

## Kayma Dalgası Hızı (Vs) Kullanılarak Erciş (Van) Yerleşim Alanının Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi

İsmail AKKAYA<sup>\*1</sup>, Ali ÖZVAN<sup>2</sup>, Mutluhan AKIN<sup>3</sup>, Müge AKIN<sup>4</sup>, Uğur ÖVÜN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Van

<sup>2</sup>Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Van

<sup>3</sup>Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Nevşehir

<sup>4</sup>Abdullah Gül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri

Geliş tarihi: 14.04.2017

Kabul tarihi: 25.09.2017

### Öz

Van İli, Erciş İlçesi yerleşim alanı ve çevresi Kuvaterner yaşlı güncel çökeller üzerinde yeralan, yeraltısuyu seviyesi sığ, çevresinde tarihsel ve aletsel dönemde büyük deprem üretmiş aktif fayların yer aldığı, 23 Ekim 2011 Van (Mw=7,1) depremi sonrasında belli kesimlerinde sıvılaşma olayının gerçekleştiği önemli bir yerleşim yeridir. Tüm bu veriler, Erciş ve yakın çevresi için olası büyük bir depremde sıvılaşma ve yanal yayılma türü yüzey deformasyonlarının meydana gelebileceğini işaret etmektedir. Bu nedenle çalışmada, Kayma dalga hızları (Vs) kullanılarak Erciş yerleşim alanı ve çevresinin üç farklı deprem senaryosu için sıvılaşma analizleri yapılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, Erciş merkezinin yoğun olarak üzerinde bulunduğu eski göl çökellerinin sıvılaşma potansiyelinin “düşük-orta” olduğu belirlenmiştir. İnceleme alanının Van Gölü’ne yakın kıyı kesimleri ile inceleme alanının batısında sıvılaşma potansiyelinin diğer kesimlere göre daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca, Erciş yerleşim alanında 23 Ekim 2011 Van depremi sonrasında arazide gözlenen yanal yayılmalar ve sıvılaşmaların bu çalışmada ön görülen senaryolardaki sınırlarla örtüştüğü belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Erciş, Deprem, Sıvılaşma, Kayma dalga hızı (Vs)

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): İsmail AKKAYA, [iakkaya@yyu.edu.tr](mailto:iakkaya@yyu.edu.tr)

## **Evaluation of Liquefaction Potential of Erciş (Van) Settlement by using Shear Wave Velocity (Vs)**

### **Abstract**

The Erciş district of Van province and its vicinity settles on Quaternary alluvial deposits with shallow groundwater level and is surrounded by a number of active faults caused destructive earthquakes both at historical and instrumental period as well as liquefaction was also observed at certain locations of the settlement after the 23 October 2011 Van (Mw=7.1) earthquake. Eventually, all these data point out that a possible destructing earthquake around Erciş district may be followed by liquefaction and lateral spreading type ground deformations. Therefore, liquefaction analyses were executed for the Erciş settlement area considering three different earthquake scenarios using Vs wave velocities. Liquefaction analyses indicate that the liquefaction potential of old lacustrine deposits where the Erciş settlement is densely populated on is found to be “low-moderate”. On the other hand, the liquefaction potential of the coastal region of the Lake Van as well as the western side of settlement is higher than the rest. Furthermore, the liquefaction and lateral spreading locations around Erciş settlement observed after the 23 October 2011 Van earthquake strongly coincide with the boundaries defined by the scenarios in this study.

**Keywords:** Erciş, Earthquake, Liquefaction, Shear wave velocity (Vs)

### **1. GİRİŞ**

Depremler sırasında meydana gelen can ve mal kayıplarında yapı kalitesinin yanı sıra, zemin özelliklerine bağlı olarak gelişen yüzey deformasyonlarının (sıvılaşma, yanal yayılma vb.) da önemli bir rolü bulunmaktadır. Sıvılaşma, gevşek kumlu, siltli zeminlerin ve sık yeraltı suyunun bulunduğu alanlarda deprem sonucunda meydana gelmektedir. Sıvılaşma sırasında deprem dalgalarına bağlı olarak zemini oluşturan taneler arasındaki boşluk suyu basıncı artmaktadır. Boşluk suyu basıncının toplam gerilmeye eşit olduğu anda taneler arasındaki sürtünme kuvveti, diğer bir ifadeyle efektif gerilme sıfıra ulaşmaktadır. Böylece temel zeminde taşıma gücü ve ani oturma sorunları meydana gelmekte ve yapılarda devrilme gibi önemli yapısal sorunlar olabilmektedir. Büyüklüğü 5'ten fazla olan depremler sonucu sıvılaşma meydana gelebilmektedir. Sıvılaşmaya bağlı hasarların önlenmesi için dinamik yükler altındaki zeminlerin sıvılaşma potansiyellerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Sıvılaşma olgusu, özellikle 1964 yılında Nigata (Japonya) ve yine 1964 yılındaki Alaska (ABD)

depremlerinin ardından bilim insanlarının ilgisini çekmeye başlamış ve bu konudaki çalışmalarla ağırlık verilmiştir. Literatürde sıvılaşma ile ilgili gerek laboratuvar analizleri gerekse saha testleri olan standart penetrasyon testi (SPT), konik penetrasyon testi (CPT) ve kayma dalga hızı (Vs) verileri kullanılarak yapılan pek çok araştırma mevcuttur [1-21]. Bununla birlikte sıvılaşma potansiyeli araştırmalarında ilk olarak Seed ve Idriss [1] tarafından ifade edilen SPT-N ve Vs dalga hızı arasında geliştirilen deneysel bağıntılar yardımıyla da analizler yapılabilmektedir [22-24].

Birçok parametreye bağlı olmakla birlikte Vs, zeminin boşluk oranına, gerilme durumuna, efektif basıncına ve bağıl sıklığına bağlı olarak değişen önemli bir fiziksel parametredir. Ayrıca Vs, depremin yer tepkisi ve yapı-zemin ilişkisi için gerekli olan kayma modülü ile doğrudan ilişkilidir. Vs dalga hızı hem sahada hemde laboratuvarında numuneler üzerinde belirlenebilmesinden dolayı karşılaştırma imkanı olan kolay ve hızlı bir yöntemdir. Özellikle SPT ve CPT ölçümleri yapılamayan ortamlarda da kolaylıkla elde edilebilen Vs verilerine dayalı sıvılaşma analizleri de son yıllarda sıklıkla kullanılmaktadır [25,28,9,10,16-19].

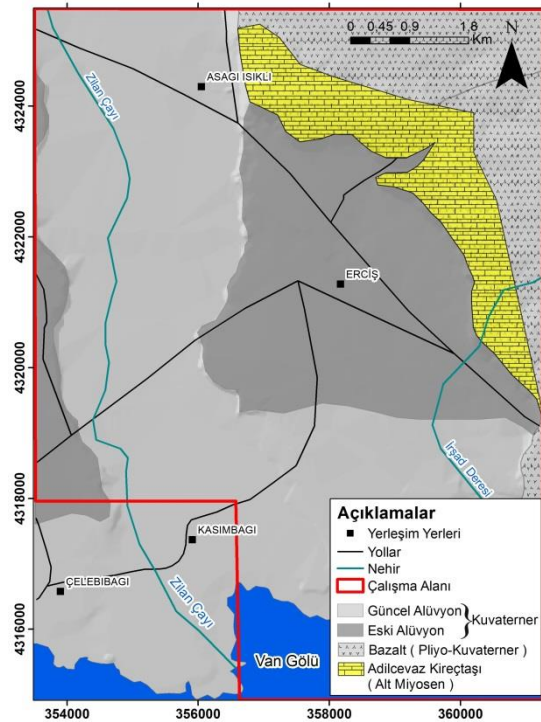


Çalışma alanında yaşlıdan gence doğru Alt Miyosen yaşlı kireçtaşları, Pliyosen-Pleyistosen yaşlı volkanikler ile Kuvaterner-Holosen yaşlı alüvyonlar ve eski göl çökelleri bulunmaktadır (Şekil 2). Erciş yerleşim alanı ve çevresinin büyük bir kesimi Holosen yaşlı farklı tane boyutlarında, gevşek, düşük dayanımlı göl ve akarsu çökellerinden oluşmaktadır. Akarsu ve delta çökelleri ise çoğunlukla ince-iri çakıl ve iri kum boyutundaki kırıntılılardan oluşmaktadır [32]. Yerleşim alanındaki birimlerin büyük bir çoğunluğunu temsil eden gölsel çökeller Van Gölü seviye değişimlerine bağlı olarak oluşmuştur [39]. Göl çökelleri daha çok ince kum silt boyutundaki malzemeden oluşmakla birlikte, yer yer kısmen derin seviyeleri temsil eden killi tabakalar da içermektedir.

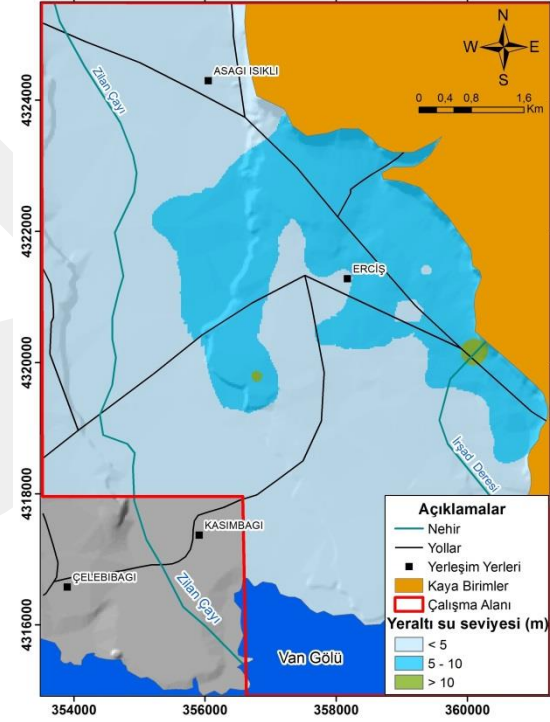
5 m'den daha sığ seviyelerdedir [33,40,41] (Şekil 3).

### 3. BÖLGENİN TEKTONİK YAPISI VE DEPREMSELLİĞİ

Çarpışma tektoniği sonucu Doğu Anadolu'da kuzey-güney yönlü sıkışmaya bağlı güncel rejim ile birlikte, doğu-batı doğrultulu ters faylar, bindirmeler ve kıvrımlar, kuzeybatı-güneydoğu doğrultulu sağ yönlü ve kuzeydoğu-güneybatı doğrultulu sol yönlü doğrultulu atımlı faylar ile kuzey-güney doğrultulu normal fay ve açılma çatlakları gelişmiştir [42-46]. Bölgede halen devam eden sismik aktivite tüm bu yapıların etkinliğini ve aktifliğini desteklemektedir.



Şekil 2. Erciş yerleşim alanı ve civarının jeolojisi (MTA [35]'dan değiştirilerek alınmıştır)

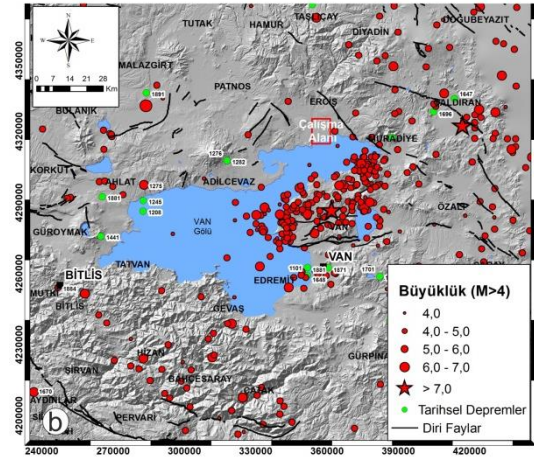
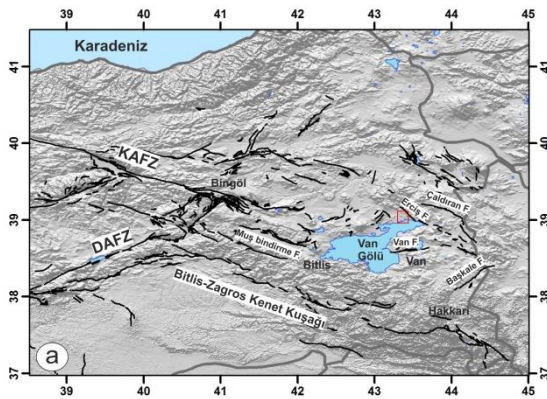


Şekil 3. Çalışma alanının yeraltı su seviyesi haritası

İnceleme alanındaki yeraltı su seviyesi eski göl çökellerinde genel olarak 5 m'den sonra gözlenirken, Van Gölü kıyı kesimlerinde, güncel alüvyon çökellerde ve Zilan Çayı civarında

Van Gölü ve çevresi büyük deprem üretebilecek farklı nitelikte (doğrultulu atımlı, normal ve ters fay) fay sistemlerini içermektedir [46-49]. Bunlar, Çaldıran fay zonu, Erciş-Kocapınar-Muradiye fay

zonu, Bitlis Kenet Kuşağı, Süphan fayı, Malazgirt fayı, Başkale fay zonu, Van fay zonu, Özalp fay zonu, Gevaş fay zonu, Gürpınar fayı, Çakırbey fayı, Alaköy fayı, Everek fayı ve Erçek fayı gibi faylardır [46,50] (Şekil 4). Bunun yanı sıra, son dönemde Van Gölü'nde Paleo Van Projesi kapsamında yapılan derin sismik çalışmalarla ortaya konulan göl içerisindeki faylarda bölgenin önemli tektonik unsurları olarak belirlenmiştir [51-53].



Şekil 4. (a) Çalışma alanı ve çevresindeki önemli tektonik unsurlar (MTA diri fay haritasından değiştirilerek) (b) Van Gölü havzasında aletsel ve tarihsel dönemde (1900-2017) meydana gelen depremler (M>4,0)

Van Gölü havzası ve çevresindeki bu faylar bölgenin tektoniğinin ve depremselliğinin önemini

ortaya koymaktadır. Bölgede hem tarihsel hemde aletsel dönemde önemli depremler meydana gelmiştir. Tarihsel dönemdeki 1646, 1715 Hoşap, 1880 Ahlat depremleri [54] ile aletsel dönemdeki 1903 Malazgirt (Ms 6,3), 1941 Erciş (Ms 5,9), 1945 Van (Ms 5,8), 1966 Varto (Ms 6,8), 1976 Çaldıran (Ms 7,3), 2011 Van (Mw 7,1) ve 2011 Van (Mw 5,6) bölgede meydana gelen önemli depremlerdir [55,56].

Çalışma alanı olan Erciş yerleşim alanı ve çevresi de bu tektonik unsurların etki alanı içerisinde kalmaktadır. Özellikle Erciş-Kocapınar fayı, Çaldıran fayı ve Van fayı inceleme alanını etkileyebilecek önemli fay zonlarıdır. Bu faylar büyük deprem üretme potansiyeline sahip oldukları için çalışma kapsamındaki analizlerde senaryo depremler için kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan deprem verileri için KOERİ [57] ve AFAD [58] deprem kataloglarından faydalanılmıştır.

#### 4. SIVILAŞMA ANALİZLERİ

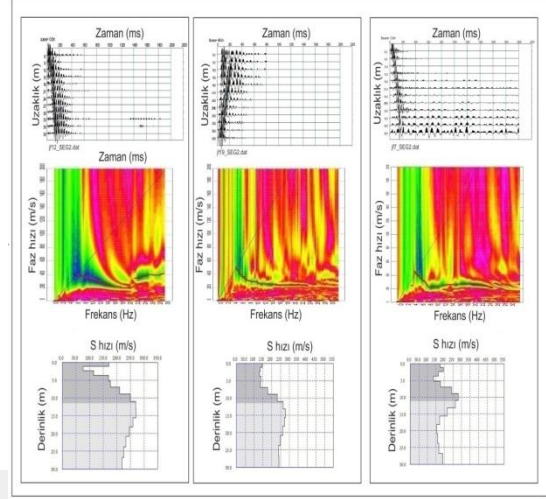
Sıvılaşma analizleri gerek laboratuvar verilerinden gerek sondaj tabanlı SPT ve CPT değerlerinden gerekse jeofizik yöntemlerle belirlenen Vs dalga hızları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Vs dalga hızı her türlü arazi koşulunda ve laboratuvar ortamında uygulanabilir olması nedeniyle sondaj tabanlı yöntemlere üstünlük sağlamaktadır. Bu üstünlük gözetilerek çalışmada Vs tabanlı sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir.

Vs dalga hızı belirlemede geleneksel kırılma yönteminin yanı sıra yüzey dalgası yöntemleri de son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Sismik yöntemler yüksek doğruluk ve ayırım gücü, araştırma derinliğinin fazla olması gibi nedenlerden dolayı mühendislik çalışmalarında en sık kullanılan jeofizik yöntemlerdendir. Çalışmada kullanılan yüzey dalgalarının çok-kanallı analizi (MASW) yöntemi, aktif kaynak kullanılarak oluşturulan yüzey dalgalarının dispersif özelliğinden yararlanarak yeraltı hakkında bilgi edinmeyi amaçlayan ve sığ derinliklerin araştırılmasında kullanılan bir sismik yöntemdir [59]. Bu yöntem ile zeminin derinliklerine doğru Vs hız yapısı elde edilmektedir. MASW yöntemi

güvenilir sonuçlar üreten, ölçü alımı ve veri-işlem aşaması kolay olan bir sismik yöntemdir. Ölçü alımında ofset mesafesi, jeofon aralığı ve serim boyu parametrelerinin seçimi, yakın ve uzak alan etkilerini, araştırma derinliğini ve dispersiyon eğrisinin elde edilmesinde çözünürlüğü etkileyen temel unsurlardır. Bu nedenle, ölçü alımında ofset ve serim uzunluğu seçimine dikkat edilmesi gerekir [60,61].

MASW yönteminde veri işlemi temel üç adımda gerçekleştirilir. Yapay kaynak ve belirli sayıda alıcılara veri toplama ilk adımdır. İkinci adım arazi verisinden dispersiyon eğrisinin oluşturulmasıdır. Dispersiyon eğrisinin belirlenmesinde farklı sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Frekans-dalga sayısı (f-k) ve kesme zamanı-yavaşlık ( $\tau$ -p) dönüşümü, faz kayması veya uzaysal özilişki (SPAC) yaygın kullanılan sayısal yöntemlerdir [62,63]. Üçüncü ve son adımı ise dispersiyon eğrisinin ters çözümüyle ortamın S dalga hız yapısının belirlenmesi oluşturur (Şekil 5).

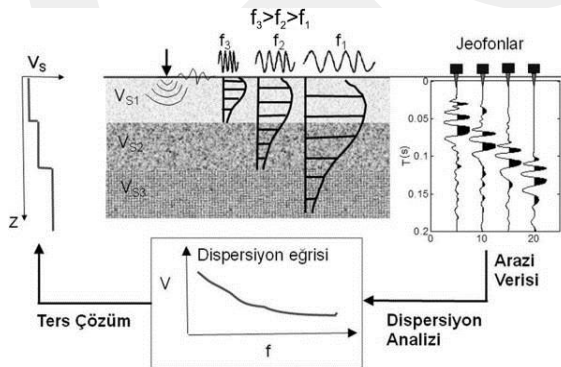
Çalışma alanında ölçü alımında 12 kanallı sismik cihaz ve 4,5 Hz düşey jeofonlar kullanılarak veri toplanmıştır. Sismik dalgaları oluşturmak amacıyla, enerji kaynağı olarak balyoz kullanılmıştır. Jeofon aralıkları 3 m, örnekleme aralığı 1ms, kayıt uzunluğu ise 2s olarak seçilmiştir. Çizelge 1’de çalışma alanında gerçekleştirilen sismik ölçü yerlerine ilişkin bilgiler, Şekil 6’da ise çalışma alanında elde edilen MASW veri örnekleri yer almaktadır.



Şekil 6. Çalışma alanında elde edilen MASW veri örnekleri

Çizelge 1. Erciş yerleşim alanında yapılan sismik ölçüm noktaları

Ölçüm Noktaları	Koordinat		Ölçüm Noktaları	Koordinat	
	X	Y		X	Y
JF-1	358834	4321780	JF-12	358403	4319327
JF-2	357845	4320814	JF-13	358589	4320226
JF-3	358412	4321020	JF-14	357419	4321976
JF-4	356938	4321736	JF-15	359824	4319987
JF-5	354377	4321624	JF-16	360328	4318263
JF-6	353979	4323405	JF-17	358353	4316416
JF-7	354213	4320100	JF-18	357059	4320320
JF-8	354174	4318355	JF-19	357154	4321295
JF-9	355755	4319970	JF-20	359992	4319155
JF-10	359625	4317561	JF-21	358840	4320901
JF-11	356741	4317401			

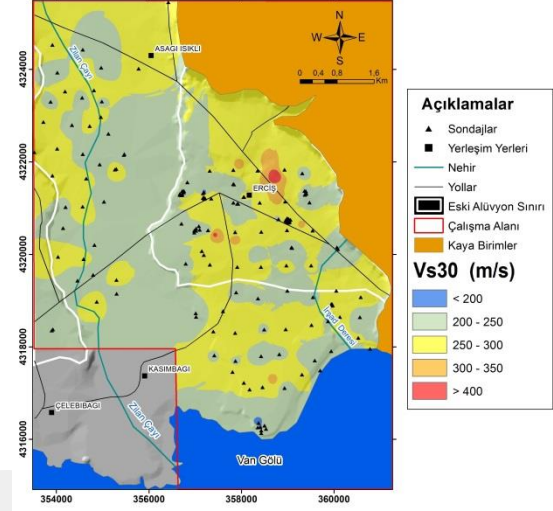


Şekil 5. MASW yönteminde ölçü alım düzeni ve temel işlem adımları [69]

### $V_s$ tabanlı sıvılaşma analizi

Sıvılaşma için temel şartlardan bir tanesi deprem gibi dinamik kuvvetlerin sıvılaşabilir zeminlere etki etmesidir. Bu etkide depremi oluşturan faylanma mekanizması, depremin uzaklığı, süresi, periyodu ve ivmesi son derece önemlidir. Dolayısıyla dinamik kuvvetlerle sıvılaşabilen zeminlerin incelenmesinde sismik dalgaların özellikle makaslama dalga hızının ( $V_s$ ) kullanımı kaçınılmazdır. Çünkü birimlerin yaşı, bağıl sıklığı, gerilme durumu, efektif basınç ve zemin boşluk oranı parametreleri  $V_s$  hızını etkilenmektedir [25,27,28,9,10,16,17,18,19].

Erciş yerleşim alanının Vs tabanlı sıvılaşma analizleri için 21 noktada sismik kırılma ve yüzey dalgası ölçümleri alınarak Vs hız değişimleri belirlenmiştir (Çizelge 1). Ayrıca, ölçülen Vs hızlarıyla uyumu ve çalışma alanındaki Kuvaterner yaşlı alüvyon birimlerle anlamlı sonuçları vermesi bakımından Akın ve arkadaşları [24] tarafından önerilen SPT-Vs ilişkisi kullanılarak çalışma alanı içindeki 165 sondaj noktası için de Vs hızları hesaplanmıştır (Çizelge 2). Hem sismik verilerden hem de çalışma alanındaki sondaj verilerindeki SPT-Vs ilişkileri kullanılarak elde edilen Vs hızlarından 30 metre derinlik için  $V_{s30}$  hızları belirlenerek haritalanmıştır (Şekil 7). İnceleme alanındaki  $V_{s30}$  hızları genel olarak güncel çökellerin olduğu alanlarda 200 m/s ile 250 m/s arasında, eski göl çökellerinin olduğu alanlarda ise 250 m/s ile 300 m/s arasında değişmektedir.



Şekil 7. İnceleme alanının  $V_{s30}$  hız dağılım haritası

Çizelge 2. Erciş yerleşim alanında yapılan ve SPT-Vs ilişkileriyle  $V_{s30}$  hızlarını belirlemek için kullanılan sondaj noktaları

Sondaj No	Enlem	Boylam	Vs30	Sondaj No	Enlem	Boylam	Vs30	Sondaj No	Enlem	Boylam	Vs30	Sondaj No	Enlem	Boylam	Vs30	Sondaj No	Enlem	Boylam	Vs30
ES-1	357838	4321511	248	ES-34	358058	4321236	274	ES-67	355779	4324017	275	ES-100	353523	4322211	268	ES-133	358427	4320486	289
ES-2	357826	4321522	252	ES-35	358047	4321239	271	ES-68	356419	4325453	269	ES-101	353914	4321701	278	ES-134	357865	4320478	260
ES-3	358992	4320777	267	ES-36	356669	4321287	268	ES-69	357014	4318726	263	ES-102	354647	4321637	273	ES-135	357278	4320522	235
ES-4	359014	4320764	266	ES-37	356688	4321280	270	ES-70	353901	4318353	265	ES-103	354937	4321945	256	ES-136	356704	4320663	260
ES-5	359029	4320754	263	ES-38	356714	4321278	273	ES-71	353925	4318379	267	ES-104	355029	4321138	248	ES-137	356795	4319798	259
ES-6	359059	4320749	262	ES-39	356723	4321301	263	ES-72	357191	4321344	189	ES-105	354567	4321032	291	ES-138	357317	4319777	269
ES-7	358954	4320732	280	ES-40	356667	4321305	264	ES-73	357170	4321320	263	ES-106	354200	4321020	264	ES-139	357912	4319726	289
ES-8	358967	4320752	279	ES-41	356718	4321362	263	ES-74	359374	4321294	276	ES-107	354147	4320567	256	ES-140	358420	4319727	274
ES-9	358985	4320775	291	ES-42	356756	4321341	266	ES-75	358801	4320760	252	ES-108	354824	4320202	258	ES-141	358970	4319757	272
ES-10	358969	4320717	270	ES-43	356757	4321372	265	ES-76	358178	4317074	273	ES-109	354589	4319896	278	ES-142	359508	4319756	272
ES-11	358985	4320738	282	ES-44	356721	4321371	272	ES-77	358051	4317219	272	ES-110	354037	4319947	281	ES-143	357019	4318647	232
ES-12	359003	4320760	299	ES-45	359941	4318919	280	ES-78	357808	4317454	273	ES-111	354458	4319433	258	ES-144	360580	4319072	276
ES-13	358992	4320702	285	ES-46	359946	4318889	286	ES-79	359702	4317488	258	ES-112	354874	4318973	282	ES-145	360051	4319213	275
ES-14	359006	4320722	296	ES-47	359972	4318891	286	ES-80	359940	4317906	257	ES-113	355303	4319146	239	ES-146	359545	4319074	254
ES-15	359018	4320747	276	ES-48	359957	4318926	279	ES-81	360781	4317956	269	ES-114	355300	4319447	288	ES-147	358993	4319210	263
ES-16	359009	4320692	294	ES-49	357169	4321219	298	ES-82	359872	4318550	264	ES-115	354962	4322970	272	ES-148	358356	4319044	266
ES-17	359021	4320713	278	ES-50	357201	4321200	298	ES-83	360527	4318194	269	ES-116	354796	4319557	246	ES-149	357885	4319174	247
ES-18	359036	4320737	275	ES-51	357211	4321216	298	ES-84	353917	4324531	279	ES-117	356980	4320512	266	ES-150	357603	4318769	262
ES-19	359025	4320683	291	ES-52	357178	4321232	298	ES-85	354573	4324427	259	ES-118	356980	4320471	266	ES-151	357392	4318330	278
ES-20	359042	4320703	275	ES-53	357192	4321214	298	ES-86	354969	4324036	250	ES-119	357015	4320509	272	ES-152	357865	4318298	271
ES-21	357020	4320555	264	ES-54	358372	4316353	201	ES-87	354670	4323997	285	ES-120	359316	4321752	255	ES-153	358492	4318374	266
ES-22	357099	4320532	263	ES-55	358409	4316261	201	ES-88	354023	4323932	259	ES-121	358931	4321831	267	ES-154	358956	4318376	289
ES-23	357079	4320608	247	ES-56	358498	4316294	262	ES-89	354190	4323523	279	ES-122	358350	4321809	303	ES-155	359515	4318468	270
ES-24	359376	4321288	257	ES-57	358429	4316189	266	ES-90	354812	4323548	287	ES-123	357826	4321823	264	ES-156	360127	4318645	269
ES-25	359406	4321313	259	ES-58	358532	4316223	270	ES-91	354983	4323306	266	ES-124	357315	4321804	270	ES-157	360560	4318641	254
ES-26	357928	4321091	261	ES-59	358430	4316130	271	ES-92	354559	4323387	259	ES-125	356833	4321555	254	ES-158	359586	4317703	253
ES-27	357910	4321092	243	ES-60	358354	4316255	276	ES-93	353875	4323299	264	ES-126	357348	4321207	267	ES-159	358818	4317838	264
ES-28	359096	4320136	246	ES-61	357188	4319984	273	ES-94	353719	4322862	281	ES-127	357827	4321115	266	ES-160	358426	4317796	248
ES-29	359082	4320147	252	ES-62	357145	4320071	275	ES-95	354339	4322794	259	ES-128	358396	4321116	281	ES-161	357871	4317693	265
ES-30	355460	4322150	254	ES-63	355267	4321835	272	ES-96	354721	4322775	274	ES-129	358946	4321140	274	ES-162	357414	4317813	265
ES-31	355468	4322168	252	ES-64	355297	4321846	278	ES-97	355126	4322607	251	ES-130	359472	4321121	252	ES-163	358457	4317124	267
ES-32	360084	4320111	264	ES-65	359367	4321371	267	ES-98	354573	4322167	262	ES-131	359538	4320512	282	ES-164	358931	4317107	254
ES-33	360064	4320151	244	ES-66	359394	4321364	268	ES-99	354018	4322284	280	ES-132	358984	4320520	272	ES-165	359309	4317398	275

Sıvılaşma analizleri için Vs dalga hızlarının kullanımını amaçlayan bu çalışmada, Seed ve Idriss [1] tarafından genel ifadesi verilen ve Idriss ve Boulanger [14] tarafından yeniden düzenlenen güvenlik faktörü analizleri kullanılmıştır. Ayrıca, Uyanık ve Taktak [18] tarafından önerilen ve Seed ve Idriss [1]'den farklı olarak depremin etkin

periodesunun ve Vs hızının kullanıldığı tekrarlı gerilim oranı kullanılmıştır.

Hem SPT hem de Vs tabanlı sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde güvenlik faktörü kullanılmaktadır. Sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü Devrimsel Dayanım Oranının (CRR, DDO),

Devirsel Gerilme Oranı (CSR, DGO) ile oranlanması sonucu belirlenmektedir.

Bu çalışmada,  $V_s$  tabanlı sıvılaşma analizlerinde Uyanık [17] ve Uyanık ve Taktak [18] çalışmalarında önerilen Kayma Gerilme Oranı (KGO) ve Kayma Direnç Oranı (KDO) terimleri kullanılmıştır. Uyanık [17] çalışmasında KGO ile CSR arasında doğrusal bir ilişki olduğunu ifade etmiştir.

$$FS_{V_s} = \frac{CRR_{V_s}}{CSR_{V_s}} = \frac{KDO}{KGO} \quad (1)$$

Eşitlikten elde edilen sonuçlara göre;  $FS \leq 1$  ise sıvılaşma gözlenir,  $1 < FS \leq 1.2$  ise potansiyel sıvılaşma ve  $FS > 1.2$  ise sıvılaşmaz olarak yorumlanır [64,14].

Kayma Direnç Oranı (KDO), fiziksel olarak zeminin doğal direncidir ve  $V_s$  hızlarının fonksiyonu olarak sıvılaşma durumunun belirlenmesinde kullanılır [9,10,65,17,18].

$$KDO = \left[ a \left( \frac{V_{s_c}}{100} \right)^2 + b \left( \frac{1}{V_{s_{max}} - V_{s_c}} - \frac{1}{V_{s_{max}}} \right) \right] MSF \quad (2)$$

bu ifadede;  $V_{s_c}$  düzeltilmiş  $V_s$  hızı,  $V_{s_{max}}$ , sıvılaşmanın oluşabileceği düzeltilmiş  $V_s$  üst sınırı,  $a$  ve  $b$  regresyon parametreleri,  $MSF$  ise deprem büyüklüğü etki faktörüdür.

Youd ve arkadaşları [73] ve Andrus ve Stokoe [10] 2 eşitlikteki regresyon parametreleri için  $a=0,022$ ,  $b=2,8$  katsayılarını ve  $V_{s_{max}} = 215$  m/s üst sınır değerini önerirken, Uyanık [16,17] çalışmalarında bu değerleri  $a = 0,025$ ,  $b=4$  ve  $V_{s_{max}} = 250$  m/s olarak önermiştir. Ayrıca, Uyanık ve Taktak [18] çalışmasında  $V_{s_{max}}$  değerinin zemin incelik içeriğine göre 220 ile 250 m/s arasında değişeceğini ifade etmiştir.

Magnitüd skala faktörü için,

$$MSF = \left( \frac{M_w}{7,5} \right)^n \quad (n = -2,56 \quad Mw > 7,5 \quad \text{ve} \quad n = -3,3 \quad Mw \leq 7,5) \quad (3)$$

bağıntısı kullanılmaktadır [65]. Burada;  $M_w$  moment büyüklüğünü,  $n$  ise üstel sabiti temsil etmektedir. 3 ifadesindeki üstel sabit değerleri Andrus ve Stokoe [9,10] tarafından önerilmiştir.

KDO hesaplamasında kullanılan  $V_{s_c}$  düzeltilmiş kayma dalga hızı

$$V_{s_c} = V_s \left( \frac{Pa}{\sigma'_{v_o}} \right)^{0,25}$$

ile ifade edilir [9,10,17,19]. Burada;  $V_{s_c}$  efektif gerilme ile düzeltilmiş  $V_s$ 'i (m/s);  $Pa$  atmosferik basıncı (100 kPa),  $\sigma'_{v_o}$  ise efektif düşey gerilmeyi (kPa) ifade etmektedir.

Kayma Gerilme Oranı (KGO), Seed ve Idriss [1] tarafından önerilen Devirsel Gerilme Oranı (CSR) ifadesine benzer olarak  $V_s$  kullanılarak tanımlanmaktadır. KGO, dinamik düşey gerilme ve efektif gerilmeden yararlanarak depremin zeminde oluşturacağı tekrarlı gerilmelerin belirlenmesinde kullanılır [16,17,19].

$$KGO = \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \left( \frac{\sigma_{vs}}{\sigma'_{vs}} \right) r_d \quad (4)$$

$$\sigma_{vs} = 0,25 T \sum_{i=1}^n \gamma_i V_{s_i}$$

$$\sigma'_{vs} = \sigma_{vs} - u = 0,25 T \left( \sum_{i=1}^n \gamma_i V_{s_i} - V_{s_n} (\gamma_{sa} - \gamma_d) \right)$$

$$r_d = 1 - 0,00765 z \quad z \leq 9,15 \text{ m}$$

$$r_d = 1,174 - 0,0267 z \quad 9,15 < z \leq 23 \text{ m}$$

$$r_d = 0,744 - 0,008 z \quad 23 < z \leq 30 \text{ m}$$

burada;  $a_{max}$  maksimum ivme ( $g$ ),  $g$  yerçekimi ivmesi,  $\sigma_{vs}$  incelenen tabaka derinliğindeki toplam düşey gerilme ( $kN/m^2$ ),  $\sigma'_{vs}$  efektif gerilme ( $kN/m^2$ ),  $r_d$  ise kayma gerilmesi azaltma katsayısı,  $T$  deprem periyodu (s),  $\gamma$  birim hacim ağırlık ( $gr/cm^3$ ),  $\gamma_{sa}$  suya doymun birim hacim ağırlık ( $gr/cm^3$ ),  $n$  sıvılaşabilir tabaka sayısı,  $z$  ise araştırma derinliğidir [19].

## 5. ÇALIŞMA ALANIN SIVILAŞMA DEĞERLENDİRMESİ

Sismik ölçümlerden elde edilen  $V_s$  hızının hassasiyeti, en büyük yer ivmesinin iyi belirlenmesi, zeminin özellikleri ve deprem büyüklüğü gibi parametreler  $V_s$  tabanlı güvenlik faktörü sivilaşma analizlerinin doğruluğunu kontrol etmektedir. Bu önemli parametreler sivilaşma analizinin doğruluğunu ve hesaplamaların hassasiyetini de doğrudan etkilemektedir.

Sivilaşmaya neden olabilecek ve zemine etkileyen dinamik kuvvet deprem kuvvetidir. Dolayısıyla, depremin zeminde oluşturacağı kayma gerilme oranının belirlenmesinde  $V_s$ , depremin periyodu ve ivmesi daha fazla etkilidir. Bundan dolayı çalışmada sivilaşma analizlerinde kullanılan senaryo depremler için bölgede hem aletsel hem de tarihsel dönemde büyük depremler üretmiş olan ve ileriki tarihlerde de benzer büyüklüklerde depremleri oluşturma potansiyeline sahip olan diri faylardan Erciş-Kocapınar, Çaldıran ve Van faylarında meydana gelmiş en büyük depremler kullanılmıştır. Bu analizler neticesinde çalışma alanını etkileyebilecek bu üç diri fay için büyüklük ( $M$ ), uzaklık ( $R$ ) ve ivme hesaplamaları yapılmıştır (Çizelge 3). Çalışma alanı ve çevresindeki depremler KOERI deprem verileri kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışma alanını etkileyebilecek 3 diri fayda meydana gelmiş en büyük depremler belirlendikten sonra Kadıroğlu ve Kartal [66] tarafından önerilen büyüklük dönüşüm bağıntıları kullanılarak her bir deprem moment büyüklüğü ( $M_w$ ) cinsinden ifade edilmiştir (Çizelge 3). Analizler sonucu elde edilen büyüklük ve uzaklık parametreleri kullanılarak Graizer and Kalkan [67] tarafından önerilen "Ground motion prediction model" ile ivme hesaplamaları yapılmıştır. Elde edilen bu veriler  $V_s$  tabanlı sivilaşma analizlerinde senaryo depremler olarak kullanılmıştır.

Hesaplanan kayma dalga hızına bağlı  $V_{s30}$  dağılımı ve  $V_s$  hızlarına bağlı olarak elde edilen güvenlik faktörü sivilaşma potansiyeli haritaları ArcMap10

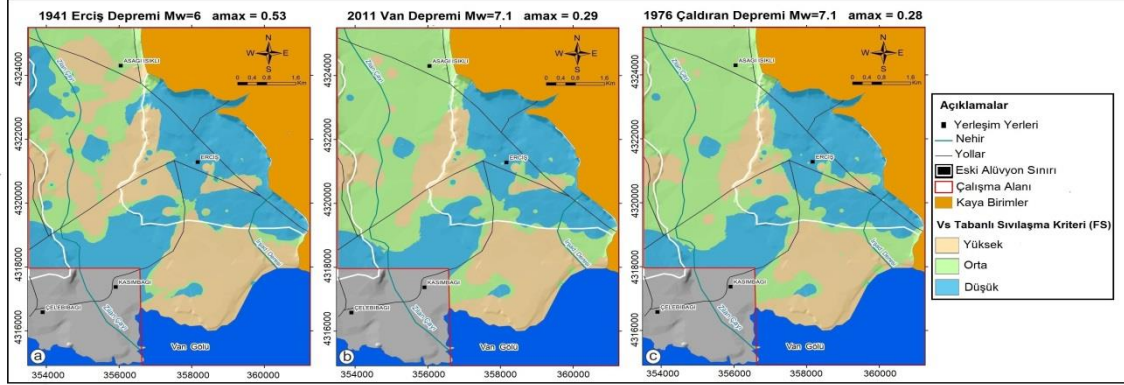
Coğrafi Bilgi Sistemleri yazılımı ile oluşturulmuştur. Haritaların CBS tabanlı ArcMap 10 yazılımında hazırlanması sırasında "Inverse Distance Weighting" istatistiksel yönteminden faydalanılmıştır.

**Çizelge 3.** Çalışma alanı çevresinde sivilaşma oluşturabilecek diri faylar ve sivilaşma analizlerinde kullanılan senaryo deprem parametreleri

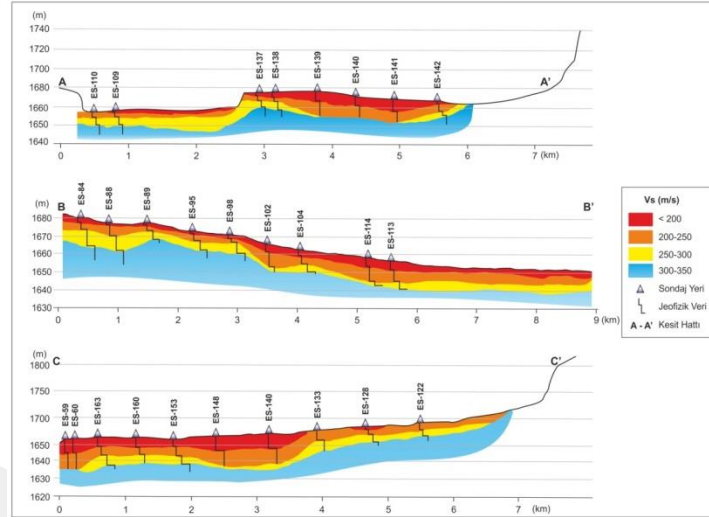
	Oluş Tarihi	$M_s$	$M_w$	R (km)	$a_{max}$ (g)
Erciş Fayı	1941	5,9	6	11	0,53
Çaldıran Fayı	1976	7,3	7,1	32	0,28
Van Fayı	2011	-	7,1	38	0,29

$V_s$ , zemin türü, yeraltısuyu ve deprem senaryoları kullanılarak inceleme alanında ilk 20 m'deki birimler sivilaşma potansiyeli açısından değerlendirilmiştir.  $V_s$  tabanlı hazırlanan sivilaşma potansiyeli haritalarında (Şekil 8a, b ve c) görüldüğü gibi Erciş'in batı kesimlerindeki güncel alüvyonlarda, Zilan Çayı ve İrşat Deresi ile Van Gölü'nün kıyı kesimlerinde her üç deprem senaryosunda da sivilaşma potansiyeli yüksek olarak belirlenmiştir. İnceleme alanının doğu ve kuzey kesimlerinde ise sivilaşma potansiyelinin düşük olduğu ortaya konmuştur (Şekil 8a,b ve c).

Ayrıca, çalışma alanında sismik ölçümler ve sondaj verileri (SPT- $V_s$  ilişkisi ile) kullanılarak elde edilen  $V_s$  hızlarının yaklaşık kuzey-güney ve doğu-batı doğrultulu derinlik değişimini gösteren kesitleri incelendiğinde (Şekil 9), Erciş yerleşim alanı ve civarında, yer yer değişkenlik göstermekle beraber yüzeyden itibaren yaklaşık 1 ila 5 m aralığında düşük  $V_s$  hız değerlerinin (< 200 m/s) olduğu belirlenmiştir. Bu değerler ile  $V_s$  tabanlı sivilaşma sonuçları karşılaştırıldığında özellikle yüzeye yakın kesimlerde elde edilen düşük hızlı ( $V_s < 200$  m/s) seviyelerin yüksek sivilaşma potansiyeline sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Çalışmada kullanılan deprem senaryoları için  $V_s$  tabanlı güvenlik faktörü sıvılaşma analizleri



Şekil 9. Çalışma alanında elde edilen  $V_s$  hızlarının yaklaşık kuzey-güney ve doğu-batı doğrultulu derinlik kesitleri

## 6. SONUÇLAR

23 Ekim 2011 Van depreminde en çok hasar gören Erciş ilçesi için  $V_s$  tabanlı sıvılaşma yöntemi üç farklı deprem senaryosuna göre değerlendirilmiştir. Tüm bu değerlendirmelerden sonra inceleme alanının Van Gölü'ne yakın kıyı kesimleri ile inceleme alanının batısında sıvılaşma potansiyelinin diğer kesimlere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum zemin sıklığının ve yeraltı suyu seviyelerinin sıvılaşma potansiyelini kontrol ettiğini göstermektedir. Üç farklı deprem senaryosuna bakıldığında, inceleme

alanına en yakın fay olan Erciş-Kocapınar fayının üreteceği depremde Erciş yerleşim alanında yüksek sıvılaşma potansiyelinin olduğu, Çaldıran ve Van fayı için yapılan senaryoda da yüksek-orta sıvılaşma potansiyelinin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Erciş yerleşim alanında 23 Ekim 2011 Van depremi sonrasında arazide gözlenen yanıl yayılmalar ve sıvılaşmaların bu çalışmada ön görülen senaryolardaki sınırlarla örtüştüğü belirlenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan yöntemlere göre sıvılaşma potansiyeli değerlendirildiğinde, Erciş merkez ve yakın çevresinde olası büyük bir depremde

özellikle Erciş-Patnos yolundan Van Gölü'ne yaklaştıkça ve akarsulara yakın bölgelerde sıvılaşma türü yüzey deformasyonlarının meydana gelebileceği söylenebilir. Özellikle 1976'da 7.3 ve 1941'de 5.9 büyüklüğündeki deprem ile hareket eden Çaldıran fayı ve Erciş-Kocapınar fayı üzerindeki gerilmenin arttığı düşünüldüğünde bölgedeki yıkıcı deprem riskinin yaklaştığı söylenebilir.

2011 Van depremleri sonrasında çalışma alanının doğusunda yeralan bazalt birimler üzerine konutlar inşa edilmiştir. Bununla birlikte, ova içerisinde depremler sonrası hasar görmüş yapıların yerine yenileri inşa edilmiştir. Bu yapılarda olası büyük depremlerde sıvılaşmaya bağlı hasarların oluşabileceği göz önünde tutulmalıdır. Bu araştırmanın bölgesel kapsamlı bir çalışma olduğu düşünülerek, Erciş'te yeni yapılacak yapılara yönelik zemin araştırmalarında sıvılaşma potansiyeli detaylı olarak değerlendirilmeli ve sıvılaşma potansiyelinin bulunduğu alanlarda zemin iyileştirme çalışmaları uygulanmalıdır.

## **7. KATKI BELİRTME**

Bu çalışma, 2014-HIZ-MİM167 ve 2015-FBE-YL271 numaralı projeler ile Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı tarafından desteklenmiştir.

## **8. KAYNAKLAR**

1. Seed, H.B., Idriss, I.M., 1971. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97,1249-1273.
2. Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe., S., Yasuda, S., Sato, H., 1982. Microzonation for Soil Liquefaction Potential using Simplified Methods. *Proceedings of the 3rd international conference on microzonation*, Seattle, 3, 1310–1330.
3. Dobry, R., Ladd, R.S., Yokel, F.Y., Chung, R.M., Powell, D., 1982. Prediction of Pore Water Pressure Buildup and Liquefaction of Sands During Earthquakes by the Cyclic Strain Method. *NBS Building Science Series* 138, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, 152.
4. Tokimatsu, K., Yoshimi, Y., 1983. Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-Value and Fine Content, *Soils and Foundations*, 23,4, 56-74.
5. Seed, H.B., Tokimatsu, L.F., Harder, L.F., Chung, R. M., 1985. Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations, *J. Geotech. Eng.-ASCE*, 111, 1425–1445.
6. Kramer, S.L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics.
7. Ishihara, K., 1996. *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*. The Oxford Engineering Science Series, Oxford.
8. Robertson, P.K., Wride, C.E., 1998. Evaluating Cyclic Liquefaction Potential using the Cone Penetration Test. *Can Geotech J.*, 35, 3, 442–459.
9. Andrus, R.D., Stokoe II, K.H., 1997. Liquefaction Resistance Based on Shear Wave Velocity. *NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, Technical Report NCEER-97-0022, T.L.Youd and I.M. Idriss, (Eds.), Held (1996), Salt Lake City, UT, Buffalo, NY, 89-128.
10. Andrus, R.D., Stokoe II, K.H., 2000. Liquefaction Resistance of Soils from Shear-Wave Velocity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, (ASCE) 126, 1015-1025.
11. Cetin, K.O., Seed, R.B., Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Kayen, R.E., Moss, R.E.S., 2004. Standard Penetration Test-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential, *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE 130(12), 1314–340.
12. Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., 2005. A Liquefaction Severity Index Suggested for Engineering Practice. *Environmental Geology*, 48, 81–91.
13. Idriss I.M., Boulanger, R.W., 2006. Semi-Empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes.

- Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 26, 115-130.
14. Idriss, I.M., Boulanger, R.W., 2008. Soil Liquefaction During Earthquakes. Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 261.
  15. Idriss, I.M., Boulanger, R.W., 2010. SPT-Based Liquefaction Triggering Procedures, Report No. UCD/CGM-10/02, Department of Civil & Environmental Engineering College of Engineering University of California, 259.
  16. Uyanık, O., 2002. Kayma Dalga Hızına Bağlı Potansiyel Sıvılaşma Analiz Yöntemi, Doktora Tezi, DEÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 200.
  17. Uyanık, O., 2006. Sıvılaşır yada Sıvılaşmaz Zeminlerin Yinelemeli Gerilme Oranına Bir Seçenek, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 8, 2, 79-91.
  18. Uyanık, O., Taktak, A.G., 2009. Kayma Dalga Hızı ve Etkin Titreşim Periyodundan Sıvılaşma Çözümlemesi için Yeni Bir Yöntem, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 13,1, 74-81.
  19. Uyanık, O., İkinci, B., Uyanık, N.A., 2013. Liquefaction Analysis from Seismic Velocities and Determination of Lagoon Limits Kumluca/Antalya Example, Journal of Applied Geophysics, 95, 90-103.
  20. Duman, E.S., İkizler, S.B., 2014. Assessment of Liquefaction Potential of Erzincan Province and its Vicinity, Turkey, Nat Hazards, 73, 1863-1887.
  21. Pekkan, E., Tun, M., Guney, Y., Mutlu, S., 2015. Integrated Seismic Risk Analysis using Simple Weighting Method: the Case of Residential Eskişehir, Turkey, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 15, 1123-1133.
  22. Hasançebi, N., Ulusay, R., 2007. Empirical Correlations Between Shear Wave Velocity and Penetration Resistance for Ground Shaking Assessments. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 66, 203-213.
  23. Dikmen, U., 2009. Statistical Correlations of Shear Wave Velocity and Penetration Resistance for Soils. Journal of Geophysics and Engineering, 6, 61-72.
  24. Akin, K.M., Kramer, S.L., Topal, T., 2011. Empirical Correlations of Shear Wave Velocity (Vs) and Penetration Resistance (SPT-N) for Different Soils in an Earthquake-prone area (Erbaa-Turkey). Eng. Geol., 119,(1-2),1-17.
  25. Dobry, R., Powell, D.J., Yokel, F.Y., Ladd, R.S., 1981a. Geotechnical Aspect. Liquefaction Potential of Saturated Sand – The Stiffness Method. Proceeding of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering Istanbul, Turkey.
  26. Dobry, R., Stokoe, K.H.II, Ladd, R.S., Youd, T.L., 1981b. Liquefaction Susceptibility from S-Wave Velocity. Proceedings, In Situ Tests to Evaluate Liquefaction Susceptibility, ASCE National Convention, held 1981, St. Louis, MO.
  27. Seed, H.B., Idriss, I.M., Arango, I., 1983. Evaluation of Liquefaction Potential, using Field Performance Data, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 109, 458-482.
  28. Tokimatsu, K., Uchida, A., 1990. Correlation between Liquefaction Resistance and Shear Wave Velocity, Soils And Foundations, 30, 2, 33-42.
  29. Akin, M., Özvan, A., Akin, M., Topal, T., 2013. Evaluation of Liquefaction in Karasu River Floodplain after the October 23, 2011, Van (Turkey) Earthquake. Natural Hazards, 69, 1551-1575.
  30. Aydan, Ö., Ulusay, R., Kumsar, H., Konagai, K., 2012. Site Investigation and Engineering Evaluation of the Van Earthquakes of October 23 and November 9, 2011. Japan Society of Civil Engineers. Technical Report, 143.
  31. Aydan, Ö., Ulusay, R., Kumsar, H., 2013. Seismic, Ground Motion and Geotechnical Characteristics of the 2011 Van-Erciş, and Van-Edremit Earthquakes of Turkey, and Assessment of Geotechnical Damages. Bulletin of Engineering Geology and Environment.
  32. Acarlar, M., Bilgin, A.Z., Elibol, E., Erkan, T., Gedik, İ., Guner, E., Hakyemez, Y., Şen, A.M., Uğuz, M.F., Umut, M., 1991. Van Gölü Doğusu ve Kuzeyinin Jeolojisi, MTA Rapor No. 9469, Ankara, 94 (yayımlanmamış).
  33. Özvan, A., Şengül, M.A., Tapan, M., 2008. Van Gölü Havzası Neojen Çökellerinin Jeoteknik Özelliklerine Bir Bakış: Erciş Yerleşkesi. Geosound, 52, 297-310.

34. Yılmaz, Y., Dilek, Y., Işık, H., 1981. Gevaş (Van) Ofiyolitinin Jeolojisi ve Sinkinematik bir Makaslama Zonu. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 24: 37-44.
35. MTA, 2007. Van İlinin Yer Bilim Verileri, Ankara.
36. Özdemir, Y., Güleç, N., 2014. Geological and Geochemical Evolution of the Quaternary Süphan Stratovolcano, Eastern Anatolia, Turkey: Evidence for the Lithosphere-Asthenosphere Interaction in Postcollisional Volcanism. *J Petrol*, 55,37–62
37. Özdemir, Y., Akkaya, İ., Oyan, V., Kelfoun, K., 2016. A Debris Avalanche at Süphan Stratovolcano (Turkey) and Implications for Hazard Evaluation. *Bulletin of Volcanology*, 78(9).
38. Oyan, V., Keskin, M., Lebedev, V.A., Chugaev, A.V., Sharkov, E.V., 2016. Magmatic evolution of the Early Pliocene Etrüsk stratovolcano, Eastern Anatolia collision zone, Turkey. *Lithos*, 256-257, 88-108.
39. Degens, E.T., Wong, H.K., Kempe, S., Kurtmann, F., 1984. A Geological Study of Lake Van, Eastern Turkey. *Geol. Rundsch*, 73, 2, 701-734.
40. Akın, M., Akın, M.K., Akkaya, İ., Özvan, A., Şengül, M.A., 2015a. Erciş (Van) Yerleşim Alanındaki Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi, No: 2014-HİZ-MİM167 Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı, 46.
41. Akın, M., Akın, M.K., Akkaya, İ., Özvan, A., Şengül, M.A., 2015b. Erciş (Van) Yerleşim Alanındaki Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi, Ulusal Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu, 3-5 Eylül 2015, KTÜ, Trabzon. 208-215.
42. Şengör, A.M.C., Kidd, W.S.F., 1979. Post-Collisional Tectonics of the Turkish–Iranian Plateau and a Comparison with Tibet; *Tectonophys.* 55, 361–376.
43. Şengör, A.M.C., Yılmaz, Y., 1981. Tethyan Evolution of Turkey: a Plate Tectonic Approach. *Tectonophysics*, 75, 181-241.
44. Şaroğlu, F., Yılmaz, Y., 1986. Doğu Anadolu’da Neotektonik Dönemdeki Jeolojik Evrim ve Havza Modelleri. *MTA Dergisi*, 107, 73-94.
45. Bozkurt, E., 2001. Neotectonics of Turkey-a Synthesis. *Geodinamica Acta*, 14, 3–30.
46. Koçyiğit, A., Yılmaz, A., Adamia, S., Kuloshvili, S., 2001. Neotectonics of East Anotolian Plateau Transition From Thrusting to Strike-Slip Faulting. *Geodinamica Acta*, 14, 177-195.
47. Örçen, S., Tolluoğlu, A.Ü., Köse, O., Yakupoğlu, T., Çiftçi, Y., Işık, A., Selçuk, L., Üner, S., Özkaymak, Ç., Akkaya, İ., Özvan, A., Sağlam, A., Baykal, M., Özdemir, Y., Üner, T., Karaoğlu, Ö., Yeşilova, Ç., Oyan, V., 2004. Van Şehri Kentleşme Alanında Yüzeyleyen Pliyo-Kuvaterenr Çökellerinde Sedimentolojik Özelliklerin ve Aktif Tektonizmanın Depremselliğe Yönelik İncelenmesi. TÜBİTAK Proje Raporu, Proje No. YDABAG 101Y100 (VAP 10).
48. Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Bozkurt, E., Dirik, K., Topal, T., Alan, H., Çağlan, D., 2011. 23 Ekim 2011 Tabanlı- Van Depreminin Sismik Jeomorfolojisi ve Doğu Anadolu’daki Aktif Tektonik Yapılarla İlişkisi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 35,2, 175–199.
49. Akkaya, İ., Özvan, A., Tapan, M., Şengül, M. A., 2015. Determining the Site Effects of 23 October 2011 Earthquake (Van Province, Turkey) on the Rural Areas using HVSR Microtremor Method. *Journal of Earth System Science*, 124,7, 1429-1443.
50. Selçuk, A.S., 2016. Evaluation of the Relative Tectonic Activity in the Eastern Lake Van Basin, East Turkey. *Geomorphology*, 270, 9-21.
51. Litt, T., Krastel, S., Sturm, M., Kipfer, R., Orcen, S., Heumann, G., Franz, S.O., Ulgen, U.B., Niessen, F., 2009. ‘PALEOVAN’, International Continental Scientific Drilling Program (ICDP): Site Survey Results and Perspectives. *Quat Sci Rev* 28:1555–1567 MTA 2007 Van İlinin Yer Bilim Verileri, Ankara.
52. Cukur, D., Krastel, S., Demirel-Schlüter, F., Demirbağ, E., İmren, C., Niessen, F., Toker, M., PaleoVan-Working Group. 2013. Sedimentary Evolution of Lake Van (Eastern Turkey) Reconstructed from High Resolution Seismic Investigations. *International Journal of*

- Earth Sciences (Geologische Rundschau), 102(2), 571-585.
53. Cukur, D., Krastel, S., Schmincke, H-U., Sumita, M., Çağatay, M.N., Meydan, A.F., Damcı, E., Stockhecke, M., 2014. Seismic Stratigraphy of Lake Van, Eastern Turkey. *Quaternary Science Reviews*, 104, 63-84.
54. Ambraseys, N.N., Finkel, C., 1995. The Seismicity of Turkey and Adjacent Areas 1500-1800. Eren Publishers, Istanbul.
55. Utkucu, M., 2013. 23 October 2011 Van, Eastern Anatolia, Earthquake (MW 7.1) and Seismotectonics of Lake Van area. *Journal of Seismology* 17, 783-805.
56. Koçyiğit, A., 2013. New Field and Seismic Data About the Intraplate Strike-slip Deformation in Van Region, East Anatolian Plateau, E. Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, 586-605.
57. KOERI (Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü), <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/tr/>
58. AFAD, Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı İnternet Sitesi; <https://www.afad.gov.tr/>
59. Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., 1999. Multichannel Analysis of Surface Waves, *Geophysics*, 64,3, 800-808.
60. Dikmen, Ü., Arısoy, M. Ö., Akkaya, İ., 2010a. Offset and Linear Spread Geometry in MASW Method, *Journal of Geophysical and Engineering*, 7, 211-222.
61. Dikmen, Ü., Başokur, A.T., Akkaya, İ., Arısoy, M.Ö. 2010b. Yüzey Dalgalarının Çok-kanallı Analizi Yönteminde Uygun Atış Mesafesinin Seçimi, *Yerbilimleri*, 31,1, 23-32.
62. Foti, S., 2000. Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves, Ph.D. Diss., Politecnico di Torino, 230 p., Milano.
63. Okada, H., 2003. The Microtremor Survey Method, *Geophysical Monograph Series no. 12*, SEG, Tulsa.
64. Seed, H.B., Idriss, I.M., 1982. Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California.
65. Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder Jr, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcusan III, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., Stokoe II, K.H., 2001. Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 127, 10.
66. Kadirioğlu, F.T., Kartal, R.F., 2016. The New Empirical Magnitude Conversion Relations using an Improved Earthquake Catalogue for Turkey and its Near Vicinity (1900-2012). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 25,300-310.
67. Graizer, V., Kalkan, E., 2015. Update of the Graizer-Kalkan Ground-Motion Prediction Equations for Shallow Crustal Continental Earthquakes, USGS Open-File Report, 1009, 79.