



**06 ŞUBAT 2023 PAZARCIK,
ELBİSTAN (KAHRAMANMARAŞ)**

ve

**20 ŞUBAT 2023 YAYLADAĞI (HATAY)
DEPREMLERİ**

**İSKENDERUN VE ANTAKYA'DA
ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİNE
YÖNELİK JEOFİZİK ÇALIŞMALAR**

Alsancak / İZMİR

27.03.2023

RAPORA KATKI KOYANLAR

Prof. Dr. Gökhan GÖKTÜRKLER (Jeofizik Mühendisliği Bölümü)

Doç. Dr. Meriç Aziz BERGE (Jeofizik Mühendisliği Bölümü)

Doç. Dr. Emre TİMUR (Jeofizik Mühendisliği Bölümü)

Arař. Gör. Dr. Aykut TUNÇEL (Jeofizik Mühendisliği Bölümü)

Öğr. Gör. Zülfikar ERHAN (Jeofizik Mühendisliği Bölümü)

İçindekiler

ÖNSÖZ.....	1
1. JEOFİZİK ÇALIŞMALAR.....	2
2. ARAŞTIRMA ALANLARI VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR.....	4
2.1. İskenderun İlçesi	4
2.2. Antakya İlçesi	12
3. UZAKTAN ALGILAMA ÇALIŞMALARI.....	20
4. SONUÇLAR.....	26
5. ÖNERİLER.....	27
KAYNAKLAR	28
EK – Saha Çalışmalarına ait Görseller	29

Şekil Listesi

- Şekil 1.** 06.02.2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) $M_w=7.7$, Elbistan (Kahramanmaraş) $M_w=7.6$ ve Yayladağı (Hatay) $M_w=6.4$ depremlerinin yerlerini (AFAD 2023a, b) ve jeofizik çalışmaların yapıldığı İskenderun ve Antakya'yı gösteren GoogleEarth uydu görüntüsü (erişim tarihi Mart 2023). Kırmızı renkli çizgiler diri fayları göstermektedir (Emre vd., 2013). 3
- Şekil 2.** İskenderun'da gerçekleştirilen jeofizik ölçüm konumlarını gösteren GoogleEarth uydu görüntüsü (erişim tarihi Mart 2023). 4
- Şekil 3.** a) ve b) İskenderun'da gerçekleştirilen jeofizik ölçümlere ait görseller..... 5
- Şekil 4.** Saha çalışmalarında gözlenen sıvılaşma yapılarına ait görseller. a) Sahil şeridinde, b), c) ve d) İskenderun Teknik Üniversitesi kampüsü içerisinde karşılaşılan sıvılaşma yapılarına ait görseller (c ve d görselleri Dr. Öğr. Üy. Muhammet Musab Erdem, İSTE İnşaat Mühendisliği Bölümü, tarafından Şubat 2023 tarihinde çekilmiştir). 5
- Şekil 5.** 9, 10, 19 ve 24 nolu konumlarda gerçekleştirilen mikrotremor ölçümleri sonuçlarına ait H/V spektral oran grafikleri. 6
- Şekil 6.** Mikrotremor verilerinden elde edilen zemin hâkim titreşim periyodu parametresinin İskenderun çalışma alanındaki dağılımı. 7
- Şekil 7.** İskenderun çalışma alanında 12, 18, 22 ve 26 nolu noktalarda yapılan SPAC ölçümlerine ait sonuçlar. Her bir grafik kesme dalgası (S dalgası) hızının (V_s) derinlikle değişimini göstermektedir. 8
- Şekil 8.** İskenderun çalışma alanına ait V_{s30} haritası..... 9
- Şekil 9.** İskenderun çalışma alanında 10 metre derinlik için V_s seviye haritası. 10
- Şekil 10.** İskenderun çalışma alanında 20 metre derinlik için V_s seviye haritası. 10
- Şekil 11.** İskenderun çalışma alanında 30 metre derinlik için V_s seviye haritası. 11
- Şekil 12.** İskenderun çalışma alanında V_{s30} değerleri kullanılarak elde edilen zemin büyütmesi. 11
- Şekil 13.** Antakya'da gerçekleştirilen jeofizik ölçüm konumlarını gösteren Google Earth uydu görüntüsü (erişim tarihi Mart 2023). Kırmızı renkli çizgiler diri fayları göstermektedir (Emre vd., 2013). 12

Şekil 14. Antakya’da gerçekleştirilen jeofizik ölçümler sırasında gözlenen yıkıma ait görseller.	13
Şekil 15. Antakya çalışma alanında 8, 9, 17 ve 20 nolu konumlarda gerçekleştirilen mikrotremor ölçümleri sonuçlarına ait H/V spektral oran grafikleri.	14
Şekil 16. Mikrotremor verilerinden elde edilen zemin hâkim titreşim periyodu parametresinin Antakya çalışma alanındaki dağılımı.	15
Şekil 17. Antakya çalışma alanında 2, 8, 17 ve 20 numaralı noktalarda yapılan SPAC ölçümlerine ait sonuçlar. Her bir grafik kesme dalgası hızının (V_s) derinlikle değişimini göstermektedir.	16
Şekil 18. Antakya çalışma alanına ait V_{s30} haritası.	17
Şekil 19. Antakya çalışma alanında 10 metre derinlik için V_s seviye haritası.	18
Şekil 20. Antakya çalışma alanında 20 metre derinlik için V_s seviye haritası.	18
Şekil 21. Antakya çalışma alanında 30 metre derinlik için V_s seviye haritası.	19
Şekil 22. Antakya çalışma alanında V_{s30} değerleri kullanılarak elde edilen zemin büyütmesi.	19
Şekil 23. Havalimanı ve çevresindeki zemin sıvılaşması (a) ve yüzey kırığı izleri (b) (HGM Küre, Harita Genel Müdürlüğü). Sarı renkli elips sıvılaşma alanını ve beyaz renkli oklar yüzey kırığını göstermektedir.	20
Şekil 24. Çalışma alanının InSAR görüntüsü (ASF DAAC HyP3 2023). Kırmızı renkli çizgiler yüzey kırığı izlerini (Reitman vd., 2023) göstermektedir.	21
Şekil 25. Çalışma alanının SAR RTC görüntüleri (ASF DAAC HyP3 2023) (a) Deprem öncesi 04.01.2023 tarihli (b) Deprem sonrası 21.02.2023 tarihli görüntü. Sarı renkli dikdörtgen sıvılaşma alanını göstermektedir.	22
Şekil 26. Hatay Havalimanı ve çevresinin Sentinel-2 verisi kullanılarak oluşturulmuş FCI görüntüleri (Sentinel Hub EO Browser) (a) 25.01.2023 (b) 09.02.2023 (c) 11.03.2023 tarihli görüntüler. Sarı renkli çizgiler yüzey kırığı izlerini (Reitman vd., 2023) göstermektedir.	23

ÖNSÖZ

06 Şubat 2023 tarihinde yerel saat ile 04.17'de Pazarcık (Kahramanmaraş) dolayında kaydedilen yıkıcı bir deprem (Mw7.7) ile bu depremden 9 saat sonra Elbistan (Kahramanmaraş) dolayında yerel saat ile 13.24'te kaydedilen ikinci bir yıkıcı deprem (Mw 7.6) ve 14 gün sonra 20 Şubat 2023 tarihinde Yayladağı (Hatay) merkezli üçüncü deprem (Mw 6.4) sonucu İskenderun ve Antakya'da ağır hasar ve can kayıpları meydana gelmiştir. Bu rapor, oluşan hasarlar ile yerel zemin koşullarının ilişkisini belirlemeye yönelik jeofizik çalışmaları, saha gözlemlerini ve değerlendirmelerini içermektedir.

Halen artçıları devam eden bu yıkıcı depremler sonrasında Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği öğretim elemanlarından oluşan bir araştırma ekibi olarak 01.03.2023 tarihinde afet bölgesine hareket edilmiştir. İskenderun ve Antakya'da gerçekleştirilen jeofizik çalışmalar sonrası 10.03.2023 tarihinde İzmir'e dönüşüyle birlikte elde edilen veriler değerlendirilerek rapor çalışmaları tamamlanmış ve kamuoyunun bilgisine sunulmaktadır.

Araştırma ekibi olarak, başta bölgede gerekli inceleme ve çalışmaların yürütülmesi için üniversitemizin olanaklarını sunan Rektörümüz Prof. Dr. Nükhet HOTAR olmak üzere Dokuz Eylül Üniversitesi Rektörlüğü ve ilgili tüm birimlerine, İskenderun'da görevli Kırklareli Valisi Birol EKİCİ'ye, AFAD Deprem Risk Azaltma Genel Müdürü Prof. Dr. Orhan TATAR'a ve bölgede görevli AFAD çalışanlarına teşekkür ederiz.

Bu afetlerde yaşamını yitirenlere Allah'tan rahmet, ailelerine ve yakınlarına baş sağlığı ve yaralılara acil şifalar dileriz.

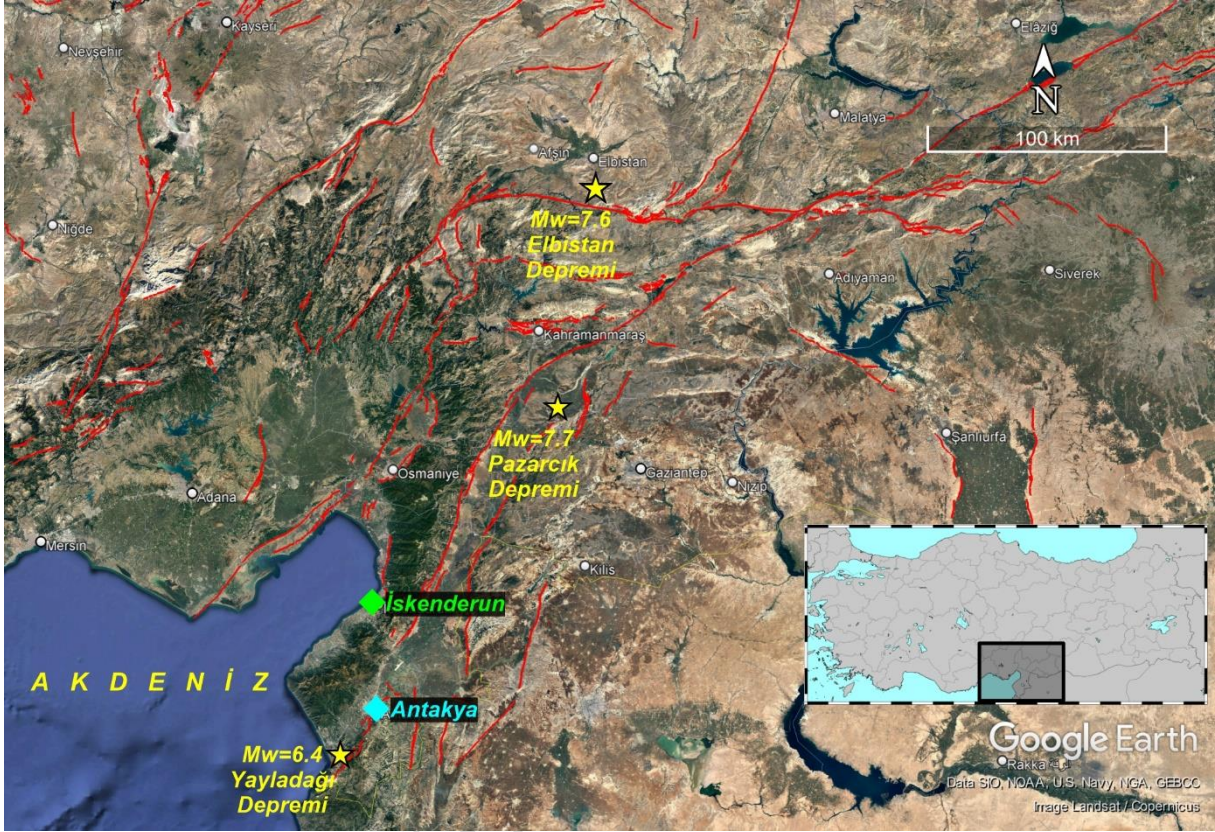
1. JEOFİZİK ÇALIŞMALAR

Binaların oturacağı zemin özelliklerinin araştırılmasına yönelik mühendislik jeofiziği çalışmalarında Jeofizik Mühendisliği'nin sismik ölçüm yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Sismik yöntemler, yerin elastik özellikleri ve mekanik davranışlarını belirleyen parametrelere duyarlı olması nedeniyle mühendislikte önemli bir rol oynar. Yöntem, özellikle zeminin deprem anındaki davranışlarının kestirimi ve sismik tehlikeyle ilgili çalışmalarda büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte, sismik araştırmalar, mühendislik ölçeğinde jeolojik yapının geometrisinin belirlenmesinde hızlı ve uygun maliyetli bir imkân sunmaktadır. Sismik kırılma yöntemi yeraltı tabakalarının sismik dalga hızlarının (V_P , V_S) belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Erhan, 2018). Diğer bir sismik yöntem olan çok kanallı yüzey dalgaları analizi (MASW) ise yeraltının kesme dalga hızının (V_S) bir ve iki boyutlu olarak belirlenmesinde tercih edilmektedir. MASW çalışmalarının sonuçlarına göre belirlenen noktalarda V_S hızlarına ve ilgili yönetmeliklere bağlı olarak zemin sınıflandırması yapılabilmektedir. Diğer yandan insan aktivitesi, trafik, makineler, deniz dalgası ve meteorolojik olayların neden olduğu doğal titreşimlerin ölçüldüğü mikrotremor yönteminde, ölçülen sismik sinyaller analiz edilerek zemine ait zemin hâkim titreşim periyodu, spektral büyütme ve kesme dalgası hız modeli gibi bilgiler elde edilebilmektedir. Mikrotremor verilerinin kullanıldığı pasif kaynaklı yüzey dalgası yöntemlerinden biri olan Uzamsal Otokorelasyon/Özilişki (SPAC) çalışmalarıyla da yeraltının kesme dalga hızı değerleri (V_S) belirlenebilmektedir. Bahse konu jeofizik yöntemler hızlı ve tahribatsız ölçüm alabilme yeteneklerinin yanı sıra yoğun yerleşim alanlarında daha kolay uygulanabilmeleri sayesinde zemin özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla sıklıkla tercih edilmektedirler.

Bu çalışmada *Jeofizik Mühendisliği Bölümü Arazi Ekipmanları Laboratuvarı* envanterinde yer alan cihazlar kullanılarak mikrotremor ve SPAC yöntemleriyle veri toplanmıştır. Mikrotremor ölçümleri *Güralp CMG 6TD* hız ölçer ve SPAC ölçümleri ise *Geometrics Smartseis* cihazı ile iki boyutlu dizilim şeklinde gerçekleştirilmiştir. Değerlendirmelerde ise sırasıyla mikrotremor için *GEOPSY* (açık kaynak) ve SPAC için *SeisImager/SW* (lisanslı) yazılımları kullanılmıştır. Haritaların hazırlanmasında ise *Surfer* yazılımı kullanılmıştır.

İzleyen bölümde jeofizik saha çalışmalarının gerçekleştirildiği İskenderun ve Antakya ilçelerine ait jeofizik ölçüm sonuçları ve değerlendirmeler sunulacaktır (Şekil 1). Ayrıca

İskenderun ve Antakya'yı da kapsayan Hatay Havalimanı merkezli uzaktan algılama çalışmalarına da bu rapor kapsamında yer verilmiştir.

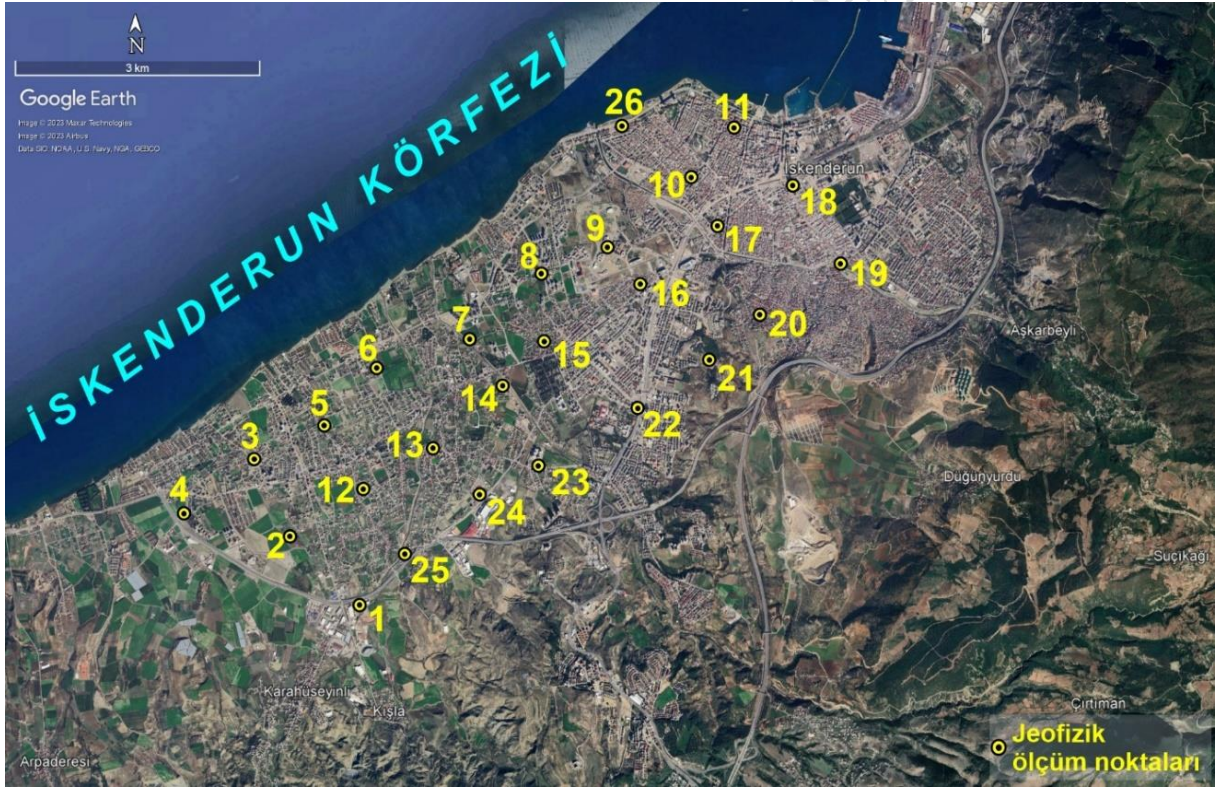


Şekil 1. 06.02.2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) Mw=7.7, Elbistan (Kahramanmaraş) Mw=7.6 ve Yayladağı (Hatay) Mw=6.4 depremlerinin yerlerini (AFAD, 2023a, b) ve jeofizik çalışmaların yapıldığı İskenderun ve Antakya'yı gösteren Google Earth uydü görüntüsü (erişim tarihi Mart 2023). Kırmızı renkli çizgiler diri fayları göstermektedir (Emre vd., 2013).

2. ARAŞTIRMA ALANLARI VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

2.1. İskenderun İlçesi

Jeofizik çalışmalara öncelikli olarak ağır hasarların olduğu Hatay iline bağlı İskenderun ilçesinde 02.03.2023 tarihi itibarıyla başlanmıştır. Bu çalışmada uygulanan mikrotremor ve SPAC yöntemlerinin ölçüm konumlarını gösteren Google Earth uydu görüntüsü Şekil 2’de verilmektedir. İskenderun ilçesinde yerleşimin yoğun olduğu sahil bölgesinden başlayarak doğuya doğru olacak şekilde saha ölçümleri esnasında karşılaşılan engeller ve ölçüme uygunluğa bağlı olarak 1 km aralıklı ölçüm karelağı tanımlanmıştır. Toplamda 26 noktada mikrotremor ve SPAC ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Jeofizik ölçümler ve sahada karşılaşılan sınırlama sonucu meydana gelen deformasyonlara ait görüntüler sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4’te verilmektedir.



Şekil 2. İskenderun’da gerçekleştirilen jeofizik ölçüm konumlarını gösteren Google Earth uydu görüntüsü (erişim tarihi Mart 2023).



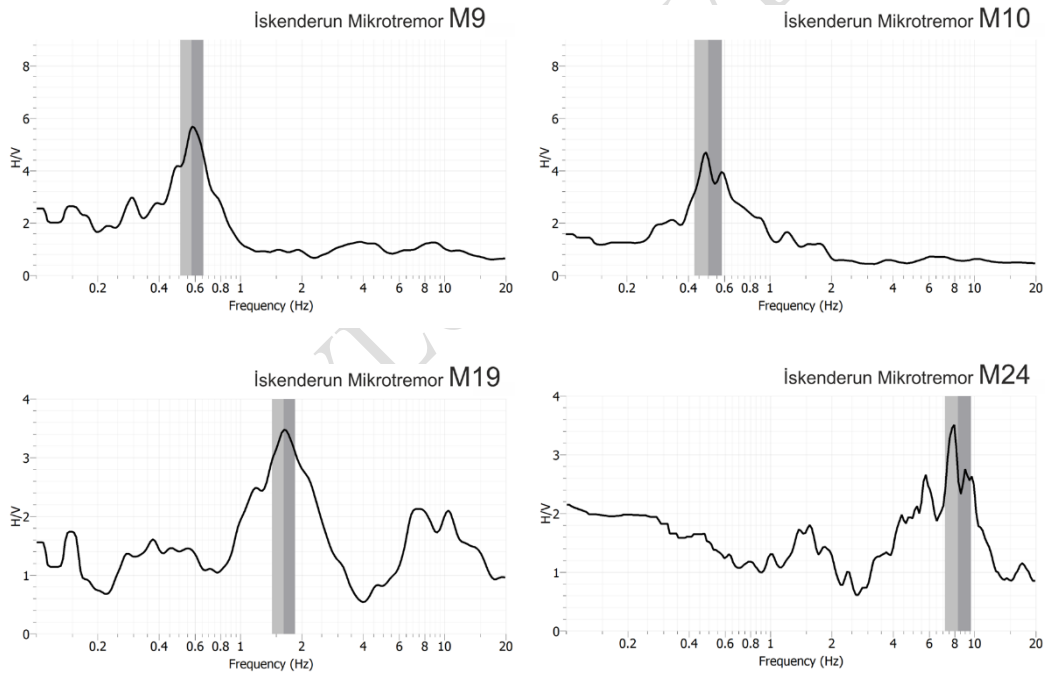
Şekil 3. a) ve b) İskenderun'da gerçekleştirilen jeofizik ölçümlere ait görseller.



Şekil 4. Saha çalışmalarında gözlenen sıvılaşma yapılarına ait görseller. a) Sahil şeridinde, b), c) ve d) İskenderun Teknik Üniversitesi kampüsü içerisinde karşılaşılan sıvılaşma yapılarına ait görseller (c ve d görselleri Dr. Öğr. Üy. Muhammet Musab Erdem, İSTE İnşaat Mühendisliği Bölümü, tarafından Şubat 2023 tarihinde çekilmiştir).

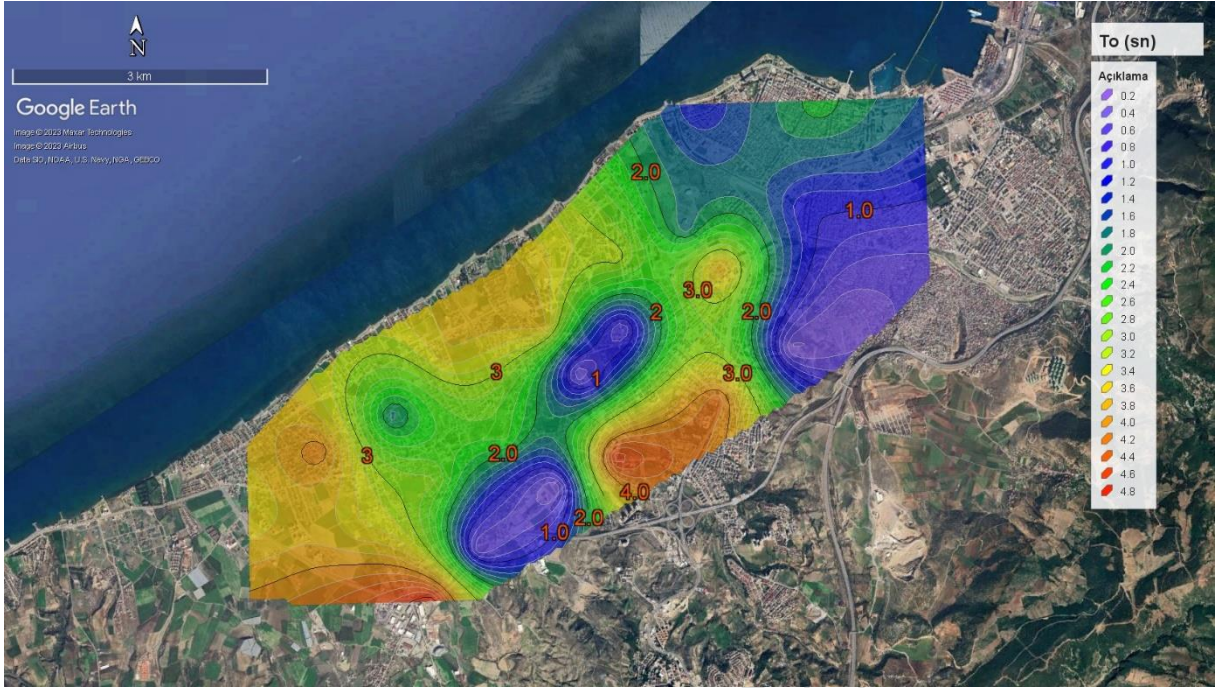
Jeofizik çalışmalar sonucu belirlenen ve yapı-zemin ilişkisini tanımlarken ihtiyaç duyulan başlıca parametrelerden biri zemin hâkim titreşim periyodudur. Bu parametrenin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen mikrotremor yöntemine ait sonuçlar, 4 farklı örnek ölçüm konumu (9,

10, 19 ve 24 nolu) için Şekil 5’te sunulmuştur. 9 numaralı ölçüm noktası, İskenderun Teknik Üniversitesi (İSTE) kampüsü içinde yer almaktadır. Mikrotremor verilerine uygulanan yatay/düşey spektral oran (HVSR) yöntemi sonucuna göre zemin hâkim titreşim frekansı 0,58 Hz olarak belirlenmiştir. Bu değerden elde edilen zemin hâkim titreşim periyodu 1,72 sn’dır. Benzer biçimde İSTE Kampüsünde ve denize 1 km mesafede yer alan 10 numaralı ölçüm noktasında alınan ölçümlerin değerlendirilmesi sonucunda zemin hâkim titreşim frekansı 0,49 Hz, periyod değeri 2,04 sn olarak hesaplanmıştır. İskenderun’da denizden biraz daha uzak olan 19 numaralı ölçüm noktasının değerlendirilmesi sonucunda zemin hâkim titreşim frekansı 1,64 Hz ve periyodu ise 0,61 sn olarak belirlenmiştir. Kentin kıyı çizgisine en uzak mesafede yer alan üçüncü hat üzerindeki 24 numaralı noktada da ölçümler alınmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda zemin hâkim titreşim frekansı 7,95 Hz ve periyod değeri ise 0,12 sn olarak tespit edilmiştir (Şekil 5).



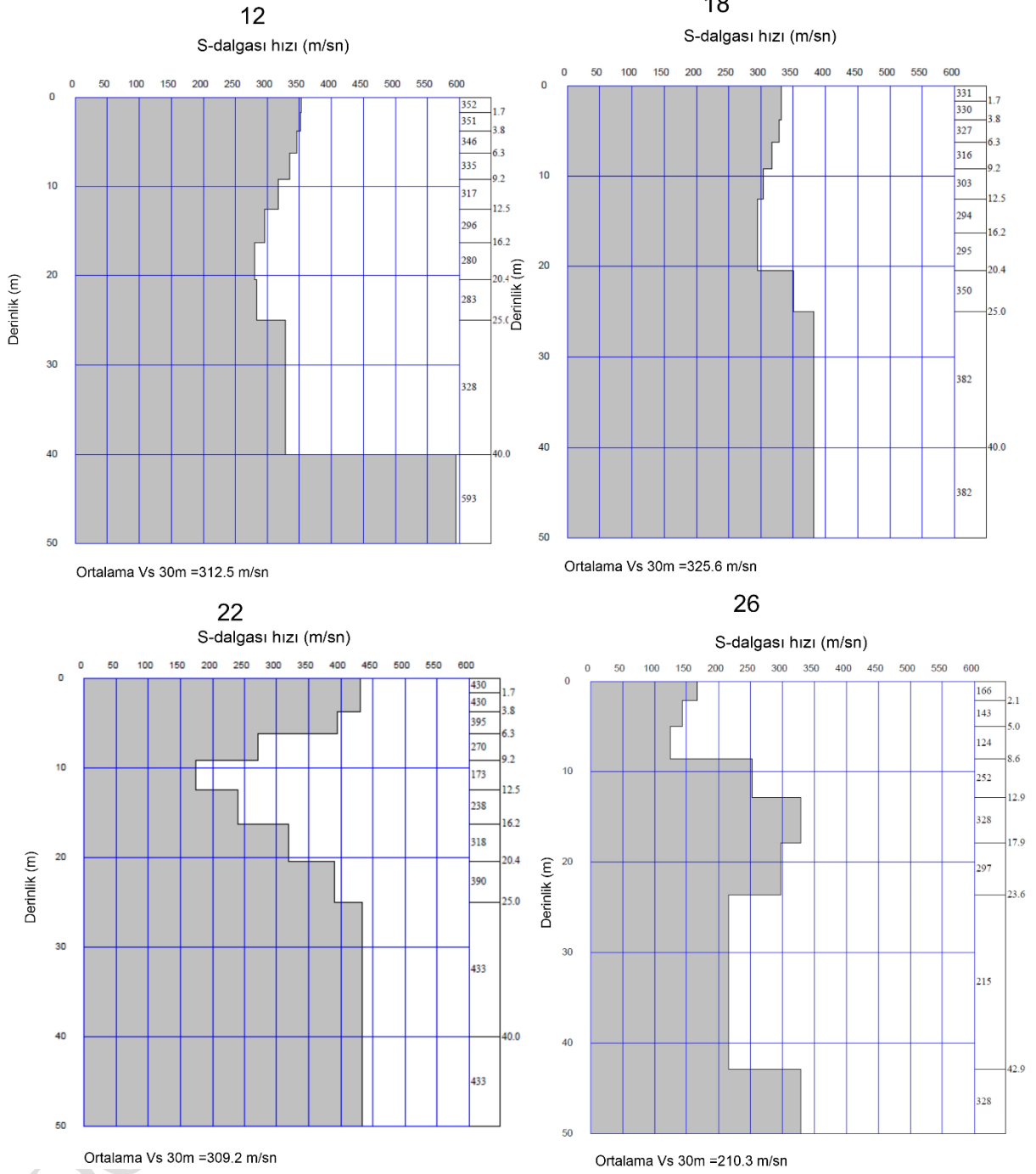
Şekil 5. 9, 10, 19 ve 24 nolu konumlarda gerçekleştirilen mikrotremor ölçümleri sonuçlarına ait H/V spektral oran grafikleri.

Tüm ölçüm noktalarında elde edilen mikrotremor verilerinin değerlendirilmesi sonucunda çalışma alanı için zemin hâkim titreşim periyodu değerleri belirlenmiş ve Şekil 6’da verilen harita oluşturulmuştur.

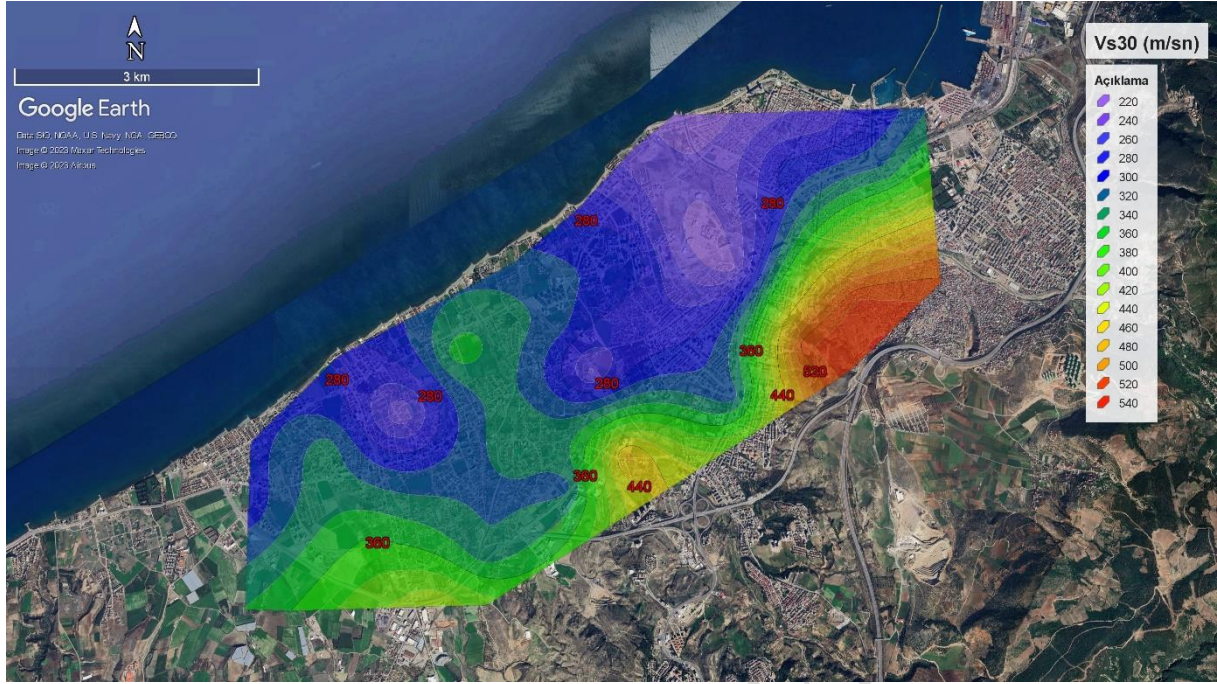


Şekil 6. Mikrotremor verilerinden elde edilen zemin hâkim titreşim periyodu parametresinin İskenderun çalışma alanındaki dağılımı.

Çalışma alanında aynı noktalar üzerinde gerçekleştirilen SPAC ölçümleriyle V_s hız değerinin bir boyutlu olarak düşey yönde derinlikle değişimi belirlenmiştir. Şekil 7’de 12, 18, 22 ve 26 nolu ölçüm noktalarında kesme dalgası hızının (V_s) düşey yönlü değişimleri örnek olarak verilmektedir. Buna göre, 30 m derinliğe kadar ortalama kesme dalgası hızı (V_{s30}) 12 numaralı ölçüm noktasında 312 m/sn, 18 numaralı ölçüm noktasında 325 m/sn, 22 numaralı ölçüm noktasında 309 m/sn ve 26 numaralı ölçüm noktasında 210 m/sn olarak elde edilmiştir. Tüm ölçüm noktalarındaki V_{s30} hız değerleri kullanılarak oluşturulan harita Şekil 8’de verilmektedir.



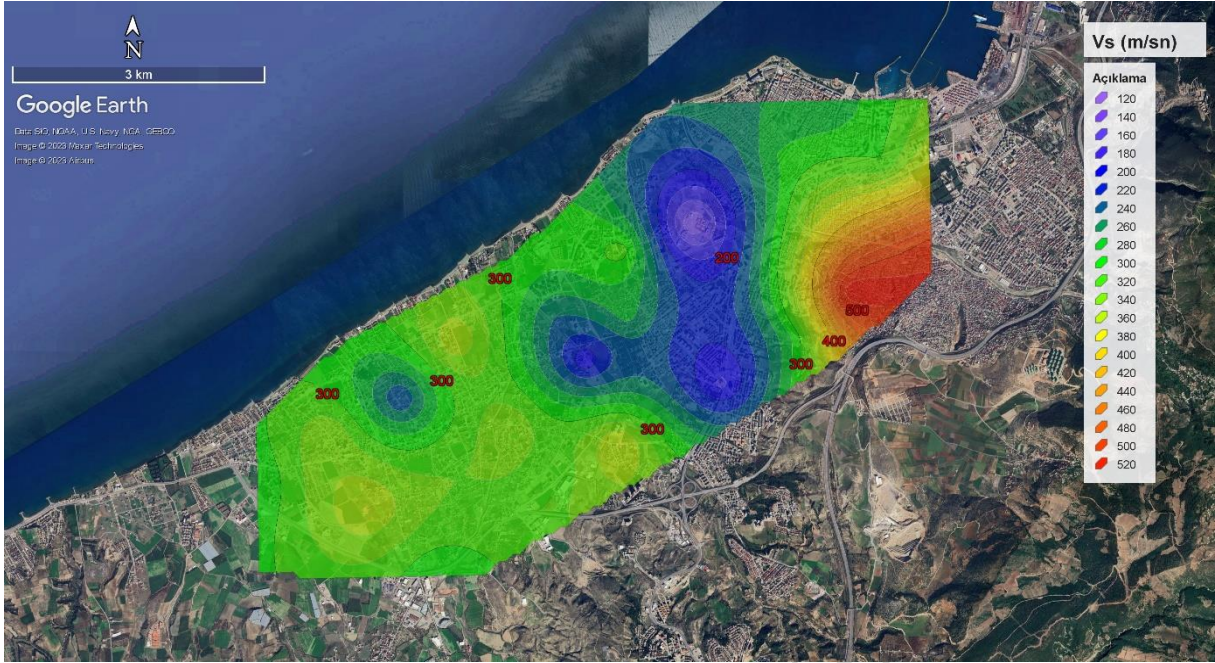
Şekil 7. İskenderun çalışma alanında 12, 18, 22 ve 26 nolu noktalarda yapılan SPAC ölçümlerine ait sonuçlar. Her bir grafik kesme dalgası (S dalgası) hızının (V_s) derinlikle değişimini göstermektedir.



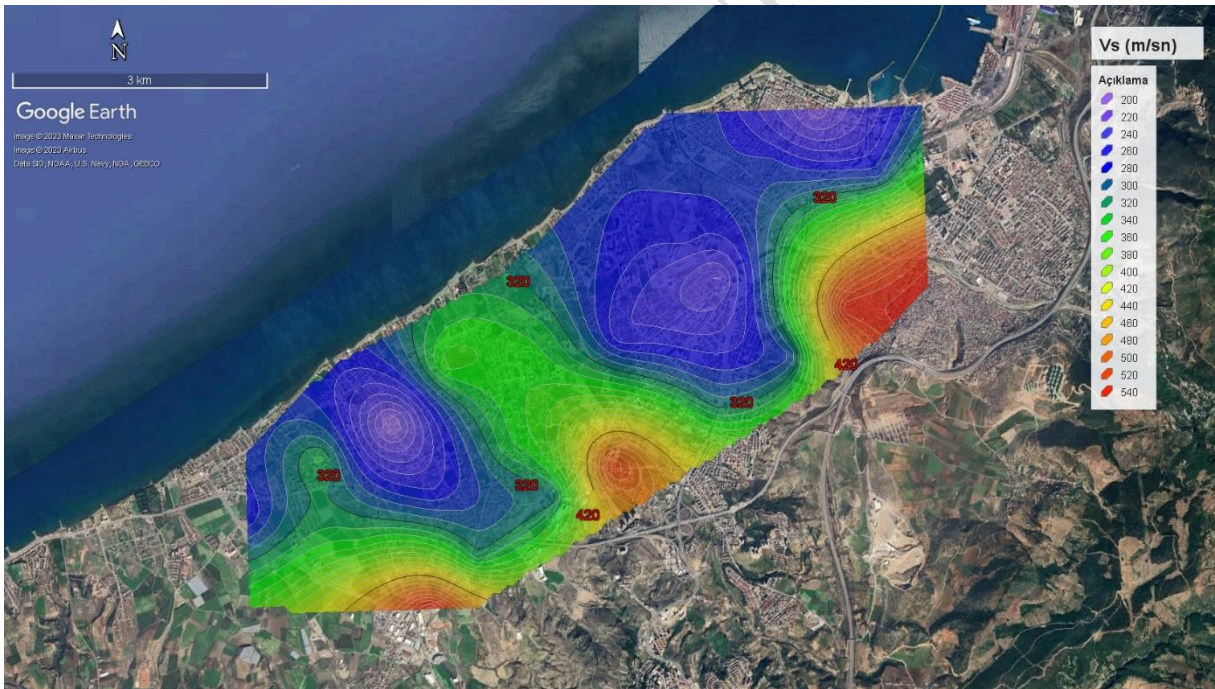
Şekil 8. İskenderun çalışma alanına ait V_{s30} haritası.

V_{s30} haritası (Şekil 8) incelendiğinde sahilden şehir merkezine doğru yaklaşık 2 km'lik kesimde 200 m/sn – 280 m/sn aralığında hız değerleri gözlenmektedir. Şehrin güneydoğusunda bu değerler 400 m/sn – 560 m/sn aralığında değişmektedir. Şehrin yerleştiği kesim Amanoslar'dan doğan ve kıyı boyunca denize boşalan akarsuların taşıdığı sedimanların birikmesi neticesinde oluşmuştur (Bkz. Demirbilek, 2018). Bu akarsular eğimin yüksek olduğu kesimlerde çakıl ve kumlu sedimanları şehrin güneydoğu kesimlerinde biriktirirken daha ince taneli kum ve silt birimlerini denize doğru taşıyacaktır. Ancak eğimin azalmasına bağlı olarak akarsuyun taşıma gücünün zayıflamasıyla ince taneli kum ve silt birimleri sahile yakın kesimlerde çökeceklerdir. V_{s30} haritasında düşük hızda sahip kesimlerin böylesi ince taneli kum ve siltli birimlere karşılık geldiği değerlendirilmektedir.

Zeminin farklı derinlikleri için V_s değerleri dağılım haritaları Şekil 9, 10 ve 11'de verilmektedir. Yüzeyden itibaren 10 m, 20 m ve 30 m derinlikler için oluşturulan haritalarda İskenderun şehrinin yer aldığı kesimde kesme dalgası hızının yanal ve düşey yöndeki değişimleri yer almaktadır. İlk 10 metre için hazırlanan haritada (Şekil 9) düşük hız değerleriyle temsil edilen ve bu sebeple fiziksel özellikler açısından zayıf olduğu düşünülen K-G uzanımlı bir zonun yer aldığı görülmektedir. Konum olarak bu zonun üzerinde yer alan İskenderun Teknik Üniversitesi Yerleşkesi'nde bu zonla ilişkili olduğu değerlendirilen zemin sıvılaşmasına bağlı kum çıkışları meydana gelmiştir (Bkz. Şekil 4). Şekil 10'da verilen ve 20 metre derinlik için hazırlanan haritada şehrin GD kesiminde görece yüksek hız değerlerinde önemli bir değişim gözlenmezken sahilden içeriye 2 km'lik kesimde özellikle KD-GB yönlü ani kesme dalga hızı (V_s) değişimleri yer almaktadır. Hız değerlerindeki değişimlerin, iri taneli çakıl ve kumlu birimlerden daha ince taneli kum ve siltli birimlere geçişlerden kaynaklandığı ve bu durumun da topografik eğimin azalmasına bağlı olarak akarsuların yatak değiştirmesiyle ilişkili olduğu değerlendirilmektedir.

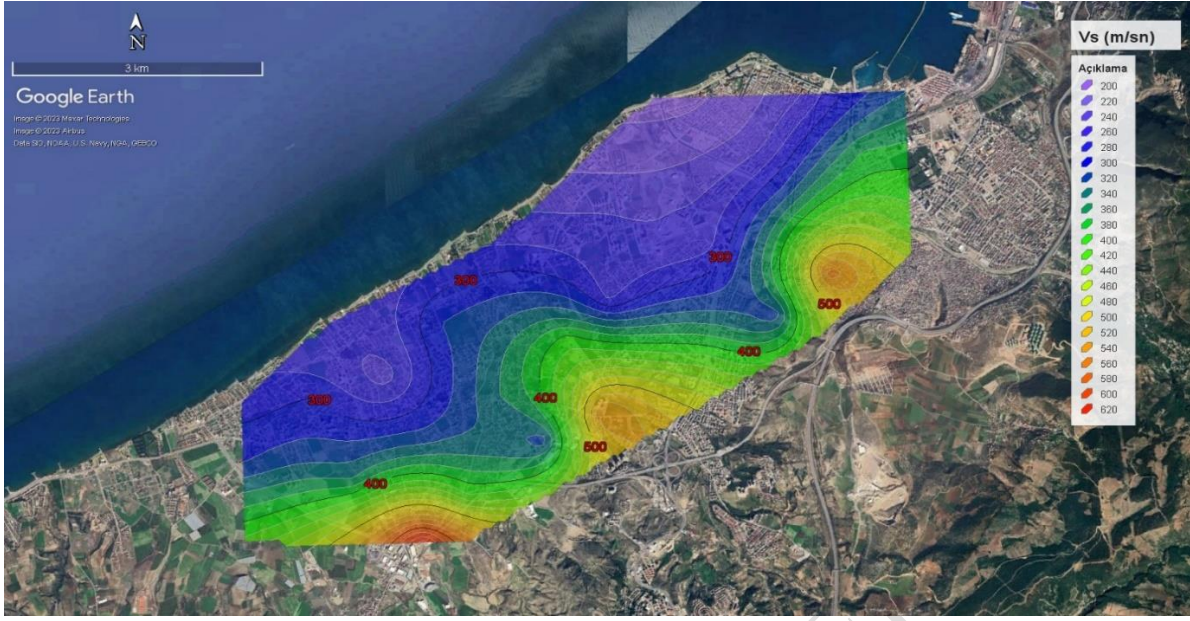


Şekil 9. İskenderun çalışma alanında 10 metre derinlik için V_s seviye haritası.



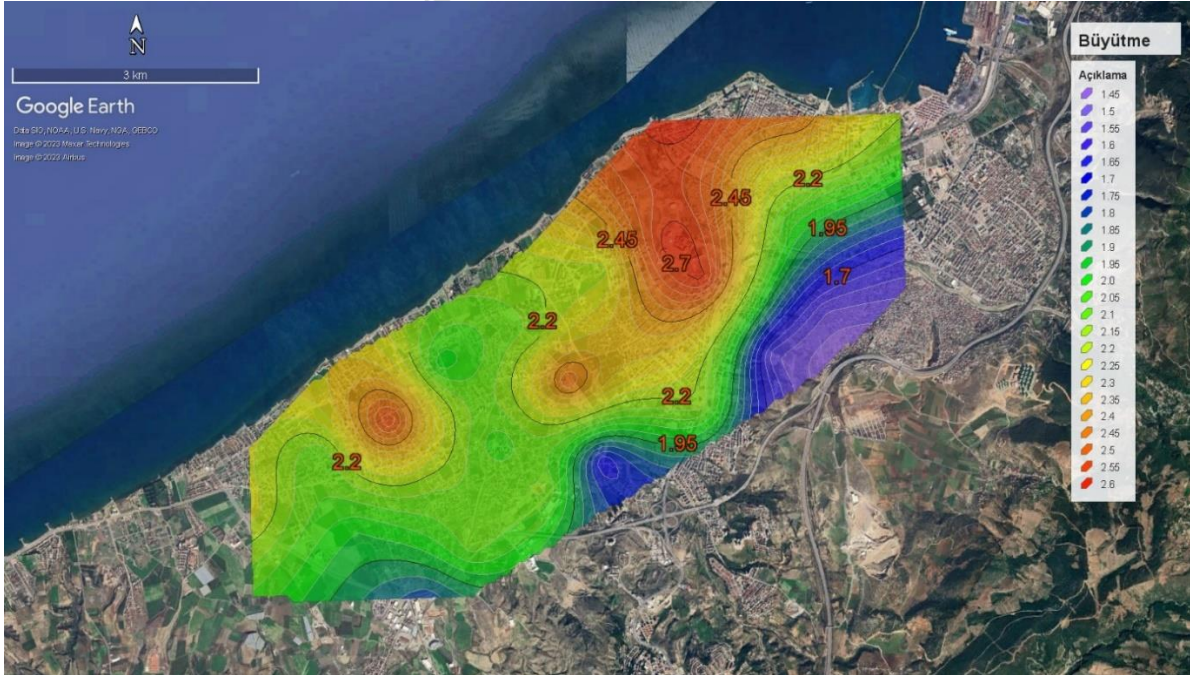
Şekil 10. İskenderun çalışma alanında 20 metre derinlik için V_s seviye haritası.

30 metre derinlik için hazırlanan haritada (Şekil 11) kıydan iç kesimlere doğru hız değerleri artmaktadır. Bu derinlik seviyesinde, kıyı kesimlerdeki düşük hız değerleri zayıf zemin özelliklerinin ve deniz suyunun etkisi olarak yorumlanmıştır. Bu düşük hız değerleri kıydan iç kesimlere 1 km'lik hat boyunca yer almaktadır.



Şekil 11. İskenderun çalışma alanında 30 metre derinlik için V_s seviye haritası.

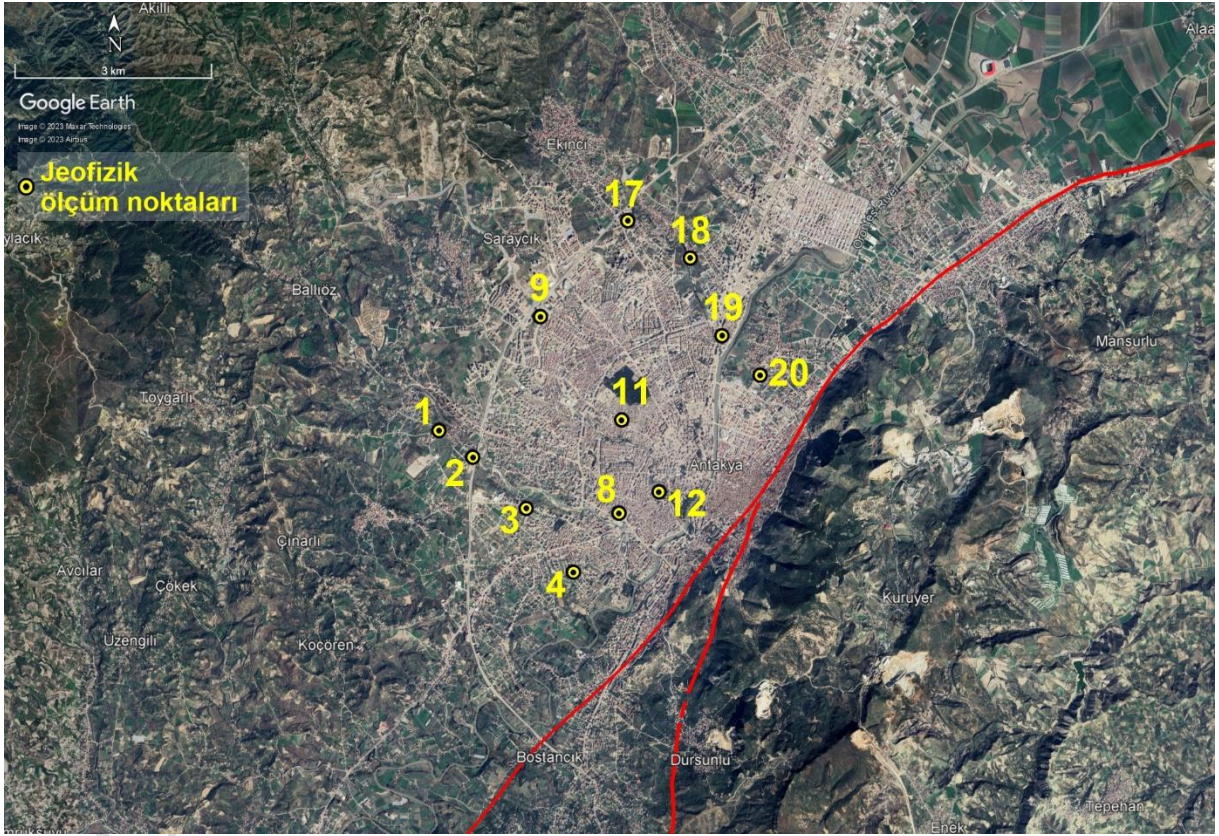
V_{s30} değerleri kullanılarak elde edilen zemin büyütmesi (Midorikawa, 1987) haritası Şekil 12’de verilmektedir. Bu haritada, çalışma alanının geneline göre kıyı kesimlerinde görece yüksek büyütme değerleri görülmektedir. Bu durum İskenderun için yorumlandığında kıyı kesimindeki zemin yapısının şehrin güneydoğu kesimine göre deprem etkisini büyüteceği anlamına gelmektedir. Bu nedenle, İskenderun kent merkezi ve haritanın güneybatı kesiminde kırmızı renkli kaparımlarla temsil edilen alanların yapılaşma öncesinde daha detaylı çalışılması gereklidir.



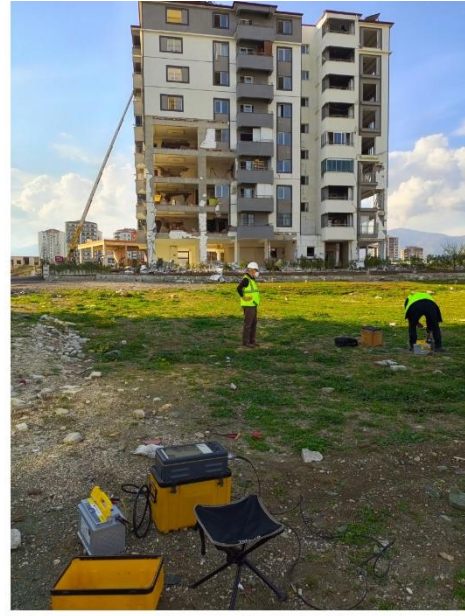
Şekil 12. İskenderun çalışma alanında V_{s30} değerleri kullanılarak elde edilen zemin büyütmesi.

2.2. Antakya İlçesi

Jeofizik çalışmalara Hatay'ın Antakya ilçesinde devam edilmiştir. 07.03.2023-08.03.2023 tarihleri arasında aynı jeofizik yöntemler (mikrotremor ve SPAC) Şekil 13'te gösterilen ölçüm konumlarında gerçekleştirilmiştir. Antakya kent merkezinin neredeyse tamamen yıkıma uğramış olan kesimini kapsayacak şekilde tasarlanan ölçüm karelajı, ilçe merkezindeki yoğun tahribata bağlı ulaşım imkânsızlıkları nedeniyle daha seyrek olarak yapılabildiği görülmüştür. Toplamda 12 noktada ölçümü gerçekleştirilmiştir. Jeofizik ölçümlere ve sahada karşılaşılan yıkıma ait görseller Şekil 14'te verilmektedir.



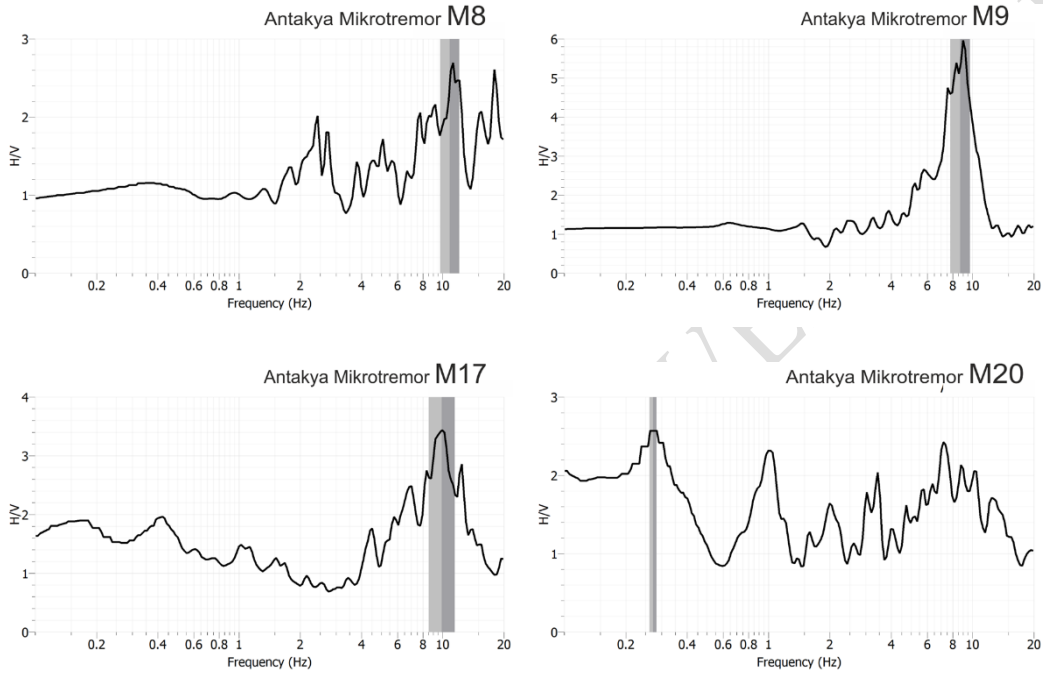
Şekil 13. Antakya'da gerçekleştirilen jeofizik ölçüm konumlarını gösteren Google Earth uydu görüntüsü (erişim tarihi Mart 2023). Kırmızı renkli çizgiler diri fayları göstermektedir (Emre vd., 2013).



Şekil 14. Antakya’da gerçekleştirilen jeofizik ölçümler sırasında gözlenen yıkıma ait görseller.

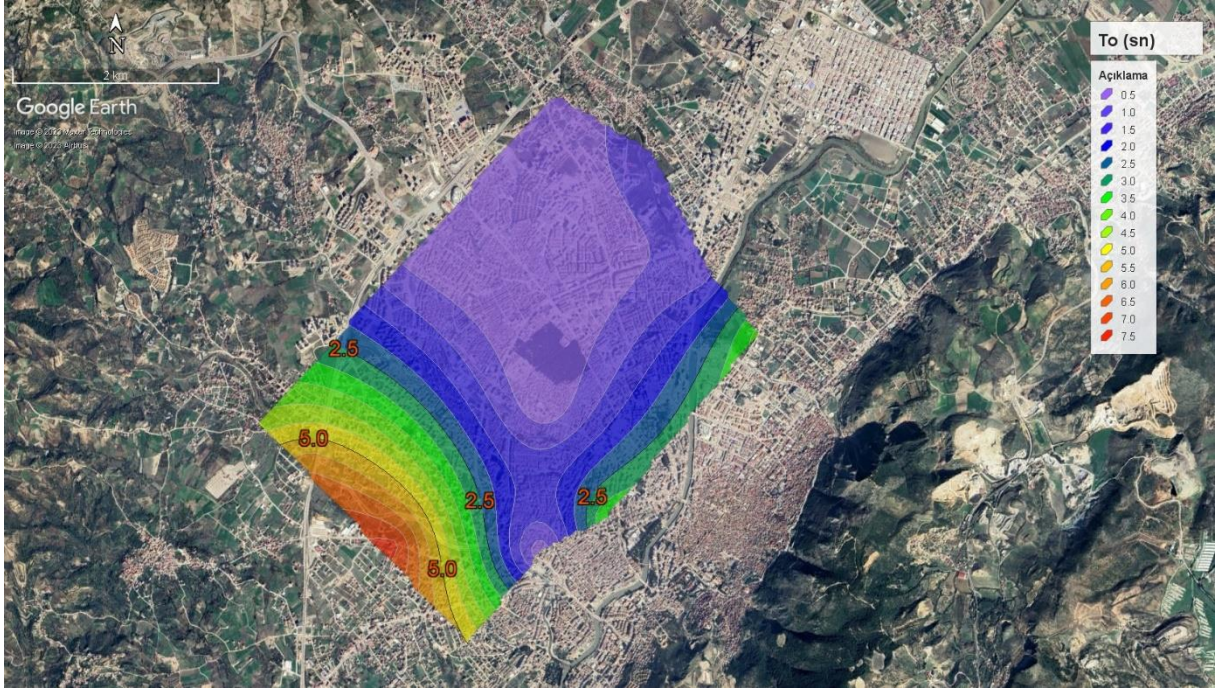
Çalışma alanında zemin hâkim titreşim periyodunun belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen mikrotremor yöntemine ait yatay/düşey spektral oran (H/V) grafikleri, 4 ayrı örnek ölçüm noktası (8, 9, 17 ve 20 nolu) için Şekil 15’te sunulmaktadır. Bunlardan 8 numaralı ölçüm noktası, Antakya ilçesi güneydoğusunda kalan ve çevresinde ağır hasarlı binaların olduğu bir alan içinde yer almaktadır. Bu noktadaki mikrotremor verisine uygulanan yatay/düşey spektral oran (H/V) yöntemi sonucuna göre zemin hâkim titreşim frekansı 11,24 Hz olarak belirlenmiştir. Bu değerden elde edilen zemin hâkim titreşim periyodu 0,09 sn’dir. Bu noktada elde edilen H/V grafiği incelendiğinde birden fazla değerde zemin titreşim frekansının pik yaptığı görülmektedir. Tüm bu değerler 3 Hz frekansından daha büyük değerler almaktadır. Çalışma alanının doğusunda ve görece yüksek kotlarda bulunan 9 numaralı noktada yapılan ölçümlerin değerlendirilmesiyle, belirgin pik yapan frekans değeri 9 Hz ve zemin hâkim titreşim periyodu değeri ise 0,11 sn olarak elde edilmiştir. Antakya’da çalışma alanının kuzeyinde yer alan 17 numaralı noktanın değerlendirilmesi sonucunda zemin hâkim titreşim frekansı 9,9 Hz

ve periyodu ise 0,1 sn olarak belirlenmiştir. Asi Nehri doğusunda yer alan 20 numaralı noktada da ölçümler alınmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda zemin hâkim titreşim frekansı 0,26 Hz ve periyot değeri ise 3,85 sn olarak tespit edilmiştir (Şekil 15).



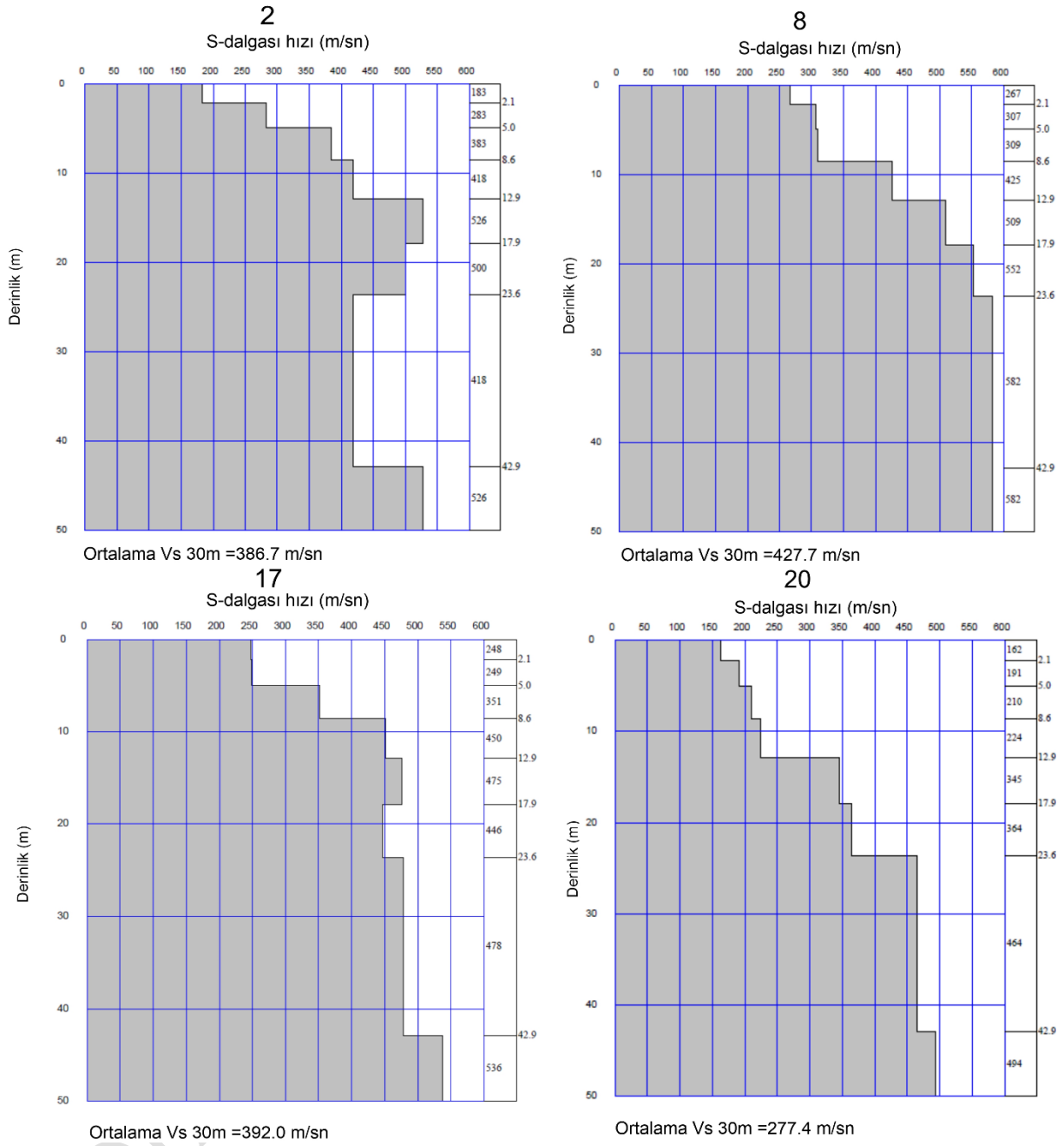
Şekil 15. Antakya çalışma alanında 8, 9, 17 ve 20 nolu konumlarda gerçekleştirilen mikrotremor ölçümleri sonuçlarına ait H/V spektral oran grafikleri.

Mikrotremor verilerinin değerlendirilmesiyle birlikte zemin özellikleri yansıtan parametrelerden zemin hâkim titreşim periyodu değerlerine de ulaşılmış olup, bu değerler dağılım haritası şeklinde oluşturulmuştur (Şekil 16).



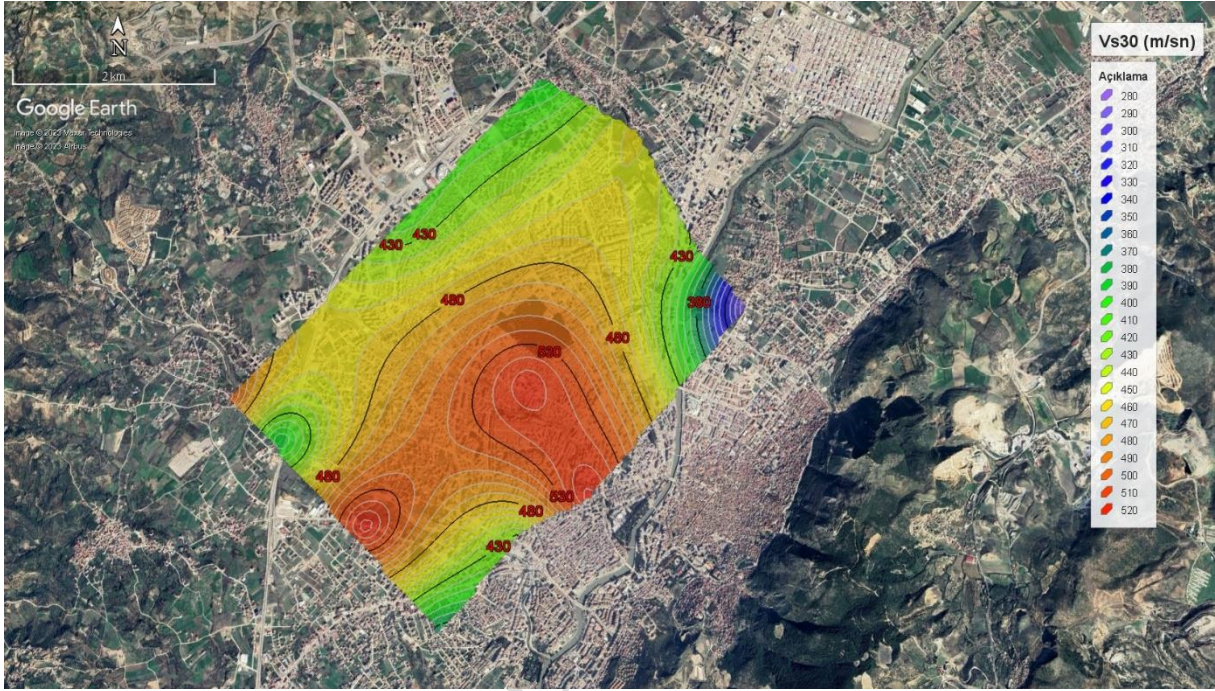
Şekil 16. Mikrotremor verilerinden elde edilen zemin hâkim titreşim periyodu parametresinin Antakya çalışma alanındaki dağılımı.

Antakya ilçesindeki çalışma alanında aynı noktalar üzerinde gerçekleştirilen SPAC ölçümleri sonucunda kesme dalgası hız (V_s) değerlerinin derinlikle değişimi belirlenmiştir. Şekil 17'de 2, 8, 17 ve 20 numaralı ölçüm konumlarına ait sonuçlar verilmektedir. V_{s30} değeri 20 numaralı ölçüm noktasında 277 m/sn, 17 numaralı ölçüm noktasında 392 m/sn, 8 numaralı ölçüm noktasında 427 m/sn ve 2 numaralı ölçüm noktasında 386 m/sn olarak elde edilmiştir (Şekil 17).



Şekil 17. Antakya çalışma alanında 2, 8, 17 ve 20 numaralı noktalarda yapılan SPAC ölçümlerine ait sonuçlar. Her bir grafik kesme dalgası hızının (V_s) derinlikle değişimini göstermektedir.

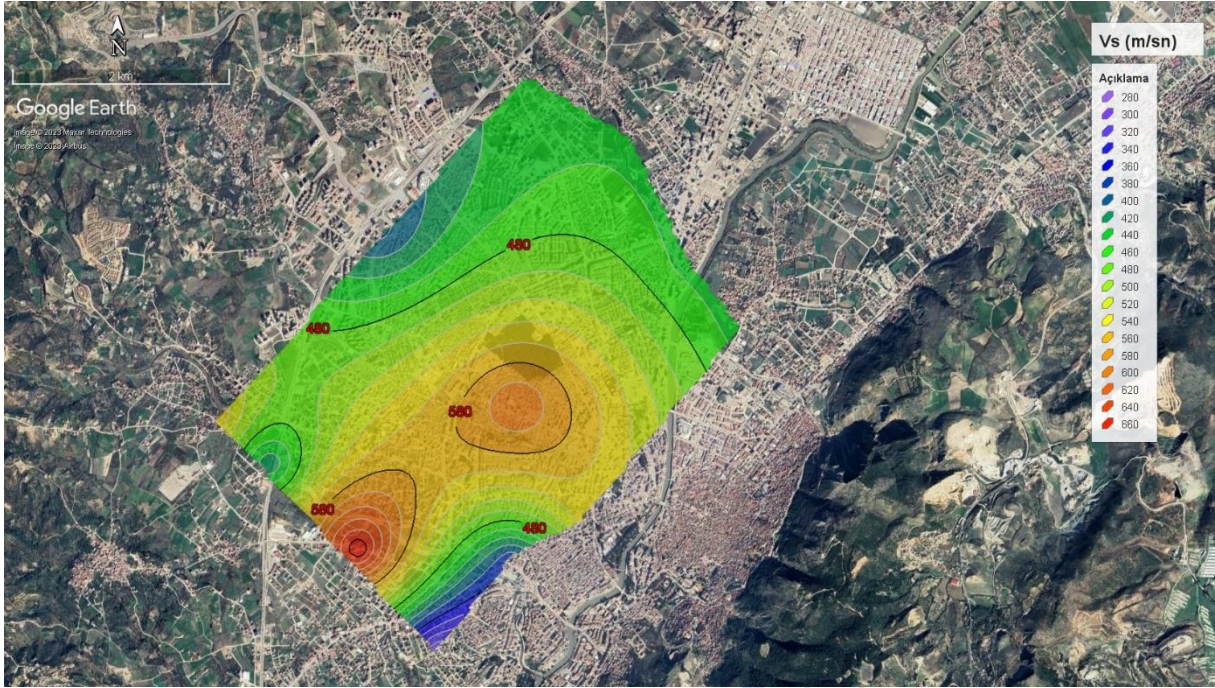
Elde edilen V_s hız değerleri kullanılarak Antakya çalışma alanına ait V_{s30} haritası hazırlanmıştır (Şekil 18). Haritada ölçüm yapılan alan genelinde 400 – 580 m/sn hız aralığında V_{s30} değerleri gözlenmektedir. Bu değerler genellikle Asi Nehri'nin batı kesiminde yer almaktadır. Nehrin doğu kesimindeki alanda ise 280 m/sn'lik hız değeri elde edilmiştir. Bu düşük değer ölçümün yapıldığı konumdaki Asi Nehri alüvyonlarıyla ilişkilidir.



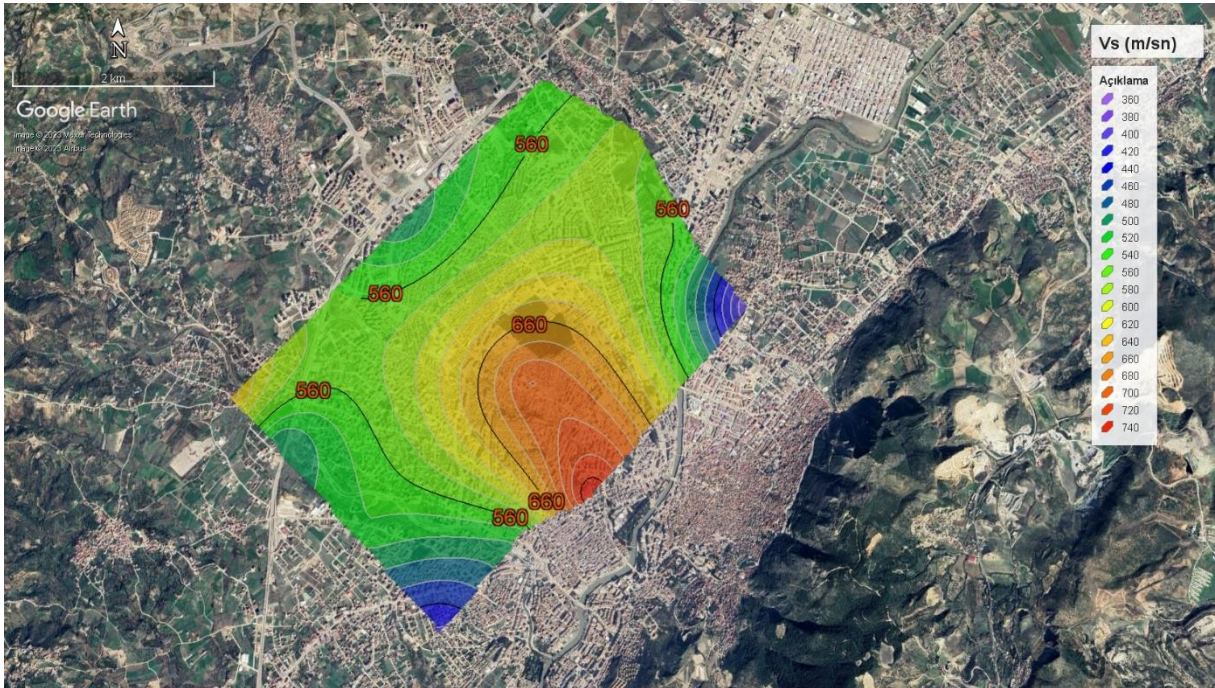
Şekil 18. Antakya çalışma alanına ait V_{s30} haritası.

Zeminin farklı derinliklerine ait V_s değerleri dağılım haritaları ise Şekil 19, 20 ve 21'de yer almaktadır. V_{s30} değerleri kullanılarak elde edilen zemin büyütmesi (Midorikawa, 1987) haritası Şekil 22'de verilmiştir.

İlk 10 metre derinlik için hazırlanan haritada alanın genelinde 420 m/sn – 680 m/sn hız aralığındaki değerler gözlenmektedir. Zayıf zemin yapısına işaret etmeyen bu değerlerin dışında güney kesimde düşük hız değeri yer almaktadır. Bu durumun, ölçü alınan bu noktadaki jeolojik yapının ayrılmış birimlerden oluşmasından kaynakladığı değerlendirilmektedir (Şekil 19). Şekil 20'de yer alan 20 metre için hazırlanan seviye haritasında ise alan 500 m/sn ile 740 m/sn arasında değişen hızlarla temsil edilmektedir. Haritanın doğu kesiminde yer alan 360 m/sn'lik düşük hız Asi Nehri'nin getirdiği çökellere karşılık gelirken alanın güneydeki bir diğer düşük hız değeri (460 m/sn) ise görece daha iyi bir zemin yapısına karşılık gelmektedir.

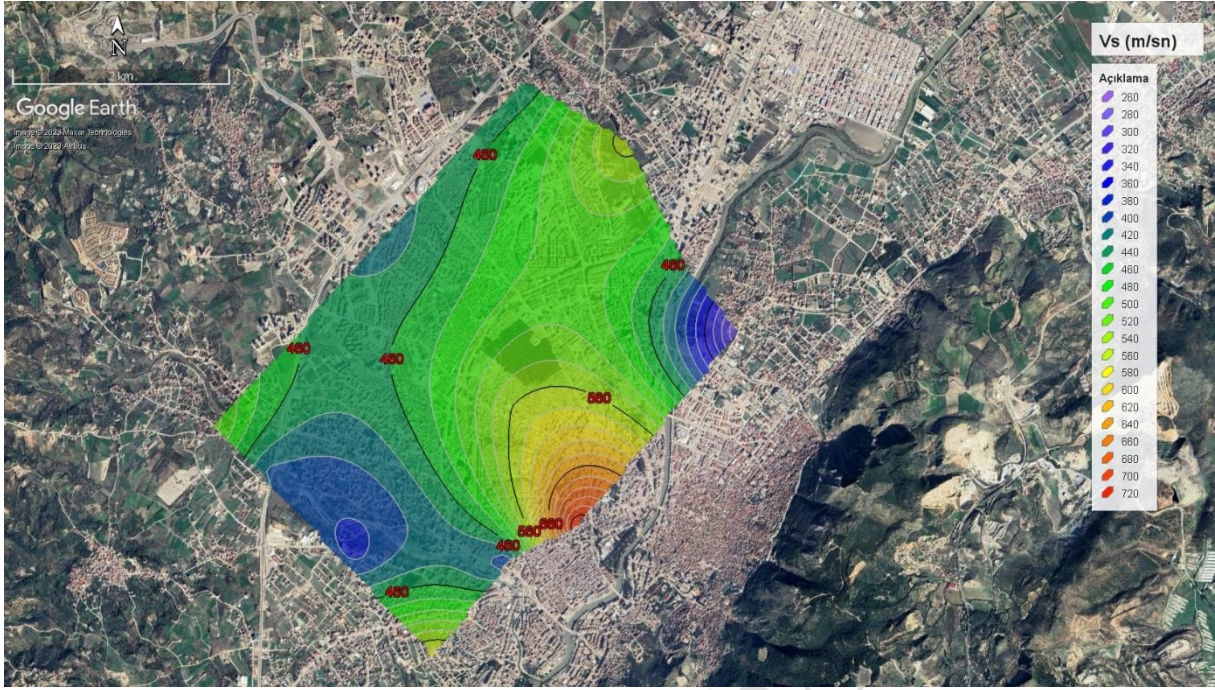


Şekil 19. Antakya çalışma alanında 10 metre derinlik için V_s seviye haritası.



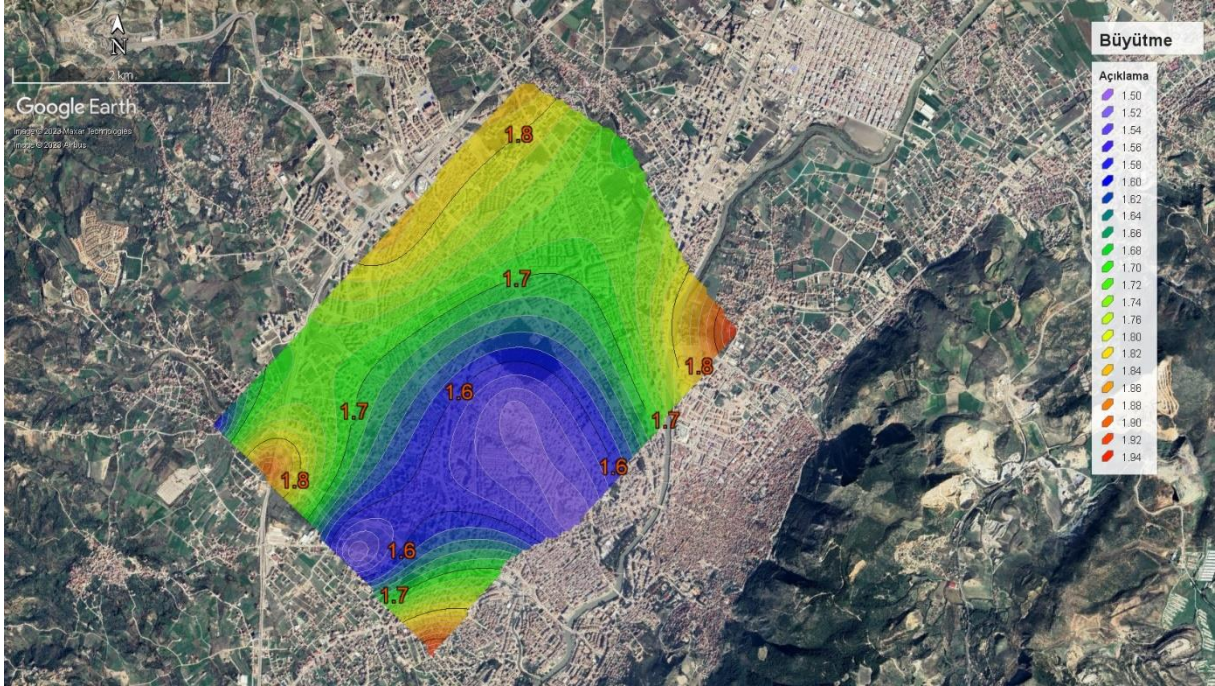
Şekil 20. Antakya çalışma alanında 20 metre derinlik için V_s seviye haritası.

Şekil 21’de 30 metre derinlik için hazırlanan harita yer almaktadır. Bu haritada 260 – 720 m/sn aralığındaki değişen hız değerleri gözlenmektedir. Düşük hız değeri yine Asi Nehri’nin getirdiği çökellerden kaynaklı olarak yorumlanırken, güneybatı kesimindeki nispeten yüksek hız 360 m/sn değerindedir (Şekil 21).



Şekil 21. Antakya çalışma alanında 30 metre derinlik için V_s seviye haritası.

V_{s30} değerleri kullanılarak hazırlanan büyütme haritası ((Midorikawa, 1987) 1,5 – 1,9 aralığındaki değerlerden oluşmaktadır. Ölçüm yapılan alan genelinde en büyük büyütme değeri yine Asî Nehri kıyısında yer alan ölçüm değerlerinden kaynaklanmaktadır (Şekil 22). Büyütme değerleri incelendiğinde, İskenderun'a kıyasla daha düşük büyütme değerleri gözlenmiştir.



Şekil 22. Antakya çalışma alanında V_{s30} değerleri kullanılarak elde edilen zemin büyütmesi.

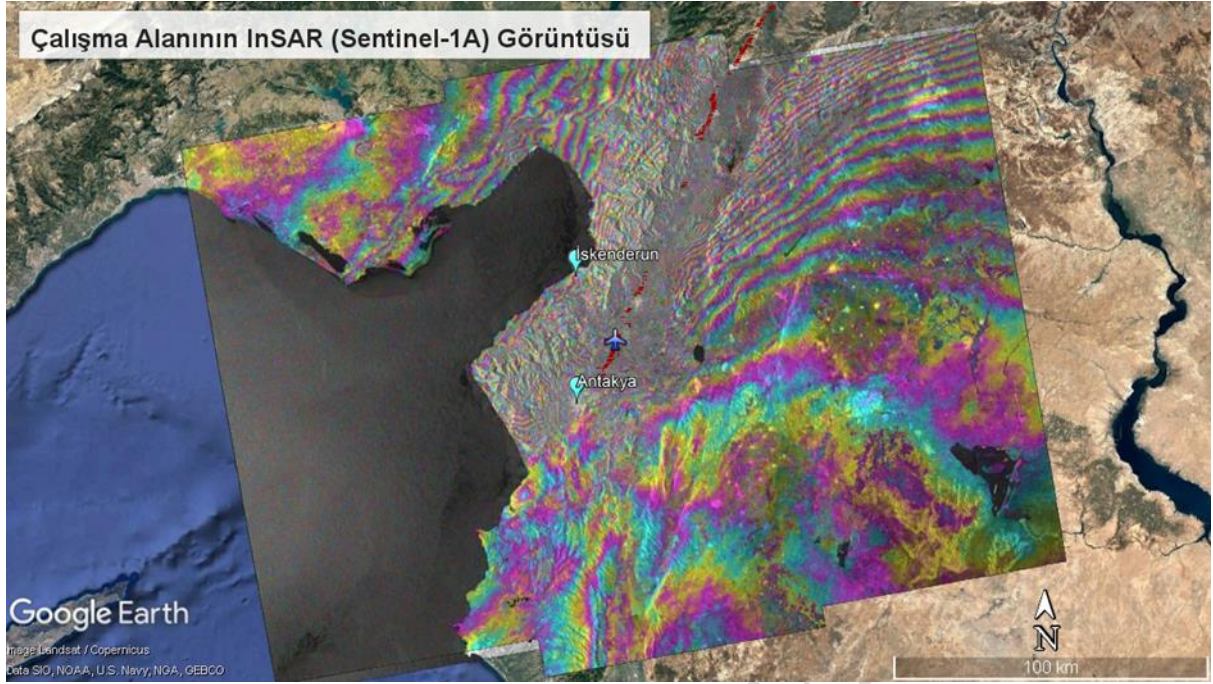
3. UZAKTAN ALGILAMA ÇALIŞMALARI

Hatay Havalimanı pistinde 6 Şubat 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) Depremi'nde faylanmaya bağlı olarak gelişen yüzey kırığı kaynaklı deformasyonlar oluşmuştur¹. Ayrıca havalimanı çevresinde zemin sıvılaşması rapor edilmiştir (Sümer vd., 2023). Harita Genel Müdürlüğü tarafından deprem sonrasında yayınlanan bölgeye ait yüksek çözünürlüklü ortofotolarda da (Şekil 23) bunlar gözlemlenebilmektedir. Şekil 24'te çalışma alanına ait Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) (ASF DAAC HyP3 2023) görüntüsü yer almaktadır. Bu görüntü için Kopernik Programı kapsamında Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından işletilen Sentinel-1A (C-Band) uydusu tarafından deprem öncesinde 04.01.2023 tarihinde ve deprem sonrasında 21.02.2023 tarihinde toplanan L-1 (Level-1) SAR SLC (Single Look Complex) verileri kullanılmıştır. Görüntü üzerindeki kırmızı renkli çizgiler bölgede deprem sonrasında oluşan ve Reitman vd. (2023) tarafından yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri kullanılarak haritalanan yüzey kırığı izlerini göstermektedir. Buna göre havalimanı ve çevresinde yoğun yüzey kırığı izleri gözlenmektedir.



Şekil 23. Hatay Havalimanı çevresindeki zemin sıvılaşması (a) ve yüzey kırığı izleri (b) (HGM Küre, Harita Genel Müdürlüğü). Sarı renkli elips sıvılaşma alanını ve beyaz renkli oklar ise yüzey kırığını göstermektedir.

¹ “Depremde hasar gören Hatay Havalimanı ne zaman açılacak? Çalışmalar ne durumda?” Erişim 21 Mart 2023. <https://www.ahaber.com.tr/ozel-haberler/2023/02/09/depremde-hasar-goren-hatay-havalimani-ne-zaman-acilacak-calismalar-ne-durumda>.

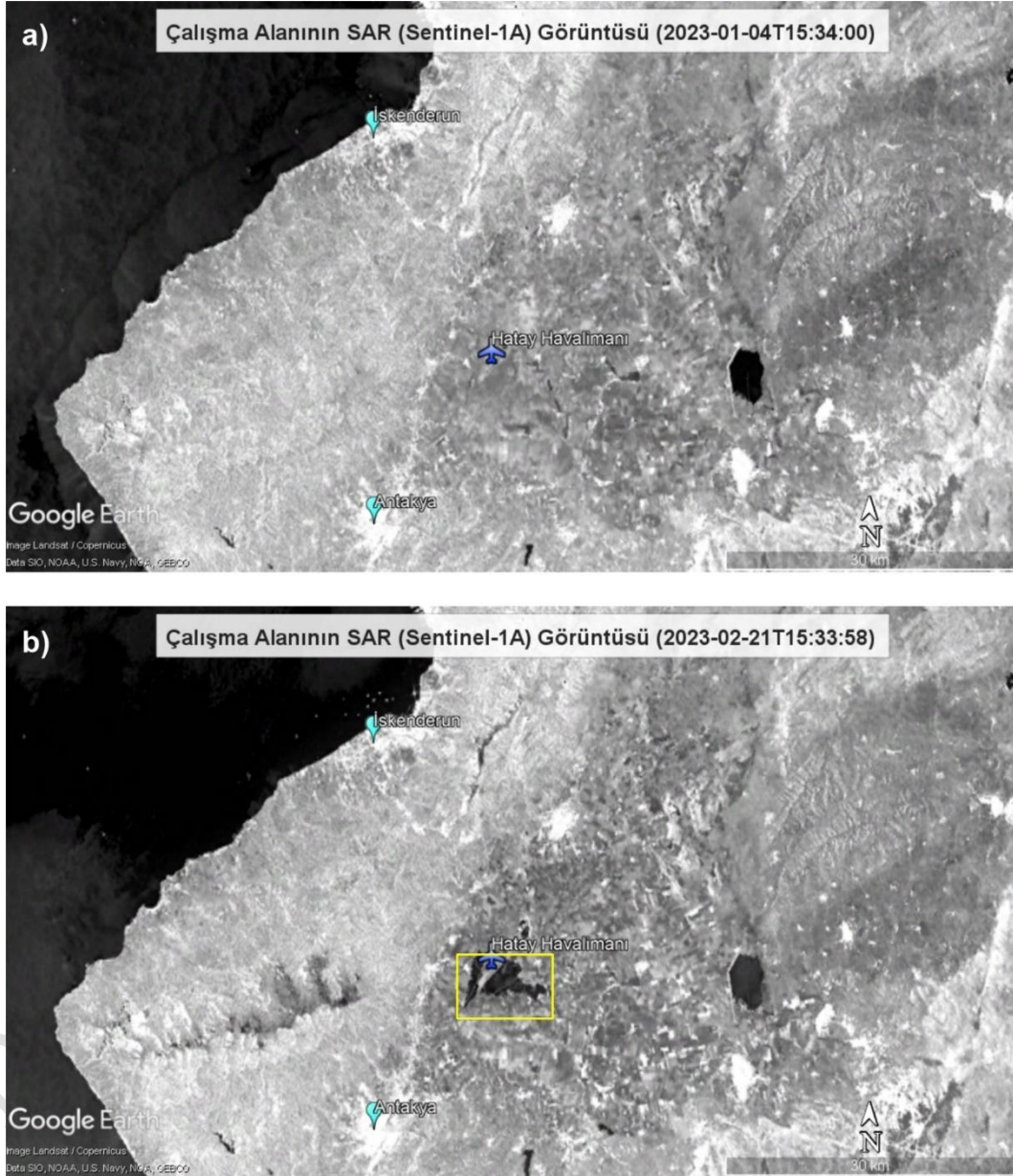


Şekil 24. Çalışma alanının InSAR görüntüsü (ASF DAAC HyP3 2023). Kırmızı renkli çizgiler yüzey kırığı izlerini (Reitman vd., 2023) göstermektedir.

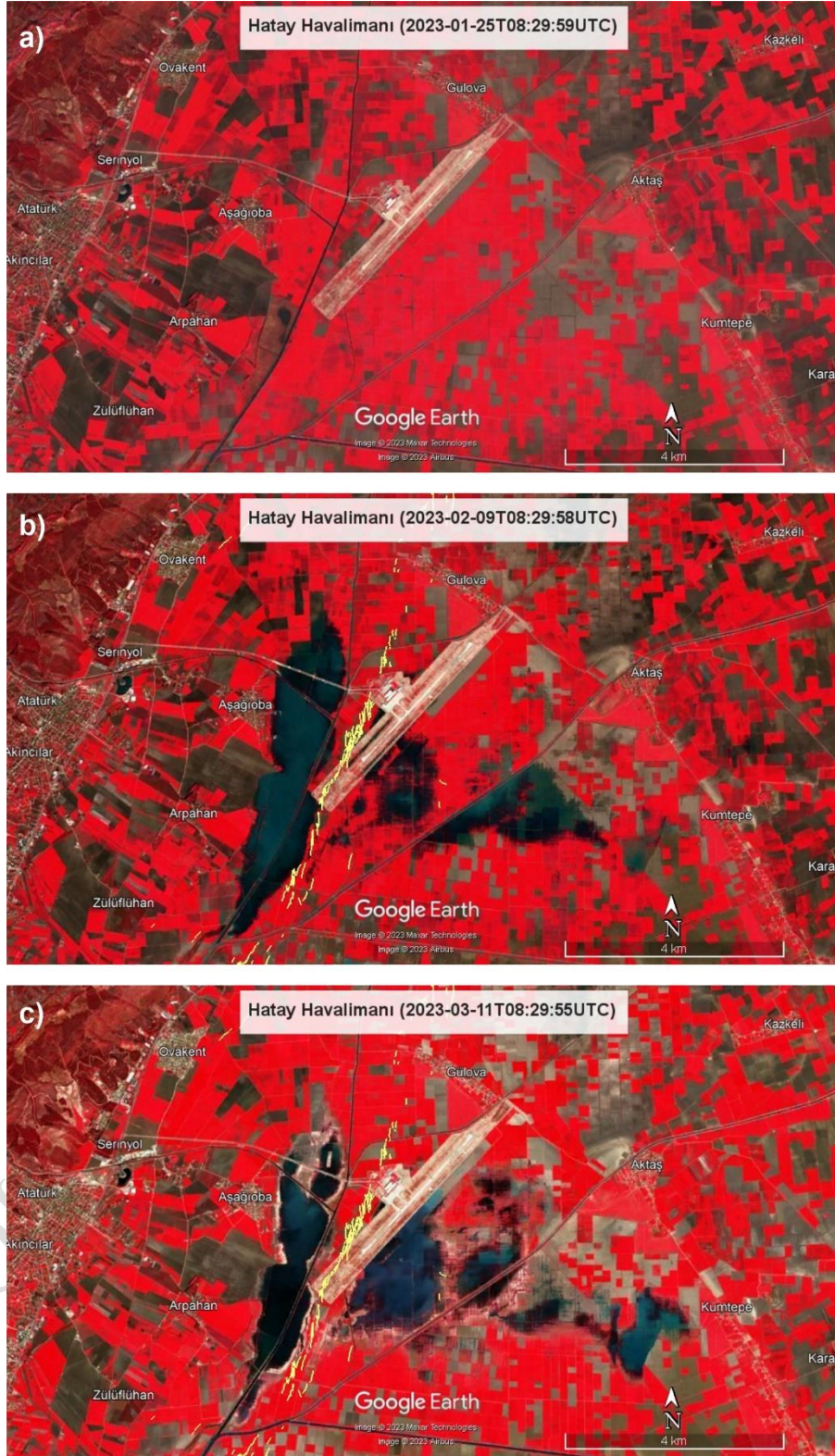
Sentinel-1A uydusu tarafından aynı tarihlerde (04.01.2023 ve 21.02.2023) toplanan L-1 SAR GRD (Ground Range Detected) verileri kullanılarak elde edilen ve piksel çözünürlüğü 30 metre olan RTC (Radiometric Terrain Correction) görüntüleri (ASF DAAC HyP3 2023) Şekil 25'te verilmektedir. Bu görüntülerde parlak alanlar yüksek miktarda radar enerjisinin geriye saçıldığı yerleşim yerlerini (Antakya, İskenderun vb.) göstermektedir. Su kütleleri gibi radar enerjisinin geriye saçılmadığı yansıyor uzaklaştığı alanlar ise koyu renkle temsil edilmektedir. 21.02.2023 tarihli görüntüde havaalanı çevresinde yaygın koyu renkli bölgeler gözlenmektedir. Deprem sonrası döneme ait olan bu görüntü havaalanının bulunduğu bölgede, sıvılaşmaya bağlı kum ve su çıkışlarının ortofotolarında (Şekil 23) gözlemlendiğinden daha geniş bir alanda etkili olduğunu göstermektedir.

Şekil 26'da Sentinel-2 uydusunun (Kopernik Programı/ESA) taşıdığı MultiSpectral Instrument (MSI) optik sensörü tarafından elde edilen Hatay Havalimanı ve civarının 25.01.2023, 09.02.2023 ve 11.03.2023 tarihlerindeki L-2A (Level-2A) seviyesinde işlenmiş görüntülerinin FCI (False Color Image) gösterimleri yer almaktadır (Sentinel Hub EO Browser). FCI görüntülemeleri RGB kanallarında sırasıyla 8 (near infrared / yakın kızılötesi), 4 (kırmızı), 3 (yeşil) bantlarının kullanılmasıyla oluşturulur. Görsellerdeki kırmızı tonlu renkler bitki örtüsüyle kaplı alanları, kahverengi/gri renkler ise bitki örtüsü olmayan alanları gösterirken

yüksek miktarda su içeren alanlar ise mavi/siyah renklerle temsil edilmektedir. Bu görseller deprem sonrasında havaalanı civarında oluşan sıvılaşmanın yayılımını ve zamana bağlı değişimini (09.02.2023 – 11.03.2023) net bir şekilde ortaya koymaktadır (Şekil 26). Ayrıca havaalanı pistindeki deformasyonların yüzey kırığı verileriyle de ilişkili ve uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 25. Çalışma alanının SAR RTC görüntüleri (ASF DAAC HyP3 2023) (a) Deprem öncesi 04.01.2023 tarihli (b) Deprem sonrası 21.02.2023 tarihli görüntü. Sarı renkli dikdörtgen sıvılaşma alanını göstermektedir.



Şekil 26. Hatay Havalimanı ve çevresinin Sentinel-2 verisi kullanılarak oluşturulmuş FCI görüntüleri (Sentinel Hub EO Browser) (a) 25.01.2023 (b) 09.02.2023 (c) 11.03.2023 tarihli görüntüler. Sarı renkli çizgiler yüzey kırığı izlerini (Reitman vd., 2023) göstermektedir.

Bu bölüme ait kaynakça ve ek bilgiler aşağıda verilmiştir.

Yüksek Çözünürlüklü Ortofotolar: HGM Küre, Harita Genel Müdürlüğü (www.harita.gov.tr)

ASF (Alaska Satellite Facility) (<https://asf.alaska.edu>)

ASF DAAC (The ASF Distributed Active Archive Center) (<https://asf.alaska.edu/asfsardaac>)

Avrupa Uzay Ajansı (European Space Agency) (<https://www.esa.int/>)

Kopernik Programı (<https://www.copernicus.eu/en>) (Copernicus Programme of the European Union)

Sentinel-1 Uydusu (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1>)

Sentinel-2 Uydusu (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>)

Sentinel Hub EO Browser (<https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>)

Yüzey Kırığı Verisi (17.02.2023 tarihli güncelleme):

Reitman, Nadine G, Richard W. Briggs, William D. Barnhart, Jessica A. Thompson Jobe, Christopher B. DuRoss, Alexandra E. Hatem, Ryan D. Gold, and John D. Mejsstrik (2023) Preliminary fault rupture mapping of the 2023 M7.8 and M7.5 Türkiye Earthquakes. DOI: <https://doi.org/10.5066/P985I7U2>

SAR: InSAR ve SAR-RTC görüntüleri ASF'nin bulut temelli hesaplama alt yapısı (Vertex) kullanılarak oluşturulmuştur.

ASF DAAC HyP3 2023 using the hyp3_gamma plugin version 6.0.1 running GAMMA release 20220630. Contains modified Copernicus Sentinel data 2023, processed by ESA.

Hogenson, K., Kristenson, H., Kennedy, J., Johnston, A., Rine, J., Logan, T., Zhu, J., Williams, F., Herrmann, J., Smale, J., & Meyer, F. (2020). Hybrid Pluggable Processing Pipeline (HyP3): A cloud-native infrastructure for generic processing of SAR data [Computer software]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4646138>

InSAR Verileri: INSAR-GAMMA

Referans Görüntü	S1A_IW_SLC__1SDV_20230104T153359_20230104T153427_046636_0596ED_082F
Başlangıç Zamanı	01/04/23, 15:33:59Z
Bitiş Zamanı	01/04/23, 15:34:27Z
Beam Modu	IW
Path	14
Frame	114
Uçuş Doğrultusu	ASCENDING
Polarizasyon	VV+VH
Absolute Orbit	46636

İkincil Görüntü	S1A_IW_SLC__1SDV_20230221T153357_20230221T153425_047336_05AE7F_B11B
Başlangıç Zamanı	02/21/23, 15:33:57Z
Bitiş Zamanı	02/21/23, 15:34:25Z
Beam Modu	IW
Path	14
Frame	114
Uçuş Doğrultusu	ASCENDING
Polarizasyon	VV+VH
Absolute Orbit	47336

SAR RTC Verileri: RTC-GAMMA

Görüntü	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230104T153400_20230104T153425_046636_0596ED_4238
Başlangıç Zamanı	01/04/23, 15:34:00Z
Bitiş Zamanı	01/04/23, 15:34:25Z
Beam Modu	IW
Path	14
Frame	114
Uçuş Doğrultusu	ASCENDING
Polarizasyon	VV+VH
Absolute Orbit	46636

Görüntü	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230221T153358_20230221T153423_047336_05AE7F_8E78
Başlangıç Zamanı	02/21/23, 15:33:58Z
Bitiş Zamanı	02/21/23, 15:34:23Z
Beam Modu	IW
Path	14
Frame	114
Uçuş Doğrultusu	ASCENDING
Polarizasyon	VV+VH
Absolute Orbit	47336

4. SONUÇLAR

06 Şubat 2023 Pazarcık ve Elbistan (Kahramanmaraş) ile 20 Şubat 2023 Yayladağı (Hatay) depremleri sebebiyle İskenderun ve Antakya’da oluşan hasarın zemin özellikleriyle ilişkisini incelemek amacıyla Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Uygulamalı Jeofizik Anabilim Dalı öğretim elemanlarından oluşan bir araştırma ekibi tarafından 01.03.2023 – 10.03.2023 tarihleri arasında yapılan jeofizik saha çalışmaları ve Hatay Havalimanı odaklı olarak gerçekleştirilen uzaktan algılama çalışmaları kapsamında aşağıdaki bulgu ve sonuçlara ulaşılmıştır. Buna göre:

- Mikrotremor ve SPAC çalışmalarından elde edilen bulgular değerlendirildiğinde İskenderun kent merkezi ve kıyı kesiminin zemin hâkim titreşim periyodu değerlerinin yüksek olduğu ve zayıf zemin niteliğinde olduğu belirlenmiş ve çalışma alanında elde edilen düşük V_{s30} (30 m derinliğe kadar ortalama kesme dalgası hızı) değerlerinin de bunu desteklediği gözlenmiştir.
- İskenderun kıyı kesiminden bir kilometre içeriye kadar yüksek zemin hâkim titreşim periyotları gözlemlenmektedir. Bu sonuçlar, sahada karşılaşılan sıvılaşmaya bağlı zemin deformasyonlarıyla örtüşmektedir. İskenderun’daki hasarın başlıca sebepleri zayıf zemin koşulları, sıvılaşma, yüksek katlı binalar ve yapı kalitesindeki sorunlar olarak sıralanabilir.
- Antakya’da zemin koşullarının İskenderun’a kıyasla görece daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum saha çalışmalarından elde edilen ve İskenderun’a göre görece daha yüksek V_{s30} değerleriyle de desteklenmektedir. Ancak, Antakya’da daha fazla yıkım ve can kaybı meydana gelmiştir. Bunun temel sebepleri, Antakya’nın depremin gerçekleştiği fay hattına yakın bir konumda bulunması ve deprem sırasında yer hareketi ivmesinin yüksek değerlere (AFAD, 2023b) ulaşmış olmasıdır. Ayrıca bölgede yapı kalitesinin yetersizliğinin de hasarda etkili olduğu değerlendirilmektedir.
- Hatay Havalimanı çevresinde zemin sıvılaşması oluşmuş ve yüzey kırıklarına bağlı deformasyon meydana gelmiştir. Sıvılaşma uzaktan algılama yöntemleriyle izlenmiş ve zamana bağlı değişimi belirlenmiştir. Havalimanının konumlandığı bölgede zemin sıvılaşmasının yaygın bir sorun olduğu görülmektedir.

5. ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında ulaşılan sonuçlardan hareketle, aşağıda maddeler halinde sunulan öneriler yapılmaktadır. Buna göre,

- Yeniden yapılaşma planlanırken, sıvılaşma riski yerinde jeofizik ölçümlerle tespit edilmeli ve sıvılaşmaya karşı tedbirler alınarak projeler yapılandırılmalıdır.
- Zemin hâkim titreşim periyotları mutlaka parsel bazında belirlenmeli; yapı tasarımı ve kat sayıları belirlenirken rezonans etkisi göz önünde bulundurulmalıdır.
- Bölgede yüksek katlı yapıların depremde yıkılmasa bile ağır hasarlar aldığı gözlemlenmiştir, özellikle gevşek ve zayıf zemin özelliği gösteren alüvyal bölgelerde yüksek katlı yapılaşmadan kaçınılmalıdır.
- Zemin özellikleri yapılaşma için seçilen alanlarda ani değişimler gösterebilir. Bu sebeple yapılaşma öncesi tüm alan jeofizik yöntemlerle incelendikten sonra yapılar projelendirilmelidir.
- Zeminin fiziksel ve geometrik özellikleri modellendikten sonra gerekliyse zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulmalıdır.
- Havaalanı, hastane ve yerleşke gibi kritik tesislerin yer seçimi ve inşasından önce yapılması gereken mikrobölgeleme çalışmalarında, ayrıntılı jeofizik etütlerin uygulanması ve Jeofizik Mühendislerince denetlenmesi gerekmektedir.
- İskenderun benzeri zemin koşullarına sahip olan yerleşim yerlerinde uygulanacak jeofizik etütler, yapıların inşa edileceği alanların zemin koşullarına ait parametrelerin iki ve üç boyutlu şekilde belirlenmesine imkân verecek şekilde projelendirilmelidir.
- Günümüzde yerel yönetimler yapıların sağlamlığı ile ilgili incelemelerini beton kalitesi ölçümü, karot alma ve yapı jeofiziği çalışmaları ile gerçekleştirmektedirler. Ancak yapıların zemin ile ilişkisinin ortaya konulması açısından da zemine yönelik jeofizik çalışmaların da eş zamanlı yapılması gereklidir.
- Zemin koşulları ve yapı stoğu bakımından İzmir ile benzerlikler gösteren İskenderun ve Antakya'da deprem sırasında ve sonrasında yaşananların başta İzmir olmak üzere tüm yerel yönetimler tarafından yakından izlenmesi önerilir.

Kamuoyuna saygıyla duyurulur.

KAYNAKLAR

AFAD, 2023a. 06 Şubat 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) Mw 7.7 ve Elbistan (Kahramanmaraş) Mw 7.6 Depremlerine İlişkin Ön Değerlendirme Raporu.

AFAD, 2023b. 20 Şubat 2023 Yayladağı (Hatay) Mw 6.4 Depremine İlişkin Ön Değerlendirme Raporu.

Demirbilek, S. (2018). *İskenderun-Arsuz Arasındaki Kıyı Ovalarında Bozuk Drenaj Sahalarının Tespiti ve Çözüm Önerileri*. Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Coğrafya Anabilim Dalı. Yüksek Lisans Tezi (Yayımlanmamış). Hatay.

Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. ve Şaroğlu, F., 2013. Türkiye Diri Fay Haritası. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30. Ankara-Türkiye.

Erhan, Z., 2018. Sismik kırılma ve çok kanallı yüzey dalgaları uygulaması ve değerlendirilmesi. TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Meslek İçi Eğitim ve Belgelendirme Kursları, Kurs Notları, 52 s.

Google Earth Pro 7.3.6.9345 (64-bit) Build Date: Thursday, December 29, 2022 10:50:09 PM UTC

Geopsy, SESAME.

Midorikawa, S., 1987. Prediction of isoseismal map in Kanto Plain due to hypothetical earthquake. *Journal of Structural Dynamics*, 33, 43-48.

SeisImager/SW, Geometrics.

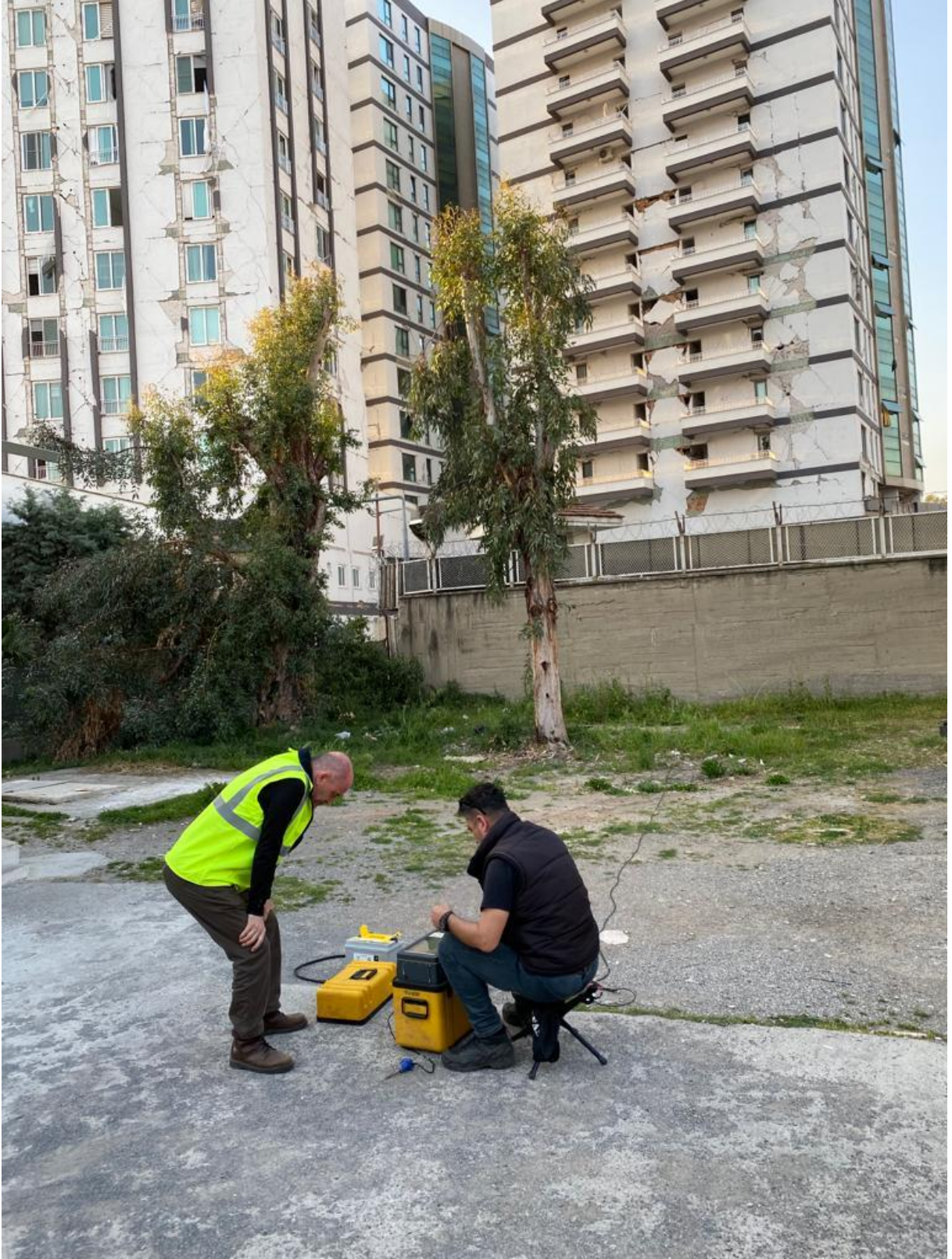
Surfer, Golden Software.

Sümer, Ö., Drahor, M.G., Ongar, A., Eski, S., Tepe, Ç. ve Duman, A., 2023. 06 Şubat 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş), Elbistan (Kahramanmaraş) ve 20 Şubat 2023 Defne (Hatay) Depremleri Saha Çalışmaları Yerbilimsel Ön Raporu 1. Dokuz Eylül Üniversitesi. Mart 2023, İzmir.

EK – Saha Çalışmalarına ait Görseller



İskenderun'da gözlenen yıkıma ait görseller



İskenderun 18 nolu nokta



İskenderun'da yüksek katlı yapıda gözlenen deformasyonlar



İskenderun 26 nolu nokta



İskenderun saha çalışmasından drone görüntüsü



Antakya saha çalışmasından drone görüntüsü



Antakya 8 Nolu nokta



Antakya 20 Nolu nokta



Antakya'da gözlenen yüzey deformasyonları



Antakya'da gözlenen yüzey deformasyonları



İskenderun Kriz Merkezinde yapılan bilgilendirme toplantısı



Saha çalışma ekibi