasyonlarla tavan bloğunu kontrol ettiği anlaşılmıştır (Şekil 8 ve Şekil 9a).

Sonuç olarak, güncel hareket hızlarıyla Alaşehir-Sarıgöl arasında çökme ve yanıl yayılım sonucu meydana gelen deformasyonların, 1969 Alaşehir depremindeki yüzey kırıklarıyla sınırlanması tesadüf değildir. Sarıgöl fayı boyunca yapılan jeolojik ve jeodezik gözlemler, Doğan vd. (2022)'nin de belirttiği gibi, 1969 Alaşehir depreminin kosismik evresinde gelişen sismik kaymaya ek olarak, günümüze kadar devam eden intersismik dönemde a-sismik kayma ile önemli bir gerilme açığa çıkmış olabilir. Bölgedeki

tektonik aktivite geçmişi ve Miyosen'den kalan kalıtsal izlerin varlığı, güncel deformasyonların gelişimine halen etki etmektedir. Bu nedenle mevcut deformasyonları tek başına yeraltı su seviyesi değişimlerine bağlamak eksik modellemelere neden olabilir. Fakat yeraltı su seviyesi değişimlerinin fazla olduğu alanlarda tektonik kontrol altında gelişen çökme olaylarının daha da hızlandığı anlaşılmaktadır. Tektonik krip, büyük depremler için olası bir tetikleyici faktör ve deprem öncüsü olarak tanımlanmaktadır (Radiguet vd., 2016). Bu türden bir a-sismik deformasyon zaman içinde yavaş yavaş büyüyen yapısal hasarlar meydana gelebilmektedir. Günümüzde, bölgedeki deformasyon oranındaki artış, 1990'lı yıllardan bugüne kadar dönemsel olarak yaşanan kuraklık ve yeraltından aşırı su çekilmesi nedeniyle mevcut yeraltı su seviyesinin hızla düşüşüyle artmıştır. Bu da uzun intersismik dönemde meydana gelecek yavaş deformasyonun, sediman konsolidasyonunu hızlandırarak çok daha hızlı bir şekilde gerçekleşmesine neden olacaktır. Seviye değişimleri, bölgedeki jeotermal faaliyet ve yapısal elemanlar da dikkate alınarak düşünülmeli, a-sismik olarak hareket eden diri fay hatları üzerinde tampon alanlar oluşturma kriterleri yeniden ele alınmalı ve üst yapı rezerv alanlarının belirlenmesinde mutlaka çok disiplinli çalışmalar yapılmalıdır.

EXTENDED SUMMARY

It is noteworthy that a significant part of the a-seismic surface deformations developed in recent years, especially in Western Anatolia, follow old surface ruptures. It is possible to list the locations of a-seismic surface deformations occurring in the grabens in the Western Anatolia Extensional Province (WAEP) (Eyidoğan and Jackson, 1985; Şengör et al., 1985; Şengör, 1987; Jackson and McKenzie, 1988; Ambraseys, 1988; Reilinger et al., 1997; McClusky et al., 2000; Bozkurt, 2001a; Taymaz et al., 2007; Biryol et al.,

2011) and reported in the last 30 years as follows: Gediz (Alaşehir), Küçük Menderes, Büyük Menderes, Burdur, Gülovası and Afyon-Akşehir grabens (Figure 1). For example, geodetic and paleoseismological data were obtained in Bolvadin (Afyon-Akşehir Graben) indicating that surface deformations developed on the old surface rupture of the Bolvadin Fault, shown with the star number 2 in Figure 1b (Özkaymak et al., 2017). In the area between Alaşehir and Sarıgöl located within the Gediz (Alaşehir) Graben, which is the subject of this study, and where surface deformations are observed, there is a surface rupture of the 1969 earthquake (M: 6.9), just like in the Bolvadin Fault example (Figure 2a). Based on this, investigating the deformation-surface rupture relationship similar to that put forward by Özkaymak et al. (2017) in the area between Alaşehir and Sarıgöl formed the basis of this study.

In this study, the surface deformations in the region between Alaşehir and Sarıgöl districts were examined using the Persistent Scatter-InSAR (PS-InSAR) method, and the active tectonics of the region and causes of current deformations were discussed with field studies. With the images obtained over a long period, the relationship between the cracks that developed in Sarıgöl after the heavy rain and hail on October 18, 2020 and the surface ruptures formed as a result of the 1969 Alaşehir earthquake and the subsidence geometry of the graben are discussed. In addition to field studies, all data obtained using PS-InSAR were evaluated together with geological, hydrogeological, geophysical and geodetic studies to measure the extent and speed of the destruction observed in the Sarıgöl-Aşağı Koçaklar neighborhood, and the effects of long-term deformations developing in the region were interpreted. A tectonic subsidence model has been created by combining all the findings obtained from all these correlations. This study aims to provide a different perspective for future studies by revealing for the first time a tectonic model

associated with the subsidence geometry of the region. In addition, it is now understood that the subsidence geometry in graben-type basins that developed under active tectonic effects, not only controlled by groundwater level and faults but also old hereditary structures, played a major role in deformation distribution.

With the PS-InSAR process performed in the 1100 km² area between Alaşehir-Sarıgöl, 10508 PS and 8508 PS data points were obtained in ascending and descending orbits, respectively (Figure 5a and b). The average point density is 9.5 and 7.73 PS/km² for ascending and descending orbits, respectively. While similar LOS velocity points of both lines indicate vertical deformation, areas showing different spatial patterns represent horizontal displacement (Figure 5). As shown in Figure 5a and b, it is difficult to estimate the ground displacement using PS-InSAR in the agricultural areas within the graben due to the high temporal unconformity. The LOS annual velocity values remodeled by Spline Interpolation are between -28.9 mm/y and +9.3 mm/y for the ascending orbit, and it ranges from -16.5 mm/y to +9.3 mm/y for the descending orbit (Figure 5c and d). Vertical displacements obtained by 2D decomposition of LOS measurements during the 2015-2023 period allowed us to determine the annual average vertical deformation rate on the graben in the range of mm/year. The 2D results prepared with the equation given in Equation (1) for ascending and descending orbits reflect the annual displacement amounts in a vertical (Figure 6a) and E-W direction (Figure 6b). Annual average vertical deformation rates in the areas where reflections are intense are between -16.92 and -6.94 mm/y in the center of Alaşehir and between -12.8 and 0.8 mm/y in the center of Sarıgöl (Figure 6a). Considering the vertical deformation rates, the highest subsidence rate was found in the Üzümlü village in Alaşehir with -26 mm/y. The 2D decomposition of LOS measurements with respect to the horizontal

east-west displacement showed that the average annual horizontal deformation rate was 11 mm/y (westward) and 7 mm/y (eastward) (Figure 6b). On the other hand, horizontal displacements were detected with velocities ranging between 6-4 mm/y in the area where cracks occurred in Sarıgöl on October 18, 2020. Accordingly, it is understood that under the active tectonic regime in the region, while the Bozdağ Horst uplifted, the graben collapsed simultaneously.

Point-based time/velocity variation graphs using PS-InSAR results are generally consistent with groundwater level changes caused by seasonal changes. The fact that the activity on the Killik Fault on the northern edge of the graben is relatively lower than on the southern edge is one of the factors causing this. In order to make this situation more understandable, the geology of the region and the results obtained from the Swath Profiles (Figure 8) taken in the perpendicular and parallel directions to the graben were combined thus the deformation distributions caused by the fault geometry were interpreted. According to this, west of Alaşehir and east of Sarıgöl are the areas where vertical displacements approach zero. Vertical and lateral velocities increase as we go from these borders to the center and south (Figure 8).

It has been stated that the Sarıgöl Fault, one of the faults passing through the Sarıgöl settlement area, theoretically has a listric normal fault geometry in the light of the data obtained from core drillings (Koca et al., 2011). As seen in Figure 9, the decrease in the vertical deformation rate from the southern edge of the basin (-26 mm/y) to the north (-3 mm/y) supports the theory of listric normal fault geometry. This situation can be explained by the decrease in the dip of the listric fault plane advancing into the basin will also decrease the amount of offset caused by the earthquake. This means that the amount of consolidation in the sedimentary rocks during the interseismic period decreases into the basin

towards the end of the fault. Therefore, it is thought that the average velocity values decrease from the southern edge of the graben to the northern edge. Another study reporting that the basin developed under structural control with listric fault geometry belongs to Çiftçi and Bozkurt (2010). This fault, which is called the main graben fault in the south of Alaşehir and operates together with the high-angle faults located at the edge of the basin, is understood to be a fault with listric geometry, according to the TPAO seismic sections interpreted by the researchers (Figure 9a). This strengthens the reason why the ground movements occurring between Alaşehir and Sarıgöl are directly related to the geometry of these faults. In addition, the vertical deformations, which increase towards the southern margin and decrease towards the interior of the basin, indicate that the high-angle faults are caused by a domino-like (Çiftçi and Bozkurt, 2009b) return process in the hanging-wall of the main graben fault with listric geometry.

The horizontal movement rates in the literature generally try to be explained by the NW-SE directional compressions accompanying the NE-SW directional extension of the region (Tiryakioğlu et al., 2019; Poyraz et al., 2019). The horizontal movements between 11 mm/y (westward) and 7 mm/y (eastward) obtained from PS-InSAR results indicate that the western section is displaced eastward and the eastern section is displaced westward. The overlap in opposite horizontal movements (E-W) in the area where the maximum collapse velocity is observed suggests that the collapse occurred with radial bulging in the horizontal plane and in synformal geometry in the vertical (Figure 9b and c). Therefore, it is thought that the horizontal movement is related to the geometry and type of the southern margin faults, which directly control the subsidence regime of the basin, rather than the NW-SE directional compression in the region. The synforms which are thought to be within the basin are directly related to the extensional folds. These folds may occur as

longitudinal or transverse structures according to the general trend of the Gediz Graben (Çiftçi and Bozkurt, 2008). It is thought that the structural evolution of the Gediz Graben is closely related to the southern margin faults from the Miocene to the present (Çiftçi and Bozkurt, 2009b). The fact that Alaşehir and Salihli sub-basins have a different sedimentary thickness is explained by Çiftçi and Bozkurt (2010) with the temporal difference in the formation of these basins. In this context, the fact that the deformations seen in Figures 6 and 9 are not visible from the west of Alaşehir can be attributed to the fact that these two sub-basins are bounded by a covered semi-vertical fault (Çiftçi and Bozkurt, 2010).

In some places, the locations of active faults are compatible with the spatial distribution of the subsidence model (Figure 6) and groundwater level changes (Figure 7). Incompatible areas strengthen the assumption that ground deformation processes are also controlled by natural tectonic factors, apart from groundwater abstraction used for agricultural irrigation in the region. Observation of the inconsistencies in groundwater level changes at measurement points 1, 2, 5, 8 and 9 (Figure 6a and 7) may be due to the fact that these points are close to the surface ruptures formed by the Alaşehir earthquake and a significant part of the deformations occurring in these areas occur under tectonic effects. It is also seen that the vertical and horizontal displacements are morphologically constrained by the high angle faults bounding the Gediz Graben and the surface ruptures that occurred in the 1969 Alaşehir earthquake (Figure 6). This indicates that the deformations we detected are mostly a-seismic deformations of tectonic origin. Eravcı et al. (2009) attributed the vertical displacements to the unusual a-seismic movements of the fault with a normal component. However, with the results we obtained, it was easily understood that the deformations were not limited to the areas where the active faults reached the surface, and

that the fault plane controlled the hanging-wall with horizontal and vertical deformations (Figure 8 and 9a).

Consequently, it is not a coincidence that the deformations occurring as a result of subsidence and lateral spreading between Alaşehir-Sarıgöl and current movement rates are bounded by the surface ruptures of the 1969 Alaşehir earthquake. As Doğan et al. (2022) also stated, in addition to the seismic slip that developed in the coseismic phase of the 1969 Alaşehir earthquake, a significant stress may have been released by a-seismic slip in the interseismic phase that continues today. The history of tectonic activity in the region and the presence of hereditary traces from the Miocene still affect the development of current deformations. Therefore, attributing the existing deformations to groundwater level changes alone may lead to incomplete modelling. However, it is understood that the subsidence events developing under tectonic control accelerate in areas where groundwater level changes are high. Tectonic creep is defined as a possible triggering factor and earthquake precursor for large earthquakes (Radiguet et al., 2016). This kind of a-seismic deformation can cause structural damage that grows gradually over time.

Today, the deformation rate in the region has increased due to the rapid decrease in the existing groundwater level due to periodic drought from the 1990s to the present and excessive withdrawal of water from the underground. This will cause the slow deformation that will occur in the long interseismic phase to occur much faster by accelerating sediment consolidation. In order to eliminate such risks, groundwater level changes should be evaluated by taking into account the geothermal activity and structural elements in the region, the criteria for creating buffer zones on a-seismically moving active faults should be reconsidered, and multidisciplinary studies should be carried out in determination of superstructure reserve areas.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Semih ESKİ tarafından Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne bağlı olarak yürütülen doktora tezi kapsamında hazırlanmıştır. Yayının yazım aşamasındaki destek ve katkılarından ötürü Dr. Çiğdem TEPE, Doç. Dr. Ökmen SÜMER ve Dr. Atilla ONGAR'a, makalenin bilimsel açıdan kalitesini arttıracak katkılar sağlayan dergi hakemlerine ve "Yer Bilimlerinde Sayısal Modelleme Özel Sayısı" konuk editörü Oğuz GÖĞÜŞ'e teşekkür ederiz.

ORCID ID

Semih Eski  <https://orcid.org/0000-0002-2526-2571>

Hasan Sözbilir  <https://orcid.org/0000-0002-3777-4830>

KAYNAKLAR / REFERENCES

- Abdikan, S., Arıkan, M., Sanli, F. B. & Cakir, Z. (2014). Monitoring of coal mining subsidence in peri-urban area of Zonguldak city (NW Turkey) with persistent scatterer interferometry using ALOS-PALSAR. *Environmental Earth Sciences*, 71, 4081-4089.
- Akoğlu, A. M., Jónsson, S., Wang, T., Çakır, Z., Dogan, U., Ergintav, S., ... & Emre, Ö. (2018). Evidence for tear faulting from new constraints of the 23 October 2011 Mw 7.1 Van, Turkey, earthquake based on InSAR, GPS, coastal uplift, and field observations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(4), 1929-1946. <https://doi.org/10.1785/0120170314>
- Ali, M., Shahzad, M. I., Nazeer, M., Mahmood, I. & Zia, I. (2021). Estimation of surface deformation due to Pasni earthquake using RADAR interferometry. *Geocarto International*, 36(14), 1630-1645.
- Ambraseys, N. N. (1988). Engineering Seismology. *Earthquake Engineering ve Structural Dynamics*, 17, 1-105.
- Anderson, E. R., Griffin, R. E. & Irwin, D. E. (2016). Implications of different digital elevation models and preprocessing techniques to delineate debris flow inundation hazard zones in El Salvador. *Natural Hazard Uncertainty Assessment: Modeling and Decision Support*, 167-177.

- Angelier, J., Dumont, J. F., Karamandereci, H., Poisson, A., Şimşek, Ş. & Uysal, Ş. (1981). Analyses of fault mechanisms and expansion of southwestern Anatolia since the late Miocene. *Tectonophysics*, 75(3-4), T1-T9.
- Arpat, E. ve Bingöl, E. (1969). Ege Bölgesi graben sisteminin gelişimi üzerine düşünceler. *Mineral Research and Exploration Institute of Turkey (MTA) Bulletin*, 73, 1-8.
- ASF (Alaska Satellite Facility), 2019. <https://search.asf.alaska.edu/#/>, 10 Mart 2019.
- Aslan, G., Cakir, Z., Lasserre, C. & Renard, F. (2019). Investigating subsidence in the Bursa Plain, Turkey, using ascending and descending Sentinel-1 satellite data. *Remote Sensing*, 11(1), 85.
- Asti, R., Malusà, M. G. & Faccenna, C. (2018). Supradetachment basin evolution unravelled by detrital apatite fission track analysis: the Gediz Graben (Menderes Massif, Western Turkey). *Basin Research*, 30(3), 502-521.
- Barka, A. & Reilinger R. (1997). Active Tectonics of Eastern Mediterranean region: deduced from GPS, neotectonic and seismicity data. *Annali Di Geofisica*, X2(3), 587-610.
- Bayık, C., Abdikan, S., Ozdemir, A., Arıkan, M., Balık Sanlı, F. & Doğan, U. (2021). Investigation of the landslides in Beylikdüzü-Esenyurt Districts of Istanbul from InSAR and GNSS observations. *Natural Hazards*, 109(1), 1201-1220.
- Bayramov, E., Buchroithner, M., Kada, M. & Zhuniskenov, Y. (2021). Quantitative assessment of vertical and horizontal deformations derived by 3d and 2d decompositions of insar line-of-sight measurements to supplement industry surveillance programs in the tengiz oilfield (Kazakhstan). *Remote Sensing*, 13(13), 2579.
- Beccaletto, L. & Steiner, C. (2005). Evidence of two-stage extensional tectonics from the northern edge of the Edremit Graben, NW Turkey. *Geodinamica Acta*, 18(3-4), 283-297.
- Bekaert, D. P. S., Walters, R. J., Wright, T. J., Hooper, A. J. & Parker, D. J. (2015). Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. *Remote Sensing of Environment*, 170, 40-47.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375-2383.
- Biryol, C. B., Beck, S. L., Zandt, G. & Özacar, A. A. (2011). Segmented African lithosphere beneath the Anatolian region inferred from teleseismic P-wave tomography. *Geophysics Journal International*, 184(3), 1037-1057.
- Blasco, J.M.D., Fomelis, M., Stewart, C. & Hooper, A. (2019). Measuring urban subsidence in the Rome metropolitan area (Italy) with sentinel-1 SNAP-StaMPS persistent scatterer interferometry. *Remote Sensing* 11(2), 17.
- Bodur, Ö., Göğüş, O. H., Brune, S., Uluocak, E. Ş., Glerum, A., Fichtner, A. & Sözbilir, H. (2023). Crustal flow driving twin domes exhumation and low-angle normal faulting in the Menderes Massif of western Anatolia. *Earth and Planetary Science Letters*, 619, Article 118309.
- Bozkurt, E. (2000). Timing of Extension on the Büyük Menderes Graben, western Turkey and its tectonic implications. *Geological Society London*, 173, 385-403.
- Bozkurt, E. (2001a). Neotectonics of Turkey - a synthesis. *Geodinamica Acta*, 14, 3-30.
- Bozkurt, E. (2001b). Late Alpine evolution of the central Menderes Massif, western Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 89(4), 728-744.
- Bozkurt, E. (2003). Origin of NE-trending basins in western Turkey. *Geodinamica Acta*, 16(2-6), 61-81.
- Bozkurt, E. (2004). Granitoid rocks of the southern Menderes Massif (southwestern Turkey): field evidence for Tertiary magmatism in an extensional shear zone. *International Journal of Earth Sciences*, 93(1), 52-71.
- Bozkurt, E. & Rojay, B. (2005). Episodic, two-stage Neogene extension and short-term intervening compression in Western Turkey: field evidence from the Kiraz Basin and Bozdağ Horst. *Geodinamica Acta*, 18(3-4), 299-316.
- Bozkurt, E. & Sözbilir, H. (2004). Tectonic evolution of the Gediz Graben: field evidence for an episodic,

- two-stage extension in western Turkey. *Geological Magazine*, 141(1), 63-79.
- Bozkurt, E. & Sözbilir, H. (2006). Evolution of the large-scale active Manisa Fault, Southwest Turkey: implications on fault development and regional tectonics. *Geodinamica Acta*, 19(6), 427-453.
- Bozkurt, E., Winchester, J. A., Mittwede, S. K. & Ottley, C. J. (2006). Geochemistry and tectonic implications of leucogranites and tourmalines of the southern Menderes Massif, Southwest Turkey. *Geodinamica Acta*, 19(5), 363-390.
- Bozzano, F., Carabella, C., De Pari, P., Discenza, M. E., Fantucci, R., Mazzanti, P., ... & Sciarra, N. (2019). Geological and geomorphological analysis of a complex landslides system: the case of San Martino sulla Marruccina (Abruzzo, Central Italy). *Journal of Maps*, 16(2), 123-136. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1702596>
- Buscher, J. T., Hampel, A., Hetzel, R., Dunkl, I., Glotzbach, C., Struffert, A., Akal, C. & Rätz, M. (2013). Quantifying rates of detachment faulting and erosion in the central Menderes Massif (western Turkey) by thermochronology and cosmogenic ¹⁰Be. *Journal of the Geological Society*, 170(4), 669-683. <https://doi.org/10.1144/jgs2012-132>
- Chen, C. W. & Zebker, H. A. (2002). Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8), 1709-1719.
- Cigna, F., Osmanoglu, B., Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Ávila-Olivera, J. A., Garduño-Monroy, V. H., DeMets, C. & Wdowinski, S. (2012). Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: A case study in Morelia, Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 117, 146-161.
- Çağlayan, A., Isik, V. & Saber, R. (2019). An assessment of Holocene seismic activity on 1944 Earthquake Segment, North Anatolian Fault Zone (Turkey). *Geosciences Journal*, 23, 805-822.
- Çakır, Z., Chabaliier, J. B. D., Armijo, R., Meyer, B., Barka, A. & Peltzer, G. (2003). Coseismic and early post-seismic slip associated with the 1999 Izmit earthquake (Turkey), from SAR interferometry and tectonic field observations. *Geophysical Journal International*, 155(1), 93-110.
- Çelik, H. (1991). Akarsuların (vadi) profil özellikleri ile eski tabanlar arasındaki ilişkiler üzerine araştırmalar. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 43(2), 101-130.
- Çetin, E., Çakır, Z., Meghraoui, M., Ergintav, S. & Akoglu, A. M. (2014). Extent and distribution of aseismic slip on the İsmetpaşa segment of the North Anatolian Fault (Turkey) from Persistent Scatterer InSAR. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(7), 2883-2894.
- Çiftçi, N. B. & Bozkurt, E. (2007). Anomalous stress field and active breaching at relay ramps: a field example from Gediz Graben, SW Turkey. *Geological Magazine*, 144(4), 687-699.
- Çiftçi, N. B. & Bozkurt, E. (2008) Folding of the Gediz Graben Fill, SW Turkey: Extensional and/or Contractional Origin?. *Geodinamica Acta*, 21(3), 145-167.
- Çiftçi, N. B. & Bozkurt, E. (2009a). Evolution of the Miocene sedimentary fill of the Gediz Graben, SW Turkey. *Sedimentary Geology*, 216(3-4), 49-79.
- Çiftçi, N. B. & Bozkurt, E. (2009b). Pattern of normal faulting in the Gediz Graben, SW Turkey. *Tectonophysics*, 473(1-2), 234-260.
- Çiftçi, N. B. & Bozkurt, E. (2010). Structural evolution of the Gediz Graben, SW Turkey: temporal and spatial variation of the graben basin. *Basin Research*, 22(6), 846-873.
- Dai, F., Lee, C. & Ngai, Y. Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64(1): 65-87. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00093-X)
- Dănişor, C., Datcu, M. & Dănişor, A. (2018). Estimation of terrain's linear deformation rates using synthetic aperture radar systems. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 400(2), 022018. IOP Publishing.
- De Novellis, V., Carlino, S., Castaldo, R., Tramelli, A., De Luca, C., Pino, N.A., Pepe, S.; Convertito, V., Zinno, I. & De Martino, P. (2018). The 21 August 2017 Ischia (Italy) earthquake source model inferred from seismological, GPS,

- and DInSAR measurements. *Geophysical Research Letters*, 45(5), 2193–2202. <https://doi.org/10.1002/2017GL076336>
- Dewey, J. F. & Şengör, A. M. C. (1979). Aegean and surrounding regions: complex multiplate and continuum tectonics in a convergent zone. *Geological Society of America Bulletin*, 90(1), 84–92.
- Dilek, Y., Altunkaynak, S. & Öner, Z. (2009). Syn-extensional granitoids in the Menderes core complex and the late Cenozoic extensional tectonics of the Aegean province. In: Ring, U., Wernicke, B. (Eds.), *Extending a Continent: Architecture, Rheology and Heat Budget*. Geological Society of London Special Publications, 321, 197–223.
- Doğan, A., Kaygusuz, Ç., Tiryakioğlu, İ., Yigit, C. O., Sözbilir, H., Özkaymak, Ç. & Turgut, B. (2022). Geodetic evidence for aseismic fault movement on the eastern segment of the Gediz Graben system (western Anatolia extensional province, Turkey) and its significance for settlements. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 57(3), 461–476.
- Doğru, F. (2020). The Importance of Atmospheric Corrections on InSAR Surveys Over Turkey: Case Study of Tectonic Deformation of Bodrum-Kos Earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 177(12), 5761–5780.
- Dumont, J. F., Uysal, S., Şimşek S., Karamandersi, I. H. ve Letouzey, F. (1979). Güneybatı Anadolu'daki grabenlerin oluşumu. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 92, 7–17.
- Elliott, J. R., Walters R. J. & Wright, T. J. (2016). The role of space-based observation in understanding and responding to active tectonics and earthquakes. *Nature Communications*, 7, Article 13844.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Şaroğlu, F., Olgun, Ş., Elmacı, H. & Çan, T. (2018). Active fault database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8), 3229–3275. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0041-2>
- Emre, T. & Sözbilir, H. (2007). Tectonic evolution of the Kiraz Basin, Küçük Menderes Graben: evidence for compression/uplift-related basin formation overprinted by extensional tectonics in West Anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 16(4), 441–470.
- Eravcı, B., Erkmen, C., Yaman, M., Tüzel, B. & Iravul, Y. (2009). The Origin of Ground Deformations that Caused Damage at Sarigol-Manisa-Turkey. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2655.
- Erkül, F., Helvacı, C. & Sözbilir, H. (2005). Evidence for two episodes of volcanism in the Bigadiç borate basin and tectonic implications for western Turkey. *Geological Journal*, 40(5), 545–570.
- Ersoy, E. Y. & Helvacı, C. (2007). Stratigraphy and geochemical features of the Early Miocene bimodal (ultrapotassic and calc-alkaline) volcanic activity within the NE-trending Selendi Basin, Western Anatolia, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 16, 117–139.
- Ersoy, E. Y., Helvacı, C. & Sözbilir, H. (2010). Tectono-stratigraphic evolution of the NE–SW-trending superimposed Selendi basin: Implications for late Cenozoic crustal extension in Western Anatolia, Turkey. *Tectonophysics*, 488(1–4), 210–232.
- Eyidoğan, H. (1988). Rates of crustal deformation in western Turkey as deduced from major earthquakes. *Tectonophysics*, 148(1–2), 83–92.
- Eyidoğan, H. & Jackson, J. A. (1985). A seismological study of normal faulting in the Demirci, Alaşehir ve Gediz earthquake of 1969–1970 in western Turkey: implications for the nature and geometry of deformation in the continental crust. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 81, 569–607.
- Fattahi, H. (2015). *Geodetic Imaging of Tectonic Deformation With InSAR* [PhD Thesis]. University of Miami, Florida.
- Fernandez, J., Prieto, J. F., Escayo, J., Camacho, A. G., Luzón, F., Tiampo, K. F., ... & Mallorquí, J. J. (2018). Modeling the two- and three-dimensional displacement field in Lorca, Spain, subsidence and the global implications. *Scientific Reports*, 8(1), Article 14782. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33128-0>
- Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8–20.
- Fialko, Y. (2006). Interseismic strain accumulation and the earthquake potential on the southern San

- Andreas fault system. *Nature*, 441(7096), 968-971.
- Forster, M. & Lister, G. (2009). Core-complex-related extension of the Aegean lithosphere initiated at the Eocene-Oligocene transition. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B2). Article B02401. <https://doi.org/10.1029/2007JB005382>
- Genç, C. Ş., Altunkaynak, Ş., Karacık, Z., Yazman, M. & Yılmaz, Y. (2001). The Çubukludağ graben, south of İzmir: its tectonic significance in the Neogene geological evolution of the western Anatolia. *Geodinamica Acta*, 14(1-3), 45-55.
- Gessner, K., Gallardo, L. A., Markwitz, V., Ring, U. & Thomson, S. N. (2013). What caused the denudation of the Menderes Massif: Review of crustal evolution, lithosphere structure, and dynamic topography in southwest Turkey. *Gondwana research*, 24(1), 243-274.
- Gessner, K., Piazzolo, S., Güngör, T., Ring, U., Kroner, A. & Passchier, C.W. (2001a). Tectonic significance of deformation patterns in granitoid rocks of the Menderes nappes, Anatolide belt, southwest Turkey. *International Journal of Earth Sciences* 89, 766-780.
- Gessner, K., Ring, U., Johnson, C., Hetzel, R., Passchier, C.W. & Güngör, T. (2001b). An active bivergent rolling-hinge detachment system: central Menderes metamorphic core complex in western Turkey. *Geology*, 29, 611-614.
- Gezgin, C. (2022). The influence of groundwater levels on land subsidence in Karaman (Turkey) using the PS-InSAR technique. *Advances in Space Research*, 70(11), 3568-3581.
- Goldstein, R. M., Zebker, H. A. & Werner, C. L. (1988). Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 23, 713-720.
- Göktaş, F. ve Hakyemez, Y. (2015). Kemalpaşa (İzmir) Pliyo-Kuvaterner Havzasının Stratigrafik Evrimi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 58(2), 1-28. <https://doi.org/10.25288/tjb.298498>
- Gören, R. (2016). *Alaşehir ve çevresinde Gediz grabeni güney kenar faylarının holosen aktivitesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Gürboğa, Ş. D., Koçyiğit, A. & Ruffet, G. (2013). Episodic two-stage extensional evolutionary model for southwestern Anatolian graben-horst system: new field data from the Erdoğan-Yenigediz graben (Kütahya). *Journal of Geodynamics*, 65, 176-198.
- Gürer, Ö. F., Sarica-Filoreau, N., Özburan, M., Sangu, E. & Doğan, B. (2009). Progressive development of the Büyük Menderes Graben based on new data, western Turkey. *Geological Magazine*, 146(5), 652-673.
- Gürsoy, H., Temiz, H. ve Tatar, O. (1997). Gediz grabeni GD kenarındaki güncel deformasyon verileri. *Aktif Tektonik Araştırma Grubu Birinci Toplantısı*, İTÜ, İstanbul.
- Haghighi, M. H. (2019). *Local and large scale insar measurement of ground surface deformation* [PhD Thesis]. Leibniz Universität Hannover, Hannover.
- Hancock, P. L. & Barka, A. A. (1987). Kinematic indicators on active normal faults in western Turkey. *Journal of Structural Geology*, 9(5-6), 573-584.
- Hastaoğlu, K. O., Poyraz, F., Erdoğan, H., Tiryakioğlu, İ., Özkaymak, Ç., Duman, H. Gül, Y., Guler, S., Dogan, A. & Gul, Y. (2023). Determination of periodic deformation from InSAR results using the FFT time series analysis method in Gediz Graben. *Natural Hazards*, 117(1), 491-517. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05870-w>
- Hetzel, R., Ring, U., Akal, C. & Troesch, M. (1995). Miocene NNE-directed extensional unroofing in the Menderes Massif, southwestern Turkey. *Journal of the Geological Society of London*, 152, 639-654. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.152.4.0639>
- Hetzel, R., Romer, R. L., Candan, O. & Passchier, C. W. (1998). Geology of the Bozdağ area, central Menderes massif, SW Turkey: Pan-African basement and Alpine deformation. *Geologische Rundschau*, 87(3), 394-406.
- Hodgkinson, K. M. (1996). *Crustal deformation in extensional regimes: Iceland, Nevada and SW Turkey*. [PhD Thesis]. Durham University, Durham.
- Hooper, A. (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35, L16302.

- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K. & Arikan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514, 1-13.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31, L23611.
- Hu, J., Li, Z. W., Ding, X. L., Zhu, J. J., Zhang, L. & Sun, Q. (2014). Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review. *Earth-Science Reviews*, 133, 1-17.
- Ingleby, T. & Wright T. J. (2017). Omori-like decay of postseismic velocities following continental earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 44(7), 3119-3130.
- Innocenti, F., Agostini, S., Di Vincenzo, G., Doglioni, C., Manetti, P., Savaşçin, M. Y. & Tonarini, S. (2005). Neogene and Quaternary volcanism in Western Anatolia: magma sources and geodynamic evolution. *Marine Geology*, 221(1-4), 397-421. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.03.016>
- Işık, V. & Tekeli, O. (2001). Late orogenic crustal extension in the northern Menderes massif (western Turkey): evidences for metamorphic core complex formation. *International Journal of Earth Sciences*, 89, 757-765.
- Işık, V., Saber, R. & Çağlayan, A. (2021). November 08, 2019 Turkmanchay earthquake (Mw: 5.9) in NW Iran: an assessment of the earthquake using DInSAR time-series and field evidence. *Natural Hazards*, 105, 3013-3037.
- İmamoğlu, M., Balık Sanli, F., Cakir, Z. & Kahraman, F. (2022). Rapid ground subsidence in the Küçük Menderes Graben (W. Turkey) captured by Sentinel-1 SAR data. *Environmental Earth Sciences*, 81(7), 221.
- İmamoğlu, M., Kahraman, F., Cakir, Z. & Sanli, F. B. (2019). Ground deformation analysis of Bolvadin (W. Turkey) by means of multi-temporal InSAR techniques and Sentinel-1 data. *Remote Sensing*, 11(9), 1069.
- Jackson, J. & McKenzie, D. (1988). The relationship between plate motions and seismic moment tensors and rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East. *Geophysical Journal*, 93, 45-73.
- Jolivet, L., Faccenna, C., Huet, B., Labrousse, L., Le Pourhiet, L., Lacombe, O., ... & Driussi, O. (2013). Aegean tectonics: Strain localisation, slab tearing and trench retreat. *Tectonophysics*, 597, 1-33. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.06.011>
- Kaya, O., Ünay, E., Saraç, G., Eichhorn, S., Hassenrück, S., Knappe, A., Pekdeğer, A. & Mayda, S. (2004). Halitpaşa Transpressive Zone: Implications for an Early Pliocene Compressional Phase in Central Western Anatolia, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 13, 1-13.
- Kent, E. (2015). *The Relationship Between Active Faulting and Fluvial Geomorphology: A Case Study In The Gediz Graben, Turkey* [PhD Thesis]. Plymouth University, Plymouth.
- Ketin, İ. (1968). Relations between general tectonic features and the main earthquake regions of Turkey. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 71(71).
- Kim, D. J. & Jung, J. (2018). Subsidence in the Kathmandu Basin, before and after the 2015 Mw 7.8 Gorkha Earthquake, Nepal Revealed from Small Baseline Subset-DInSAR Analysis. *GIScience & Remote Sensing*, 55(4), 604-621.
- Koca, M. Y., Sözbilir, H. ve Uzel, B. (2011). Sarıgöl fay zonu boyunca meydana gelen deformasyonların nedenleri üzerine bir araştırma. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 35(2), 151-174.
- Koçman, A. (1985). İzmir-Bozdağlar yöresinin yapısal jeomorfolojisi ve evrimi. *Ege Coğrafya Dergisi*, 3(1), 63-86.
- Koçyiğit, A. (1984). Güneybatı Türkiye ve Yakın Dolayında levha içi yeni tektonik gelişim. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 27, 1-16. https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/84b98aac2ddd59_ek.pdf?dergi=T%20DCRK%20DDE%20JEOLJ%20DD%20B%DCLTEN%20
- Koçyiğit, A., Yusufoglu, H. & Bozkurt, E. (1999). Evidence from the Gediz graben for episodic two stage extension in western Turkey. *Journal of the Geological Society of London*, 156, 605-616.
- Koralay, E., Candan, O., Akal, C., Dora, O. Ö., Chen, F., Satir, M. ve Oberhänsli, R. (2011). Menderes Masifi'ndeki Pan-Afrikan ve Triyas yaşlı

- metagranitoidlerin jeolojisi ve jeokronolojisi, Batı Anadolu, Türkiye. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 142, 69-121.
- Lauknes, T. R., Shanker, A. P., Dehls, J. F., Zebker, H. A., Henderson, I. H. C. & Larsen, Y. (2010). Detailed rockslide mapping in northern Norway with small baseline and persistent scatterer interferometric SAR time series methods. *Remote Sensing of Environment*, 114(9), 2097-2109.
- Le Pichon, X. & Angelier, J. (1979). The Hellenic arc and trench system: a key to the neotectonic evolution of the eastern Mediterranean area. *Tectonophysics* 60, 1-42.
- Le Pichon X., Chamot-Rooke C., Lallemand S., Noomen R. & Veis G. (1995). Geodetic determination of the kinematics of Central Greece with respect to Europe: implications for Eastern Mediterranean tectonics, *Journal of Geophysical Research*, 100, 12675-12690.
- Lips, A. L., Cassard, D., Sözbilir, H., Yılmaz, H. & Wijbrans, J. R. (2001). Multistage exhumation of the Menderes massif, western Anatolia (Turkey). *International Journal of Earth Sciences*, 89(4), 781-792.
- Maghsoudi, Y., van der Meer, F., Hecker, C., Perissin, D. & Saepuloh, A. (2018). Using PS-InSAR to detect surface deformation in geothermal areas of West Java in Indonesia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 386-396.
- Massonnet, D., Holzer, T. & Vadon, H. (1997). Land subsidence caused by the East Mesa geothermal field, California, observed using SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, 24(8), 901-904.
- McClusky, S. C., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., ... & Veis, G. (2000). Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*, 105, 5695-5719. <https://doi.org/10.1029/1999JB900351>
- McKenzie, D. (1978). Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions. *Geophysical Journal International*, 55(1), 217-254.
- Nocquet, J. M. (2012). Present-day kinematics of the Mediterranean: a comprehensive overview of GPS results. *Tectonophysics*, 579, 220-242.
- Oktar, O., Erdoğan, H., Poyraz, F. & Tiryakioğlu, İ. (2021). Investigation of deformations with the GNSS and PSInSAR methods. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(23), 1-16.
- Osmanoğlu, B., Sunar, F., Wdowinski, S. & Cabral-Cano, E. (2016). Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 90-102.
- Öner, Z. & Dilek, Y. (2011). Supradetachment basin evolution during continental extension: The Aegean province of western Anatolia, Turkey. *Geological Society of America Bulletin*, 123(11-12), 2115-2141.
- Özkaymak, C. & Sözbilir, H. (2008). Stratigraphic and structural evidence for fault reactivation: the active Manisa fault zone, western Anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17, 615-635.
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Tiryakioğlu, İ. ve Baybura, T. (2017). Bolvadin'de (Afyon-Akşehir Grabeni, Afyon) Gözlenen Yüzey Deformasyonlarının Jeolojik, Jeomorfolojik ve Jeodezik Analizi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 60(2), 169-189. <https://doi.org/10.25288/tjb.302914>
- Paton, S. (1992). Active normal faulting, drainage patterns and sedimentation in southwestern Turkey. *Journal of the Geological Society, London* 149, 1031-44.
- Pawluszek-Filipiak, K. & Borkowski, A. (2020). Integration of DInSAR and SBAS Techniques to determine mining-related deformations using sentinel-1 data: The case study of Rydułtowy mine in Poland. *Remote Sensing*, 12(2), 242.
- Poyraz, F. & Hastaoğlu, K. Ö. (2020). Monitoring of tectonic movements of the Gediz Graben by the PSInSAR method and validation with GNSS results. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(17), 1-11.
- Poyraz, F., Hastaoğlu, K. Ö. ve Demirel, M. (2016). Gediz Grabenin Doğu Kesimindeki Tektonik Hareketlerin Envisat Radar Görüntülerini Kullanarak Araştırılması. 8. *Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu* (s.: 1-5). İstanbul.

- Poyraz, F., Hastaoğlu, K. Ö., Koçbulut, F., Tiryakioğlu, İ., Tatar, O., Demirel, M., ... & Sığırcı, R. (2019). Determination of the block movements in the eastern section of the Gediz Graben (Turkey) from GNSS measurements. *Journal of Geodynamics*, 123, 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.11.001>
- Poyraz, F., Tatar, O., Hastaoğlu, K. Ö., Tiryakioğlu, İ., Gürsoy, Ö., Koçbulut, F., ... & Gül, D. (2015). Gediz Grabeninin Doğu Kesimindeki Güncel Tektonik Hareketlerin GPS Ve Ps-InSAR Yöntemleri Kullanılarak Belirlenmesi; İlk Sonuçlar. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1), 17-28. <https://doi.org/10.15659/hartek.15.03.64>
- Price, S. P. & Scott, B. (1994). Fault-block rotations at the edge of a zone of continental extension; southwest Turkey. *Journal of Structural Geology*, 16(3), 381-392.
- Purvis, M. & Robertson, A. (2004). A pulsed extension model for the Neogene–Recent E–W-trending Alaşehir Graben and the NE–SW-trending Selendi and Gördes Basins, western Turkey. *Tectonophysics*, 391(1), 171-201.
- Purvis, M. & Robertson, A. (2005). Sedimentation of the Neogene–Recent Alaşehir (Gediz) continental graben system used to test alternative tectonic models for western (Aegean) Turkey. *Sedimentary Geology*, 173(1-4), 373-408.
- Radiguet, M., Perfettini, H., Cotte, N., Gualandi, A., Valette, B., Kostoglodov, V., ... & Campillo, M. (2016). Triggering of the 2014 Mw 7.3 Papanao earthquake by a slow slip event in Guerrero, Mexico. *Nature Geoscience*, 9(11), 829-833. <https://doi.org/10.1038/ngeo2817>
- Reid, H. F. (1910). The mechanics of the earthquake: The California Earthquake of April 18, 1906. *Carnegie Institute Washington Publication*, 87(2), 192.
- Reilinger, R. E., McClusky, S. C., Oral, M. B., King, R. W., Toksoz, M. N., Barka, A. A., Kinik, I., Lenk, O. & Sanli, I. (1997). GPS measurements of present day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 102(B5), 9983-9999. <https://doi.org/10.1029/96JB03736>
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R. ... & Karam, G. (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 111(B5). Article B5411 <https://doi.org/10.1029/2005JB004051>
- Ring, U., Johnson, C., Hetzel, R. & Gessner, K. (2003). Tectonic denudation of a Late Cretaceous–Tertiary collisional belt: regionally symmetric cooling patterns and their relation to extensional faults in the Anatolide belt of western Turkey. *Geological Magazine*, 140(4), 421-441.
- Roberts, S. C. (1988). *Active normal faulting in Central Greece and Western Turkey* [phD Thesis]. University of Cambridge, Cambridge.
- Rojay, B. (2009). Post-Miocene Deformation in Central Anatolia and its link to Horst and Graben System of Western Anatolia, Turkey. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 4601.
- Rojay, B., Demirci, C., Toprak, V. & Özsayın, E. (2019). Superposition of the neotectonic events in a complex multi extensional terrain evolution during post-Miocene in western Anatolia (Gediz-Alaşehir Graben, western Turkey). *Geophysical Research Abstracts*, (21).
- Rojay, B., Toprak, V., Demirci, C. & Süzen, L. (2005). Plio-quadernary evolution of the Küçük Menderes graben southwestern Anatolia, Turkey. *Geodinamica Acta*, 18(3-4), 317-331.
- Rosen, P. A., Hensley, S., Zebker, H. A., Webb, F. H. & Fielding, E. J. (1996). Surface deformation and coherence measurements of Kilauea Volcano, Hawaii, from SIR–C radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 101(E10), 23109-23125.
- Saatçılar, R., Ergintav, S., Demirbağ, E. & İnan, S. (1999). Character of active faulting in the North Aegean Sea. *Marine Geology*, 160(3-4), 339-353.
- Saber, R., Isik, V., Caglayan, A. & Tourani, M. (2023). Sentinel-1 InSAR observations and time-series analysis of co- and postseismic deformation mechanisms of the 2021 Mw 5.8 Bandar Ganaveh Earthquake, Southern Iran. *Journal of Mountain Science*, 20(4), 911-927.

- Sangu, E., Gürer, Ö. F. & Gürer, A. (2020). Fault kinematic and Plio-Quaternary paleostress evolution of the Bakırçay basin, western Turkey. *International Geology Review*, 62(10), 1245-1261.
- Sarychikhina, O. & Glowacka, E. (2015). Application of DInSAR Stacking Method for Monitoring of Surface Deformation Due to Geothermal Fluids Extraction in the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress 2015 (WGC)* (pp. 19-25).
- Savaşçın, M. Y., Giese, L. B., Kaya, O., Pekdeğer, A. & Woith, H. (1999). An example for the optimal use of geothermal energy-the integrated development project for Kula, West Anatolia. *International Symposium on Geology and Environment*, Istanbul.
- Seyitoğlu, G. & Scott, B. C. (1991). Late Cenozoic crustal extension and basin formation in west Turkey. *Geological Magazine*, 128(2), 155-166.
- Seyitoğlu, G. & Scott, B. C. (1994). Late Cenozoic basin development in west Turkey: Gördes basin tectonics and sedimentation. *Geological Magazine*, 131(5), 631-637.
- Seyitoğlu, G. & Scott, B. C. (1996). The age of Alaşehir Graben (west Turkey) and its tectonic implications. *Geological Journal*, 31(1), 1-11.
- Seyitoğlu, G., Scott, B. C. & Rundle, C. C. (1992). Timing of Cenozoic extensional tectonics in west Turkey. *Journal of the Geological Society*, 149(4), 533-538.
- Seyitoğlu, G., Tekeli, O., Çemen, İ., Şen, Ş. & Işık, V. (2002). The role of the flexural rotation/rolling hinge model in the tectonic evolution of the Alaşehir graben, western Turkey. *Geological Magazine*, 139, 15-26.
- Shahabi, H. & Hashim, M. (2015). Landslide susceptibility mapping using GIS-based statistical models and Remote sensing data in tropical environment. *Scientific reports*, 5(1), 9899.
- Shanker, P., Casu, F., Zebker, H. A. & Lanari, R. (2011). Comparison of persistent scatterers and small baseline time-series InSAR results: A case study of the San Francisco bay area. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(4), 592-596.
- Sözbilir, H. (2001). Extensional tectonics the geometry of related macroscopic structures: Field evidence from the Gediz detachment, western Turkey. *Turkish Journal of Earth Science*, 10, 51-67.
- Sözbilir H. (2002). Revised stratigraphy and facies analysis of the Palaeocene-Eocene supra-allochthonous sediments and their tectonic significance (Denizli, SW Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 11, 1-27.
- Sözbilir, H., Erkül, F. & Sümer, Ö. (2003a). Field evidence for post-Miocene NE-trending accommodation zone lying between Gümüldür (İzmir) and Bigadiç (Balıkesir), west Anatolia. 56. *Geological Congress of Turkey*, 85-86.
- Sözbilir, H., İnci, U., Erkül, F. & Sümer, Ö. (2003b). An active intermittent transfer zone accommodating N-S extension in western Anatolia and its relation to the North Anatolian fault system. *International Workshop on the North Anatolian, East Anatolian and Dead Sea Fault Systems: Recent Progress in Tectonics and Palaeo-seismology and Field Training Course in Palaeoseismology*, 87.
- Sözbilir, H., Uzel, B., Sümer, Ö., Eski, S., Softa M., Tepe, Ç., Özkaymak, Ç. ve Baba, A. (2018). Çanakkale-Ayvacık Deprem Fırtınasının (14 Ocak-20 Mart 2017) Sismik Kaynakları. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B-Teorik Bilimler*, 6, 1-17.
- Sümer, Ö., İnci, U. & Sözbilir, H. (2013). Tectonic evolution of the Söke Basin: extension-dominated transtensional basin formation in western part of the Büyük Menderes Graben, Western Anatolia, Turkey. *Journal of Geodynamics*, 65, 148-175.
- Şaroğlu, F. ve Güler, B. (2020). Batı Anadolu Tektonik Kaması'nın güncel deformasyonu: batıya doğru kaçıştan kaynaklanan blok hareketleri. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 63(2), 161-194. <https://doi.org/10.25288/tjb.593423>
- Şengör, A. M. C. (1979). The North Anatolian Transform Fault: its age, offset and tectonic significance. *Geological Society of London*, 136, 269-282.
- Şengör, A. M. C. (1987). Cross-faults and differential stretching of hanging walls in regions of low-angle normal faulting: examples from western Turkey. *Geological Society London*, 28, 575-589.
- Şengör, A. M. C., Görür, N. & Şaroğlu, F. (1985). Strike-slip faulting and related basin formation in

- zones of tectonic escape: Turkey as a case study, In K. Biddle, N. Christie-Blick (Eds), *Strike-slip Deformation, Basin Formation and Sedimentation. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publications 37*, 227-264.
- Şimşek, C. ve Demirkesen, A. C. (2022). Kısa Dönem Kuyu İzlem Verilerine Göre Yeraltısuyu Besleniminin Belirlenmesi, Alaşehir (Manisa) Örneği. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 24(70), 91-104.
- Tatar, O., Sözbilir, H., Koçbulut, F., Bozkurt, E., Aksoy, E., Eski, S., ... & Metin, Y. (2020). Surface deformations of 24 January 2020 Sivrice (Elazığ)–Doğanyol (Malatya) earthquake (Mw= 6.8) along the Pütürge segment of the East Anatolian Fault Zone and its comparison with Turkey's 100-year-surface ruptures. *Mediterranean Geoscience Reviews*, 2(3), 385-410. <https://doi.org/10.1007/s42990-020-00037-2>
- Taymaz, T., Ganas, A., Berberian, M., Eken, T., Irmak, T. S., Kapetanidis, V., ... & Özkan, B. (2022). The 23 February 2020 Qotur-Ravian earthquake doublet at the Iranian-Turkish border: Seismological and InSAR evidence for escape tectonics. *Tectonophysics*, 838. Article 229482. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229482>
- Taymaz, T., Jackson, J. & McKenzie, D. (1991). Active tectonics of the north and central Aegean Sea. *Geophysical Journal International*, 106(2), 433-490.
- Taymaz, T., Yılmaz, Y. & Dilek, Y. (2007). The geodynamics of the Aegean and Anatolia: introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 291(1), 1-16.
- Tekin, T., Sançar, T. & Rojay, B. (2022). A new set of overprinting slip-data along Manisa Fault in Aegean Extensional Province, Western Anatolia. *EGU22-452, Copernicus Meetings*.
- Temiz, H., Gürsoy, H. & Tatar, O. (1998). Kinematics of late pliocene-quaternary normal faulting in the southeastern end of the Gediz graben, Western Anatolia, Turkey. *International Geology Review*, 40(7), 638-646.
- Thomson, S. N. & Ring, U. (2006). Thermochronologic evaluation of postcollision extension in the Anatolide orogen, western Turkey. *Tectonics*, 25, Article TC3005.
- Tiryakioğlu, İ., Umutlu, A. İ. ve Poyraz, F. (2019). Jeodezik Yöntemlerle Deprem Tekrarlama Periyotlarının Belirlenmesi: Alaşehir Bölgesi Örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(3), 762-768.
- Torres, R., Snoeij, P., Davidson, M., Bibby, D. & Lokas, S. (2012). The Sentinel-1 mission and its application capabilities. *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 1703-1706). *Munich, Germany*. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351196>.
- Uzel, B., Kuiper, K., Sözbilir, H., Kaymakci, N., Langereis, C. G. & Boehm, K. (2020). Miocene geochronology and stratigraphy of western Anatolia: Insights from new Ar/Ar dataset. *Lithos*, 352, Article 105305.
- Uzel, B., Langereis, C. G., Kaymakci, N., Sözbilir, H., Özkaymak, Ç. & Özkaptan, M. (2015). Paleomagnetic evidence for an inverse rotation history of Western Anatolia during the exhumation of Menderes core complex. *Earth and Planetary Science Letters*, 414, 108-125.
- Uzel, B. & Sözbilir, H. (2008). A first record of a strike-slip basin in western Anatolia and its tectonic implication: the Cumaovası Basin. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17(3), 559-591.
- van Hinsbergen, D. J. J., Dekkers, M. J., Bozkurt, E. & Koopman, M. (2010). Exhumation with a twist: paleomagnetic constraints on the evolution of the Menderes metamorphic core complex, western Turkey. *Tectonics*, 29(3), 1-33, Article TC3009.
- Walters, R. J., Holley, B., Parsons & Wright T. J. (2011). Interseismic strain accumulation across the North Anatolian Fault from Envisat InSAR measurements. *Geophysical Research Letters*, 38(5), Article L05303. <https://doi.org/10.1029/2010GL046443>
- Wang, H., Wright, T. J. & Biggs, J. (2009). Interseismic slip rate of the northwestern xianshuihe fault from insar data. *Geophysical Research Letters*, 36(3), Article L03302. <https://doi.org/10.1029/2008GL036560>
- Weiss, J. R., Walters, R. J., Morishita, Y., Wright, T. J., Lazecky, M., Wang, H., ... & Parsons, B. (2020). High-resolution surface velocities and strain for Anatolia from Sentinel-1 InSAR and GNSS data. *Geophysical Research Letters*,

- 47(17), Article e2020GL087376. <https://doi.org/10.1029/2020GL087376>
- Yagüe-Martínez, N., Prats-Iraola, P., Gonzalez, F. R., Brcic, R., Shau, R., Geudtner, D., Eineder, M. & Bamler, R. (2016). Interferometric processing of Sentinel-1 TOPS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(4), 2220-2234. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2497902>
- Yeats, R. S., Sieh, K. ve Allen, C. R. (2006). *Deprem Jeolojisi* (Çev: R. Demirtaş ve K. Kayabalı). Ankara: Gazi Kitabevi. (Orijinal yayın tarihi: 1997).
- Yen, J. Y., Lu, C. H., Chung-Pai, C., Hooper, A. J., Chang, Y. H., Liang, W. T., ... & Chen, K.-S. (2011). Investigating active deformation in the northern Longitudinal Valley and City of Hualien in eastern Taiwan using persistent scatterer and small-baseline SAR interferometry. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*. 22, 291-304. [https://doi.org/10.3319/TAO.2010.10.25.01\(TT\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2010.10.25.01(TT))
- Yılmaz, Y., Genç, Ş. C., Gürer, O. F., Bozcu, M., Yılmaz, K. ve Karacık, Z., Altunkaynak, Ş. & Elmas, A. (2000). When did the western Anatolian grabens begin to develop?. In E. Bozkurt, J. A. Winchester & J. D. A. Piper (Eds.), *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area. Geological Society of London, Special Publication, 173*, 353-384. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2000.173.01.17>
- Zanchi, A. & Angelier, J. (1993). Seismotectonics of western Anatolia: regional stress orientation from geophysical and geological data. *Tectonophysics*, 222(2), 259-274.
- Zhang, Y., Meng, X., Chen, G., Qiao, L., Zeng, R. & Chang, J. (2016). Detection of geohazards in the Bailong River Basin using synthetic aperture radar interferometry. *Landslides*, 13(5), 1273-1284.
- Zhu, L., Mitchell, B. J., Akyol, N., Cemen, I. & Kekovali, K. (2006). Crustal thickness variations in the Aegean region and implications for the extension of continental crust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B1), Article B01301. <https://doi.org/10.1029/2005JB003770>