



Relationship between Seismic Velocity and Pore Pressure: Case Study of Denizli Basin

Orhan Gureli ¹

¹ Arar Petrol ve Gaz AUP AS. Dumluca Sok. No.19 Beysukent, Cankaya, Ankara, Türkiye
ORCID: 0000-0001-5909-2171

Keywords

Denizli basin, Local earthquake, 3D seismic velocity tomography, Geothermal, Pore pressure

Highlights

- * Geothermal potential of Denizli basin
- * Distribution map of Vp and Vp/Vs ratio of Denizli basin
- * Pore pressure predictions of Denizli basin

Aim

To reveal the geothermal potential of Denizli basin and to obtain pore pressure maps.

Location

Denizli city Türkiye

Methods

Equations of both Eaton and Sayer were used in order to calculate pore pressure.

Results

High pressure areas of the Denizli basin were determined.

Supporting Institutions

Akca Enerji AS has given the information of Ak-3 and Ak-6 wells.

Financial Disclosure: The author declares that this study has received no financial support.

Peer-review

Externally peer-reviewed

Conflict of Interest: The author has no conflicts of interest to declare.

Manuscript

Research Article

Received: 24.12.2021

Revised: 04.04.2022

Accepted: 05.04.2022

Printed: 30.06.2022

DOI

10.46464/tdad.1042767



Content of this journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International Non-Commercial License

Corresponding Author

Orhan Gureli

Email: orhangureli@gmail.com

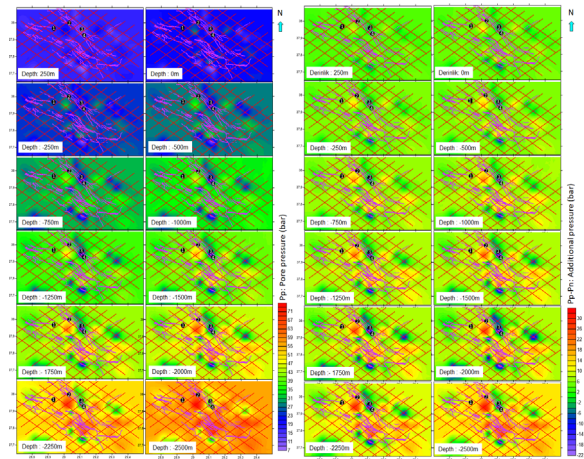


Figure
Pore pressure maps of the study area

How to cite:

Gureli O., 2022. Relationship between seismic velocity and pore pressure: case study of Denizli basin, Turk. J. Earthq. Res. 4(1), 98-136, <https://doi.org/10.46464/tdad.1042767>



Sismik Hız İle Boşluk Basıncı İlişkisi: Denizli Havzası Örneği

Orhan Güreli¹

¹ Arar Petrol ve Gaz AÜP AŞ. Dumluca Sok. No.19 Beysukent, Çankaya, Ankara, Türkiye
ORCID: 0000-0001-5909-2171

ÖZET

Ege bölgesi ve Denizli havzası yüksek sismik aktiviteye ve zengin jeotermal alanlara sahiptir. Ayrıca bölgede yoğun bir deprem etkinliği de gözlenmektedir. Bölgede petrol, gaz ve jeotermal arama ve üretimi için boşluk basıncı hesabı, kaydedilen bu deprem verilerinin analizi ile belirlenen 1-B ve 3-B sismik hızlardan hesaplanabilir. Bu çalışma kapsamında Denizli Havzasının boşluk basıncı literatürdeki mevcut V_p hızları kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar sahada açılmış jeotermal kuyuları ve doğal jeotermal sıcak su çıkışları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda elde edilen bilgilerin kuyu bilgileri ile uyumlu oldukları görülmüştür. Sonuç olarak, bu yöntem jeotermal alanlarda sondaj için boşluk basınç bölgelerinin belirlenmesinde kullanılabilir ve kuyu lokasyonunda ek bir bilgi olarak kabul edilebilir.

Anahtar kelimeler

Denizli havzası, Yerel depremler, 3-B sismik hız tomografisi, Jeotermal, Boşluk basıncı

Öne Çıkanlar

- * Denizli Havzasının jeotermal potansiyeli.
- * Denizli Havzasının V_p dağılım haritası ve V_p/V_s oranı.
- * Denizli havzasının boşluk basıncı tahminleri.

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 24.12.2021
Düzeltilme: 04.04.2022
Kabul: 05.04.2022
Basım: 30.06.2022

DOI

10.46464/tdad.1042767

Sorumlu yazar

Orhan Güreli
Eposta:
orhangureli@gmail.com

Relationship between Seismic Velocity and Pore Pressure: Case Study of Denizli Basin

Orhan Güreli¹

¹ Arar Petrol ve Gaz AUP AŞ. Dumluca Sok. No.19 Beysukent, Çankaya, Ankara, Türkiye
ORCID: 0000-0001-5909-2171

ABSTRACT

The Aegean region and Denizli basin have high seismic activity and rich geothermal fields. Furthermore, a remarkable earthquake activity is also observed in the region. The pore pressure calculation for oil, gas and geothermal exploration and production in the region can be computed from the 1-D and 3-D seismic velocities determined by the analysis of seismologic data. In the frame of this study, the pore pressure of Denizli Basin was calculated using V_p velocities obtained from available literature. Obtained results were compared with geothermal wells and hot water springs in the field. We report that the information obtained from the comparison is coherent with the well data. As a result, this technique can be used to determine the pore pressure zones for the drill in geothermal areas, and can be considered as an additional information in the well location.

Keywords

Denizli basin, Local earthquake, 3D seismic velocity tomography, Geothermal, Pore pressure

Highlights

- Geothermal potential of Denizli Basin .
- Distribution map of V_p and V_p/V_s ratio of Denizli Basin.
- Pore pressure predictions of Denizli Basin.

Manuscript

Research Article

Received: 24.12.2021
Revised: 04.04.2022
Accepted: 05.04.2022
Printed: 30.06.2022

DOI

10.46464/tdad.1042767

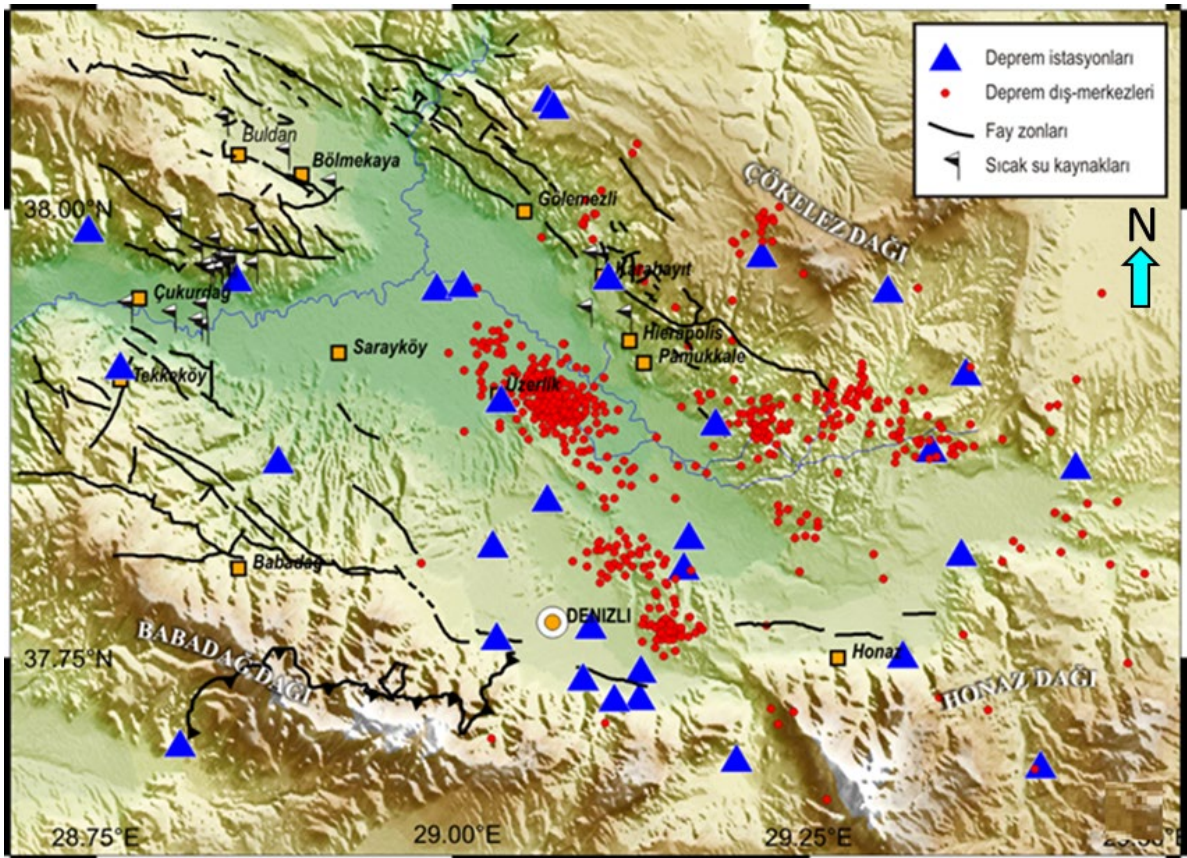
Corresponding Author

Orhan Güreli
Email:
orhangureli@gmail.com

1. GİRİŞ

Ege bölgesi ve Denizli havzası yüksek sismik aktiviteye ve zengin jeotermal alanlara sahiptir. 2000 yılında Denizli havzası çevresinde artan bir sismik aktivite gözlemlenmiştir. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu-Marmara Araştırma Merkezi-Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü (TÜBİTAK-MAM-YDBE) tarafından bölgedeki sismik aktiviteyi gözlemlemek için 28 istasyonlu geçici sismik ağ kurulmuş, 635 deprem kullanılarak bir boyutlu (1-B) ve üç boyutlu (3-B) sismik hız modelleri elde edilmiştir (Kaypak ve Venedik 2011). Bu modelleri, jeolojik ve tektonik birimlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlar ve yorumlamışlardır.

Denizli havzası, Anadolu'nun batısında olup Alaşehir Grabeni ile Büyük Menderes Grabeni'nin birleştiği bir noktadadır. Havzanın kuzey-güney yönündeki genişleme rejimi nedeniyle, doğu-batı yönlü büyük küçük boyutlarda birçok graben oluşmuştur. Bölgedeki en önemli iki graben, D-B yönlü Büyük Menderes ve KB-GD yönlü Alaşehir grabenidir. Bu grabenler doğuda Denizli havzasında birleşirler. Denizli havzası ve çevresi, jeotermal açıdan önemli bir potansiyele sahip olduğu kadar, deprem etkinliği açısından da bir öneme sahiptir (Şekil 1).



Şekil 1: TÜBİTAK-MAM YDBAE tarafından 3-29.09.2000 tarihleri arasında bölgeye yerleştirilmiş istasyonlar (üçgenler) ve kaydedilen mikro depremlere ($1.0 \leq M \leq 3.0$) ait lokasyonlar (daireler) (Kalın çizgiler ana fay zonlarını, siyah-beyaz bayraklar ise mevcut sıcak su noktalarını göstermektedir.) (Kaypak ve Gokkaya 2012)

Figure 1: Stations (triangles) and locations of recorded micro earthquakes (circles) ($1.0 \leq M \leq 3.0$) by TÜBİTAK-MAM YDBAE between 3-29.09.2000 (Bold black lines indicate main fault zones and black and white flags indicate existing hot water spots.) (Kaypak and Gokkaya 2012)

Tarihsel ve aletsel dönemlerde bölgede farklı büyüklüklerde birçok deprem olmuş ve bunların birçoğu yıkıcı ve çevreye zarar verici olmuştur. Bunlardan birincisi 21 Aralık 1945'te meydana gelen Sarayköy-Buldan depreminin hasarlarının gözlemlenmesiyle ilgilidir (Lahn 1948). Ates ve Bayulke (1982), 19 Ağustos 1976 depreminin ($M = 4.7$) merkez üssü yakınında bir ivmeölçer

tarafından kaydedilen kuvvetli hareket verilerini incelemiştir. Altunel ve Barka (1996), Denizli-Hierapolis antik kenti içindeki Roma ve Bizans yapılarına zarar veren MS 60 depreminin yüzey kırılmalarını araştırmıştır. Piccardi (2007) de MS 60 depreminin Pamukkale Fayı üzerinde yer alan Hierapolis ve Colossae antik kentleri üzerindeki etkilerine odaklanmıştır. Akyol ve diğ. (2006) 45 geçici ve 5 kalıcı istasyon tarafından kaydedilen 725 yerel depremi kullanarak Batı Anadolu'da Denizli havzasını da içeren 1-B P-dalgası kabuk hız modelini hesaplamıştır.

Denizli havzası ve çevresinin tektonik evrimi ve jeolojik yapısı, Gökçen (1982) tarafından incelenmiştir. Bölgeyle ilgili daha yeni çalışmalar da yapılmıştır. Bu araştırmacılar çalışmalarında, bölgedeki yeni jeodinamik sistemleri, tektonik modelleri ve jeolojik evreleri anlatmışlardır. Ayrıca, bölgenin jeotermal potansiyeli, jeokimyasal (Uysal ve diğ. 2009) ve petrol (Gurgey ve diğ. 2007) özellikleri ile ilgili çalışmalar da bulunmaktadır. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) bölgede Maden ve Jeotermal aramaları için uzun yıllar çalışma yürütmüştür. Bu çalışmalarda daha çok gravite ve öz direnç yöntemleri uygulanmış ve 2000 m derinliğe kadar önemli sonuçlar elde edilmiştir (Özgüler ve diğ. 1983). Ates ve diğ. (1999), aeromanyetik ve gravite verilerini yeniden yorumlayarak Anadolu'nun GB'sındaki D-B yönelimli gravite anomalilerinin bölgedeki graben sistemleri ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Günümüzde bölgede pek çok jeofizik araştırmalar yapılmış, kuyular açılmış ve Jeotermal Elektrik Santralleri (JES) kurulmuştur.

Sismik tomografi yöntemi ile depremle ortaya çıkan dalgaların (P ve S dalgası) seyahat zamanı kullanılarak, basenin veya bölgenin sismik hız modeli elde edilir. Elde edilen hız modeliyle deprem arasındaki ilişkiler ortaya çıkartılır ve ayrıca bölgenin jeolojisi ile korele edilir. Bu konuda Charlety ve diğ. (2006), Ozer ve Polat (2017), Ozer ve Ozyazicioglu (2019), Al-Amri ve diğ. (2020), Ozer (2021) gibi birçok araştırmacı konuyla ilgili çalışmıştır.

Sondaj öncesi basınç hesabı, geçmişte çok basit modellerle hız bilgileri kullanılarak basit tahminlerle yapılmıştır. Yöntemler genellikle basınç için yerel olarak kalibre edilmiş bir dizi eğri içerir. Etkif gerilme kavramının ortaya çıkışı ve bu kavramdan geliştirilen basınç tahmin yöntemlerinin, petrol ve doğalgaz arama aşamasında yaygın olarak kullanılmasına yol açmıştır. Etkif gerilme yöntemlerinin kullanımı, basınç tahmini için standart haline gelmiştir. Bu tekniğin Eaton yöntemi, Bowers yöntemi ve Sperry Sun yöntemi dâhil olmak üzere birçok çeşidi vardır (Huffman 2002, Wang ve Wang 2015).

2. JEOLJİK VE TEKTONİK ORTAMLAR

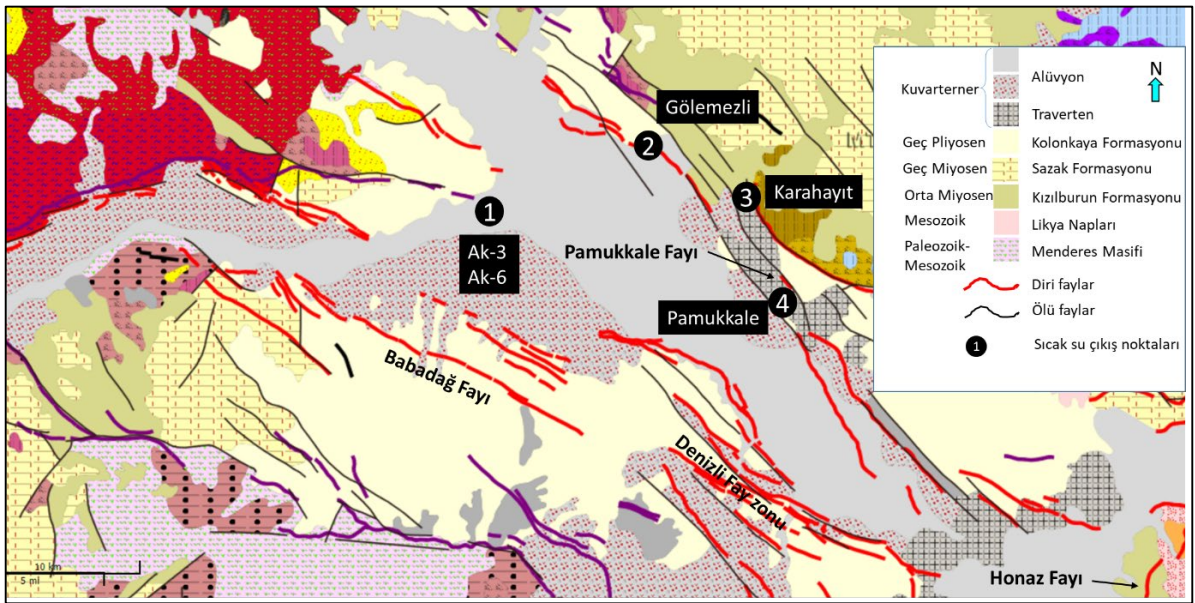
Batı Anadolu'daki tektonik genişleme hareketleri sonucunda çok fazla graben oluşmuştur. En büyük graben; Büyük Menderes Grabeni (BMG), Küçük Menderes Grabeni (KMG) ve Gediz Grabenidir (GG). Bölgedeki grabenler, Kuzey-Güney doğrultulu genişleme hareketine bağlı olarak çoğunlukla Doğu-Batı yönlü olup değişik boyutlardadır. Denizli havzası BMG ile GG'nin kesiştiği yerde oluşmuştur. Ege bölgesinin önemli havzalarından biri olan Denizli Havzası, 50 km uzunluğunda ve 25 km genişliğindedir. Batı-Kuzeybatı ve Doğu-Güneydoğu doğrultulu simetrik olmayan bir grabendir (Şekil 2). Havza güneyde Honaz ve Babadağ dağları, kuzeyde ise Çökelez Dağı arasındadır (Topal 2003).

2.1) Jeoloji

Denizli ve çevresi jeolojik olarak iki ana grup litolojiden oluşur. İlk grup temel kayalar ve ikinci grup ise bunların üzerini örten genç havza çökelleridir. Bölgenin jeolojik birimleri incelendiğinde, bu birimler yaşlıdan gence aşağıdaki şekilde sıralanmıştır (Şekil 2). Bunlar; 1- Paleozoyik yaşlı metamorfikler (aşağıdan yukarıya doğru gnays, şist, kuvarsit, mikaşist ve mermer birimler tabanı oluşturur), 2- Pliyosen çökelleri (Paleozoyik yaşlı metamorfikleri örten karasal ve gölsel çökelleridir. Bunlar konglomera, kıltaşı, kumtaşı, marn, kireçtaşı ve silttaşı aralanmalarından oluşur) ve 3-Kuvaterner çökelleridir (Alüvyon, yamaç molozları ve hidrotermal bozuşum kayaçları).

2.2) Tektonizma

Menderes masifinin oluşturduğu gerilmeler sonucunda, tektoniğe bağlı Doğu-Batı ve Kuzeybatı-Güneydoğu yönlü normal faylar ve gerilmeye bağlı çatlaklar ile horst ve grabenler oluşmuştur. Bu horst ve grabenleri oluşturan Pamukkale Fayı, Denizli Fay Zonu, Babadağ Fayı ve Doğu-Batı yönlü Honaz faylarıdır (Şekil 2). Burada oluşmuş fayların çoğu normal faylardır. Bölge tektonik olarak, Denizli bölgesi ile Batı Anadolu'nun genişlemesi ile oluşan graben sistemi içinde yer alır (Sengor 1987). Batı Anadolu yılda 40-60 mm civarında Kuzey-Güney yönlü genişlemektedir (McKenzie 1978). Babadağ, Honazdağ, Yenice, Çökelezdağ ve Buldan horstları ile Çürüksu, Büyük Menderes, Gediz grabenleri bölgenin başlıca yapılarıdır. Bölgede volkanik kayalarla ilgili bilgi yoktur, fakat faylardan çıkan gazların türüne bakıldığında, ısı kaynağının magmatik kökenli olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 2: Denizli Havzası'nın jeoloji haritası (MTA 2021'den revize edildi)
 Figure 2: Geologic map of the Denizli Basin (revised from MTA 2021)

2.3) Hidrotermal

Bölgede, grabenleri oluşturan faylar ve kırık zonları içerisine giren magma sokulumları jeotermal sistemi oluşturmaktadır (Duman 2009). Buna bağlı olarak bölgede çok fazla sıcak su çıkışları bulunmaktadır. Bu sıcak su çıkışlarından bazıları Tekkehamam, Kızıldere, Yenice, Gölemezli, Karahayit ve Pamukkale'dir. En önemli sıcak su çıkışları Pamukkale ve Kızıldere jeotermal sahalarıdır. Doğal olarak çıkan su sıcaklıkları 35 °C ile 90 °C arasındadır. Bununla birlikte sahada, özellikle Kızıldere jeotermal sahası ve çevresinde, sıcak su çıkışı ile birlikte çok fazla buhar çıkışları da vardır. Erees ve diğ. (2007)'ye göre sıcak sular daha çok fayların vadiyi kestiği bölgelerden, buhar ise yükselimlerin olduğu yerlerden ve tepelerden gelmektedir. Denizli basenindeki Jeotermal sahalarında farklı sıcaklık seviyeleri bulunmaktadır. Bölgedeki en yüksek sıcaklık 246 derece ile Kızıldere-3 JES'tedir.

2.4) Depremsellik

Bölge depremsellik bakımından Türkiye'nin en aktif bölgelerindendir ve yoğun fay zonları ile kaplıdır. Bu bakımdan Denizli ili ve çevresi hem tarihsel dönemde, hem de aletsel dönemde meydana gelmiş depremlerden etkilenmiştir. Tarihsel dönemdeki depremler

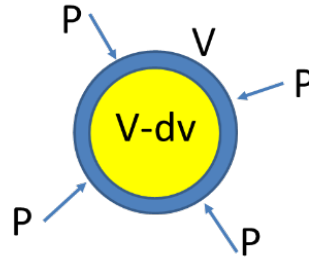
değerlendirildiğinde, bugün Pamukkale olarak bilinen ve antik dönemde Hierapolis kentini yıkan yıkıcı depremlere ait kayıtlar bulunmuştur. Bu bilgilere göre MS 17, MS 60, MS 300, MS 494 ve 700 tarihlerinde meydana gelen depremlerde Pamukkale ve yakın çevresinde büyük hasarlar meydana gelmiştir. 1358 yılında meydana gelen deprem nedeniyle Pamukkale büyük hasar görmüş ve bunun sonucunda da Pamukkale terk edilmiştir. Son yüzyılda Denizli ve ilçelerinde 35'in üzerinde önemli deprem meydana gelmiştir. Denizli ve çevresinde son yüzyılda meydana gelen depremlere baktığımızda çok sık aralıklarla 4.0-5.0 arası depremler meydana gelmiştir. Büyüklüğü 5'den büyük olan önemli depremler; Çivril, Buldan, Honaz, Denizli Kuzeyi, Sarayköy ve Çameli olarak verilebilir. Tüm bunlar göz önüne alındığında Denizli önemli bir Sismotektonik Bölge olarak tanımlanmaktadır.

3. YÖNTEM

Kayaçların sismik hızları; kayacın yoğunluğuna, porozitesine, litolojisine, sıcaklığına, üzerindeki basınca ve boşluk basıncına bağlı olarak değişir (Uyanik 1999). Bu konu geliştirilmiş ve daha çok doğalgaz sahalarında uygulanmakta olup "Doğrudan Hidrokarbon Keşfi-Direct HC indicator (DHI)" yöntemlerinden biri olmuştur. Aynı zamanda bu yöntem, gazlı sahalarda kuyu tasarımında ve kuyu koruma (Casing) programında kullanılmaktadır.

3.1) Teori

Bulk Modülü (K): Hidrostatik basınç altında kalan bir kayaçtaki gerilme-deformasyon ölçüsüdür. Yani materyalin hacim değişikliğine karşı mukavemetinin ölçüsüdür (Şekil 3).



Şekil 3: Bulk modülü (P: basınç, V: hacim ve dv ise hacim değişimi)
Figure 3: Bulk modulu (P: pressure, V: volume and dv: volume change)

$$K = \frac{\text{Hacim Gerilmesi}}{\text{Hacim Deformasyonu}} = \frac{P}{dv/V} \quad (1)$$

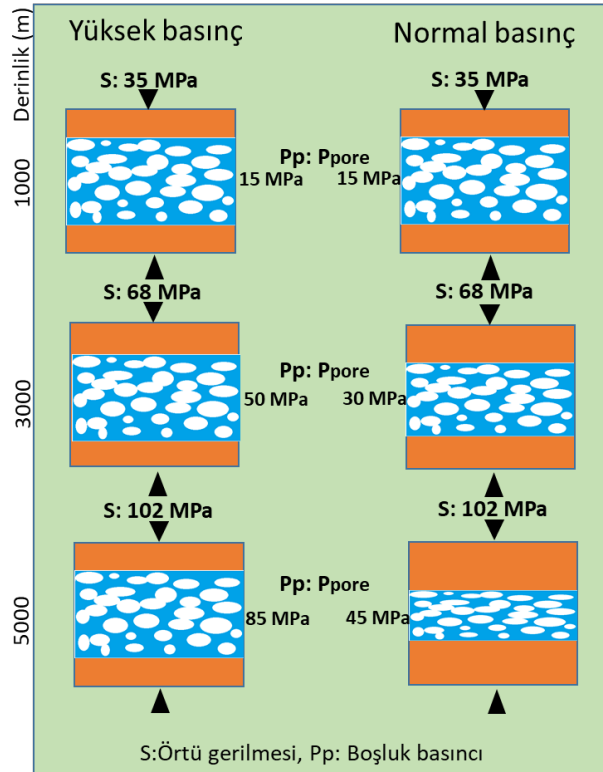
Denklem 1'de K: Bulk modülü, P: basınç, V: hacim ve dv ise hacim değişimidir. Şekil 3'te görüldüğü gibi dışardan tüm yüzeye uygulanan basınç artarsa hacimde bir miktar azalma olmaktadır. Hacmin azalması Bulk modülünü (K) artırmaktadır. K modülü arttıkça formasyon sertleşmekte olup, bu sertleşmeye bağlı olarak sismik hızlar da artmaktadır.

$$v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (2)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3)$$

Denklem 1 ve 2'de V_p : P dalgasının hızı, V_s : S dalgasının hızı, μ : Rijitide (sıkıştırılabilirlik) ve ρ ise yoğunluktur. Sismik hızlar kayaçların, Kimyasal bileşimine, sıcaklığına ve basıncına bağlı olarak değişir. Düşük sıcaklıkta, yüksek basınçta ve katı hal durumunda sismik hızlar artmaktadır. Yüksek sıcaklık, düşük basınç ve sıvı hal ise hızı azaltan faktörlerdir. Kayaçların içindeki akışkan arttıkça V_s hızı düşer, V_p hızı ise akışkanın hızına bağlı olarak, kayaç hızından akışkan hızına doğru değişir.

Boşluk basıncının etkileri Şekil 4'te gösterilmiştir. Boşluk basıncı ile hızlar ters orantılıdır. Boşluk basıncının artması ile sismik ara hızlar düşmektedir. Gazın ve/veya basınçlı akışkanın bulunduğu formasyon içinde boşluk basıncı normal seviyede olduğunda, üzerindeki yüke bağlı olarak hacimsel olarak küçülür. Bu durumda hacmin küçülmesi ile yoğunluk artacak ve buna bağlı olarak sismik ara hızlar da artacaktır. Fakat Boşluk basıncı normalden fazla olması durumunda, hacim normale göre daha fazla olacaktır. Buna bağlı olarak yoğunluk düşecek ve bunun sonucu olarak da sismik ara hızlar düşecektir. Dolayısıyla, normal şartlarda hızın artması gerekirken düşüyorsa böyle noktalarda yüksek boşluk basıncı etkisi var denilebilir. Bununla birlikte jeolojinin de iyi bilinmesi gerekir. Her düşük hızlı bölgeye yüksek boşluk basıncılı bölge denilemez, çünkü bu düşük hızlılık jeolojik nedenlerden de kaynaklı olabilir.

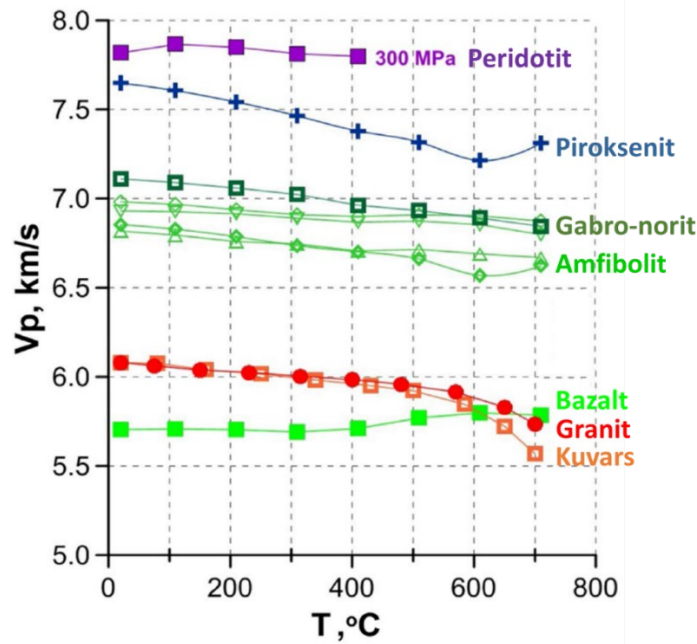


Şekil 4: Normal basınç ve yüksek basınç altında Şeyl'in davranışı (Bowers (2002)'den revize edilmiştir)
Figure 4: Compaction of shale in overpressed and normal conditions (revised from Bowers (2002).)

Şeyl gibi çökel kayaçların gözenekli olması nedeniyle yüksek basınç ve sıcaklık karşısında hacim değişikliği fazla olmaktadır. Bu nedenle bu tür kayaçların sıcaklık ve basınç altında hız değişimi fark edilebilmektedir. Kayaçlar çok sert olursa, sıcaklık ve basınç altında değişimleri az olabilir. Bu durumda hız değişimi olmayabilir. Yine de yüksek sıcaklık ve basınç altında her türlü kayaçta az da olsa bir değişim olmaktadır. Bu değişim sıcaklık ve basınca bağlı genleşme katsayısı ile orantılıdır.

3.2) Sıcaklık-Sismik Hız İlişkisi

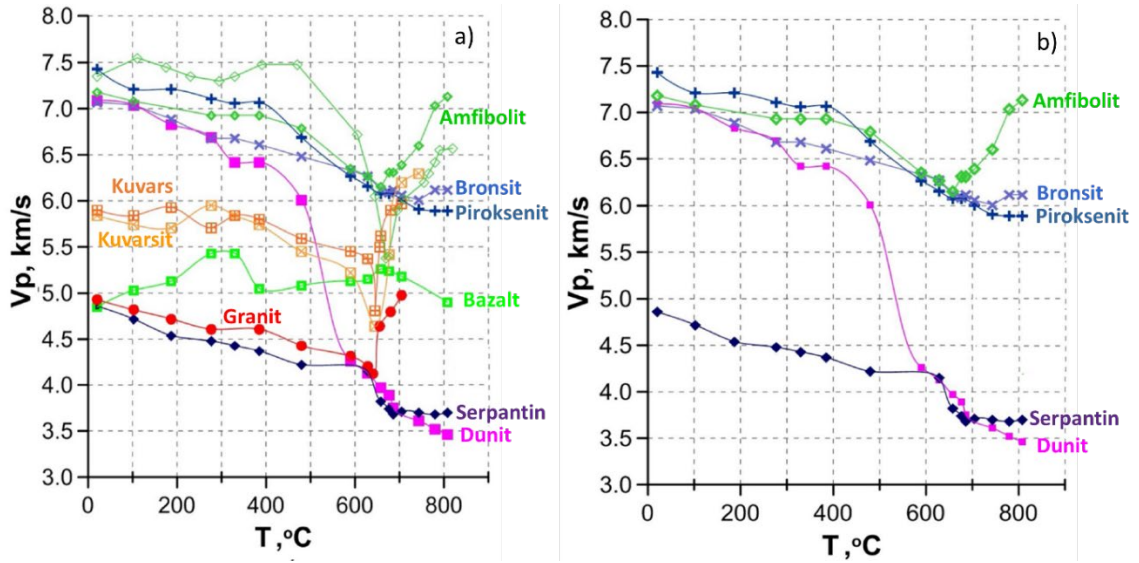
Lebedev ve diğ. (2021)'in yaptığı çalışmaya göre; kuru koşullarda, incelenen mafik-ultramafik kayalardaki sıkışma dalgı hızları (V_p), 20 ila 700 °C arasındaki tüm sıcaklık (T) aralığında çok az da olsa değişir (şekil 5). Kayacın mineral yapısının etkisi daha önemlidir. İncelenen tüm sıcaklık aralığında, ultramafik kayalardaki V_p hızı, mafik kayalardan 0.3-0.5 km/s daha yüksektir. Aynı zamanda amfibolit gibi su taşıyan mafik kayalar da benzer veya daha düşük V_p değerlerine sahiptir. Ancak, bu sıcaklıkta farklı bileşimdeki gabrolar ve amfibolitler için V_p hız farkı 0.3 km/s civarındadır. Bazaltlarda, daha yüksek gözeneklilik, heterojen yapı, kristal mineral fazlarına bağlı olarak ve ikincil minerallerin varlığı nedeniyle V_p hız değerlerinde bir miktar artış gözlenmektedir (şekil 5).



şekil 5: Kuru koşullarda ve 600 MPa basınç altında kayaların V_p hızlarının 700 °C sıcaklığa kadar değişimi (Lebedev ve diğ. 2021)

Figure 5: V_p in rocks under pressure of 600 MPa and at temperature up to 700 °C under dry conditions (Lebedev et al. 2021)

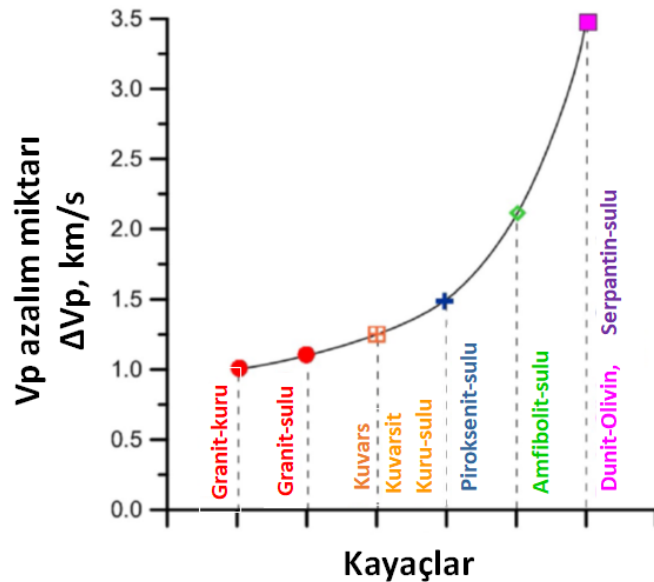
Su basıncı altında, mafik-ultramafik kayalar için V_p sıcaklık bağımlılığı, kuru koşullar altında ölçülen kayalara kıyasla daha karmaşıktır ve esas olarak numunelerin yapısal özellikleri ve mineralojik bileşimi tarafından belirlenir (şekil 6a,b). Kuru koşullarda, piroksenitlerdeki V_p hızı, 800 °C'ye kadar artan sıcaklıkla nispeten monoton bir şekilde azalır. Bununla birlikte, su basıncı altında V_p 'deki düşüş, özellikle 400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yaklaşık 1 km/s kadar daha büyüktür. Bazaltta 400-650 °C aralığında su basıncı altında elastik dalgı hızları nispeten hafif değişir ve 5-5.3 km/s düzeyinde kalır. 800 °C'ye kadar sıcaklık artışı, 0.7 km/s'yi aşmayan V_p düşüşüne yol açar. Amfibolitlerdeki elastik dalgı hızındaki keskin düşüşte belirleyici bir rol, taneler arası gözenek boşluğına su girmesiyle termal genleşme nedeniyle açılan mikro çatıklara bağlıdır. Olivin ile zenginleştirilmiş tüm ultramafik kayalarda su basıncı altında V_p hızının çarpıcı bir şekilde düşüşü görülür (şekil 6b). Dunitte içinde bulunan su basıncı altında, yaklaşık 150-200 °C'nin üzerinde V_p hızında kademeli bir düşüş ve ardından 400-700 °C aralığında keskin bir düşüş ($\Delta V_p \approx 3$ km/s) gözlenir. Dunitte $T \sim 650-750$ °C'de V_p , serpantinitede aynı koşullar altında ölçülen değerlere ulaşır. Düşük sıcaklıkta, serpantinitedeki V_p hızı, dunitte göre önemli ölçüde daha düşüktür (~ 2 km/s). Serpantinitede 600 °C'ye kadar sıcaklık artışına karşılık monoton V_p düşüşü eşlik eder, ancak nispeten dar 640-680 °C aralığında ~ 0.4 km/s V_p 'de kayda değer bir azalma daha gözlenir (Lebedev ve diğ. 2021).



Şekil 6: a) 300 MPa su basıncı altındaki kayaçların Vp hızlarının 800 °C sıcaklığa kadar değişimi, b) 300 MPa su basıncı altındaki mafik ve ultramafik kayaçların Vp hızlarının sıcaklığa bağlı değişimi (Lebedev ve diğ. 2021)

Figure 6: a) Vp in rocks under pressure of 600 MPa and at temperature up to 700 °C under dry conditions b) The Vp temperature dependence for mafic-ultramafic rocks under water pressure of 300 MPa. (Lebedev et al. 2021)

600-700 °C sıcaklık aralığında yüksek basınçlarda mafik-ultramafik ve asidik kayaçlardaki olası elastik dalga hızları düşüşünün (ΔVp) ölçekleri genelleştirilmiş bir biçimde Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekil 7'ye göre en düşük hız düşmesi kuru granit iken (1 km/s) en yüksek hız düşmesi ise ıslak olan Dunit, Olivin ve Serpantinde (3.0-3.5 km/s) olmuştur. Aynı zamanda, elde edilen deneysel veriler, kayaç içindeki su varlığı sismik hızların daha fazla düşmesine sebep olmaktadır.

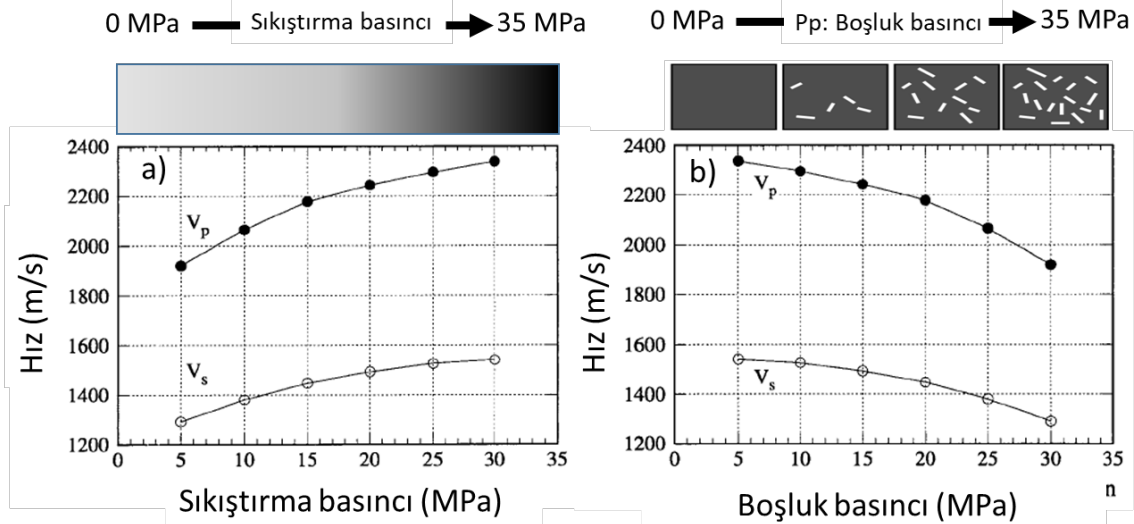


Şekil 7: Kuru ve sulu koşullarda yapılan deney sonucuna göre, 400-800 °C sıcaklıklarda elastik dalga hızlarındaki ΔVp değişimleri (Lebedev ve diğ. (2021)'den değiştirilmiştir.)

Figure 7: The value of ΔVp -changes of elastic wave velocities at temperatures of 400-800 °C. The figure shows experimental data in dry conditions and in the water presence (revised from Lebedev et al. (2021).)

3.3) Boşluk Basıncı - Sismik Hız İlişkisi

Şeyl, kil, silt, kum, kum taşları gibi tortul çökellerin yüksek poroziteli olması nedeniyle sıkıştırma ve boşluk basıncına duyarlıdır. Boşluk basıncının artması ile sismik hızlar düşmektedir. Sediman olmayan diğer kayalarda da genleşme katsayısına ve porozitesine bağlı olarak hızlar düşecektir (Şekil 8).



Şekil 8: a) V_p ve V_s hızlarının sıkıştırma basıncına göre değişimi, b) V_p ve V_s hızlarının boşluk basıncına göre değişimi (Blangy (1992)'den düzenlenmiştir.)

Figure 8: a) Variation of V_p and V_s velocities with compression pressure, b) Variation of V_p and V_s velocities with pore pressure (revised from Blangy (1992).)

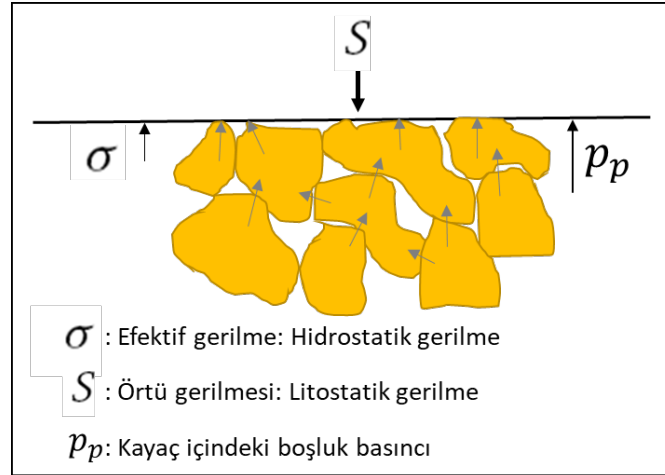
3.4) Sismik Hızlardan Boşluk Basıncının Elde Edilmesi

Sismik hızlardan boşluk basıncının elde edilmesi konusunda çok fazla araştırmacı çalışmıştır ve çalışmaya devam etmektedir. Yeraltındaki kayaların fiziksel özelliklerine, sıvı içeriklerine ve süreksizliklerine bağlı olarak V_p ve V_s hızları önemli ölçüde değişmektedir. V_p 'nin derinlikle değişimi, kayaç özelliklerini (kayaç türünü, minerolojisi, derinlik vs.) ve litolojik değişiklikleri verirken, V_p/V_s oranı değişimleri ise kayaçların porozitesi, çatlak durumu ve sıvı içeriğiyle olan ilişkisini verir (Berge ve Bonner 2002). Sismik hızlar kullanılarak boşluk basıncı hesabında en yaygın ve en çok kullanılan yaklaşımlar Eaton (1972) ve Bowers (1995) yaklaşımlarıdır. Bu yaklaşımlardan geliştirilen boşluk basıncı hesabı yöntemi petrol ve doğalgaz aramacılığında uzun yıllardır kullanılmaktadır ve günümüzde enerjiye olan ihtiyaç göz önüne alındığında ekonomik açıdan oldukça önem arz etmektedir. Bu yöntemler daha çok tortul kayaçlar için uygulanmaktadır. Özellikle sondajcılarının uyguladığı bu yöntem gazlı sahalarda kuyu tasarımında, kuyu koruma (casing) programında ve sondaj hızı planlanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma için yapılan hesaplamalarda Eaton (1972) denklemleri kullanılmıştır. Şekil 9'da görüldüğü gibi, örtü gerilmesi (S) boşluk basıncı (Pp) ile efektif gerilmenin (σ) toplamına eşittir.

$$S = \sigma + P_p \quad (\text{Sayers ve diğ. 2002}) \quad (4)$$

(4) nolu denklem normal boşluk basıncı için yazıldığında (5) nolu denklemdeki gibi olur;

$$\sigma_n = S - p_n \quad (5)$$



Şekil 9: Efektif gerilme, örtü gerilmesi ve kayaç içindeki boşluk basıncı ilişkisi

Figure 9: Relationship between lithostatic stress, hydrostatic stress and pore pressure in the rock

$$S = g \cdot \rho_m \cdot z \quad (6)$$

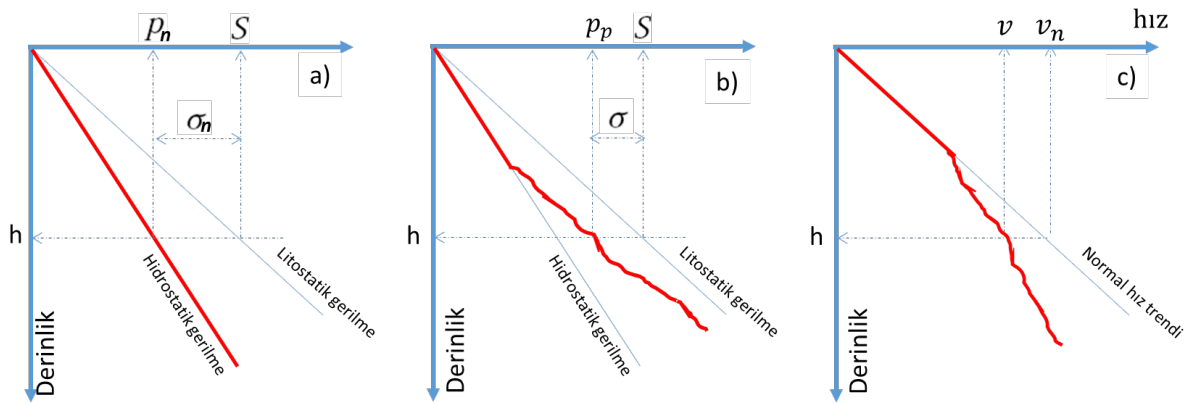
Normal boşluk basıncı, boşluk içindeki akışkanın yoğunluğuna ve derinliğine göre çevreye uyguladığı basınç olup (7) nolu denklemdeki gibidir,

$$p_n = g \cdot \rho_w \cdot z \quad (\text{Soleymani ve Riahi 2012}) \quad (7)$$

(4) nolu denklem içerisinde (6) nolu denklem yazılıp düzenlenirse (8) nolu denklemdeki gibi olur.

$$\sigma = g \cdot \rho_m \cdot z - P_p \quad (8)$$

Efektif gerilmenin sismik hızlarla ilişkisi Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10: a) Hidrostatik gerilme, litostatik gerilme ve efektif gerilme ilişkisi, b) Hidrostatik basınç, litostatik gerilme, efektif gerilme ve boşluk basıncı ilişkisi, c) Sismik hızlarla ilişkileri (Sayers ve diğ. 2002)

Figure 10: a) Relation of Hydrostatic pressure, lithostatic stress, and effective stress., b) Relation of Hydrostatic pressure, lithostatic stress, effective stress and pore pressure., c) Their relation with seismic velocity (Sayers ve diğ. 2002)

$$\sigma = \sigma_n \left(\frac{v}{v_n} \right)^m \quad (\text{Sayers ve diğ. 2002}) \quad (9)$$

$$v_n(z) = v_o + k.z \quad (\text{Sayers ve diğ. 2002}) \quad (10)$$

(10) no'lu denklem sismik ara hızların derinliğe değişimini veren denklemdir. (5) ve (9) nolu denklemler, (4) nolu denklemde yerine yazılırsa (11) nolu denklem elde edilir.

$$P_p = S - (S - p_n) \cdot (v/v_n)^m \quad (11)$$

(11) no'lu denklem boşluk basıncı hesabında yaygın olarak kullanılmaktadır (Eaton 1972, Bowers 1995). Burada;

σ_n : Normal efektif gerilme,
 σ : h derinliğindeki efektif gerilme,
 p_n : Normal boşluk basıncı,
 g : yer çekimi ivmesi,
 ρ_m : Kütlenin yoğunluğu,
 ρ_w : Formasyon içindeki akışkanın yoğunluğu,
 h : Derinlik,
 v : h derinliğindeki sismik ara hız,
 z : derinlik,
 v_n : h veya z derinliğindeki beklenen/tahmin edilen hız değeri,
 v_o : Yüzeyledeki tabakanın sismik ara hızı,
 k : birim hız değişimi,
 m : sabit katsayıdır.

4. VERİ

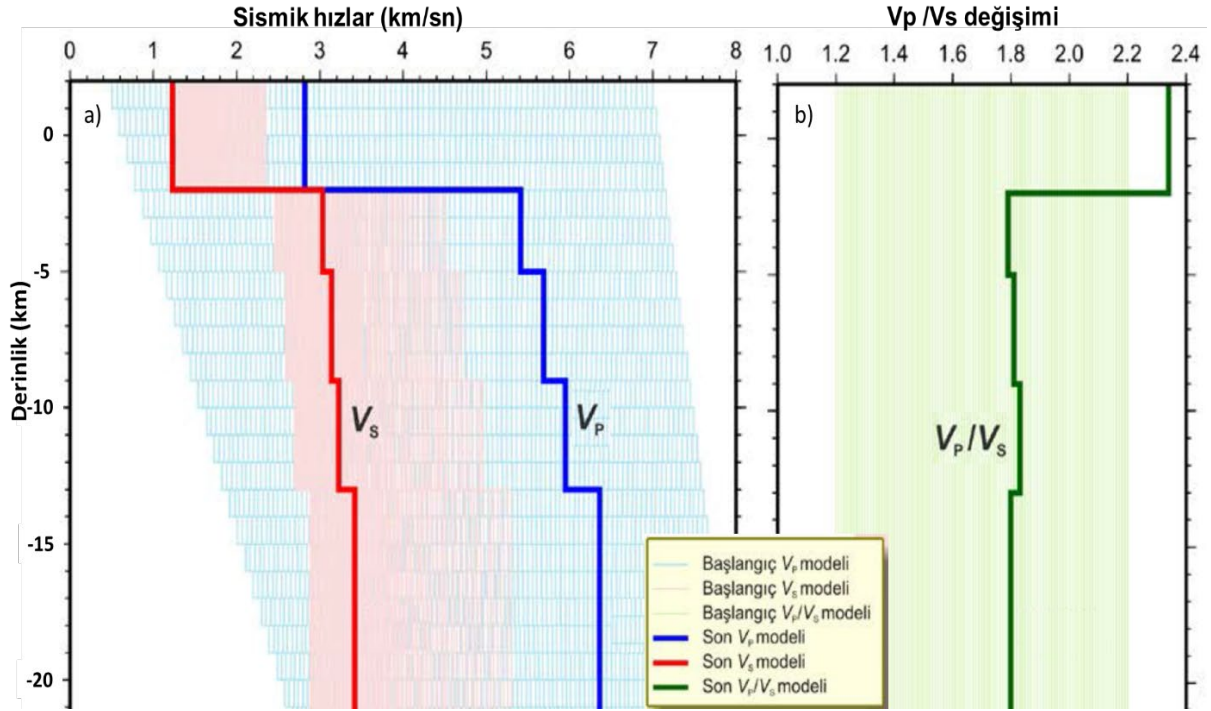
4.1) Verinin Toplanması

Bölgede 2000 yılında, kayıtlara göre en büyüğü 5.2 olan farklı büyüklüklerde bir dizi deprem kayıt edilmiştir. Meydana gelen depremleri kayıt etmek, gözlemlemek ve diri fayların hareketlerini takip etmek amacı ile TÜBİTAK-MAM YDBAE tarafından bölgeye 24 adet tek bileşenli kısa periyodlu ve 4 adet üç bileşenli geniş bantlı olmak üzere toplam 28 istasyondan oluşan bir sismik ağ kurulmuştur (Şekil 1). Bölgede 03-29 Eylül 2000 tarihleri arasında yaklaşık bir ay süre ile veri toplanmıştır (Kaypak ve Venedik 2011, Kaypak ve Gokkaya 2012).

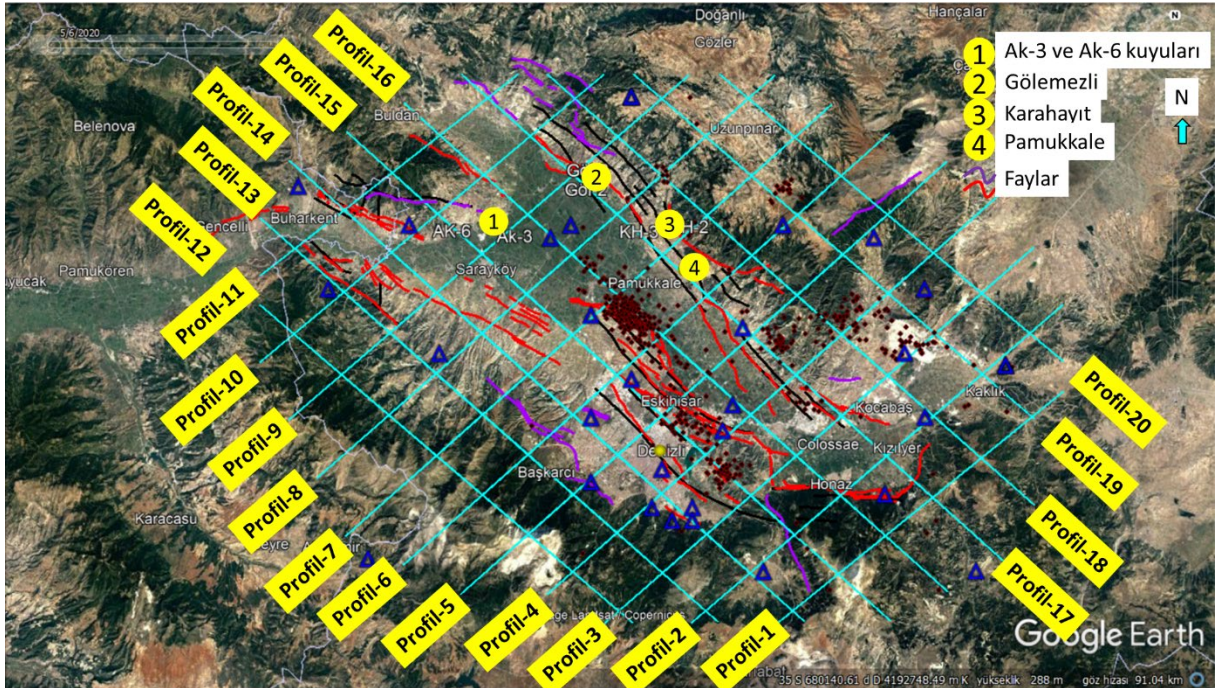
4.2) Verinin İşlenmesi

Bölgenin sismik hız yapısının elde edilebilmesi için sahada toplanan veriler iki aşamada işlenmiştir. Faz okumaları ve analizleri veri işleme kısmının en önemli aşamasını oluşturmaktadır. Önce ters çözüm yöntemi ile 1-B hız yapısı çıkarılmıştır. 1-B ters çözüm sonucunda yüzey jeolojisinin sismik hız üzerindeki etkisi gözlenmiş ve 2.0 km derinliğe kadar olan sığ katmanların hızlarının düşük olduğu görülmüştür (Şekil 11).

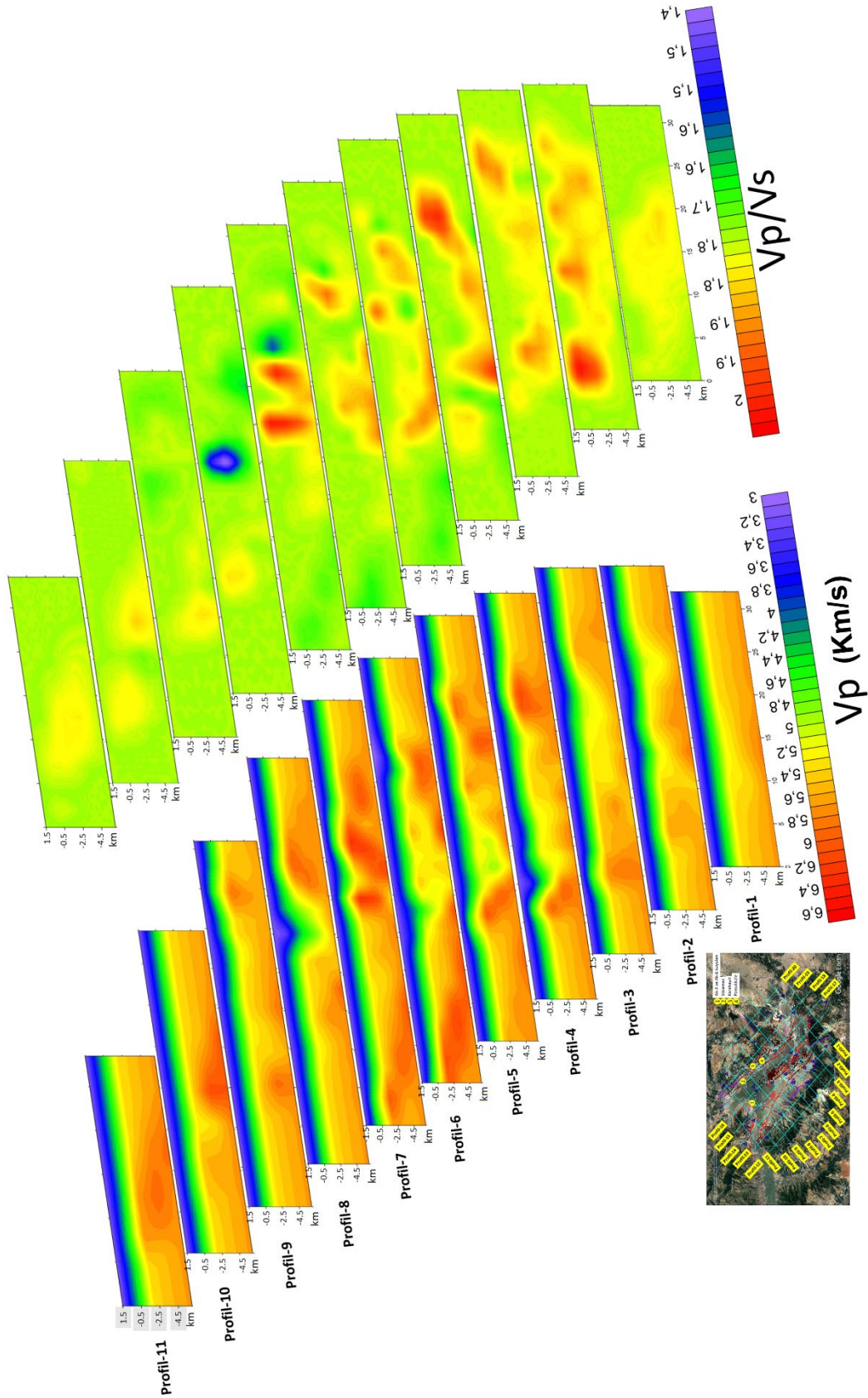
Daha sonra ise 24 km derinliğine kadar hız modeli hesaplanmıştır. Bu hesaplamada kullanılan profiller Şekil 12, Şekil 13a ve Şekil 13b'de gösterilmiştir. Şekil 12'de Denizli havzası içindeki depremler, kayıt eden deprem istasyonları, aktif ve pasif faylar görülmektedir. Değerlendirmeler sonucunda, şekilde belirlenen profiller boyunca V_p hızlar, V_p/V_s oranı değişimi belirlenmiş ve değerlendirilmede bu profiller boyunca hesaplamalar yapılmıştır. Bu profiller boyunca elde edilen V_p hızları ve V_p/V_s oranları Şekil 13a ve Şekil 13b'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, doğal sıcak su çıkışları olan Pamukkale, Karahayit ve Gölemezli bölgesindeki sıcaklık bilgileri ve Ak-3 ve Ak-6 kuyularının sıcaklık ve basınç bilgileri ile karşılaştırılmıştır.



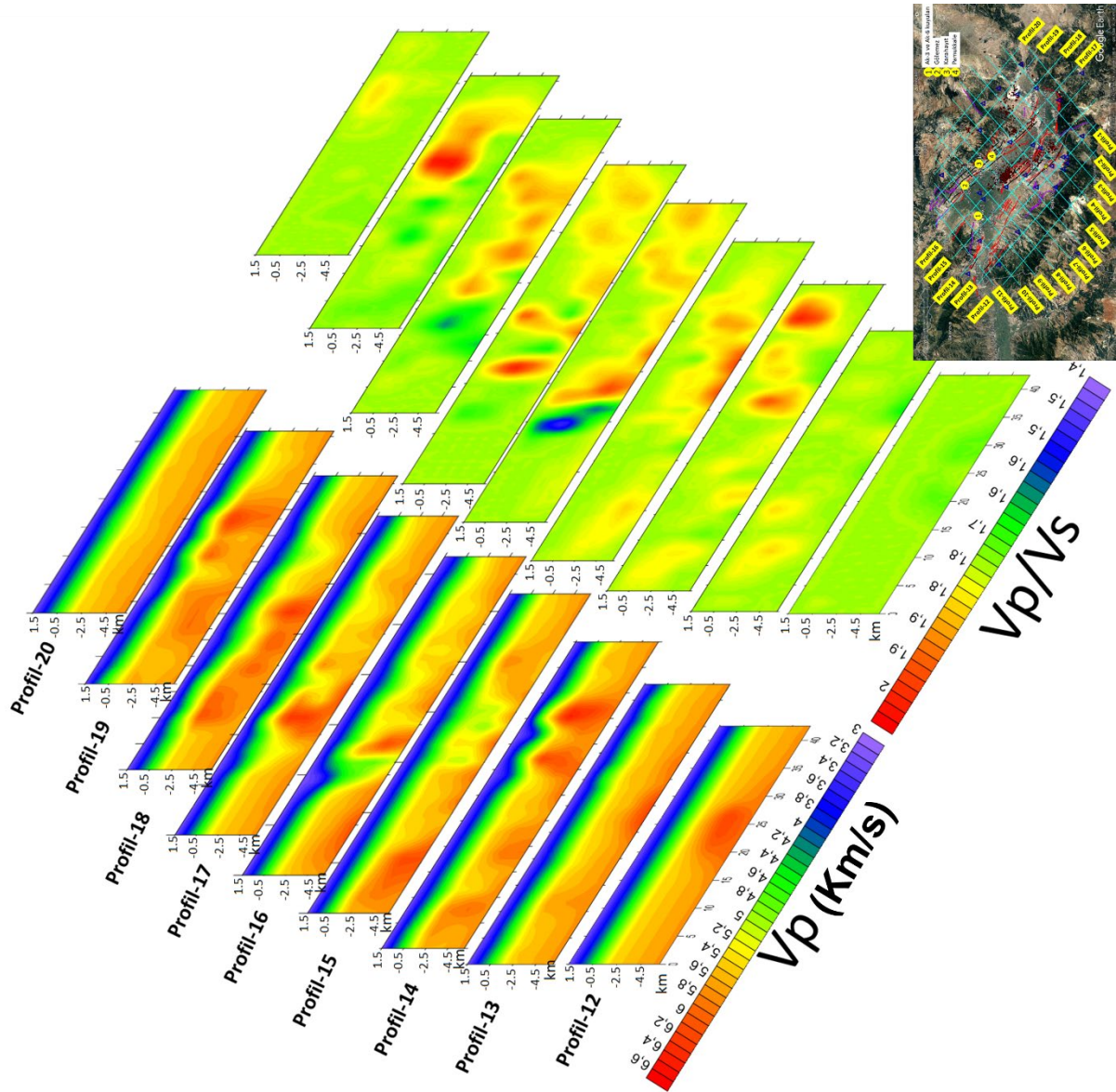
Şekil 11: a) 1-B ters çözüm için kullanılan başlangıç hız modelleri (ince çizgiler) ve final hız modelleri (kalın çizgiler), b) V_p/V_s değişimi (Kaypak ve Venedik (2011)'den revize edilmiştir)
 Figure 11: a) Initial (thin lines) and final (thick lines) minimum 1-D velocity models for P-wave, S-wave, b) V_p/V_s ratios (revised Kaypak ve Venedik (2011).)



Şekil 12: Denizli topografik haritasında profil lokasyonlarının görünümü (MTA 2021)
 Figure 12: Profile locations are shown in the Denizli topographic map (MTA 2021)



Şekil 13a: Şekil-12'deki KB-GD yönlü basene dik GB-KD yönlü profillerin 3-B ters çözüm sonucu elde edilen V_p ve V_p/V_s modellerine ait düşey 2-B kesitler (Kaypak ve Gokkaya 2012)
 Figure 13a: 2-D Vertical cross-sections for the absolute V_p and V_p/V_s models along defined profiles, perpendicular (SW-NE) to the basin direction (NW-SE) in Figure 12 (Kaypak and Gokkaya 2012)



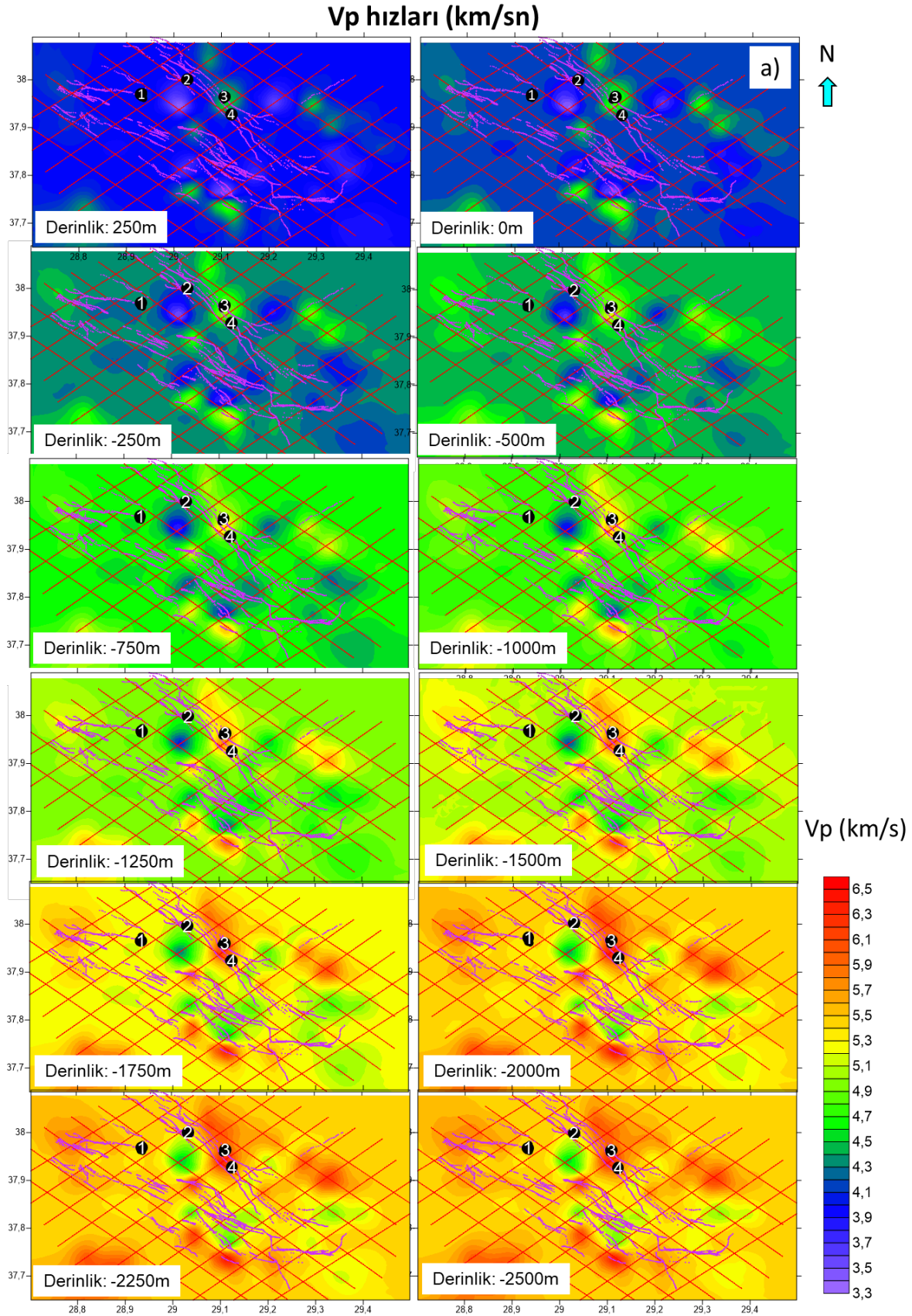
Şekil 13b: Şekil 12'deki KB-GD yönlü basene paralel KB-GD yönlü profillerin 3-B ters çözüm sonucu elde edilen V_p ve V_p/V_s modellerine ait düşey 2-B kesitler (Kaypak ve Gokkaya 2012)

Figure 13b: 2-D Vertical cross-sections for the absolute V_p and V_p/V_s models along defined profiles, parallel (NW-SE) to the basin direction (NW-SE) in Figure 12 (Kaypak and Gokkaya 2012)

Şekil 13'de verilen profiller boyunca elde edilen V_p hızları ve V_p/V_s oranı değişimleri derinliğin fonksiyonu olarak kat haritaları çıkarılmıştır (Şekil 14a,b). Bu haritalar, ham verilerden hareketle yeniden hazırlanmıştır. Bu verilere göre en düşük V_p hızı 3.1 km/s, en yüksek V_p hızı ise 6.6 km/s dir. Aynı şekilde V_p/V_s oranı değişimi ise en düşük 1.36 ve en yüksek 2.09'dur. V_p hız anomalileri ile V_p/V_s oranı anomalileri farklılık göstermektedir.

5. BULGULAR

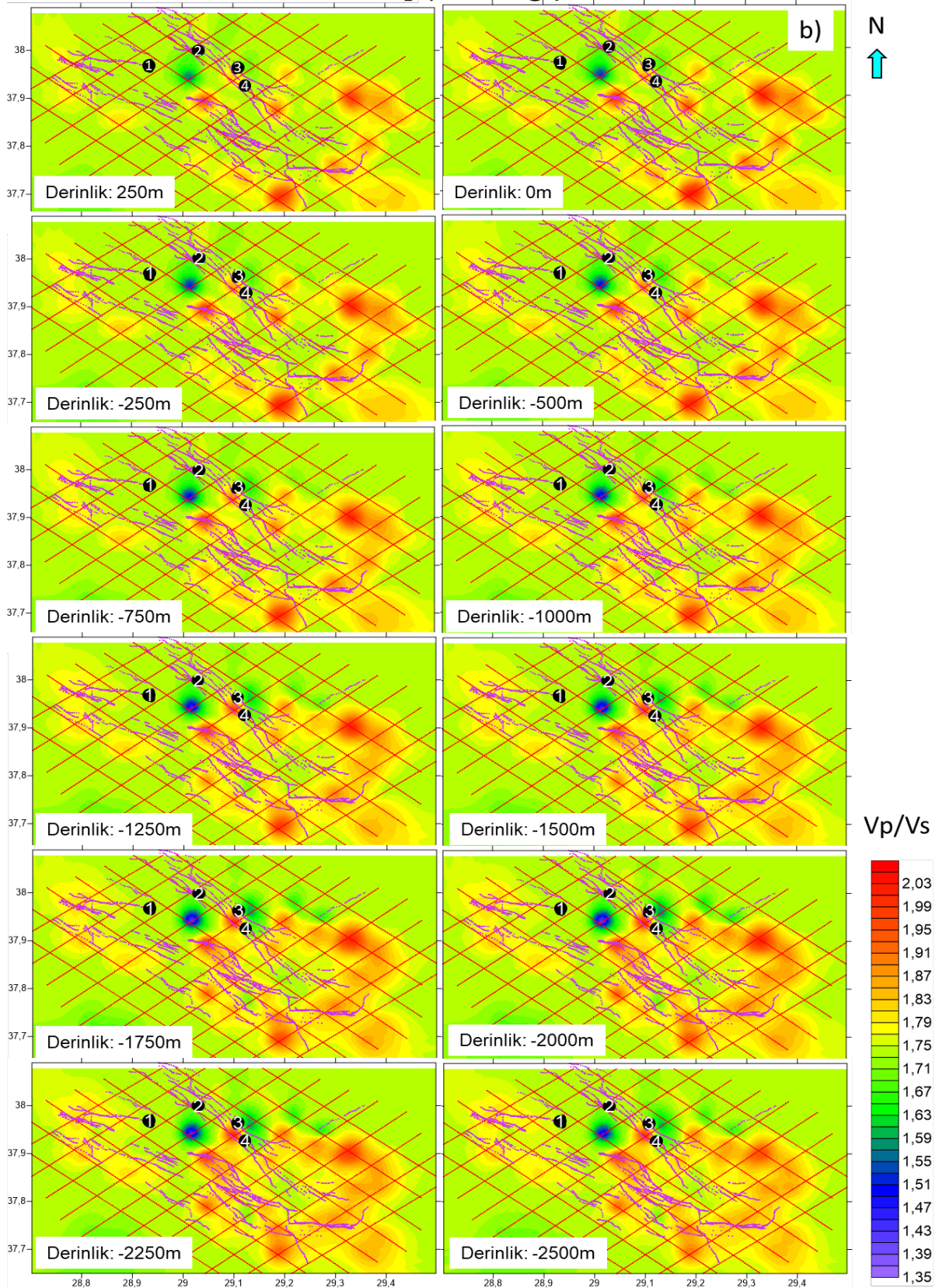
Denizli havzasındaki depremlerden elde edilen sismik hızların tamamı derinliğin fonksiyonu olarak Şekil 15a'da verilmiştir. Bu hızlar, 11 nolu denklemde kullanılarak boşluk basıncı hesabı yapılmıştır (Şekil 15b). Bu havza için hesaplamalarda aşağıdaki değerler kullanılmıştır.



Şekil 14a: Bazı seviyelerin Vp kat haritası (1: Ak-3 ve Ak-6 kuyusu, 2: Gölemezli, 3: Karahayıt, 4: Pamukkale) (Kaypak Gokkaya 2012)

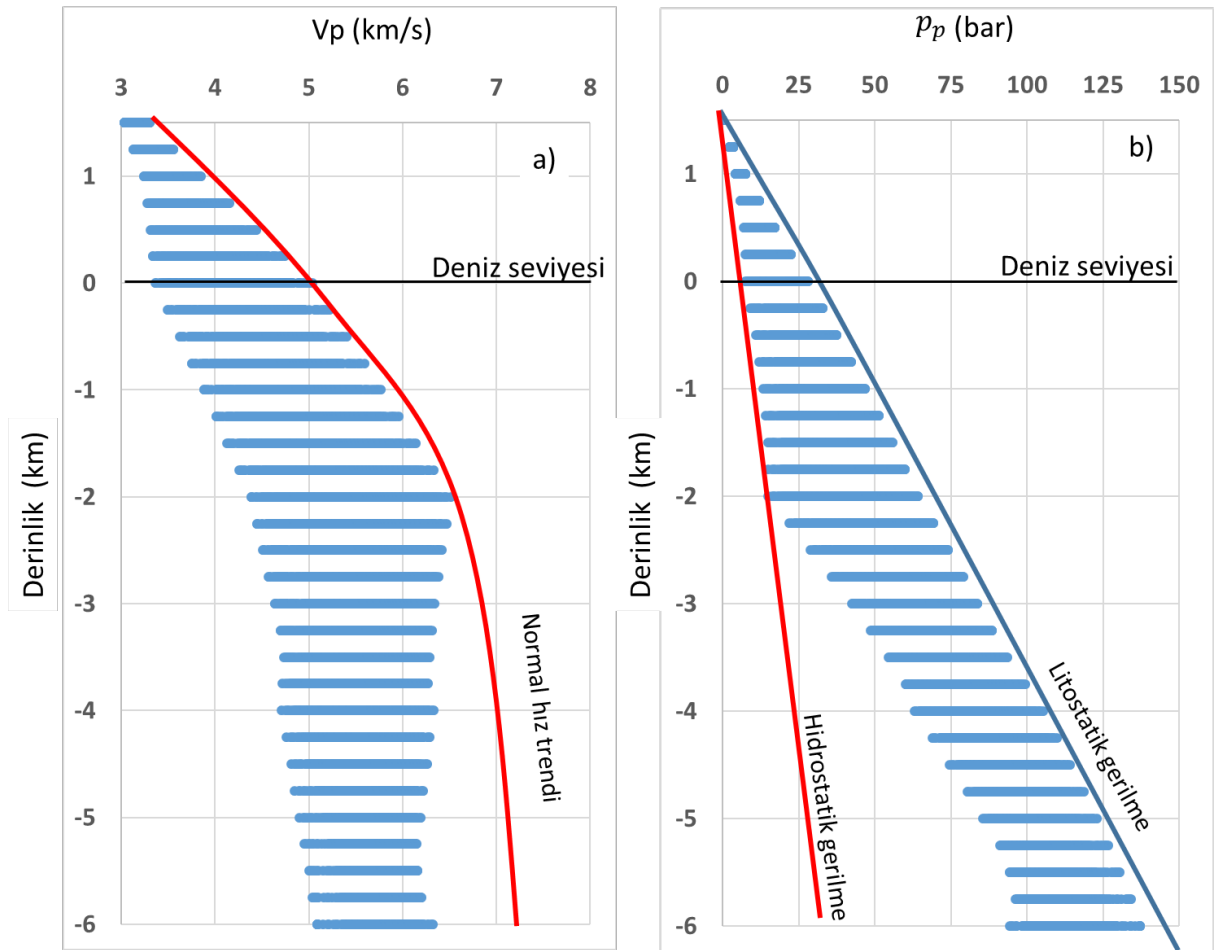
Figure 14a: Vp plane sections for some levels (1: Ak-3 ve Ak-6 well, 2: Golemezli, 3: Karahayıt, 4: Pamukkale) (Kaypak Gokkaya 2012)

Vp / Vs değişimi



şekil 14b: Bazı seviyelerin Vp/Vs değişimi haritası (1: Ak-3 ve Ak-6 kuyusu, 2: Gölemezli, 3: Karahayit, 4: Pamukkale) (Kaypak Gokkaya 2012)

Figure 14b: Vp/Vs ratio plane sections for some levels (1: Ak-3 ve Ak-6 well, 2: Golemezli, 3: Karahayit, 4: Pamukkale) (Kaypak Gokkaya 2012)



Şekil 15: Denizli havzasında deprem kayıtlarından elde edilmiş a) V_p hızları, b) hızlardan elde edilmiş boşluk basıncı değerleri

Figure 15: a) V_p velocities, b) pore pressure values obtained from the earthquake records in Denizli basin

$$S = g * \rho_m * z = 9.81 \frac{m}{sn^2} * 2.5 \frac{gr}{cm^3} * z \quad (12)$$

Denizli baseni için (6) no'lu denklem (12) no'lu denklemdeki gibi kullanılmıştır. Sahadaki sismik hız değerleri incelendiğinde ve Gardner (1974)'ait hız-yoğunluk formülüne göre ortalama yoğunluk 2.5 gr/cm^3 alınmıştır.

$$p_n = g * \rho_w * z = 9.81 \frac{m}{sn^2} * 1.1 \frac{gr}{cm^3} * z \quad (13)$$

(7) no'lu denklemde değerlendirmelerde $\rho_w = 1.1 \text{ gr/cm}^3$ olarak alınmıştır. Bu durumda (7) no'lu denklem (13) nolu denklem gibi olur.

$$v_n = 0.0658 * z^2 + 0.95 * z + 3.2 \quad (14)$$

Şekil 15'deki tüm verilerin değerlendirilmesi sonucunda (10) no'lu denklemdeki katsayılar (14) no'lu denklemdeki gibi hesaplanmıştır. (12), (13) ve (14) nolu bağıntılar ile bulunan değerler 11 nolu denklemde kullanılmıştır. Ayrıca analizler sonucunda en uygun değer $m=3$ olduğuna karar verilmiş ve çalışmada bu değer kullanılmıştır. Bu değerlere göre 11 nolu denklem 15 nolu denklemdeki gibi kullanılmıştır:

$$P_p = S - (S - p_n) \cdot (v/v_n)^3 \quad (15)$$

Böylece boşluk basıncının derinliğe bağlı olarak değişimi hesaplanmıştır. Boşluk basıncı ve “İlave basınç” olarak Boşluk basıncı iki aşamada değerlendirilmiştir. Burada “İlave basınç” tabiri; boşluk basıncı ile normal şartlardaki basınç (Hidrostatik gerilme) arasındaki fark için kullanılmıştır (Denklemler 15 ve 16). Yani formasyon içine sıcaklık ve/veya ilave akışkanın artması ile boşluktaki basıncın fazladan artması demektir.

$$\text{İlave basınç} = P_p - p_n \quad (16)$$

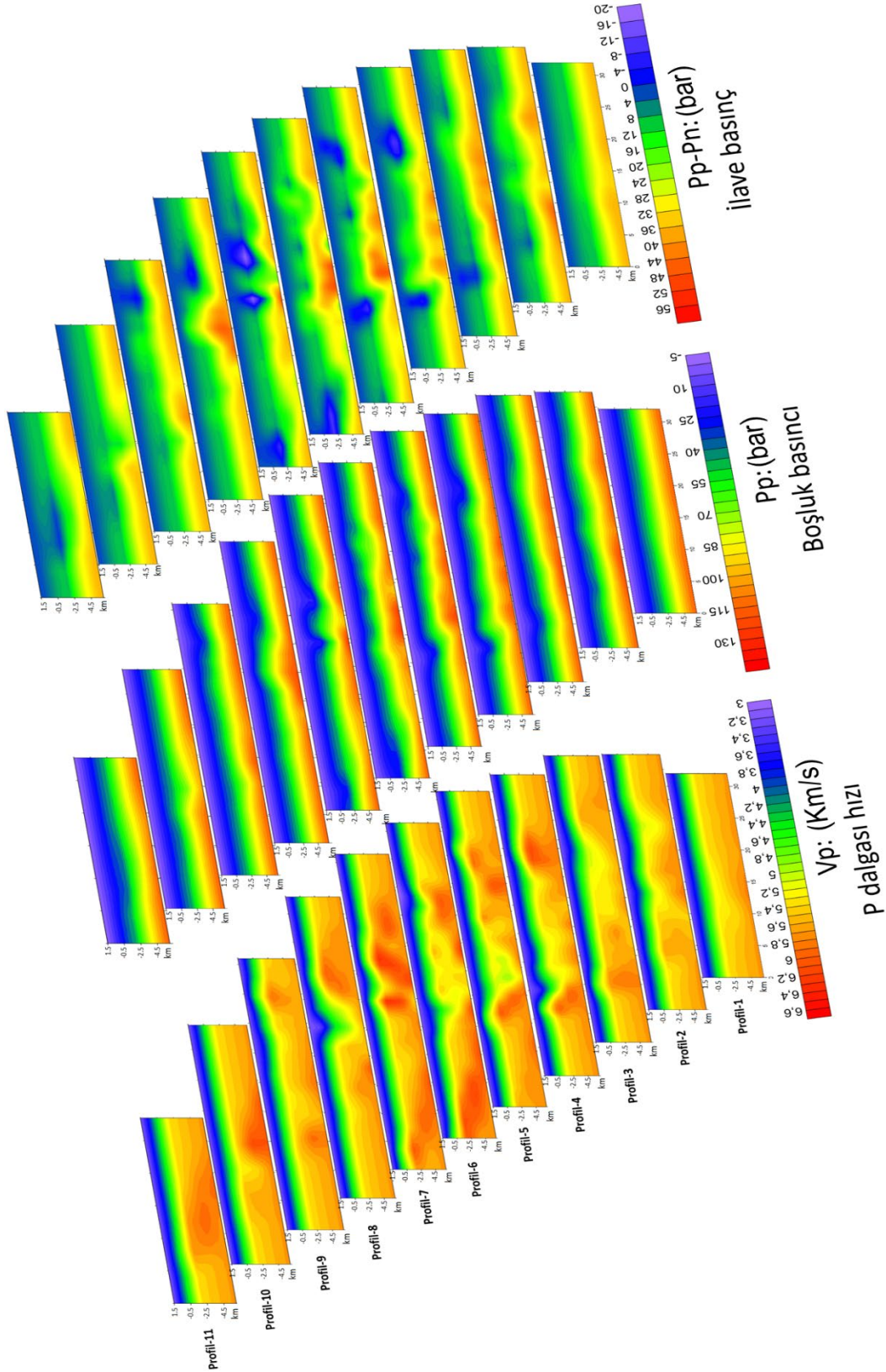
Tablo 1’de Denizli havzası çevresindeki doğal termal sıcak su çıkışları ve Ak-3 ve Ak-6 kuyu bilgileri yer almaktadır ve sahanın jeotermal bir saha olduğu görülmektedir. Halihazırda saha içerisinde çok fazla doğal sıcak su çıkışları bulunmaktadır. Bununla birlikte havzanın batısında ve güney batısında Kızıldere ve Saray bölgesinde JES’ler bulunmaktadır. Buralarda sıcaklık 246 °C’ yi bulmaktadır. “Silis jeotermometreleri Tosunlar termal suları için (AK-1, AK-2 ve AK-3) 115-166°C, Gölemezli suları için (Göl-1, Göl-2) 91-155°C, Karahayıt suları için 72-109°C ve Pamukkale suları için 68-99°C arasında rezervuar sıcaklığı değerleri vermiştir. Li jeotermometresi ile elde edilen sonuçlar Tosunlar termal suları için 137-170°C, Gölemezli suları için 118-170°C, Karakayıt kaynağı (KH-3) için 119°C ve Pamukkale kaynağı için 93°C’dir. Mg-Li jeotermometreleri yüksek, K-Mg jeotermometreleri düşük rezervuar sıcaklıkları vermiştir (Subay 2019). Silis, Li ve Mg-Li jeotermometrelerine göre de rezervuarda sıcaklık fazladır. Tosunlar sahasında 166°C-170°C civarında hesap edilmesi, basıncın da daha fazla olacağı anlamına gelmektedir.

Tablo 1: Sahadaki doğal termal kaynakları ve kuyu bilgileri (Subay 2019)
Table 1: Hot spring and well information in the field (Subay 2019)

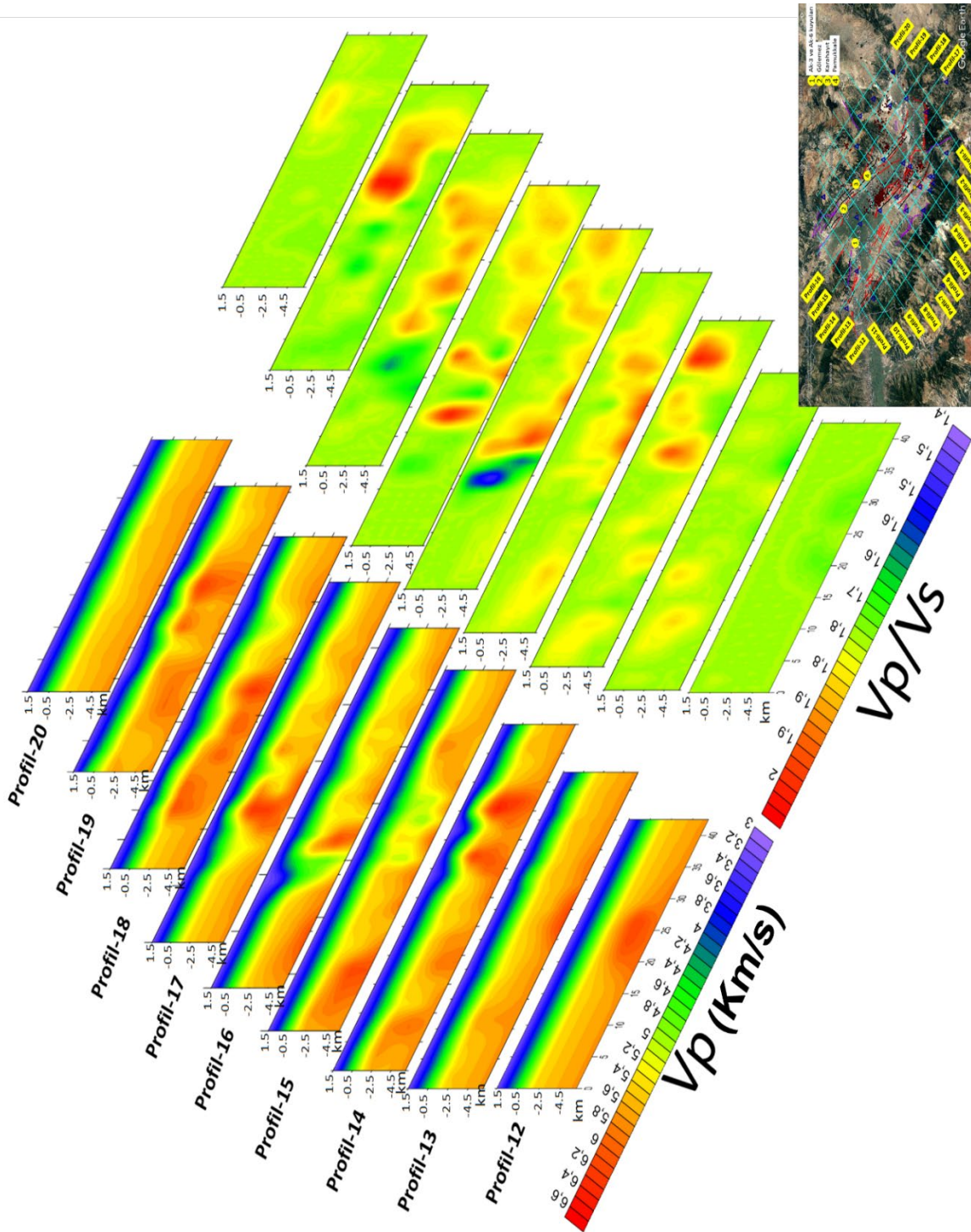
Kaynak/ Kuyu adı	Kuyu adı	Açıldığı yıl	Sıcaklık	Basınç	Derinlik	Debi	Durumu
Karahayıt	KH-1	2007	61 °C		460 m	15 l/s	Çıkış sıcaklığı
Karahayıt	KH-2	2007	61 °C		452 m	40 l/s	Çıkış sıcaklığı
Karahayıt	KH-3	2007	61 °C		570 m	80 l/s	Çıkış sıcaklığı
Karahayıt	KHR-3	2011	54 °C		900 m	27 l/s	Çıkış sıcaklığı
Gölemezli	Göl-1	2008	65 °C		605 m	120 l/s	Çıkış sıcaklığı
Gölemezli	Göl-2	2011	68 °C		137 m	136 l/s	Çıkış sıcaklığı
Gölemezli	DG-3	2002	66 °C		549 m	110 l/s	Çıkış sıcaklığı
Gölemezli	DG-4	2003	70 °C		750 m	45 l/s	Çıkış sıcaklığı
Gölemezli	DG-5	2003	62 °C		750 m	30 l/s	Çıkış sıcaklığı
Pamukkale			35-36 °C			382 l/s	Çıkış sıcaklığı
Tosunlar	AK-3	2012	132 °C	230 bar	2437 m	118 l/s	Üretim kuyusu, ölçülen rezervuar sıcaklığı
Torsunlar	AK-6	2012	148 °C	250 bar	2630 m	46 l/s	Üretim kuyusu, ölçülen rezervuar sıcaklığı

Şekil 16a ve Şekil 16b’de, V_p hızları (15) ve (16) nolu denklemlerin giriş verisi olarak kullanılmış ve elde edilmiş P_p : boşluk basıncı ve $P_p - P_n$: İlave basınç değerlerinin profil boyunca hesaplanış değerleri verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi derinlere inildikçe boşluk basıncı ve ilave basınç artmaktadır. Yine jeolojiye bağlı olarak değişimler de görülmektedir. Şekil 17’de,

Şekil 16a,b'deki profiller boyunca ve Şekil-14'deki aynı kat haritaları için hesaplanan boşluk basıncı ve ilave basın değişimleri için hazırlanmış kat haritaları verilmiştir. Haritalarda da derinlikle boşluk basıncı ve ilave basınç değerlerinin arttığı gözlenmektedir.



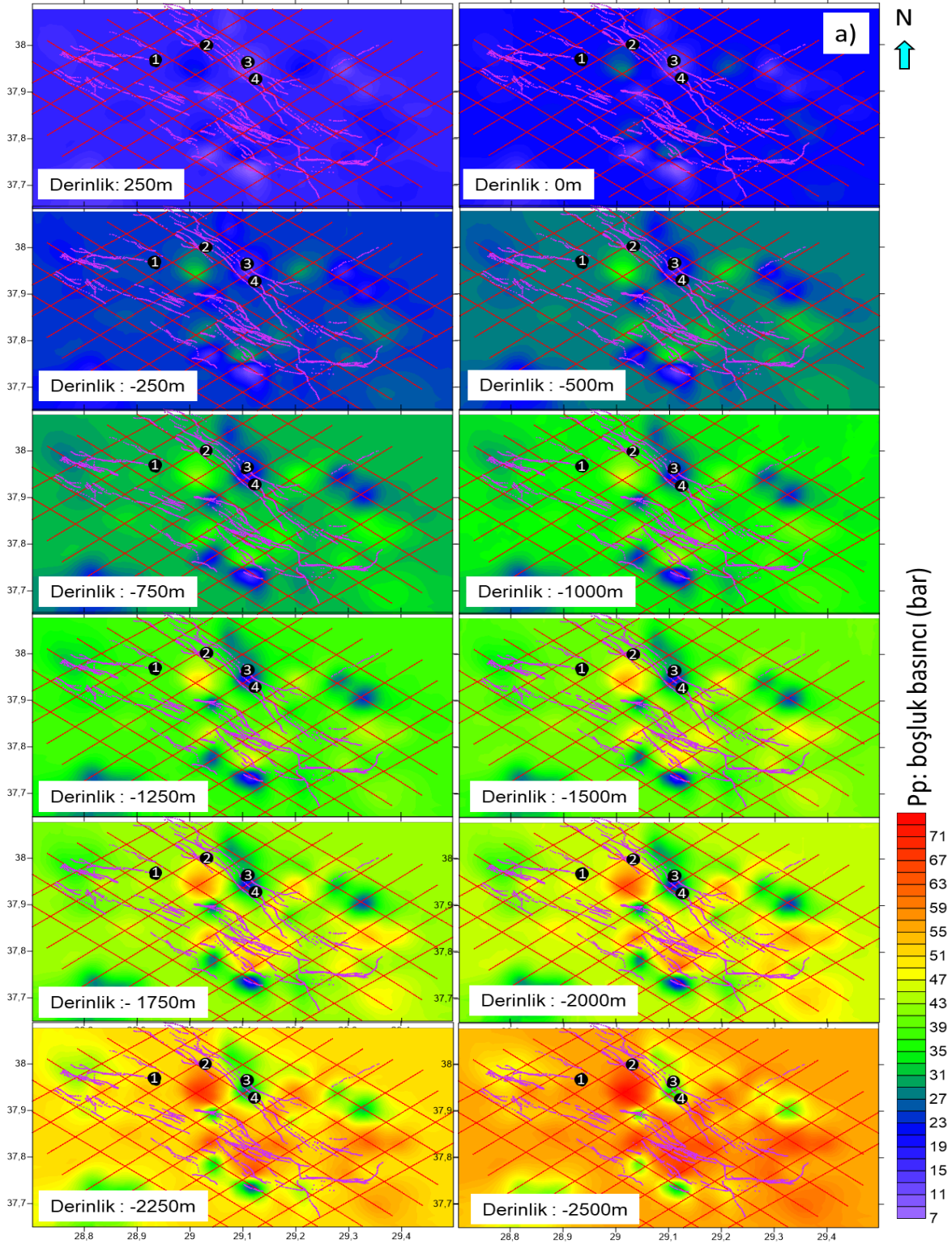
Şekil 16a: Şekil 13a'daki hızlar kullanılarak elde edilmiş boşluk basıncı ve ilave basınç kesitleri
Figure 16a: Sections of pore pressure and additional pressure obtained using the velocities in Figure 13a



Şekil 16b: Şekil 13b'deki hızlar kullanılarak elde edilmiş boşluk basıncı ve ilave basınç kesitleri
 Figure 16b: Sections of pore pressure and additional pressure obtained using the velocities in Figure 13b

Tablo 2'de, Ak-3 ve Ak-6 kuyularına ait sıcaklık ve basınç değerleri görülmektedir. Bu değer incelendiğinde derinlikle hem sıcaklık (T) hem de kuyu içi basınç (Pp) değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu iki kuyuya ait Litoloji kesiti, sıcaklık ve basınç grafikleri Şekil 18'de görülmektedir. Her iki kuyuda da aynı formasyonlar kesilmiştir. Sadece bazı formasyonlarda kalınlıklar farklıdır. Buna bağlı olarak da sıcaklık ve basınçlarda bir miktar farklılıklar vardır.

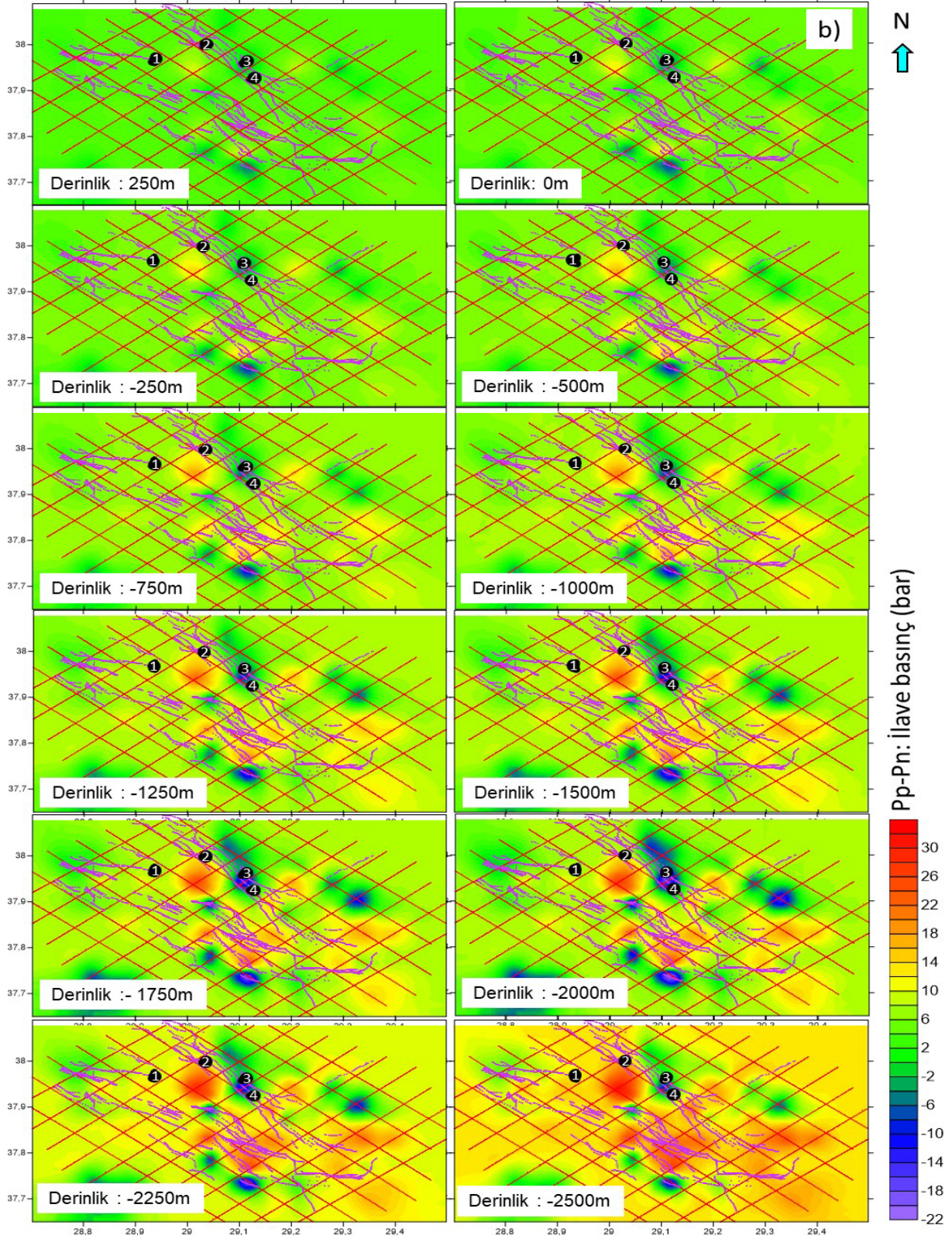
Pp: boşluk basıncı



Şekil 17a: Şekil 14'deki hızlar kullanılarak aynı kat haritalarından elde edilmiş boşluk basıncı haritası
(1: aAk-3 ve Ak-6 kuyusu, 2: Gölemezli, 3: Karahayıt, 4: Pamukkale)

Figure 17a: Pore pressure plane sections obtained from some levels using velocities in Figure 14 (1: Ak-3 ve Ak-6 wells, 2: Golemezli, 3: Karahayıt, 4: Pamukkale)

Boşluktaki ilave basınç



Şekil 17b: Şekil 14'deki hızlar kullanılarak aynı kat haritalarından elde edilmiş ilave basınç haritası (1: Ak-3 ve Ak-6 kuyusu, 2: Gölemezli, 3: Karahayıt, 4: Pamukkale)

Figure 17b: a) Additional pressure plane sections obtained from same same levels using velocities in Figure 14 (1: Ak-3 ve Ak-6 wells, 2: Golemezli, 3: Karahayıt, 4: Pamukkale)

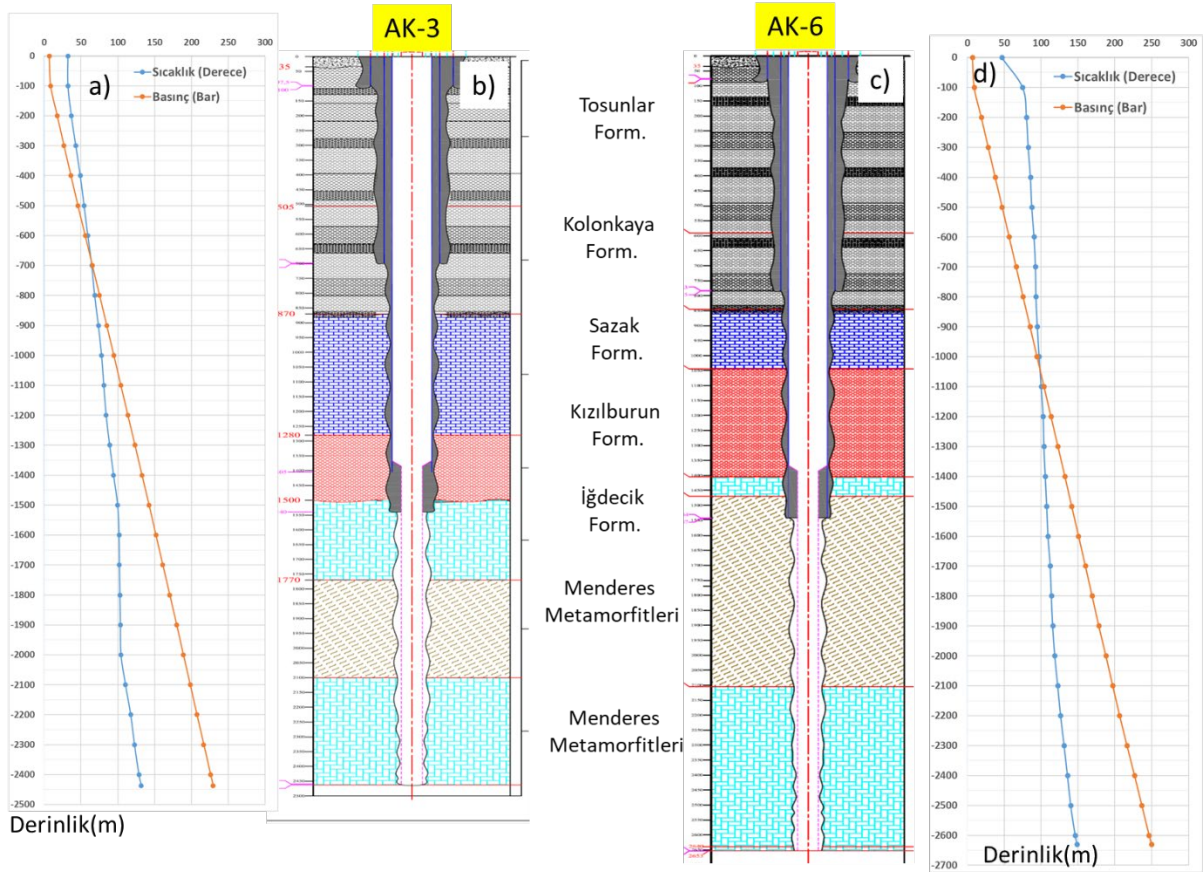
Tablo 2: Ak-3 ve Ak-6 kuyusundaki sıcaklık ve basınç değerleri
 Table 2: Temperature and pore pressure values in Ak-3 and Ak-6 wells

AK-3 Kuyusu (Kot: 145m)				AK-6 Kuyusu (Kot: 145m)			
Derinlik (Yüzeyden)	Derinlik (Deniz seviyesinden)	Sıcaklık	Basınç	Derinlik (Yüzeyden)	Derinlik (Deniz seviyesinden)	Sıcaklık	Basınç
(m)	(m)	(°C)	(bar)	(m)	(m)	(°C)	(bar)
0	145	32.3	6.8	0	145	46.8	6.8
100	45	32.4	8.8	100	45	75.1	9.2
200	-55	36.9	17.8	200	-55	80.2	18.9
300	-155	43.0	26.9	300	-155	82.5	28.3
400	-255	49.1	36.4	400	-255	85.6	37.7
500	-355	54.2	45.8	500	-355	87.4	47.3
600	-455	59.3	55.7	600	-455	90.4	56.7
700	-555	64.7	65.5	700	-555	92.4	66.1
800	-655	68.6	75.3	800	-655	93.1	75.6
900	-755	73.6	84.9	900	-755	95.0	85.1
1000	-855	78.1	94.6	1000	-855	97.3	94.5
1100	-955	80.9	104.1	1100	-955	100.1	103.9
1200	-1055	84.2	113.6	1200	-1055	102.9	113.4
1300	-1155	89.0	123.3	1300	-1155	103.9	122.9
1400	-1255	94.3	132.8	1400	-1255	105.8	132.3
1500	-1355	99.8	142.4	1500	-1355	107.7	141.5
1600	-1455	101.7	151.7	1600	-1455	109.4	150.9
1700	-1555	102.2	161.1	1700	-1555	112.5	160.1
1800	-1655	102.9	170.6	1800	-1655	114.0	169.3
1900	-1755	103.6	179.9	1900	-1755	115.8	178.3
2000	-1855	104.4	189.0	2000	-1855	118.6	188.0
2100	-1955	110.5	198.3	2100	-1955	122.7	197.2
2200	-2055	117.5	207.4	2200	-2055	126.5	206.6
2300	-2155	122.7	216.7	2300	-2155	131.3	216.6
2400	-2255	128.7	226.0	2400	-2255	135.9	226.8
2437	-2292	132.0	229.5	2500	-2355	140.3	236.8
				2600	-2455	146.4	246.7
				2630	-2485	148.8	249.8

Şekil 18'de, Ak-3 ve Ak-6 kuyularına ait litoloji bilgileri, sıcaklık ve basınç değişim grafikleri verilmiştir. Bu bilgiler, bu çalışmadaki Vp hızlarından elde edilen boşluk basıncı değerleri ile karşılaştırılmıştır. Grafikler incelendiğinde, derinliğe bağlı olarak sıcaklık ve basınç değerleri de artmaktadır. Yani kuyular devam etseydi sıcaklık ve basınç değerleri de artmaya devam edecekti. Bu bilgiler, kuyulara en yakın hatların ve hat üzerindeki noktaların hesaplanmış boşluk basıncı değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 12'de verilen haritada Vp, Vp/Vs, Pp ve Pp-Pn'ye ait kesitler; Profil-6 Şekil 19'da, Profil-7 Şekil 20'de, Profil-8 Şekil 21'de ve Profil-17 ise Şekil 22'de verilmiştir.

Bu hatlar Pamukkale, Karahayit ve Gölemezli travertenlerine ve sıcak su çıkışlarına en yakın hatlardır. Pamukkale, Karahayit ve Gölemezli ve çevresindeki doğal sıcak su çıkışlarının bulunduğu bölgeler, kesit üzerinde incelendiğinde derinlikle boşluk basıncının arttığı ve çevresinde daha yüksek basınçlı bölgelerin olduğu görülür. Muhtemelen, bu basıncın etkisiyle akışkanlar yüzeye kadar doğal olarak çıkmaktadır.



Şekil 18: a) Ak-3 kuyusunun sıcaklık ve basınç değişimi grafiği, b) Ak-3 kuyusuna ait litoloji kesiti, c) Ak-6 kuyusuna ait litoloji kesiti ve d) Ak-6 kuyusunun sıcaklık ve basınç değişimi grafiği
 Figure 18: a) Graph of temperature and pressure change of Ak-3 well, b) lithology cross section of Ak-3 well, c) lithology cross section of Ak-6 well, and d) Graph of temperature and pressure change of Ak-6 well

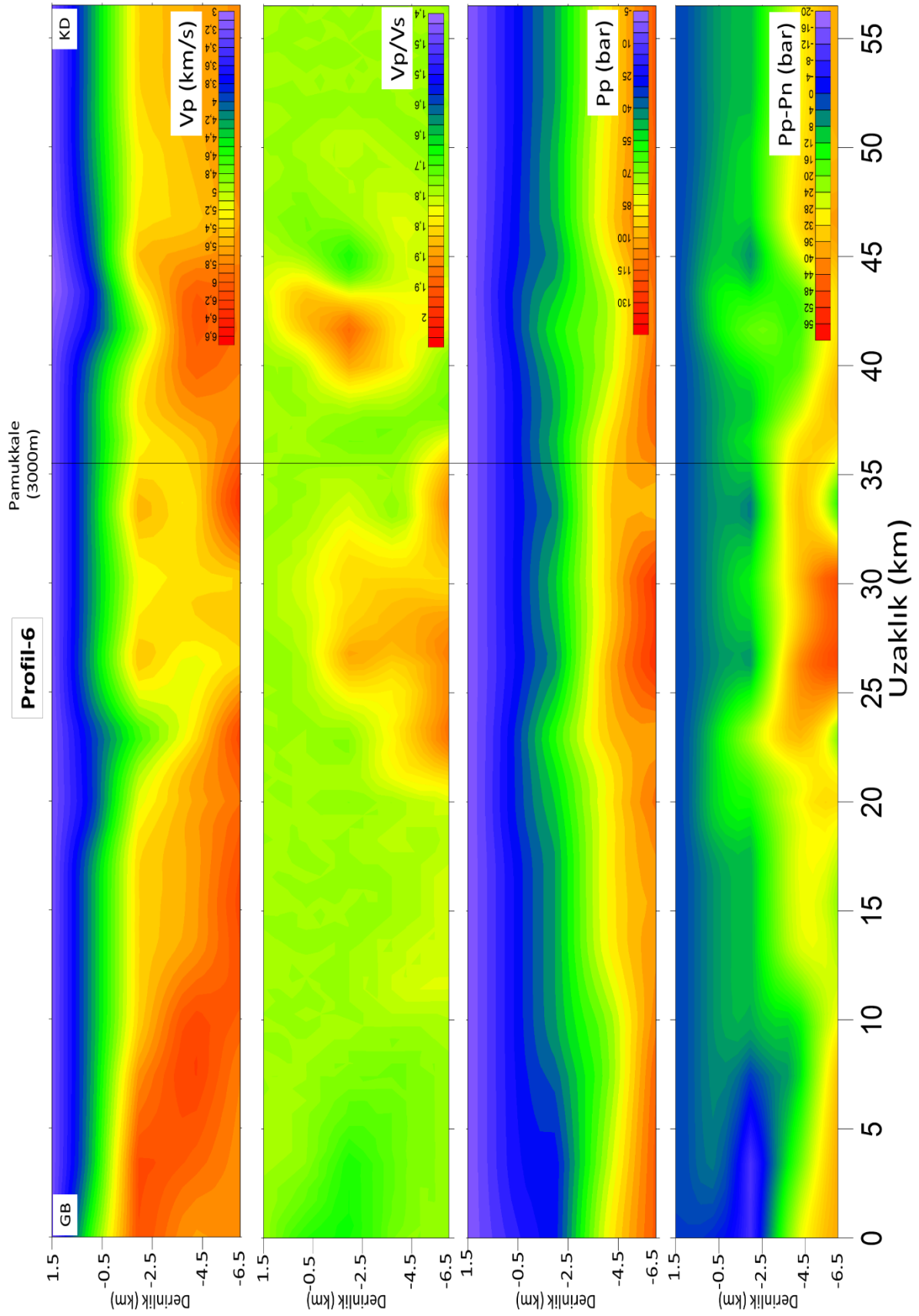
Profil-9'a ait V_p hızı, V_p/V_s oranı değişimi, boşluk basıncı (P_p) ve ilave basınç (P_p-P_n) değişim kesiti Şekil 23'te, Profil-9 üzerindeki Ak-3 ve Ak-6 kuyularına en yakın noktadaki V_p ve V_n hızları ile bu hızlardan elde edilen boşluk basıncı ve kuyulardaki basınç değerlerinin karşılaştırılması ise Şekil 24'te verilmiştir.

Profil-15'e ait, V_p hızı, V_p/V_s oranı değişimi, boşluk basıncı (P_p) ve ilave basınç (P_p-P_n) değişim kesiti Şekil 25'e yer almaktadır.

Profil-15 üzerindeki Ak-3 ve Ak-6 kuyularına en yakın noktadaki V_p ve V_n hızları ile bu hızlardan elde edilen boşluk basıncı ve kuyulardaki basınç değerlerinin karşılaştırılması Şekil 26'da verilmiştir.

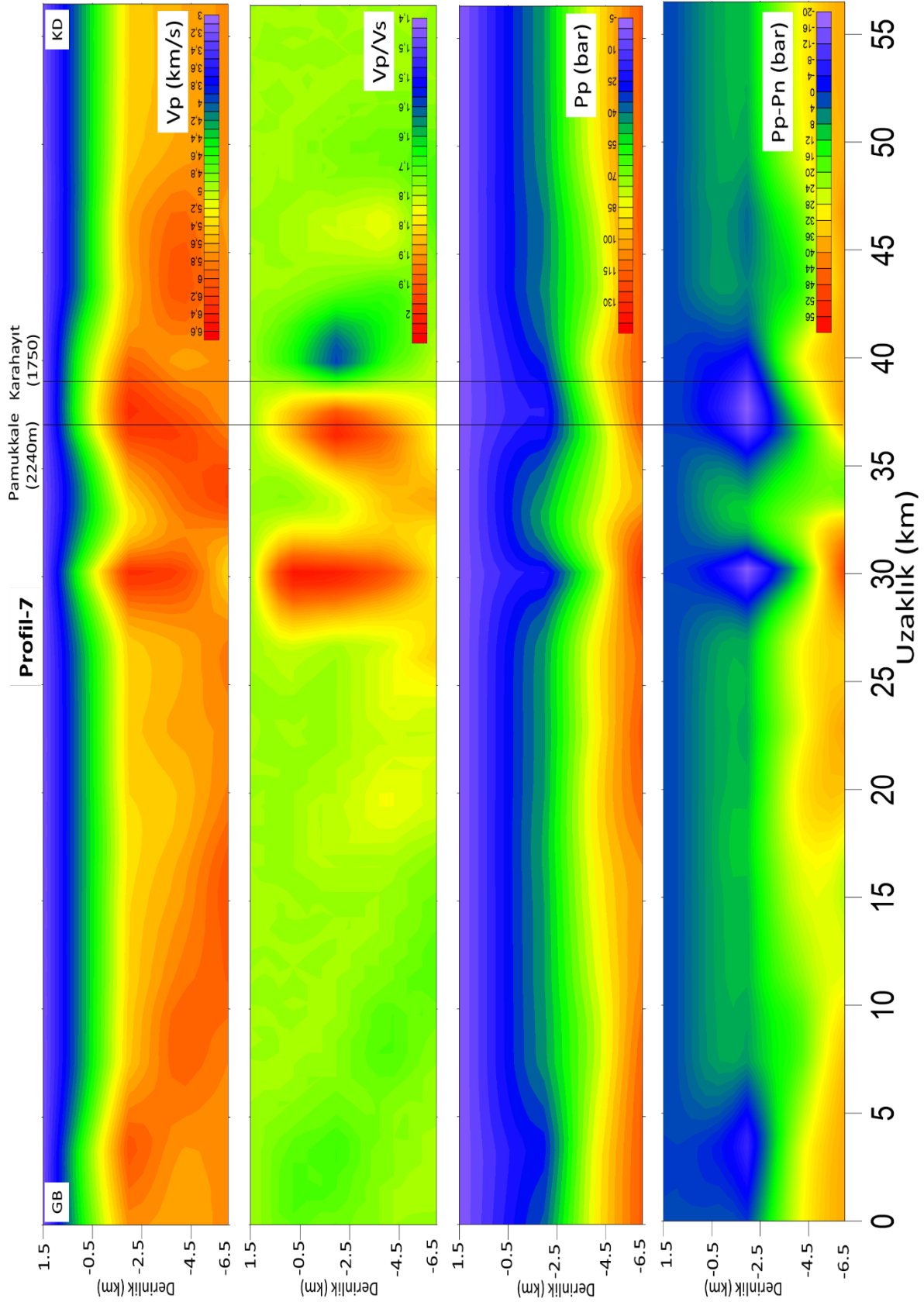
Profil-16'ya ait V_p hızı, V_p/V_s oranı değişimi, boşluk basıncı (P_p) ve ilave basınç (P_p-P_n) değişim kesiti ise Şekil 27'de verilmiştir.

Şekil 28'de ise Profil-16 üzerindeki Ak-3 ve Ak-6 kuyularına en yakın noktadaki V_p ve V_n hızları, bu hızlardan elde edilen boşluk basıncı ve kuyulardaki basınç değerlerinin karşılaştırılmasına ait bulgular yer almaktadır.



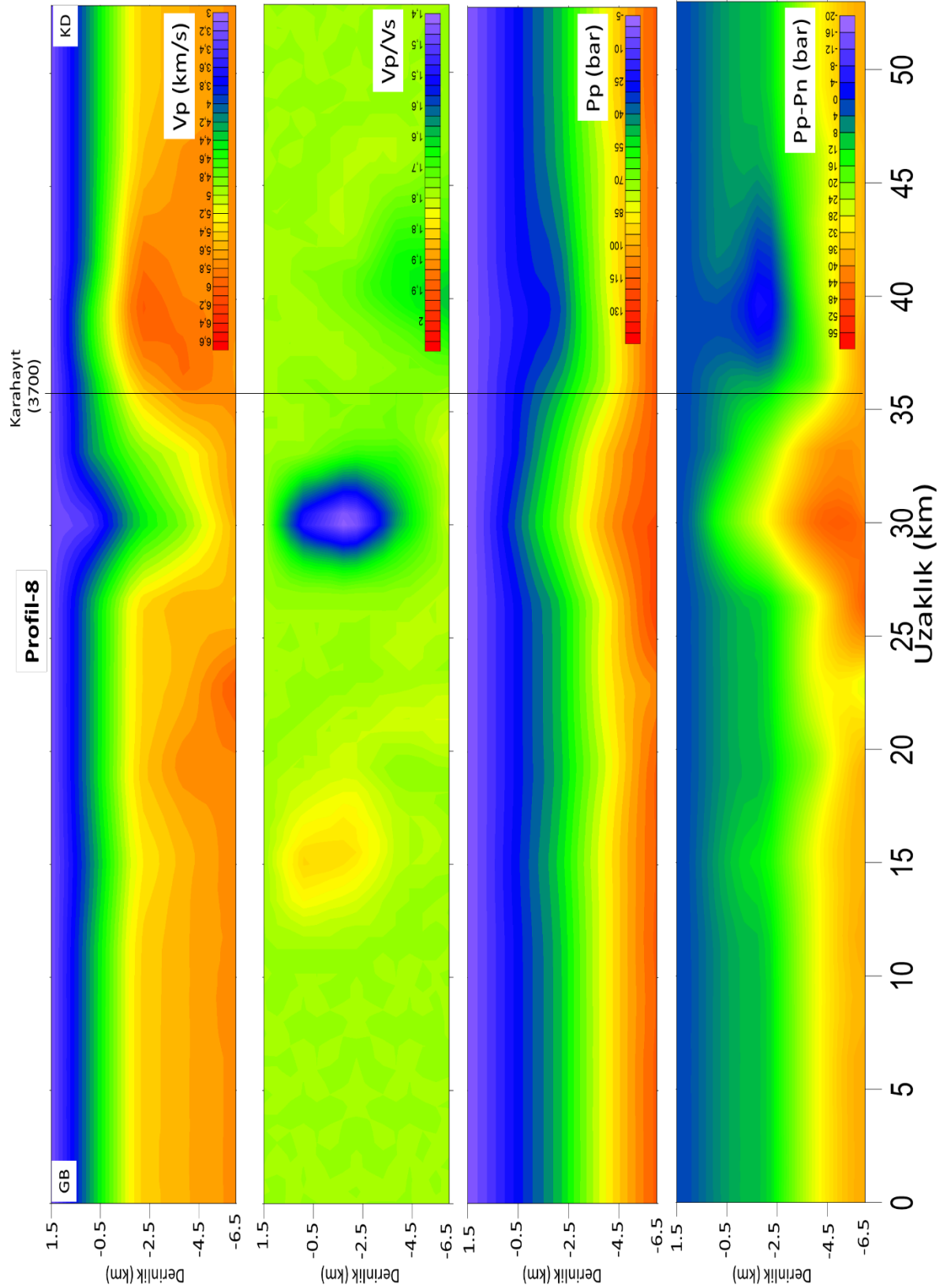
Şekil 19: Profil-6'ya ait, V_p hızı, V_p/V_s oranı değişimi, boşluk basıncı (P_p) ve ilave basınç (P_p-P_n) değişim kesiti

Figure 19: The models of V_p velocity, V_p/V_s ratio, pore pressure (P_p) and additional pressure (P_p-P_n) of Profile-6

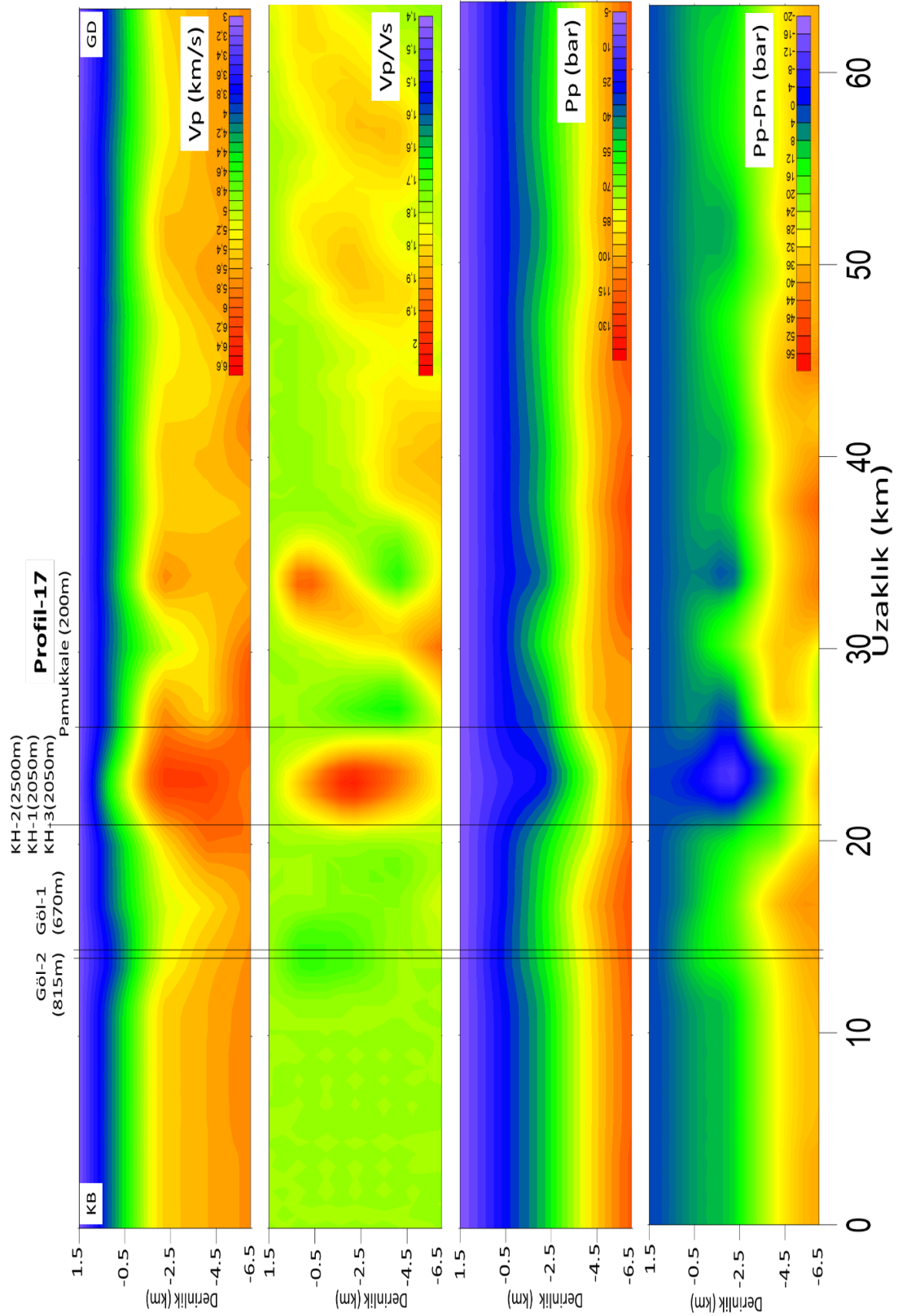


Şekil 20: Profil-7'ye ait, V_p hızı, V_p/V_s oranı değişimi, boşluk basıncı (P_p) ve ilave basınç (P_p-P_n) değişim kesiti

Figure 20: The models of V_p velocity, V_p/V_s ratio, pore pressure (P_p) and additional pressure (P_p-P_n) of Profile-7

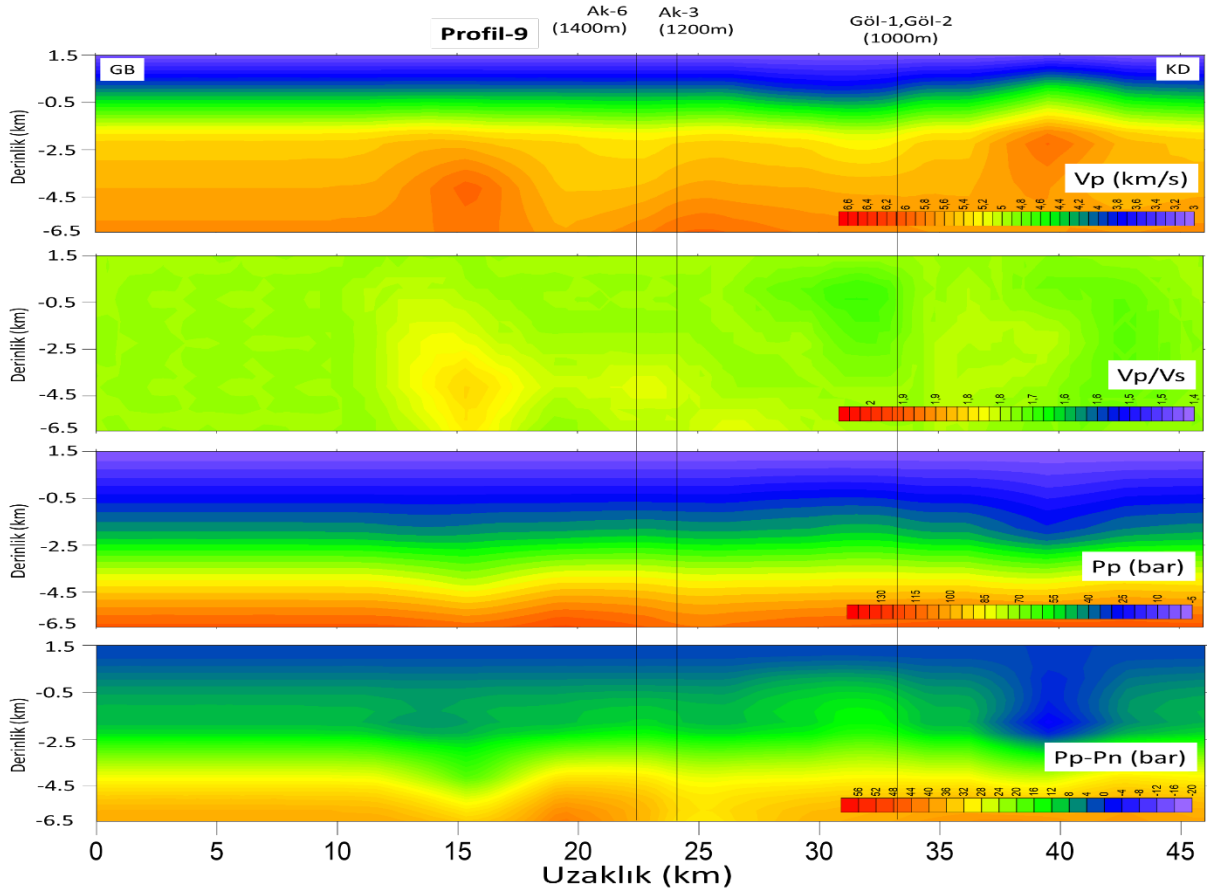


Şekil 21: Profil-8'e ait, Vp hızı, Vp/Vs oranı değişimi, boşluk basıncı (Pp) ve ilave basınç (Pp-Pn) değişim kesiti
Figure 21: The models of Vp velocity, Vp/Vs ratio, pore pressure (Pp) and additional pressure (Pp-Pn) of Profile-8



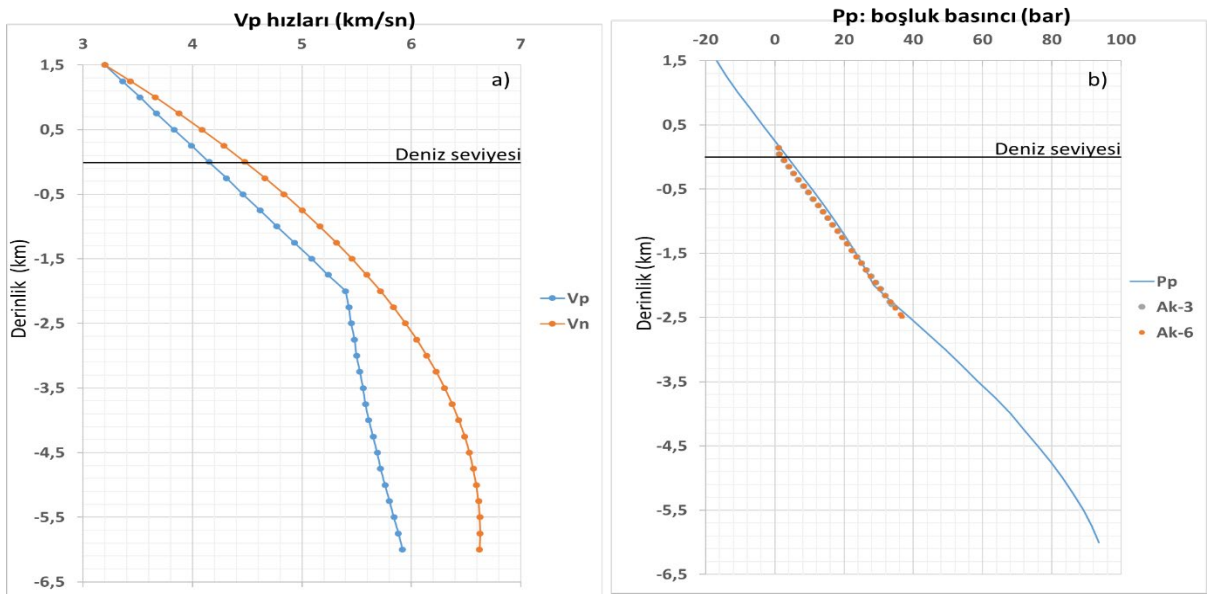
Şekil 22: Profil-17'e ait, V_p hızı, V_p/V_s oranı değişimi, boşluk basıncı (P_p) ve ilave basınç (P_p-P_n) değişim kesiti

Figure 22: The models of V_p velocity, V_p/V_s ratio, pore pressure (P_p) and additional pressure (P_p-P_n) of Profile-17



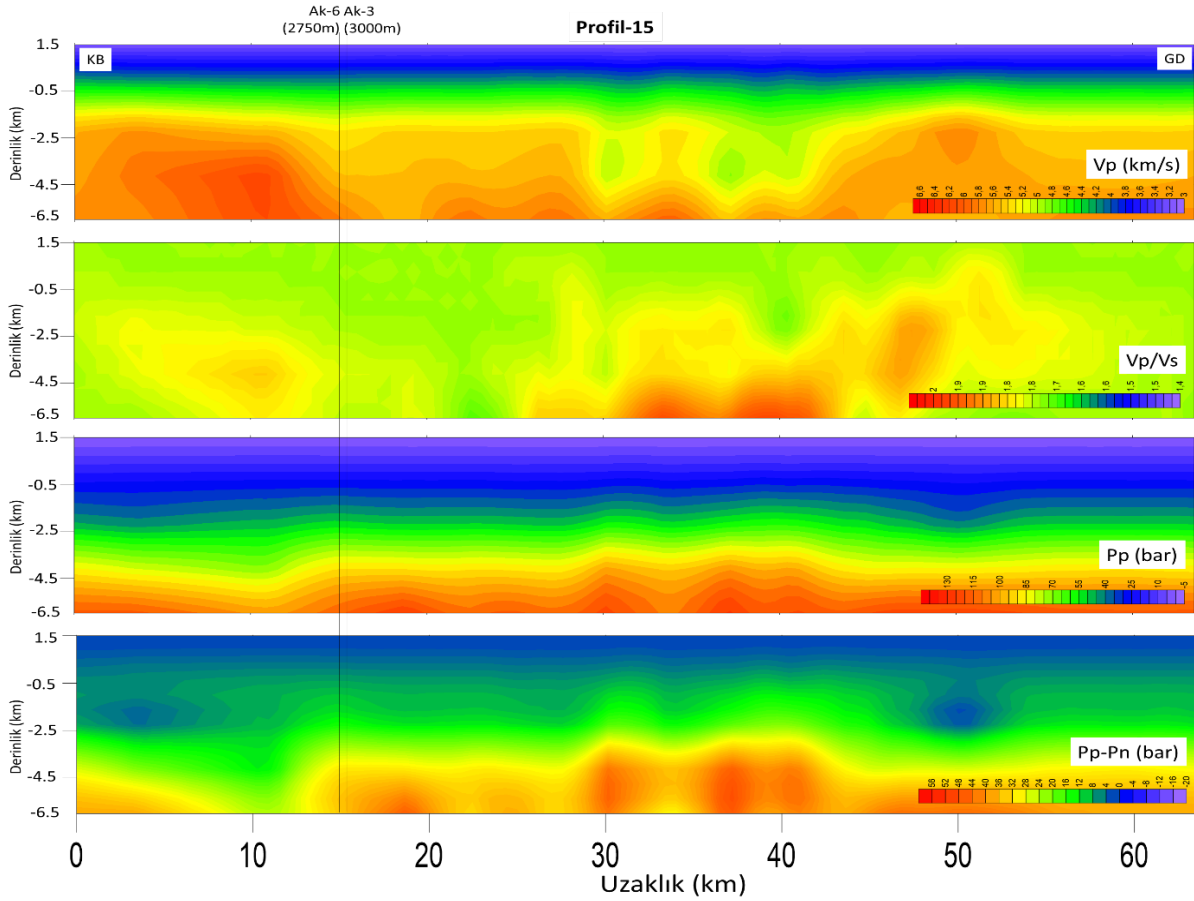
Şekil 23: Profil-9'e ait, V_p hızı, V_p/V_s oranı değişimi, boşluk basıncı (P_p) ve ilave basınç (P_p-P_n) değişim kesiti

Figure 23: The models of V_p velocity, V_p/V_s ratio, pore pressure (P_p) and additional pressure (P_p-P_n) of Profile-9



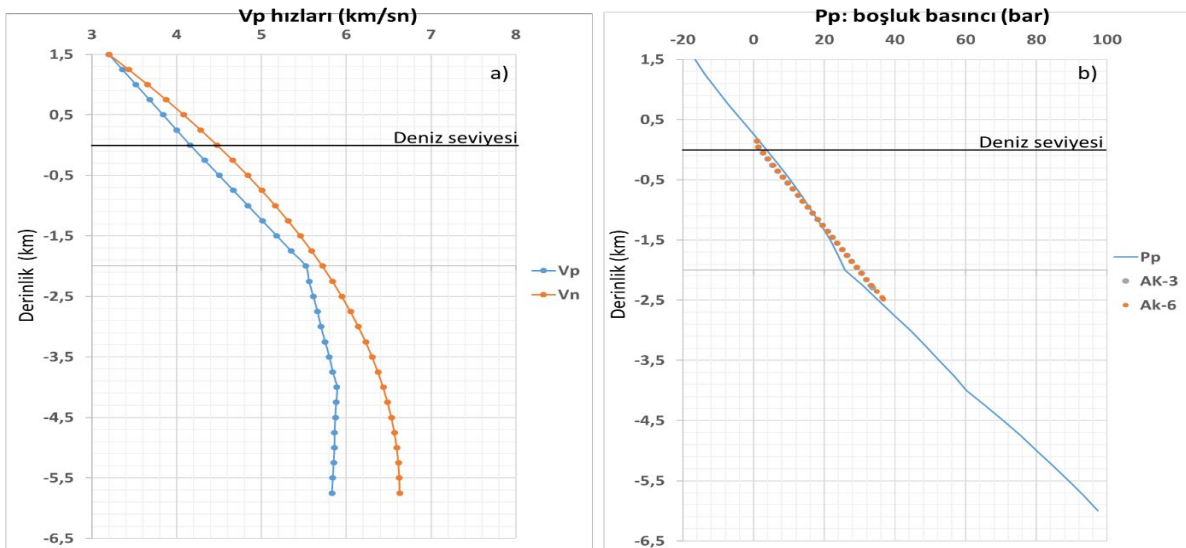
Şekil 24: a) Profil-9 üzerindeki Ak-3 ve Ak-6 kuyularına en yakın noktadaki V_p ve V_n hızları, b) Bu hızlardan elde edilen boşluk basıncı ve kuyulardaki basınç değerlerinin karşılaştırılması

Figure 24: a) V_p and V_n velocities of Profile-9 at the nearest point of the Ak-3 and Ak-6 wells, b) Comparison of pore pressures both obtained from these velocities and the pressure values in the wells



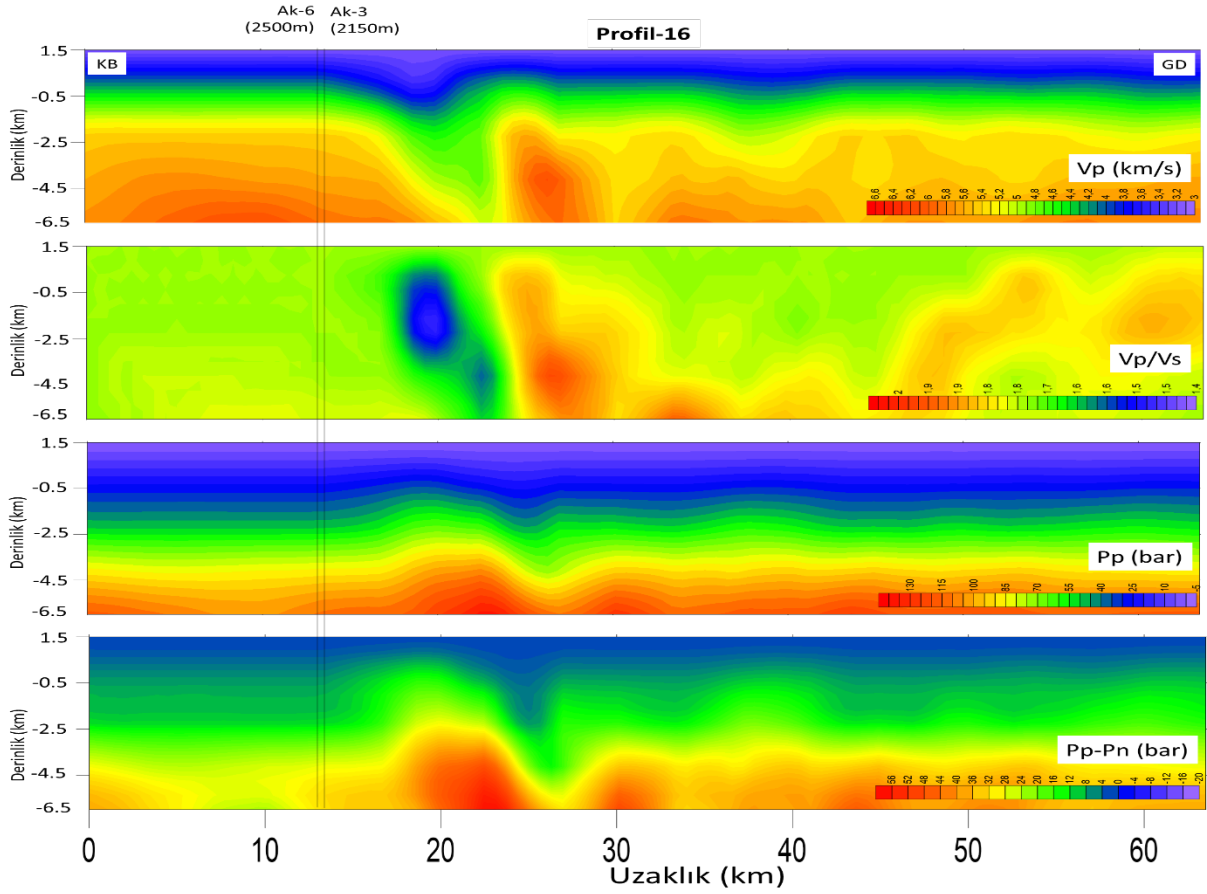
Şekil 25: Profil-15'e ait, V_p hızı, V_p/V_s oranı değişimi, boşluk basıncı (P_p) ve ilave basınç (P_p-P_n) değişim kesiti

Figure 25: The models of V_p velocity, V_p/V_s ratio, pore pressure (P_p) and additional pressure (P_p-P_n) of Profile-15



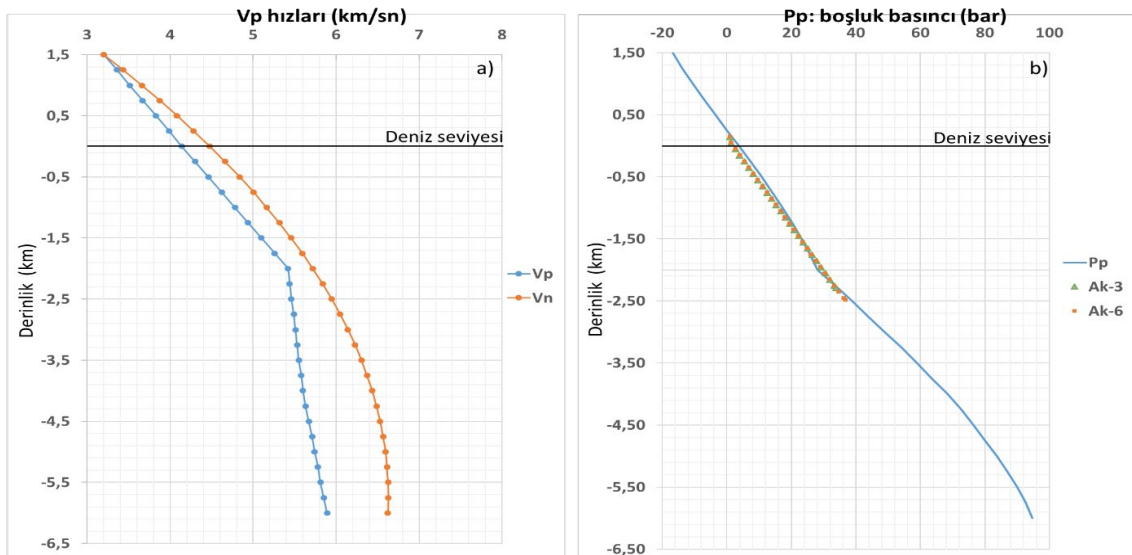
Şekil 26: a) Profil-15 üzerindeki Ak-3 ve Ak-6 kuyularına en yakın noktadaki V_p ve V_n hızları, b) Bu hızlardan elde edilen boşluk basıncı ve kuyulardaki basınç değerlerinin karşılaştırılması

Figure 26: a) V_p and V_n velocities of Profile-15 at the nearest point of the Ak-3 and Ak-6 wells, b) Comparison of pore pressures both obtained from these velocities and the pressure values in the wells



Şekil 27: Profil-16'e ait, V_p hızı, V_p/V_s oranı değişimi, boşluk basıncı (P_p) ve ilave basınç (P_p-P_n) değişim kesiti

Figure 27: The models of V_p velocity, V_p/V_s ratio, pore pressure (P_p) and additional pressure (P_p-P_n) of Profile-16

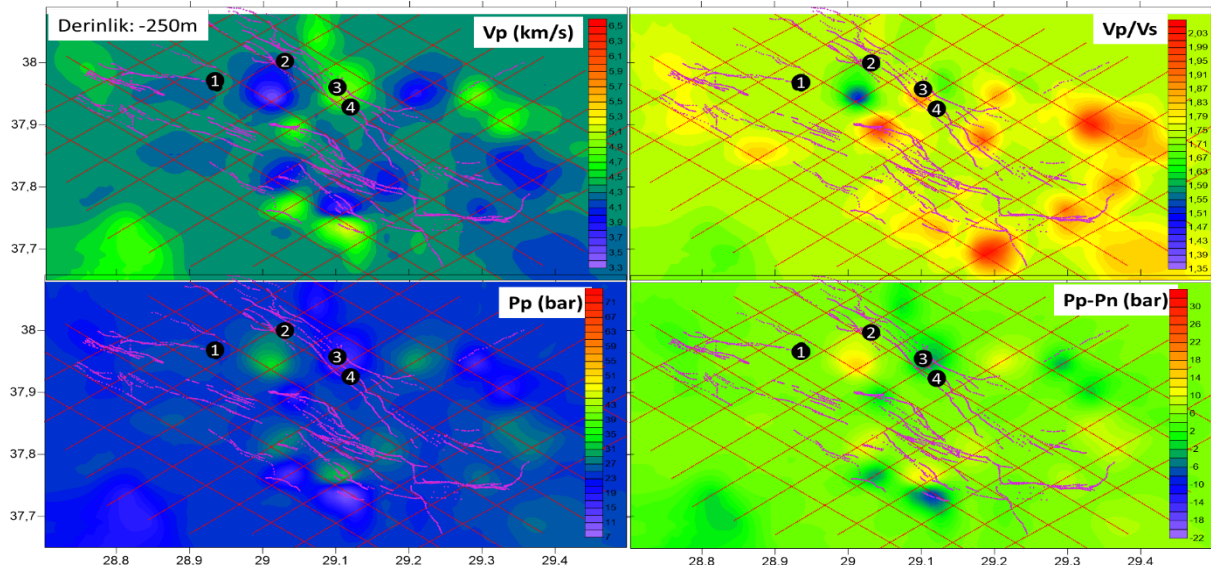


Şekil 28: a) Profil-16 üzerindeki Ak-3 ve Ak-6 kuyularına en yakın noktadaki V_p ve V_n hızları, b) Bu hızlardan elde edilen boşluk basıncı ve kuyulardaki basınç değerlerinin karşılaştırılması
Figure 28: a) V_p and V_n velocities of Profile-16 at the nearest point of the Ak-3 and Ak-6 wells, b) Comparison of pore pressures both obtained from these velocities and the pressure values in the wells

Ak-3 ve Ak-6 kuyularının içinde kayıt edilen basınç değerleri ile bu çalışmada elde edilen basınç değerleri karşılaştırılmıştır. Bu kuyulara en yakın olan Profiller 9, 15 ve 16 nolu profillerdir. En yakın 9 nolu profil olup Ak-3 kuyusuna 1200m ve Ak-6 kuyusuna ise 1400m uzaklıktadır. Profil-9, Profil-15 ve Profil-16'nın kuyulara en yakın noktalarındaki basınç değerleri ile kuyu basınç değerleri kıyaslanmıştır. Ak-3 ve Ak-6 kuyularındaki basınç değerleri; Şekil 24'de Profil 9 ile, Şekil 26'da Profil 15 ile ve Şekil 28'de ise Profil 19 ile kıyaslama yapılmıştır. Görüldüğü gibi kuyulardaki basınç değerleri ile sismik hızlardan elde edilen basınç değerleri oldukça uyumludur.

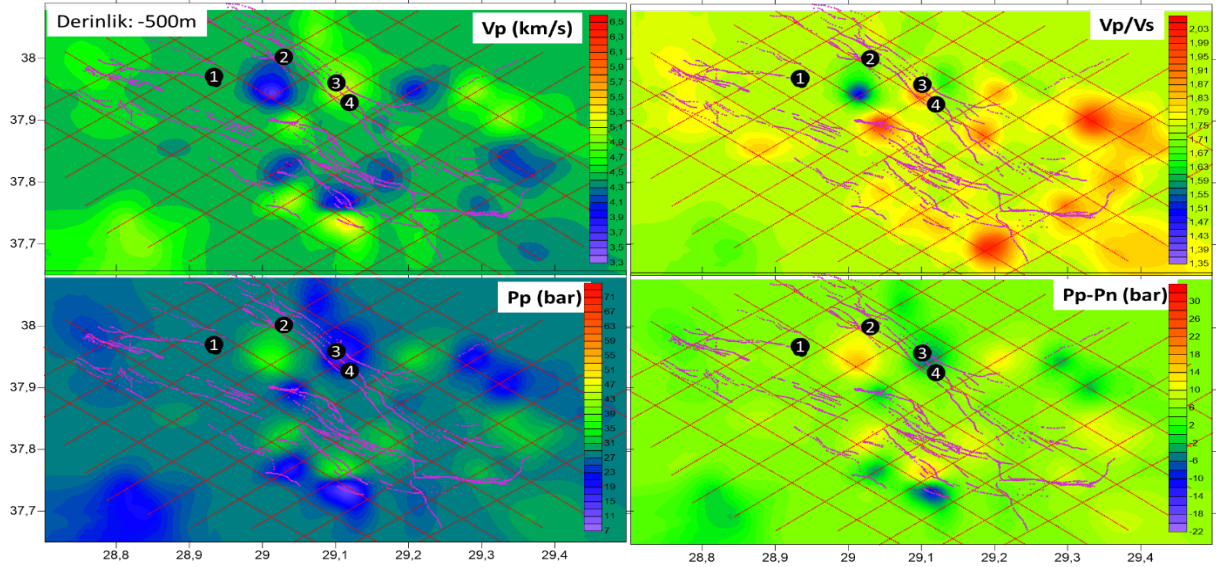
Şekil 29-34'de bölgenin V_p , V_p/V_s , P_p ve P_p-P_n 'in kat haritaları görülmektedir. Haritalar üzerinde Ak-3 ve Ak-6 kuyu yerleri (1), Gölemezli (2), Karahayıt (3) ve Pamukkale (4) sıcak su çıkışları gösterilmektedir. Bu dört noktanın ortasında Profil-8 ile Profil-16'nın kesiştiği bölgede V_p hızları ve V_p/V_s oranının çok düşük olduğu bölge olup, yine bu bölge boşluk basıncı (P_p) ve ilave basıncın (P_p-P_n) çok yüksek olduğu bölgedir. Bu bölgenin kuzeyindeki Gölemezli ve doğusundaki Karahayıt ve Pamukkale sıcak su çıkışlarının kaynağı burası olabilir. Bu bölgedeki sıcak suların doğal olarak çıkış sebebi, Profil-8 ile Profil-16'nın kesiştiği bölgedeki boşluk basıncının etkisi ile fay zonundan çıkıyor denilebilir.

Bu bölgede (Profil-8 ile Profil-16'nın kesiştiği bölge) fay sisteminin olmaması ve boşluk basınç değerlerinin çok yüksek olması nedeniyle çevresini sıkıştırıyor ve çevredeki faylardan sıcak suların çıkmasını neden olduğu düşünülebilir. Eğer buralarda da fay olsaydı, hem sıcak su çıkışı olurdu hemde basınç değerleri bu kadar yüksek olmazdı. Bu sıkıştırmanın etkisiyle Pamukkale ve Karahayıt bölgesinde hem sıcak akışkanların yüzeye çıkmasını sağlıyor, hem de hızların artmasına neden oluyor denilebilir. Yine çatlakların su/akışkan ile dolu olması nedeniyle V_s hızları düşüyor, bunun sonucu olarak da V_p/V_s oranı artıyor denilebilir.

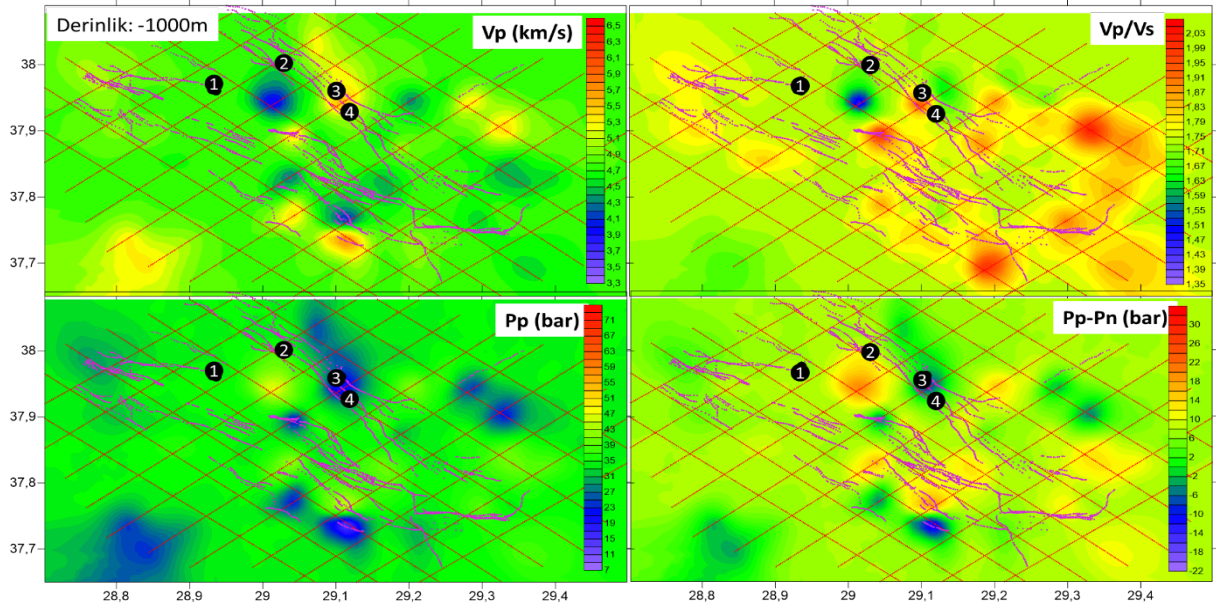


Şekil 29: -250 m kotundaki seviyenin V_p , V_p/V_s , P_p ve P_p-P_n kat haritasının karşılaştırılması (1: Ak-3 ve Ak-6 kuyusu, 2: Gölemezli, 3: Karahayıt, 4: Pamukkale)

Figure 29: Comparison of the V_p , V_p/V_s , P_p and P_p-P_n plane sections of the -250 m depth (1: Ak-3 and Ak-6 wells, 2: Gölemezli, 3: Karahayıt, 4: Pamukkale)

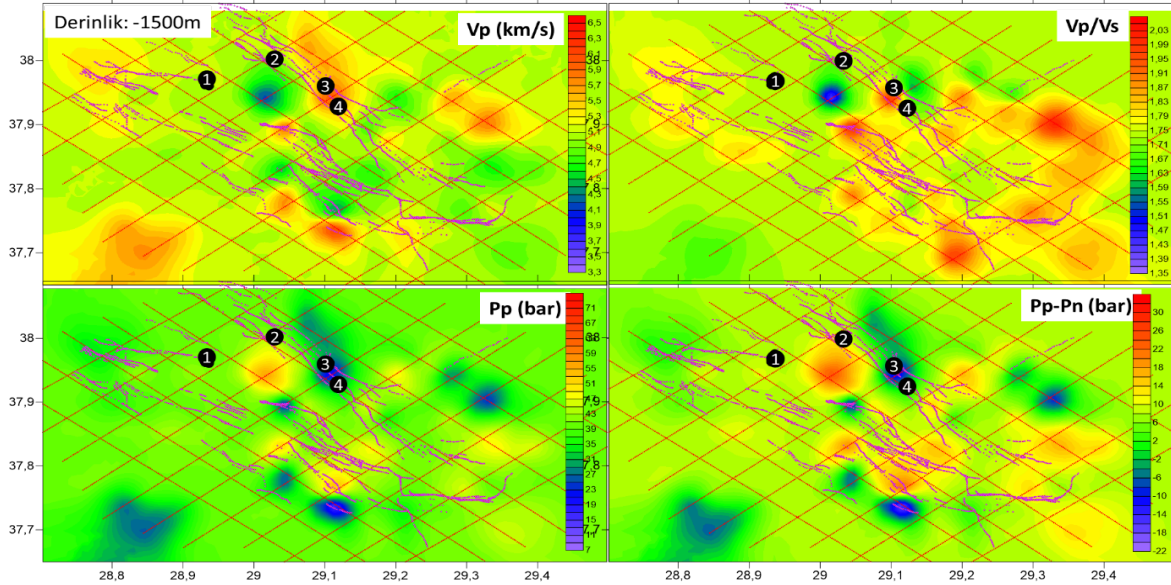


Şekil 30: -500 m kotundaki seviyenin Vp, Vp/Vs, Pp ve Pp-Pn kat haritasının karşılaştırılması (1: Ak-3 ve Ak-6 kuyusu, 2: Gölemezli, 3: Karahayit, 4: Pamukkale)
 Figure 30: Comparison of the Vp, Vp/Vs, Pp and Pp-Pn plane sections of the -500 m depth (1: Ak-3 and Ak-6 wells, 2: Gölemezli, 3: Karahayit, 4: Pamukkale)



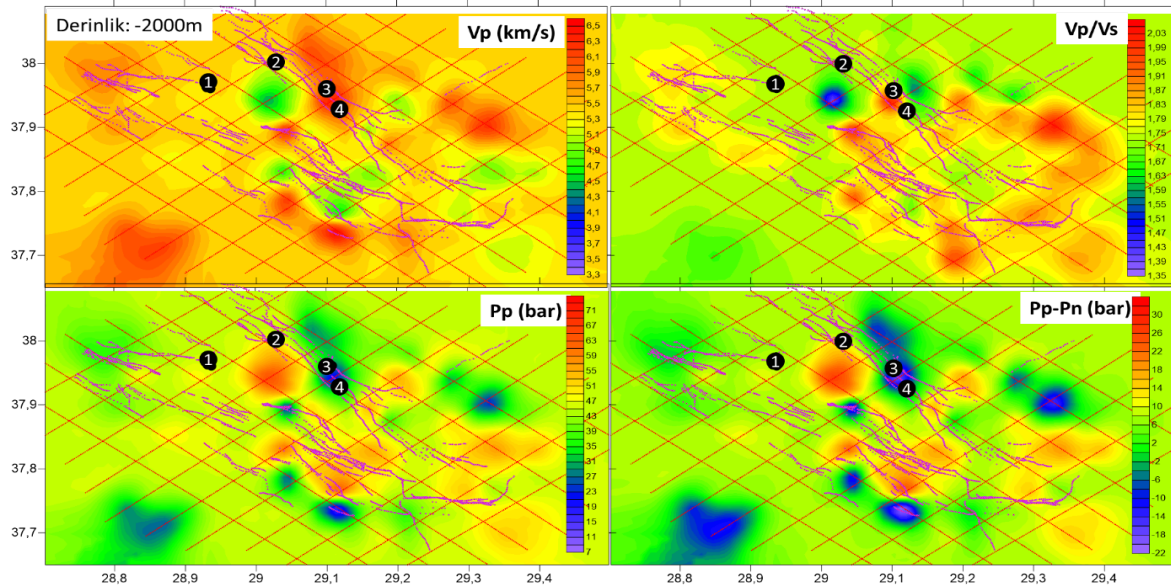
Şekil 31: -1000 m kotundaki seviyenin Vp, Vp/Vs, Pp ve Pp-Pn kat haritasının karşılaştırılması (1: Ak-3 ve Ak-6 kuyusu, 2: Gölemezli, 3: Karahayit, 4: Pamukkale)
 Figure 31: Comparison of the Vp, Vp/Vs, Pp and Pp-Pn plane sections of the -1000 m depth (1: Ak-3 and Ak-6 wells, 2: Gölemezli, 3: Karahayit, 4: Pamukkale)

Litolojik değişimler P dalgası hızını etkilerken, kayaların fiziksel özellikleri de Vp/Vs oranını etkilemektedir. Jeotermal sahalarda Vp/Vs anomalileri; genellikle kayanın dokusuna, poroziteye, gözenek içindeki akışkana, boşluk basıncına, sıcaklığa ve gözenek tipine bağlıdır (Takei 2002). 3-B Vp/Vs anomalilerin olduğu bölgeler, havza içerisindeki çatlak ve kırıklı bölgelerin yoğun olduğu kısımlardır. Yani bu bölgeler fayların çok olduğu ve fiziksel özelliklerinin değiştiği bölgelerdir. Bu bölgeleri ezilme zonu olarak da düşünebiliriz. Vp anomalileri ise kayanın litolojik değişimlerine bağlıdır. Boşluk basıncı hesabı Vp hızına bağlı olarak hesaplanması nedeniyle, hızın düştüğü yerlerde boşluk basıncı artmaktadır. Tabii ki artış için normal hız trendine göre daha düşük olmalıdır.



Şekil 32: -1500 m kotundaki seviyenin Vp, Vp/Vs, Pp ve Pp-Pn kat haritasının karşılaştırılması (1: Ak-3 ve Ak-6 kuyusu, 2: Gölemezli, 3: Karahayit, 4: Pamukkale)

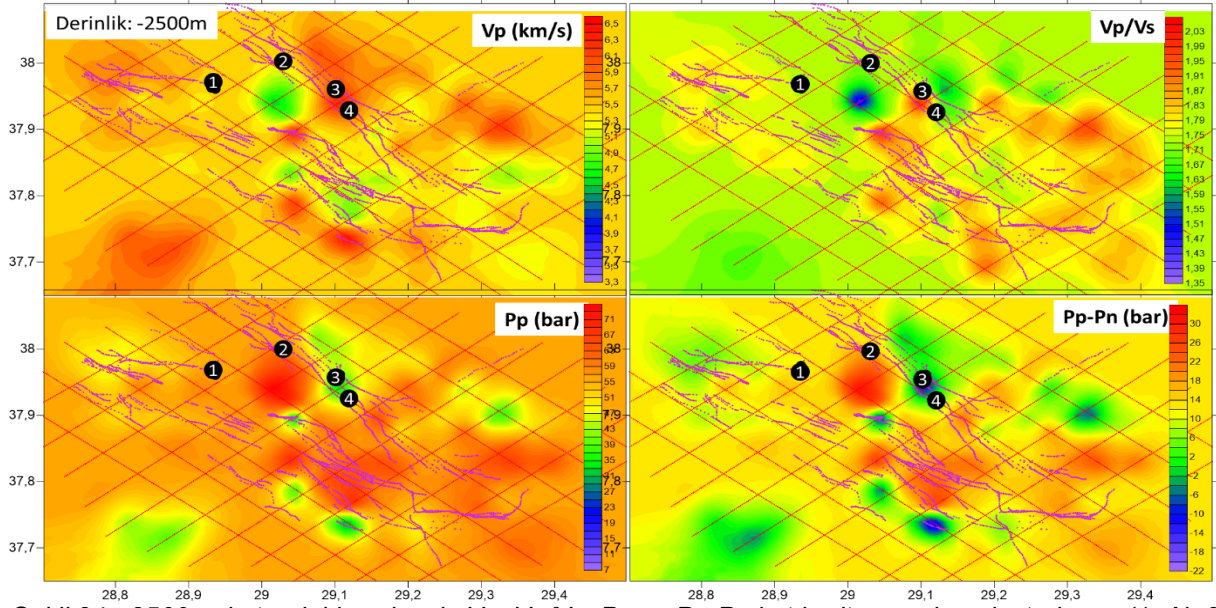
Figure 32: Comparison of the Vp, Vp/Vs, Pp and Pp-Pn plane sections of the -1500 m depth (1: Ak-3 and Ak-6 wells, 2: Gölemezli, 3: Karahayit, 4: Pamukkale)



Şekil 33: -2000 m kotundaki seviyenin Vp, Vp/Vs, Pp ve Pp-Pn kat haritasının karşılaştırılması (1: Ak-3 ve Ak-6 kuyusu, 2: Gölemezli, 3: Karahayit, 4: Pamukkale)

Figure 33: Comparison of the Vp, Vp/Vs, Pp and Pp-Pn plane sections of the -2000 m depth (1: Ak-3 and Ak-6 wells, 2: Gölemezli, 3: Karahayit, 4: Pamukkale)

Bu tür bölgelerde boşluk basıncı yüksektir. Bununla birlikte Vp/Vs oranının düşük olduğu bölgeler basınçlı bölgelerdir. Basınçla Vp hızı, Vs hızına göre daha hızlı azaldığından Vp/Vs oranı da düşmektedir. Dolayısıyla hem Vp hızının hem de Vp/Vs oranının düşük olduğu bölgelerde basınç değeri çok yüksektir. En belirgin olarak bu tür yerler, Profil 8 ile Profil 15'in kesiştiği bölgedir (Şekil 29-34). Bu tür yerler CO₂ bakımından doymun veya yüksek basınçlı akışkanın olduğu yerleri gösterir (Julian ve diğ.1998). Vp hızı düşerken Vp/Vs oranı artarsa bu tür yerlerde çatlakların yani boşlukların fazla olduğu yerler ve bu yerlerin akışkan ile dolu olduğu anlamına gelebilir. Bu tür yer en belirgin olarak Profil 5 ile Profil 14'in kesiştiği bölgedir. Bu bölge de Denizli fay zonu bölgesidir.



Şekil 34: -2500 m kotundaki seviyenin V_p , V_p/V_s , P_p ve P_p-P_n kat haritasının karşılaştırılması (1: Ak-3 ve Ak-6 kuyusu, 2: Gölemezli, 3: Karahayit, 4: Pamukkale)
 Figure 34: Comparison of the V_p , V_p/V_s , P_p and P_p-P_n plane sections of the -2500 m depth (1: Ak-3 and Ak-6 wells, 2: Gölemezli, 3: Karahayit, 4: Pamukkale)

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada boşluk basıncı (P_p) ve ilave basınç (P_p-P_n) hesaplamaları yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılarak birlikte yorumlanmıştır.

Ak-3 ve Ak-6 kuyularında ölçülen kuyu içi basınç değerleri, bu çalışmada hesaplanan ve kuyulara en yakın profillerdeki boşluk basınç değerleri ile kıyaslanmıştır. Ak-3 ve Ak-6 kuyu içi boşluk basınç değerleri ile profillerdeki hesaplanmış boşluk basınç değerlerinin birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, elde edilen boşluk basınç değerleri Pamukkale, Karahayit ve Gölemezli sıcak su çıkışları ile de kıyaslanmıştır. Seviye haritaları (Şekil 29-34) incelendiğinde, Profil-8 ile Profil-16'nın kesiştiği bölge yüksek boşluk basınçlı bir bölge olarak görülmektedir. Bu bölge ilginç olarak Ak-3, Ak-6 kuyuları ile Pamukkale, Karahayit ve Gölemezli sıcak su çıkışlarının tam ortasında yer almaktadır. Bu bölgede fay olmaması (Şekil 12) basınç değerinin artmasına neden olmaktadır. Bu bölgedeki yüksek boşluk basıncı, çevreye baskı yapmaktadır. Bu basınç ile çevrenin V_p hızı artmakta, dolayısıyla V_p/V_s oranını da artırmaktadır. Pamukkale, Karahayit ve Gölemezli sıcak suyun doğal olarak çıkış nedeni budur denilebilir. Bu basıncın etkisiyle ve aynı zamanda faylı bir bölge olması nedeniyle sıcak sular yüzeye bu bölgeden çıkmaktadır. Yine aynı haritalar incelendiğinde, bölgede yüksek basınçlı bölgelerin fazlalığı görülmektedir.

Sonuç olarak, Jeotermal sahaları içeren bölgelerde boşluk basınç değişimleri sismik hızlardan yararlanarak elde edilebilir. Bu bilgiler ile diğer jeofizik verilerin birlikte yorumlanmasıyla bölgenin jeotermal potansiyeli ortaya çıkartılır. Ayrıca tüm sonuçlar birlikte değerlendirilip, arama amaçlı bir kaç kuyu açılabilir. Daha sonra sahada mutlaka sismik yansıma yöntemi ile veri toplanmalı ve birlikte yeniden yorumlanmalıdır. Bununla birlikte sismik yansıma verisinden elde edilecek sismik hızlar ile deprem kayıtlarının değerlendirilmesinden elde edilen hızlarla ve basınçlarla karşılaştırılmalıdır. Sahada daha fazla yeni kuyu açmadan, bölgenin fayları, fay atımları, tabaka dalım açıları vs. sismik yansıma verisi ile ortaya çıkarılmalı ve yeni kuyu yerleri sismik veriden belirlenmelidir.

TEŞEKKÜR

Çalışmaya olan desteğinden ötürü Bülent KAYPAK'a ve Ak-3 ve Ak-6 kuyularına ait sıcaklık ve basınç değerlerini benimle paylaşan ve yayınlanmasına izin veren başta Sn. Hakan TEKKAYA olmak üzere Akça Enerji Üretim Otoprodüktör Grubu A.Ş. yönetimine teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

Akyol N., Zhu L., Mitchell B.J., Sozibilir H., Kekovali K., 2006. Crustal structure and local seismicity in western Anatolia, *Geophysical Journal International* 166, 1259-1269.

Al-Amri A., Abdelrahman K., Mellors R., Harris D., Al-Amri Y., 2020. Seismic Identification of Geothermal Prospecting in Harrat Rahat, Northern Arabian Shield, *Arabian Journal of Geosciences* 13(214), <http://doi.org/10.1007/s12517-020-05300-2>.

Altunel E., Barka A., 1996. Evaluation of archaeoseismic damages at Hierapolis, *Geological Bulletin of Turkey* 39, 65-74.

Ates A., Kearey P., Tufan S., 1999. New gravity and magnetic maps of Turkey, *Geophysical Journal International* 136, 499-502.

Ates R.C., Bayulke N., 1982. The 19 August 1976 Denizli, Turkey, earthquake: evaluation of the strong motion accelerograph record, *Bulletin of the Seismological Society of America* 72, 1635-1649.

Berge P.A., Bonner B.P., 2002. Seismic velocities contain information about depth, lithology, fluid content and microstructure, Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, <http://doi.org/10.4133/1.2927173>.

Blangy J.P., 1992. Integrated seismic lithologic interpretation: The petrophysical basis, PhD Thesis, Stanford University, USA, 414 p.

Bowers G.L., 1995. Pore pressure estimation from velocity data: accounting for overpressure mechanisms besides under compaction undercompaction, *SPE Drilling & Completion* 10, 89-95. <http://dx.doi.org/10.2118/27488-PA>.

Bowers G.L., 2002. Detecting High Overpressure, *The Leading Edge* 21(2), 174-177.

Charley J., Cuenot N., Dorbath C., Dorbath L., 2006. Tomographic study of the seismic velocity at the Soultz-sous-Forets EGS/HDR site, *Geothermics* 35, 532-543.

Duman O., 2009. Denizli-Kızıldere sahası jeotermal enerji aramaları jeofizik-özdirenç etüdü raporu, MTA raporu, Rapor no: 11188.

Eaton B.A., 1972. Graphical method predicts geopressure worldwide, *World Oil* 182, 51-56.

Erees F.S., Aytas S., Sac M.M., Yener G., Şalk M., 2007. Radon concentrations in thermal waters related to seismic events along faults in the Denizli Basin, Western Turkey, *Radiation Measurements* 42, 80-86.

Gardner G.H.F., Gardner L.W., Gregory A.R., 1974. Formation velocity and density- the diagnostic basic for stratigraphic traps, *Geophysics* 39(6), 770-780.

Gökçen N., 1982. Denizli ve Muğla çevresi Neojen istifinin ostrakod biyostratigrafisi, *Yerbilimleri* 8, 111-132.

Gurgey K., Simoneit B.R.T., Batı Z., Karamanderesi İ.H., Varol B., 2007. Origin of petro-liferous bitumen from the Büyük Menderes-Gediz geothermal graben system, Denizli-Sarayköy, western Turkey, *Applied Geochemistry* 22, 1393-1415.

Huffman A.R., 2002. The future of pore-pressure prediction using geophysical methods, *The Leading Edge* 21(2), 199-205.

Julian B.R., Pitt A.R., Foulger G.R., 1998. Seismic image of a CO2 reservoir beneath a seismically active volcano, *Geophys. J. Int.* 133(1), F7-F10, <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1998.1331540.x>

Kaypak B., Gokkaya G., 2012. 3-D imaging of the upper crust beneath the Denizli geothermal region by local earthquake tomography, western Turkey, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 211-212, 47-60.

Kaypak B., Venedik G., 2011. Denizli havzası 3-B sismik hız yapısının jeolojik, tektonik, hidrotermal ve deprensellik ilişkisi, 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-14 Ekim 2011, Ankara-Türkiye, Erişim adresi: http://www.tdmd.org.tr/TR/Genel/4.Oturum/1.TDMSK_108.pdf

Lahn E., 1948. Denizli-Sarayköy-Buldan bölgesinin deprem faaliyeti hakkında not, *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni* 1, 39-50. Erişim Linki: <https://www.acarindex.com/pdfs/29879>

Lebedev E.B., Kern H., Pavlenkova N.I., Lukanin O.A., Lobanov K.V., Zharikov A.V., Popp, T., 2021, Compressional wave velocity measurements on mafic-ultramafic rocks under high aqueous fluid pressure and temperature help to explain low velocity zones in the lithosphere, *Scientific Reports* 11,13424 <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92248-2>.

McKenzie D.P., 1978. Active tectonics of the Alpine-Himalayan Belt: The Aegean Sea and its surrounding regions, *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 55, 217-254.

MTA, 2021. Yerbilimleri Harita Görüntüleyici, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, Erişim adresi: <http://yerbilimleri.mta.gov.tr>.

Ozer C., Polat, O., 2017. Local earthquake tomography of Izmir geothermal area, Aegean region of Turkey, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* 58 (1), 17-42.

Ozer C., Ozyazicioglu M., 2019. The Local Earthquake Tomography of Erzurum (Turkey) Geothermal Area, *Earth Sciences Research Journal* 23(3), 209-223.

Ozer C., 2021. 4-D tomographic change of Vp and Vp/Vs structure before destructive earthquakes: a case study of the Sivrice-Elazığ earthquake (mw = 6.8), Eastern Turkey, *Natural Hazards* 108(2), 1901-1917.

Özgüler M.E., Turgay M.I., Şahin H., 1983. Denizli jeotermal alanlarında jeofizik çalışmalar, *MTA Bülteni* 99-100,129-141.

Piccardi L., 2007. The AD 60 Denizli Basin earthquake and the apparition of Archangel Michael at Colossae (Aegean Turkey), *Geological Society, London, Special Publications* 273, 95-105

Sayers C.M., Johnson G.M., Denyer G., 2002. Predrill pore-pressure prediction using seismic data, *Geophysics* 67(4), 1286-1292.

Sengor A.M.C., 1987. Cross-faults and differential stretching of hanging walls in regions of lowangle normal faulting; Examples from western Turkey. (In: Continental Extensional Tectonics, Editors: Coward M.P., Dewey J.F., Hancock P.L., 619 p, Geological Society, London, Special Publications), 575-589.

Soleymani H., Riahi M.A., 2012. Velocity based pore pressure prediction-A case study at one of the Iranian southwest oil fields, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 94-95, 40-46.

Subay E., 2019. Tosunlar jeotermal sahasının (denizli) hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal incelemesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 111 s.

Takei Y., 2002. Effect of pore geometry on Vp/Vs: from equilibrium geometry to crack, *J. Geophys. Res.* 107, Erişim adresi: <http://doi.org/10.1029/2001JB00522>.

Topal S., 2003. Denizli neojen istifinin startigrafisi ve tektonik özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 63 s.

Uyanık O., 1999. Kayaçların sismik hızlar ve kayma direncinin incelenmesi, 52. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiriler kitabı, 63-70.

Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/273058917_Kayaclarda_Sismik_Hizlar_ve_Kayma_Direncinin_Incelenmesi

Uysal I.T., Feng Y., Zhao J., Isik V., Nuriel P., Golding S.D., 2009. Hydrothermal CO₂ degassing in seismically active zones during the late Quaternary, *Chemical Geology* 265, 442-454.

Wang Z., Wang R., 2015. Pore pressure prediction using geophysical methods in carbonate reservoirs: Current status, challenges and way ahead, *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 27(2), 986-993.

ARAŞTIRMA VERİSİ (*Research Data*)

Çalışma kapsamında TÜBİTAK-MAM Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü'nün Denizli Havzasında kaydettiği deprem verileri kullanılmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ (*Conflict of Interest / Relationship*)

Araştırma kapsamında herhangi bir kişiyle ve/veya kurumla çıkar çatışması/ilişkisi bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI (*Author Contributions*)

- Çalışmanın tasarlanması (*Designing of the study*): O.G.
- Literatür araştırması (*Literature research*): O.G.
- Saha çalışması, veri temini/derleme (*Fieldwork, collection/compilation of data*): O.G.
- Verilerin işlenmesi/analiz edilmesi (*Processing/analysis of data*): O.G.
- Şekil/Tablo/Yazılım hazırlanması (*Preparation of figures/tables/software*): O.G.
- Bulguların yorumlanması (*Interpretation of findings*): O.G.
- Makale yazımı, düzenleme, kontrol (*Writing, editing and checking of manuscript*): O.G.