



BORNOVA (İZMİR)'DE BİR İNŞAAT ALANINDA DİNAMİK ZEMİN DAVRANIŞI VE SIVILAŞMA ANALİZLERİ

Yusuf BATUGE¹, Mehmet KURUOĞLU^{2*}, Tuğba ESKİŞAR³

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

³ Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Dinamik Zemin Davranışı,
Yer Tepki Analizi,
Eşdeğer Doğrusal Yöntem,
Sıvılaşma Analizi,
SPT-N.*

Öz

Bu çalışma kapsamında, İzmir ili Bornova ilçesinde bulunan bir inşaat alanında dinamik zemin davranışı analizleri ve sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda, öncelikle sahada uygulanan sondajlar ve jeofizik yöntemlerin verileri bir veri bankasında toplanmıştır. Sahanın 3 boyutlu modeli çıkartılmış ve sondajların konumlarına göre sahanın farklı açılardan geoteknik profilleri elde edilmiştir. Sonrasında dinamik zemin davranışı analizleri, frekans tanım alanında bir boyutlu eşdeğer doğrusal analiz yöntemiyle DEEPSOIL programı kullanılarak yapılmıştır. Analizlerde 1977 İzmir, 1992 Doğanbey, 1995 Dinar ve 1999 Kocaeli depremlerine ait ivme-zaman kayıtları kullanılmıştır. Ayrıca, SPT-N değerleriyle sıvılaşma analizleri yapılarak alanın sıvılaşma riski belirlenmiştir. Alan içinde farklı deprem etkileri sonucu 0.4g ve üzeri değerlerde en büyük yatay yüzey ivmelerinin oluşabileceği, sıvılaşma riskinin alan genelinde mevcut olmadığı, ancak lokal olarak sıvılaşma gözlenebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

DYNAMIC SOIL BEHAVIOR AND LIQUEFACTION ANALYSES AT A CONSTRUCTION SITE IN BORNOVA (IZMIR)

Keywords

*Dynamic Soil Behavior,
Site Response Analysis,
Equivalent Linear Method,
Liquefaction Analysis,
SPT-N.*

Abstract

In this study, 1-D dynamic site response and liquefaction analyses have been performed for a site in Bornova district of Izmir. For this purpose, the soil properties derived from boreholes and the results of geophysical measurements were collected in a database. A 3-D model of the site was created and geotechnical profiles of the site were inspected via different cross sections considering the locations of the boreholes. Then, dynamic site response analyses were performed by using DEEPSOIL program applying the 1-D equivalent linear analysis method in the frequency domain. In the analyses, acceleration-time records of 1977 Izmir, 1992 Doğanbey, 1995 Dinar and 1999 Kocaeli earthquakes were used. Besides, liquefaction analyses were performed with SPT-N values and the liquefaction potential was evaluated. As a result of the application of different earthquake excitations in the area, it was concluded that the peak ground acceleration values may occur at values of 0.4g and above, and the risk of liquefaction is not valid for the total area, but some locations in the area may be susceptible to liquefaction.

Alıntı / Cite

Batuge, Y., Kuruoğlu, M., Eskişar, T., (2023). Bornova (İzmir)'de Bir İnşaat Alanında Dinamik Zemin Davranışı ve Sıvılaşma Analizleri, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11(3), 1066-1085.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Y. Batuge, 0000-0002-8060-6664
M. Kuruoğlu, 0000-0001-6680-5408
T. Eskişar, 0000-0002-0269-2149

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	07.06.2023
Revizyon Tarihi / Revision Date	10.06.2023
Kabul Tarihi / Accepted Date	22.06.2023
Yayın Tarihi / Published Date	28.09.2023

* İlgili yazar / Corresponding author: mehmet.kuruoglu@deu.edu.tr, +90-232-301-7071

DYNAMIC SOIL BEHAVIOR AND LIQUEFACTION ANALYSES AT A CONSTRUCTION SITE IN BORNOVA (IZMIR)

Yusuf Batuge¹, Mehmet Kuruoğlu^{2†}, Tuğba Eskişar³

¹ Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Izmir, Türkiye

² Dokuz Eylül University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Izmir, Türkiye

³ Ege University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Izmir, Türkiye

Highlights

- 3-D soil model and cross sections of the site are constituted.
- An alternative V_s -SPT- N_{30} relationship is proposed for the site.
- The dynamic site response analysis is performed with DEEPSOIL.
- Distribution of PGA values is mapped and liquefaction potential of the site is evaluated.

Graphical Abstract

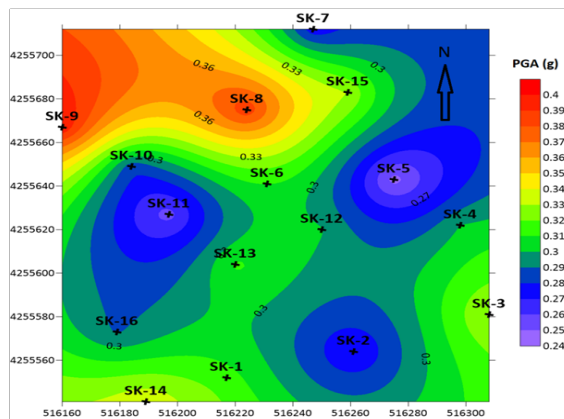


Figure. 1999 Kocaeli Depremi için alandaki PGA dağılımını gösteren örnek bir harita
(An exemplary map of the PGA distribution of the site for 1999 Kocaeli Earthquake)

Purpose and Scope

The site response and the liquefaction potential of a site was determined according to the Turkish Building Earthquake Code, by using the data obtained from soil boreholes, field and laboratory test results in the investigated area in Bornova District of the city of Izmir.

Design/methodology/approach

A 3-D soil model of the site was created by using the field and laboratory test data. Critical cross sections were determined. V_s -SPT- N_{30} correlation was obtained for the site. Dynamic site response analyses were performed by using DEEPSOIL and the results were gathered to create PGA and PSA maps of the site. The liquefaction potential of the site was evaluated. This study showed that the dynamic soil parameters could alternate within a short distance in the site and the design of critical locations in the site should be investigated extensively.

Findings

Under the influence of the 1999 Kocaeli earthquake, PGA values ranged from 0.24 g to 0.4 g, and PSA values ranged between 1.05 g and 1.8 g. Some locations in the investigated site were susceptible to liquefaction.

Originality

Results of the site-specific dynamic site response and liquefaction analyses of the soils were presented. An alternative V_s -SPT- N_{30} correlation was proposed.

[†] Corresponding author: mehmet.kuruoglu@deu.edu.tr, +90-232-301-7071

1. Giriş (Introduction)

İzmir Körfezi'nin kıyı kesimleri, deprem üretebilecek fayların yoğun ve sismik aktivitenin yüksek olduğu bir bölge içerisinde yer almaktadır. Yerel zemin koşullarının genellikle suya doygun alüvyondan ibaret olduğu kıyı kesiminde, deprem hareketinin etkisini büyütebilecek zemin özelliğine sahip sahaların varlığı, sahaya özel dinamik analizlerin yapılmasını gerektirmektedir. Suya doygun alüvyon zeminlerde, yüzeyden itibaren ilk 20.0 metre derinlikte yer alan gevşek kum ve silt grubu zeminler için, zeminin sıvılaşma potansiyelinin incelenmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmanın amacı, sismik olarak aktif bir yerleşim alanı olan İzmir ilinin Bornova ilçesinde yer alan ve bir yüksek yapının inşa edildiği sahada, dinamik zemin davranışı ve sıvılaşma analizleri yaparak, seçilen sahanın farklı deprem hareketleri altındaki dinamik davranışını analiz etmektir. Bu amaçla, öncelikle, sahanın zemin özellikleri belirlenmiş, zeminin üç boyutlu modeli kurulmuş ve kesitler alınarak, sondajlarla belirlenemeyen kısımların hangi tür zemin tabakalarından oluştuğu tahmin edilmiştir. Bu tahmin yapılırken, iki sondaj konumu arasındaki zemin özellikleri, noktadan noktaya korelasyon yöntemi uygulanarak belirlenmiştir. Sahaya özgü hazırlanan veriler detaylı bir şekilde incelenerek, saha içinde ölçülen kayma dalgası hızları ile SPT-N darbe sayıları arasındaki ilişki araştırılmıştır. Ardından her sondaj konumunda eşdeğer doğrusal yöntem ile dinamik zemin davranışı analizleri yapılmıştır. Saha içinde birkaç sondaj konumunda sıvılaşabilir zemin özelliklerine sahip ardışık tabakalar tespit edilerek, bu tabakaların sıvılaşma potansiyeli incelenmiştir. Deprem hareketlerinin oluşturduğu en büyük zemin yüzeyi ivmeleri ve en büyük zemin yüzeyi spektral ivmeleri "kriging" yöntemi ile işlenerek sahanın her bir deprem kaydı için haritalar oluşturulmuş ve risk arz eden yerler saptanmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

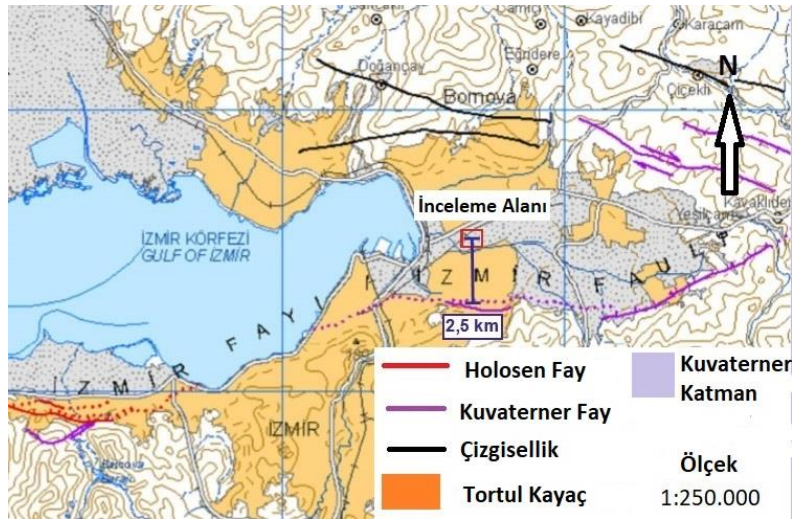
İzmir Körfezi kuzey kıyı bölgesi zeminleri daha önceden yapılan çalışmalarda inceleme alanı olarak alınmış, bölge zeminlerinin dinamik davranışı, bir boyutlu dinamik yer tepki analizi yöntemi uygulanarak ayrıntılı incelenmiştir (Kuruoğlu, 2004, Eskişar, 2008, Eskişar vd., 2014a ve 2014b, Kuruoğlu ve Eskişar, 2015, Edinçliler ve Çalikoğlu, 2018). Çalışmalarda, öncelikle zemin özelliklerinin bir arada toplandığı geoteknik veritabanı oluşturulmuştur. Dinamik zemin davranışı analizleri, bir boyutlu eşdeğer doğrusal analiz yöntemi uygulanarak ve EERA programı kullanılarak yapılmıştır. 1977 İzmir Depremi (M=5.3), 2003 Urla Depremi (M=5.6) ve 2005 Urla Depremi (M=5.9)'nin ivme kayıtları ve bu depremlerin senaryo depremine dönüştürülmesi amacıyla, ivme zaman kayıtlarının frekans içeriği sabit tutularak büyüklüğü M=6.5 olacak şekilde düzenlenerek kullanılmıştır. Dinamik analizler sonucunda en büyük zemin yüzeyi ivmesi, en büyük taban kayası ivmesi, en büyük ivme oranı, en büyük zemin yüzeyi spektral ivmesi, en büyük taban kayası spektral ivmesi ve en büyük spektral ivme oranı değerleri belirlenmiştir. Sıvılaşma analizi için 4 farklı yöntem kullanılarak sıvılaşma potansiyeli haritaları çıkartılmıştır. Sonuç olarak, İzmir körfezi kuzey kıyı bölgesinde yerel zemin özellikleri çıkartılmış, bölgenin sıvılaşma potansiyeli ortaya konulmuştur. Çalışmalarda sunulan ivme ve spektral ivme haritalarında yer alan bazı konumlarda mevcut yapıların yeniden değerlendirilmesi gerekebileceğini ve yerel olarak üretilen elastik tasarım spektrumlarına ait parametrelerin yeniden düzenlenebileceği belirtilmiştir (Eskişar vd., 2014b, Kuruoğlu ve Eskişar, 2015). Bu çalışmalardan bir kısmı, zengin verileri ile İzmir'in Körfezi'nin kuzey kıyılarında yer alan suya doygun, kalın alüvyon zemin tabakaları hakkında bilgi sağlamak için bir mikrobölgeleme çalışması niteliğindedir (Kuruoğlu, 2004, Eskişar, 2008, Eskişar vd., 2014a). 2020 Samos Depremi (M=6.6), çalışma alanına yaklaşık 70 km uzaklıkta meydana gelmiş olmasına rağmen, yüksek zemin büyütmeleri nedeniyle alüvyon zeminde inşa edilen 7-10 katlı yapılarda (Manavkuyu-Bayraklı bölgesinde) hasarlara neden olmuş, 8 yapı yıkılmış ve 116 can kaybı yaşanmıştır (Çetin vd., 2022a, Çetin vd., 2022b, Yakut vd., 2022). Kaya sahalarda da ivme büyütmeleri saptanmıştır ve bu durum, İzmir zeminlerinin dinamik davranışının önemli bir karakteristiği olarak ortaya çıkmıştır (Çetin vd., 2022a). Manavkuyu bölgesindeki yumuşak ve gevşek zemin koşulları, zemin büyütmesini arttıran bir faktör oluşturmuş, 0.6-1.5 s periyot aralığında kalan yapılar (genellikle 7-10 katlı), büyük deprem yüklerine maruz kalmışlar, 30 yıllık ve daha eski yapılar, yetersiz mühendislik hizmeti alma, dayanımı yetersiz malzeme kullanımı, tasarım ve uygulama hataları nedeniyle ağır hasar almışlardır (Yakut vd., 2022).

Kale (2008), çalışma alanı olarak İstanbul İli Zeytinburnu İlçesi'nde yer alan 3 adet enkesit üzerinde deprem sırasında oluşacak yüzey hareketlerinin değişimini belirlemek için bir ve iki boyutlu dinamik davranış analizleri yaparak, analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Bozkurt (2010) tarafından, İzmir Körfezi güney kıyı bölgesi zeminlerinin dinamik zemin davranışlarını araştırılmıştır. Çalışmada, bir boyutlu dinamik yer tepki analizi yöntemi uygulanmış ve EERA programı kullanılmıştır. Eşdeğer doğrusal model ile İzmir yöresindeki fay sistemlerinde farklı deprem senaryoları için zemin tepki analizleri yapılmıştır. Nar (2016) tarafından, 1999 Gölcük depremi sonucu oluşan çökmeler, yanal yayılmalar, sıvılaşma kaynaklı zemin hasarları ile zemin büyütmesi, üst yapı hasarları belirlenmiş ve tepki spektrumlarının elde edilebilmesi amacıyla bir boyutlu dinamik zemin davranışı analizleri yapılmıştır. Edinçliler ve Çalikoğlu (2018), İzmir ilinin Karşıyaka ve Çiğli

ilçelerinden alınan birer adet sondaj uygulamasından çıkarılan zemin profili için sismik davranış analizini gerçekleştirmişlerdir. Deprem ivme kayıtları olarak 2014 Gökçeada depremi ($M=6.5$) ve 2017 Bodrum depremi ($M=6.5$) kullanılmıştır. Mert (2018) tarafından, Eskişehir ili Çifteler İlçesi'nde yer alan sıvılaştırılabilir özellikteki zeminlerden oluşan ve sondaj verileri bulunan 18 adet konumun DEEPSOIL programında frekans tanım alanında eşdeğer doğrusal yöntem ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan yöntem ile dinamik zemin davranış analizleri ve sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Ceren ve Karakan (2019), Kahramanmaraş ilinde dinamik zemin davranış değerlendirme yapmıştır. Yüksek kil içeriğine sahip Üngüt Mahallesi zemininin DEEPSOIL programı yardımı ile frekans tanım alanında doğrusal ve eşdeğer doğrusal, zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler yapılmış, zeminin dinamik davranış incelenmiştir. 54 adet sondaj kuyusu üzerinde yapılan analizlerde, 1999 Kocaeli ($M_w=7.4$) ve Northridge ($M_w=6.7$) depremlerine ait ivme kayıtları kullanılmıştır.

3. İnceleme Alanının Tanımlanması (Identification of the Investigated Area)

İnceleme alanı, İzmir ili Bornova ilçesindeki 2610 m²'lik alana sahip bir parsel içerisinde yer almaktadır. Alana 5 bloktan oluşan bir yapı topluluğu inşa edilmiştir. Yapıların bina yükseklik sınıfı BYS-6'dır, bina kullanım sınıfı BKS-3 ve bina önem katsayısı $I=1.0$ 'dir (TBDY, 2018). Binalar, sıg temel niteliğinde olan radye temel üzerine inşa edilmiştir. İnceleme alanının harita üzerindeki konumu ve en yakınındaki İzmir fay hattına uzaklığı, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'nün (MTA) jeoloji haritasında gösterilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. İnceleme alanının konumu ve İzmir Fayı'na yaklaşık mesafesi (Location of the investigated area and its distance to the İzmir Fault)

Zemin etüd raporundan (Ege Temel Sondajcılık, 2015) elde edilen bilgilere göre, çalışma alanındaki zemin türü alüvyondur. Çoğunlukla killi, siltli, kumlu ve az miktar çakıllı bir profil sergilemektedir. Yer altı su seviyesi 2.00 ile 4.55 m arasında değişmektedir. Zemin yatak katsayısı 15000-30000 kN/m³, zemin büyütmesi 2.4-2.7 aralığında, zemin hâkim titreşim periyodu ise 0.6 s değerinde belirlenmiştir. Zemin sınıfı TBDY (2018)'e göre ZE olarak değerlendirilmiştir.

Geoteknik çalışmalar kapsamında, 2015 yılında bölgede derinlikleri 30.45 m ile 50.45 m arasında değişen 16 adet sondaj kuyusu açılmıştır. Sondajlar sırasında zeminin geoteknik özelliklerini saptamak amacıyla Standart Penetrasyon (SPT) deneyleri yapılmıştır. Sondajlar sırasında örselenmiş, örselenmemiş (UD) ve karot örnekleri alınmıştır. Bu örnekler üzerinde doğal su içeriği (ω_n) ve doğal ve kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiş, USCS zemin sınıflarını saptamak için yıkamalı elek analizi ve kıvam limitleri deneyleri yapılmıştır. Jeofizik çalışmalar kapsamında 7 Serim aktif kaynaklı yüzey dalgası (MASW), 7 Serim Sismik Kırılma ölçümü, 2 noktada ise mikrotremor ölçümleri alınmıştır. Arazi ve laboratuvar deneylerinin sonuçları dijital olarak işlenerek bir veri bankasında toplanmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. SK-1 sondaj kuyusuna ait veriler (Geotechnical data belongs to the SK-1 borehole)

ÖRNEK No.	DERİNLİK (m)	ω_n (%)	W _L (%)	W _p (%)	I _p (%)	-No. 10 (%)	-No. 200 (%)	USCS Zemin Sınıfı	SPT-N ₃₀
SPT-1	3.00-3.45							DOLGU	4
SPT-2	4.50-4.95	33.1	47	21	26	2	85.2	CL	10
SPT-3	6.00-6.45							CL	9
SPT-4	9.00-9.45	21.3	38	17	21	3.7	77.9	CL	10
SPT-5	10.50-10.95							CL	12
SPT-6	13.50-13.95	15.5	23	14	9	3.1	49.5	SC	39
SPT-7	16.50-16.95	10.1	22	15	7	37.4	20.3	SC	30
SPT-8	19.50-19.95	19.7	26	14	12	17.3	47.6	SC	28
SPT-9	21.00-21.45	24.5	39	18	21	19.5	59.3	CL	26
SPT-10	24.00-24.45	34.2	54	22	32	1	86.8	CH	21
SPT-11	27.00-27.45							CH	21
SPT-12	30.00-30.45							CH	22

Sondaj kuyularının ve jeofizik ölçümlerin (MASW) çalışma alanındaki konumları Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir.

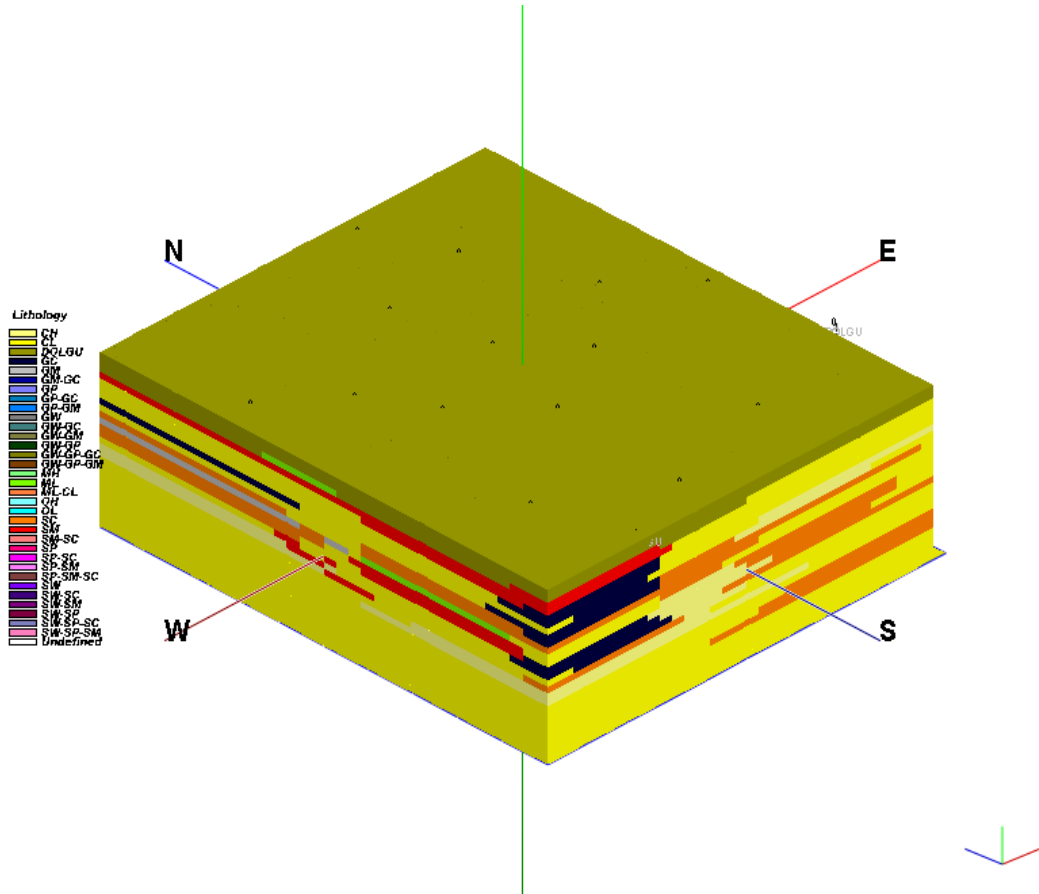


Şekil 2. İnceleme alanındaki sondaj konumları (Locations of the boreholes at the investigated area)



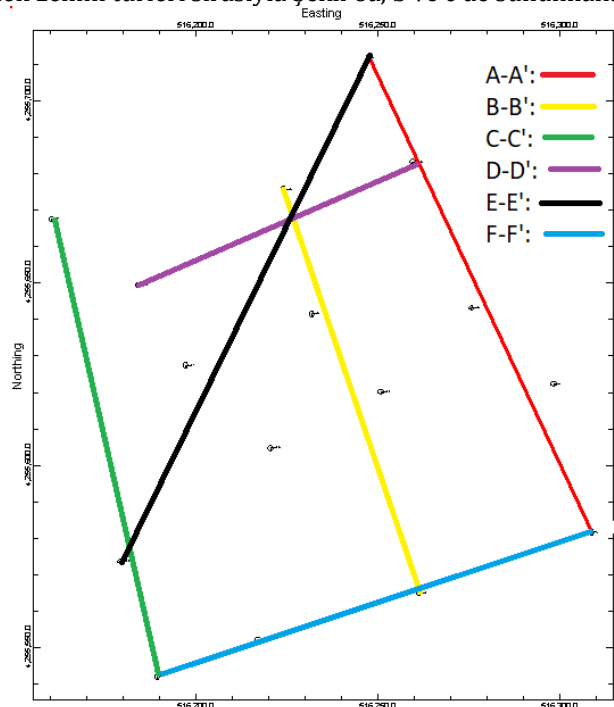
Şekil 3. İnceleme alanındaki jeofizik ölçüm konumları (Locations of the geophysical measurement at the investigated area)

RockWorks programı ile elde edilen 3 boyutlu zemin modelinde, dolgu tabakasının altında genellikle CL türü düşük plastisiteli kil veya SM türü siltli kum olduğu görülmektedir (Şekil 4). Daha derinlere inildikçe yoğun olarak SC, CL, CH türü zeminlerin yer aldığı gözlenmektedir. Arazide çakıllı zeminlere nadiren rastlanmakla birlikte, birkaç konumda ML türü zeminlerin var olduğu da görülmektedir.

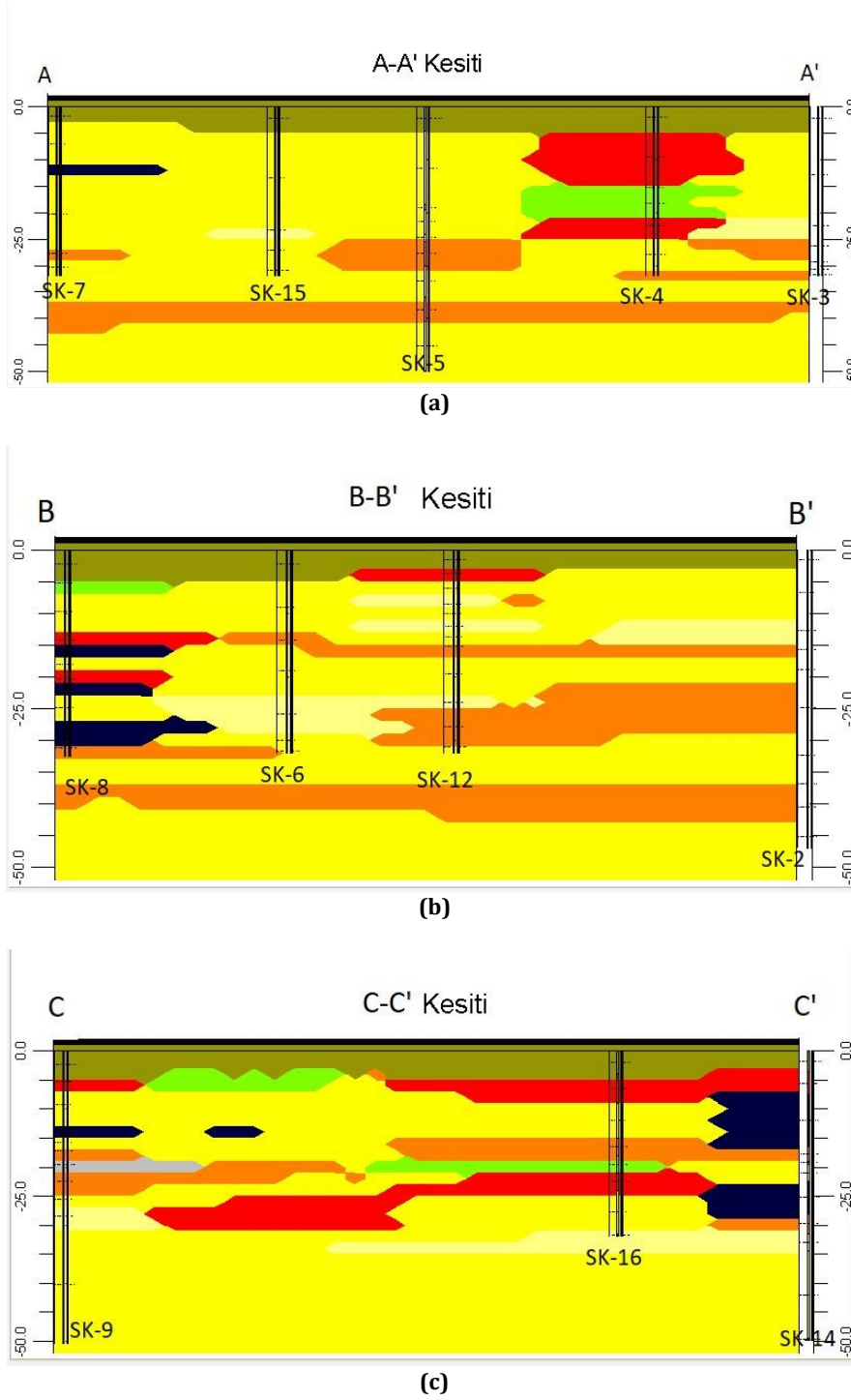


Şekil 4. İnceleme alanının 3 boyutlu zemin modeli (A 3-D soil model of the investigated area)

Bu model oluşturulduktan sonra, zemin kesitleri çıkarılmıştır (Şekil 5). Şekil 5'te gösterilen zemin kesitlerinden A-A', B-B' ve C-C'nde belirlenen zemin türleri sırasıyla Şekil 6a, b ve c'de sunulmaktadır.



Şekil 5. İnceleme alanından alınan kesitler (Cross sections taken from the investigated area)



Şekil 6. (a) İnceleme alanından alınan A-A' kesiti, (b) inceleme alanından alınan B-B' kesiti, (c) inceleme alanından alınan C-C' kesiti ((a) The cross section A-A' taken from the investigated area, (b) the cross section B-B' taken from the investigated area, (c) the cross section C-C' taken from the investigated area)

4. Araştırma Yöntemi (Investigation Method)

4.1. Dinamik Zemin Davranışı Analizi (Dynamic Soil Behavior Analysis)

Dinamik zemin davranışı analizi, bir sahadaki zeminin deprem etkisinde dinamik davranışını incelemek ve tepki spektrumlarını belirlemek amacıyla yapılır. Dinamik analiz sonucunda zemin büyütmesi, zemin hâkim titreşim periyodu, sıvılaşma potansiyeli gibi birçok dinamik zemin parametresi elde edilir. Dinamik zemin davranışı analizinde, deprem kaynağındaki kırılma mekanizması, gerilme dalgalarının yer içinde yayılarak belirli bir sahanın altındaki anakayanın tepesine ulaşması idealize edilerek, yer yüzeyindeki kuvvetli yer hareketi parametreleri, deprem dalgalarının anakaya üzerindeki zemin tabakaları tarafından iletilerek yüzeye ulaşması sırasında oluşan büyütme ve spektral etkiler belirlenir (Kramer, 1996).

Bu çalışmada analiz yöntemi olarak, uygulamada sıkça kullanılan, yüzeyi eğimli olmayan düz sahalar için geliştirilmiş, bir boyutlu eşdeğer doğrusal analiz metodu uygulanmıştır. Bu metodun uygulanması için ise DEEPSOIL programı kullanılmıştır. DEEPSOIL programı ile frekans tanım alanında bir boyutlu doğrusal ve eşdeğer doğrusal analizler ile, zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan zemin davranışı analizleri yapılabilmektedir (Hashash vd., 2016). DEEPSOIL ile analiz yapılabilmesi için, öncelikle programa zeminlerin birim hacim ağırlıkları, tabaka kalınlıkları, kayma dalgası hızları gibi özelliklerin tanıtılması gerekmektedir. Ardından, uygun görülen depremlerin ivme-zaman kayıtlarıyla analiz yapılabilmektedir. Eşdeğer doğrusal analiz modelinde, kayma modülünün ve sönüm oranının zemin özelliklerine bağlı olarak tekrarlı bir hesaplama metodu uygulanmaktadır. Bu özellikler ayrık noktalarla (Discrete Points), veya doğrusal olmayan modellerden birinin omurga eğrileri (Backbone Curves) oluşturularak, dinamik zemin parametreleri tanımlanabilir.

Bir boyutlu dinamik analizde, tüm zemin sınırlarının yatay olduğu ve zemin tepkisini belirlemek için anakayadan düşey yönde yayılan deprem dalgaları zemin yüzeyine ulaşırken zemin tabakalarının tepkileri gözlemlenir. Eşdeğer doğrusal analiz, frekans tanım alanında ve zaman tanım alanında yapılabilir. Zaman tanım alanında, ölçekleme yöntemi olarak deprem kaydının frekans içeriği değiştirilmeksizin sadece deprem kaydının genliği ile oynanır. Frekans tanım alanındaki ölçekleme yöntemlerinde ise tasarım ivme spektrumuna bir eşlik bulmak için yer hareketi kaydının frekans içeriği değiştirilebilir.

İnceleme alanında sıvılaşma potansiyelini belirlemek için, yüzeyden itibaren ilk 20 m'de sıvılaşma özelliği olmayan kil ve killi zemin tabakalarının sıklıkla yinelenmesi ve sıvılaşmayan zeminlerin sondajların büyük bölümünü oluşturması sebebiyle, bu çalışmada eşdeğer doğrusal analiz modeli ile frekans tanım alanında hesap yapılması uygun görülmüştür. Dinamik zemin davranışı analizlerinde 1977 İzmir (M=5.3), 1992 Doğanbey (M=6.0), 1995 Dinar (M=6.0) ve 1999 Kocaeli (M=7.4) depremlerine ait ivme-zaman kayıtları kullanılmıştır.

4.2. Sıvılaşma Analizi (Liquefaction Analysis)

4.2.1. NCEER Yöntemi (NCEER Method)

Sıvılaşma analizi için yaygın olarak kullanılan ve en pratik yöntem olan basitleştirilmiş sıvılaşma analiz yöntemi, Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilmiştir. Yöntem, TBDY (2018)'de sıvılaşma analizi için uygulanması tavsiye edilen bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. SPT-N değerlerini dikkate alarak uygulanan bu yöntem, yıllar içinde farklı araştırmacılar tarafından değiştirilmiştir. Bu değiştirilen yöntemlerden biri olan Youd vd. (2001) yöntemi, zeminin sıvılaşması için gerekli tekrarlı direnç oranının (CRR), depremin oluşturduğu tekrarlı gerilme oranıyla (CSR) karşılaştırılması sonucu zeminin sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörünün (FS) belirlenmesi esasına dayanmaktadır.

Tekrarlı gerilme oranının formülü, aşağıdaki Eşitlik (1)'de gösterilmiştir:

$$CSR = 0.65(a_{maks}/g) (\sigma_{v0} / \sigma'_{v0}) r_d \quad (1)$$

Burada; a_{maks} deprem sırasında zemin yüzeyinde oluşan maksimum yatay yer ivmesi, g yerçekimi ivmesi, σ_{v0} ve σ'_{v0} toplam ve efektif yüzey gerilmeleri ve r_d gerilme azaltma katsayısıdır.

Gerilme azaltma katsayısı (r_d), Eşitlik (2)'de verilen formülle bulunmaktadır. Formüldeki z değeri derinliği (m) göstermektedir.

$$r_d = \frac{(1.000 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5})}{(1.000 - 0.4177z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.001210z^2)} \quad (2)$$

Tekrarlı direnç oranı moment büyüklüğü 7.5 olan depreme göre düzenlenmiştir. Buna göre kum zeminlerde tekrarlı direnç oranı hesaplanırken (CRR_{M7.5}) formülü kullanılmıştır (Eşitlik 3). Formüldeki $N_{1(60)CS}$ değeri temiz kum düzeltmesi yapılmış SPT-N değeridir.

$$CRR_{M7.5} = \frac{1}{34 - N_{1(60)CS}} + \frac{N_{1(60)CS}}{135} + \frac{50}{[10N_{1(60)CS} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (3)$$

Temiz kum düzeltmesi sadece kum zeminlerde uygulanmaktadır. CRR değerlerinin ince dane oranının artması ile artmasının ve bu artışın sebebinin sıvılaşma dayanımının artması veya penetrasyon direncinin azalması nedeniyle olabileceği düşünülmektedir. Bu sebeple, ince dane oranının tekrarlı dayanım oranı üzerindeki etkisini ifade etmek üzere $N_{1(60)CS}$ değerinin bulunması ve kullanılması önerilmiştir (Youd vd, 2001). Bu değer nasıl bulunacağı aşağıda gösterilmiştir (Eşitlik 4).

$$N_{1(60)CS} = \alpha + \beta N_{1(60)} \quad (4)$$

Burada, α ve β değerleri katsayılarıdır. Bu katsayılar ince dane oranına göre, yani No.200 eleğin altında kalan yüzdelik kısma göre belirlenir.

Sıvılaşma güvenlik faktörü (FS) aşağıda verilen Eşitlik (5) ile bulunur.

$$FS = (CRR_{M7.5} / CSR) * MSF \quad (5)$$

Buradaki MSF, büyüklük düzeltme faktörüdür. MSF hesaplaması için kullanılan formül aşağıda Eşitlik (6)'da verilmiştir. (M_w : Deprem moment büyüklüğü).

$$MSF = 10^{2.24} / M_w^{2.56} \quad (6)$$

Bu hesaplamalar sonucunda, TBDY (2018)'e göre FS değerinin 1.1'den küçük olması durumunda tabakanın sıvılaşma riski taşıdığı ifade edilebilmektedir.

4.2.2. Iwasaki vd. (1984) Yöntemi (Iwasaki et al., 1984 Method)

Bu yöntemde, 20 m'ye kadar derinlikler için, zeminin sıvılaşmaya karşı gösterdiği dirence bakılır. Bu yöntem sayesinde bulunacak sıvılaşma potansiyeli indeksi (I_L) sıvılaşmanın derecesini göstermektedir. Yöntem uygulanırken, basitleştirilmiş sıvılaşma analizinden elde edilen güvenlik katsayısı (FS) değerleri kullanılmıştır. Buna göre I_L değeri Eşitlik 7'deki gibi hesaplanmıştır. Bu eşitlikte, $W(Z)$, derinliğe bağlı olarak hesaplanan bir değişkendir. Bulunacak I_L değerinin yorumlanması ise aşağıdaki tablodaki gibidir (Tablo 2).

$$I_L = \int_0^{20} FS * W(Z) dZ \quad (7)$$

Tablo 2. I_L değerine bağlı Sıvılaşma riski (Liquefaction risk according to I_L)

I_L	Risk
$I_L = 0$	Sıvılaşma riski çok düşük
$0 < I_L \leq 5$	Sıvılaşma riski düşük
$5 < I_L \leq 15$	Sıvılaşma riski yüksek
$I_L > 15$	Sıvılaşma riski çok yüksek

4.3. İnceleme Alanına Özel V_S -SPT- N_{30} Korelasyonu (A V_S -SPT- N_{30} Correlation Special for the Investigation Area)

MASW yöntemi, zemin tabakalarının kayma dalgası hızlarının derinlikle değişimini ölçmede yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle V_{S30} , yani ilk 30 m'nin kayma dalgası hızı ölçümünde sağlıklı sonuçlar vermektedir. İnceleme alanında 7 adet serimle yapılan MASW çalışması sonucunda zemin yüzeyinden 30 m derinliğe kadar olan tabakaların kayma dalgası hızı değerleri belirlenmiştir. İnceleme alanında, derinlikleri 30.45 m ile 50.45 m arasında değişen 16 adet sondaj kuyusunun açıldığı ve anakaya derinliğinin 60 m'de olduğu bilinmektedir. Sondaj kuyularının altındaki tahmini zemin tabakalarını belirlemek için de 3 boyutlu zemin modellemesi sonuçları detaylı bir şekilde incelenerek kullanılmıştır. Böylece derinlikleri 60 m olan 16 adet zemin profili oluşturulmuştur. DEEPSOIL programı, ile dinamik zemin davranış analizi gerçekleştirebilmek için, kayma dalgası hızı verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. İnceleme alanına özel olarak türetilen V_S -SPT- N_{30} korelasyonu (Eşitlik 8) kullanılarak, 30-60 m derinlikleri arasındaki zemin tabakalarının kayma dalgası hızı değerleri, SPT-N değerlerine bağlı olarak saptanmıştır. Geçmiş çalışmalarla elde edilen V_S -SPT-N korelasyonları da, bu çalışmada dikkate alınmıştır (Tablo 3).

V_S -SPT- N_{30} korelasyonunun geliştirilmesinde kullanılan MASW yöntemi ile ölçülen kayma dalgası hızı değerleri ve SPT-N değerleri Tablo 4'te, türetilen denklem ise Eşitlik (8)'de verilmiştir.

Bu çalışmada, inceleme alanı zeminleri için

$$V_s = 107N^{0.27} \quad (8)$$

korelasyonu elde edilmiştir.

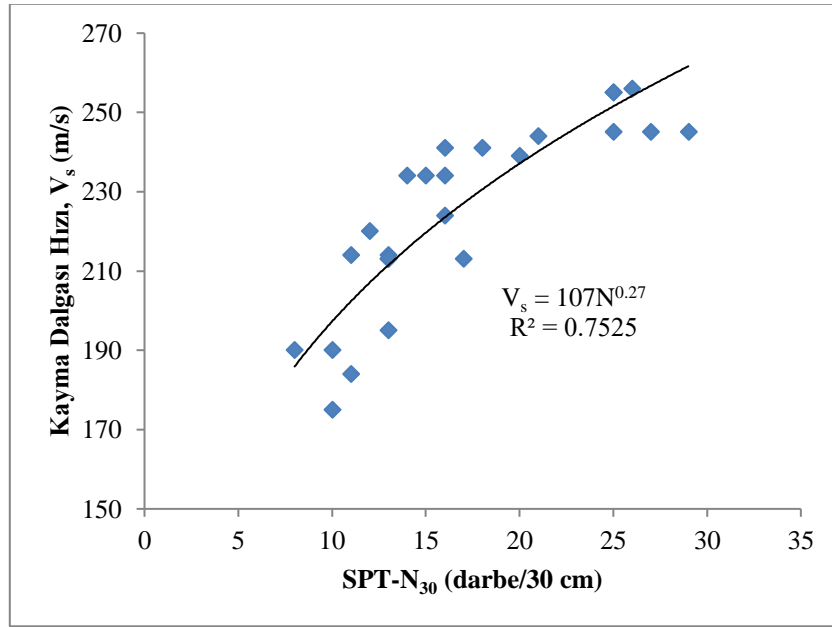
Bu eşitliğin korelasyon katsayısı, $R^2=0.7525$ olarak bulunmuştur (Şekil 7). Bu korelasyon ilişkisinde tüm zemin türleri dikkate alındığından, Eşitlik (8), Athanasopoulos'un (1995) önerisine yakın bulunmuştur (Tablo 3).

Tablo 3. Farklı araştırmacıların zemin türlerine göre Vs-SPT-N korelasyon önerileri (Kirar vd., 2016'dan)
(Vs-SPT-N correlations proposed by various researchers according to the type of soils (from Kirar vd., 2016))

Araştırmacılar	Tüm Zemin Türleri için	Kum Zeminler İçin	Kil Zeminler için
Uma Maheswari vd., (2010)	$95.64N^{0.301}$	$100.53N^{0.265}$	$89.31N^{0.358}$
Ohba ve Toriumi (1970)	$84N^{0.31}$	-	-
Ohta ve Goto (1978)	$85.35N^{0.348}$	$88N^{0.33}$	-
Seed ve Idriss (1981)	$61N^{0.5}$	-	-
Hasancebi ve Ulusay (2007)	$90N^{0.309}$	$90.8N^{0.319}$	$97.9N^{0.269}$
İyisan (1996)	$51.5N^{0.516}$	-	-
Athanasopoulos (1995)	$107.6N^{0.36}$	-	-
Kiku vd., (2001)	$68.3N^{0.292}$	-	-
Kirar vd., (2016)	$99.5N^{0.345}$	$100.3N^{0.338}$	$94.4N^{0.379}$

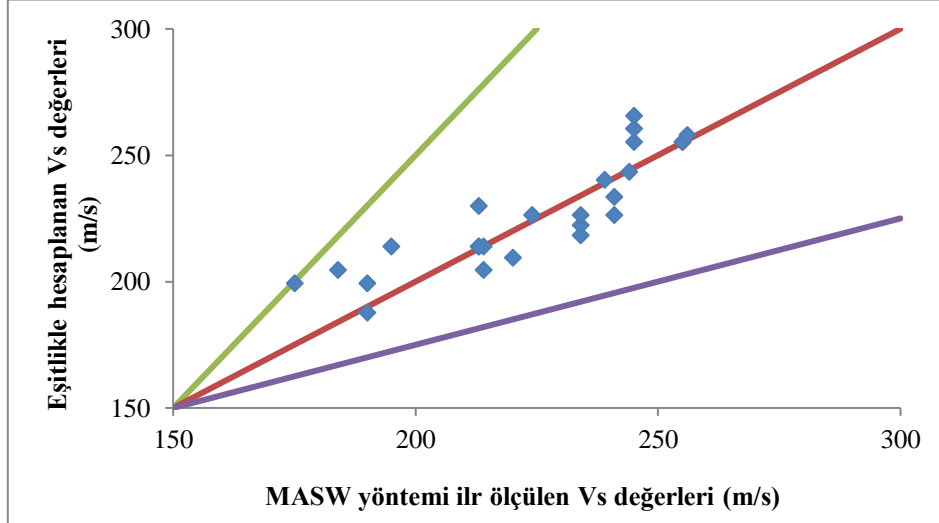
Tablo 4. Vs-SPT-N korelasyonu için seçilen veriler (Selected data for Vs-SPT-N correlation)

Sondaj No.	Ölçülen V_s değerleri (m/sn)	SPT-N	Derinlik (m)
SK-1	175	10	4.5
SK-1	220	12	11.5
SK-1	256	26	22
SK-2	184	11	4.5
SK-2	213	17	17
SK-2	244	21	24
SK-5	234	15	19
SK-5	245	27	24.5
SK-6	234	16	17.5
SK-6	245	29	21
SK-7	213	13	6
SK-7	255	25	14.5
SK-9	213	13	6.5
SK-9	255	25	12
SK-11	224	16	6
SK-11	234	14	15
SK-11	245	25	24
SK-12	195	13	6
SK-12	239	20	11
SK-13	190	8	6
SK-13	214	13	12
SK-13	241	18	25.5
SK-16	190	10	5
SK-16	214	11	17.5
SK-16	241	16	22



Şekil 7. Bu çalışmada elde edilen V_s -SPT- N_{30} korelasyonu ve korelasyon katsayısı (V_s -SPT- N_{30} correlation obtained from this study and the coefficient of correlation)

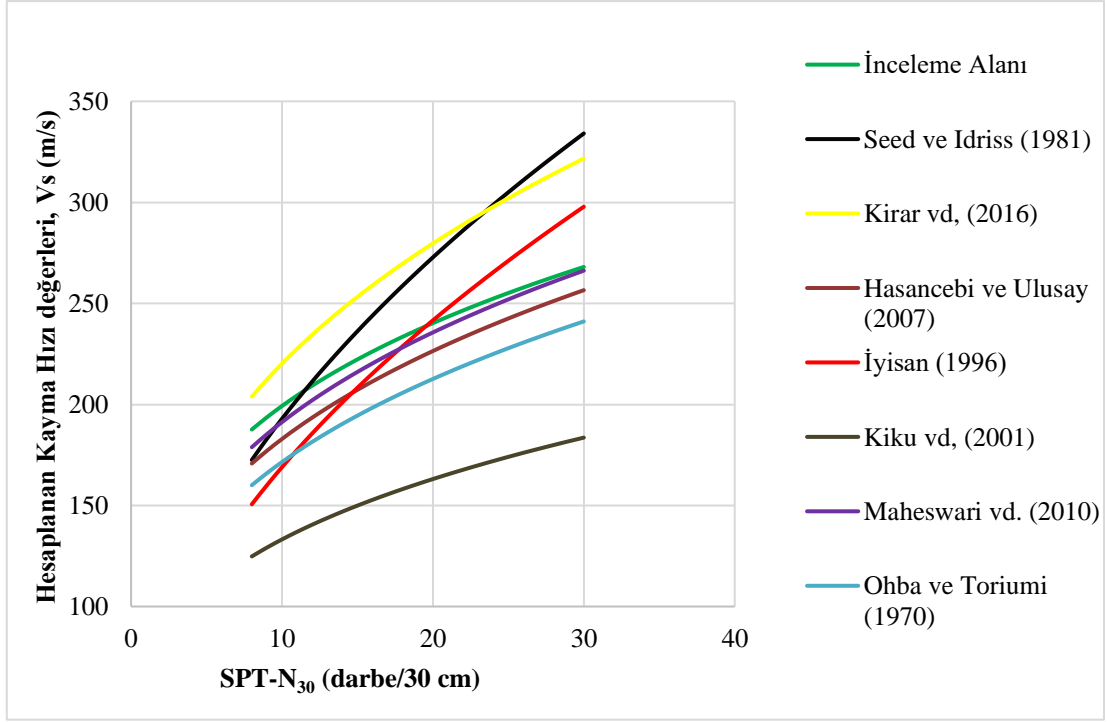
Bulunan korelasyonun kullanılabilirliğini değerlendirmek için bazı kontrollerin yapılması gerekmektedir (Kirar vd., 2016). MASW uygulamasıyla ölçülen kayma dalgası hızı değerleri ile eşitlikten bulunacak kayma dalgası hızı değerlerinin arasındaki farkı inceleyerek, bu farkın kabul edilebilir değerler arasında olduğunu göstermek gerekli olmaktadır. Şekil 8'de, yapılan bu kontrole ilişkin olarak hazırlanan grafik gösterilmektedir. MASW yöntemi ile ölçülen ve eşitlikle hesaplanan değerlerin kabul edilebilir aralığı, Şekil 8'deki yeşil ve mor renkler ile çizilen ve %25 farkı ifade eden üst ve alt sınır doğrularının arasında kalan bölgedeki değerlerin kabul edilebilir olduğu gösterilmiştir (Kirar vd., 2016).



Şekil 8. MASW yöntemi ile ölçülen V_s değerleriyle korelasyondan elde edilen V_s değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of V_s values measured from MASW method and V_s values obtained from the correlation)

İnceleme alanı için bu çalışmada Eşitlik 8'den elde edilen korelasyon ile, önceki çalışmalarda tüm zemin türleri için elde edilen ilişkiler karşılaştırılmıştır. Buna göre; bu çalışmada elde edilen korelasyon ilişkisinin Athanasopoulos (1995) ilişkisine yakın sonuç vermesinin yanında, Maheswari vd., (2010) ile Hasançebi ve Ulusay (2007) ilişkileri ile de yakınlık gösterdiği sonucuna varılmıştır (Şekil 9).

Buna göre, zemin profilinde SPT deneyinin yapılabildiği ve SPT-N değeri belirlenebilen, ancak V_s değerleri ölçülemeyen zemin tabakalarının kayma dalgası hızı değerlerinin, bu korelasyon ilişkisinden elde edilebileceği kabul edilmiştir. Bu kayma dalgası hızı değerleri, dinamik zemin davranışı analizlerinde kullanılabilir.



Şekil 9. Bu çalışmada elde edilen korelasyon ile önceki çalışmalarda önerilen ilişkilerin karşılaştırılması (Comparison of the correlation obtained in this study with relationships proposed in the past studies)

5. Analiz Sonuçları (Results of the Analyses)

5.1. Dinamik Yer Tepki Analizi Sonuçları (Results of the Dynamic Site Response Analysis)

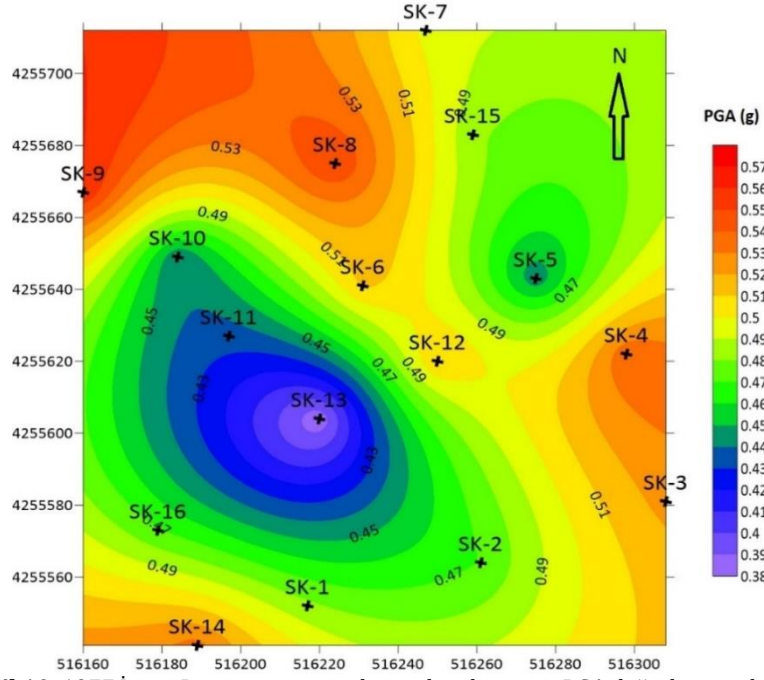
Dinamik yer tepki analizleri için seçilen depremlere ait bilgiler Tablo 5'te sunulmaktadır.

Tablo 5. Analizler için seçilen depremlere ait veriler (Information about the earthquakes selected for the analyses)

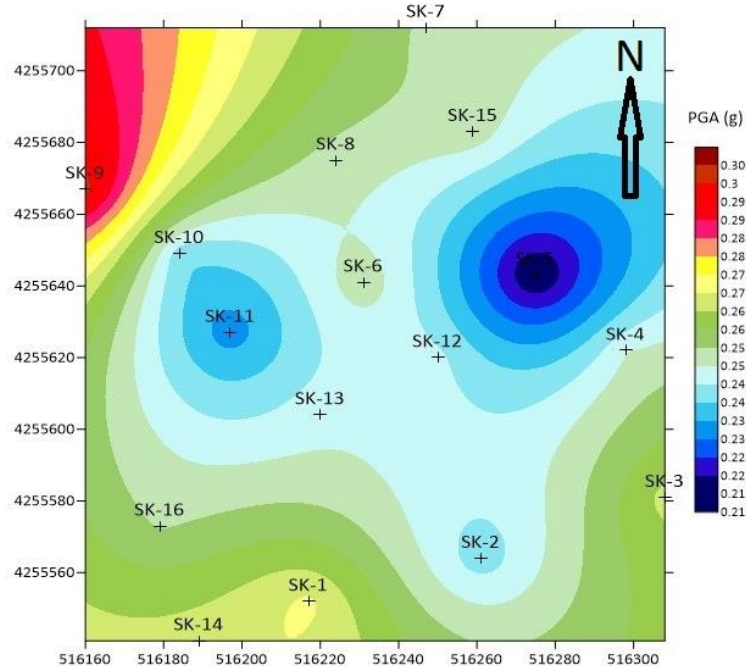
Depremler	Tarihler	Kayıt İstasyonu	Fay Hattı	Fay Mekanizması	Büyüklik (M)	PGA (g)
1977 İzmir	16.12.1977	Poligon, İzmir	İzmir	Normal Fay	5.3	0.39
1992 Doğanbey	6.11.1992	Kuşadası, İzmir	Tuzla	Doğrultu atımlı (sağ yönlü)	6.0	0.20
1995 Dinar	1.10.1995	İzmir	Dinar	Normal Fay	6.4	0.20
1999 Kocaeli	17.08.1999	Bornova, İzmir	Kuzey Anadolu	Doğrultu atımlı	7.5	0.20

Bu deprem ivme kayıtları kullanılarak, DEEPSOIL (Hashash vd., 2016) programı ile 16 adet sondaj konumundaki zemin profillerinin bu 4 depremde göstereceği en büyük yer ivmesi değerleri (PGA) ve en büyük spektral ivme değerleri (PSA) ile ivme ve spektral ivme cinsinden zemin büyütmesi değerleri belirlenmiştir. Bu veriler kullanılarak, inceleme alanında bu parametrelerin dağılımı, Surfer V. 18.00 (Surface Mapping System) haritalama programı yardımıyla belirlenmiştir.

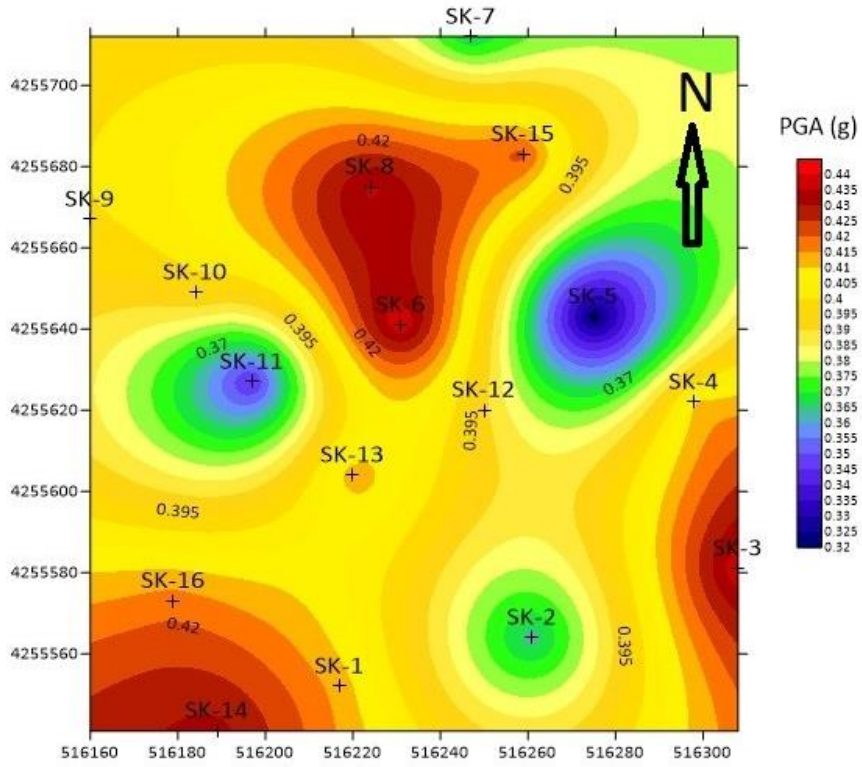
Aşağıdaki haritalarda (Şekil 10-17), dinamik analizi yapılan 4 adet depremin oluşturacağı kuvvetli yer hareketi parametrelerinin alansal dağılımı gösterilmektedir.



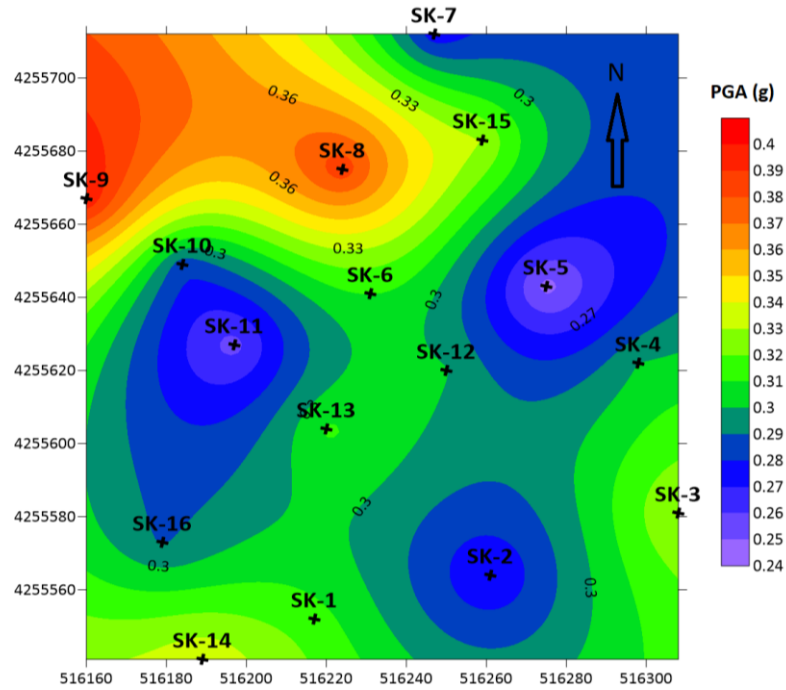
Şekil 10. 1977 İzmir Depremi için inceleme alanı boyunca PGA değerlerinin dağılımı
(Distribution of the PGA values along the investigated area for the 1977 Izmir Earthquake)



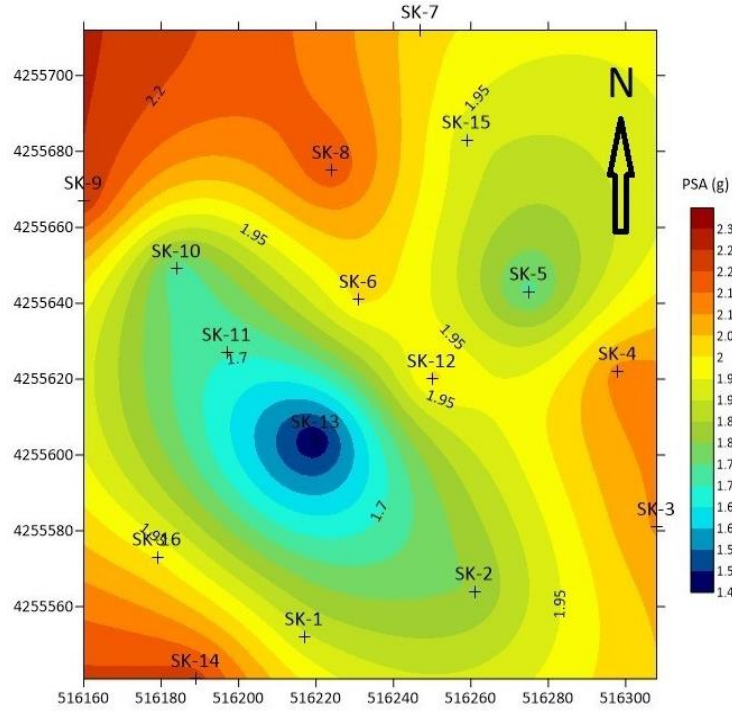
Şekil 11. 1992 Doğanbey Depremi için inceleme alanı boyunca PGA değerlerinin dağılımı
(Distribution of the PGA values along the investigated area for the 1992 Doganbey Earthquake)



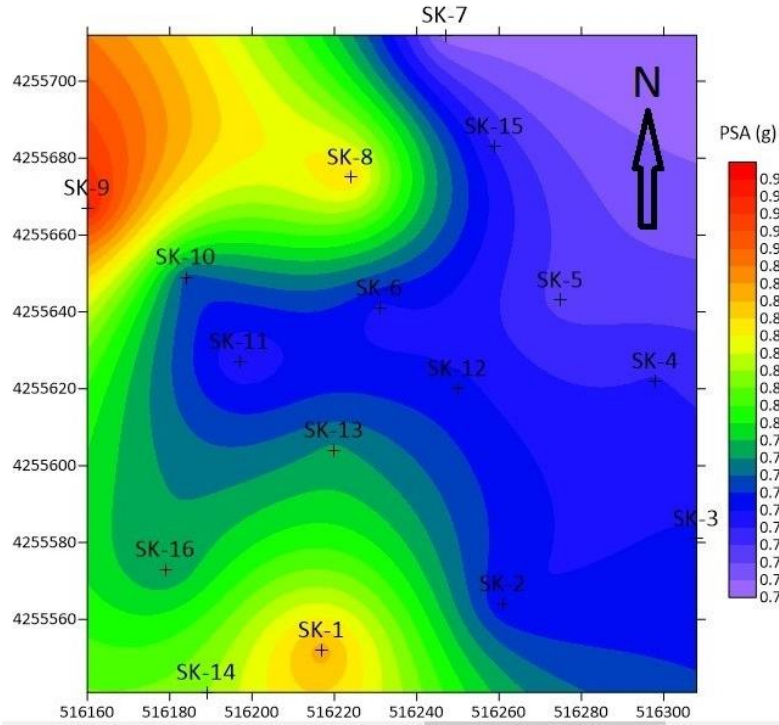
Şekil 12. 1995 Dinar Depremi için inceleme alanı boyunca PGA değerlerinin dağılımı
(Distribution of the PGA values along the investigated area for the 1995 Dinar Earthquake)



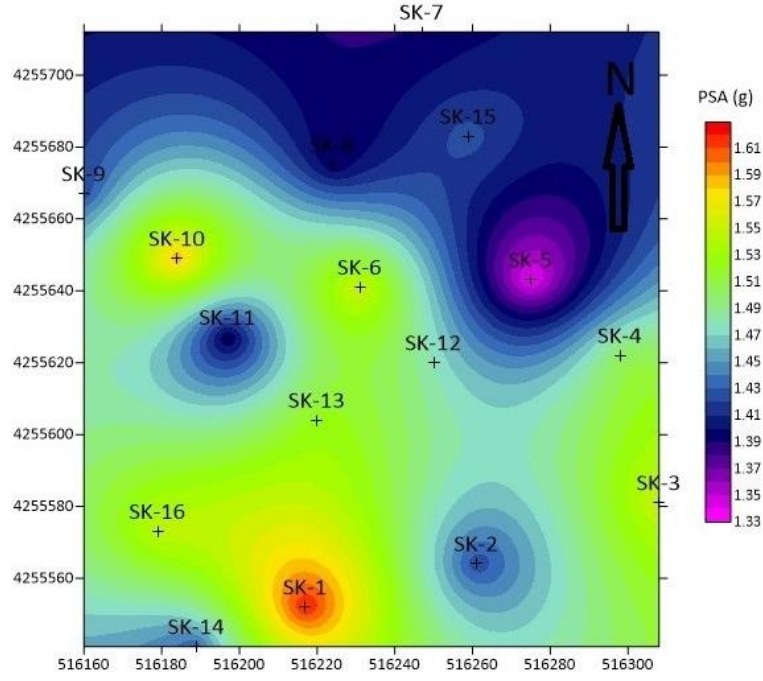
Şekil 13. 1999 Kocaeli Depremi için inceleme alanı boyunca PGA değerlerinin dağılımı
(Distribution of the PGA values along the investigated area for the 1999 Kocaeli Earthquake)



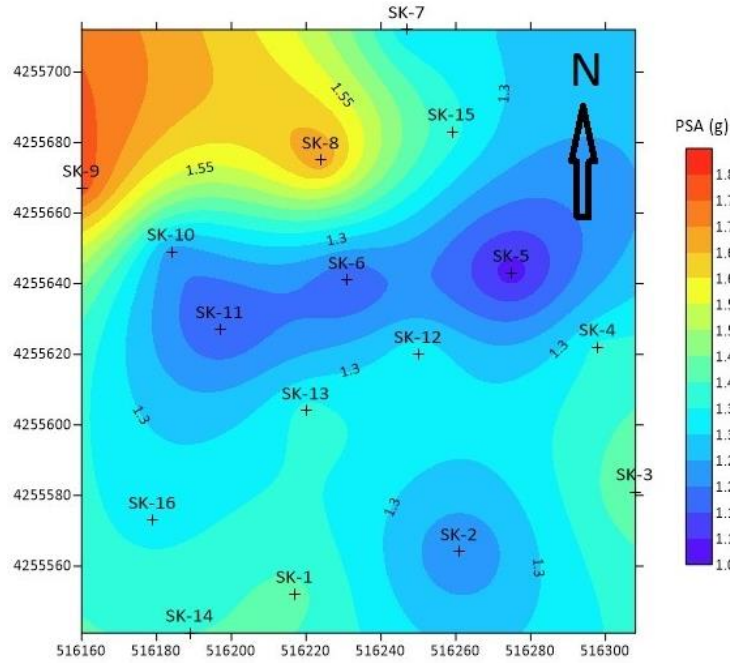
Şekil 14. 1977 İzmir Depremi için inceleme alanı boyunca PSA değerlerinin dağılımı
(Distribution of the PSA values along the investigated area for the 1977 Izmir Earthquake)



Şekil 15. 1992 Doğanbey Depremi için inceleme alanı boyunca PSA değerlerinin dağılımı
(Distribution of the PSA values along the investigated area for the 1992 Doganbey Earthquake)



Şekil 16. 1995 Dinar Depremi için inceleme alanı boyunca PSA değerlerinin dağılımı
(Distribution of the PSA values along the investigated area for the 1995 Dinar Earthquake)



Şekil 17. 1999 Kocaeli Depremi için inceleme alanı boyunca PSA değerlerinin dağılımı
(Distribution of the PSA values along the investigated area for the 1999 Kocaeli Earthquake)

1977 İzmir depremi ile analiz yapıldığında PGA değerleri 0.38 g ile 0.56 g, PSA değerleri ise 1.45 g ile 2.25g aralığında değişim göstermiştir. 1992 Doğanbey depremi etkisinde PGA değerleri 0.21 g ile 0.3 g, PSA değerleri ise 0.7 g ile 0.94 g aralığında değerler almıştır. 1995 Dinar depremi ile analiz yapıldığında PGA değerleri 0.32 g ile 0.44 g, PSA değerleri ise 1.33 g ile 1.66 g aralığında değişim göstermiştir. 1999 Kocaeli depremi etkisinde PGA değerleri 0.24 g ile 0.4 g, PSA değerleri ise 1.05 g ile 1.8 g aralığında değerler almıştır. Bu sonuçlara göre, en yüksek PGA ve PSA değerleri İzmir Fayı'nın inceleme alanına çok yakın olması nedeniyle 1977 İzmir depreminde, en küçük PGA ve PSA değerleri ise yaklaşık 60 km mesafede meydana gelen 1992 Doğanbey depreminde gözlemlenmiştir. 16 sondajdan elde edilen PGA değerleri incelenecek olursa, tüm sondaj loglarında ve tüm deprem kayıtları için alüvyon özellikteki zemin profilleri, anakayadan gelen ivme değerlerini büyütme eğilimi göstermiştir.

Sahada hâkim olan alüvyon zemin, 1977 İzmir depremi için yer ivmesi değerini %16.7, spektral ivme değerini %37.3, 1992 Doğanbey depreminde yer ivmesi değerini %26.5, spektral ivme değerini %24.5, 1995 Dinar depreminde yer ivmesi değerini %99.9, spektral ivme değerini %68.9, 1999 Kocaeli depreminde yer ivmesi değerini %54.4, spektral ivme değerini %66.7 oranında arttırmıştır.

5.2. Sıvılaşma Analizi Sonuçları (Results of the Liquefaction Analysis)

İnceleme alanında, NCEER (Ishihara vd., 2001) ve Iwasaki vd. (1984) sıvılaşma analiz yöntemleriyle ve TBDY (2018)'de önerilen yöntemle analiz yapıldığında, alanda sıvılaşma potansiyelinin mevcut olduğu, yani zemin yüzeyinden itibaren 20 m derinliğe kadar olan bölgede, yer altı su seviyesinin altında yer alan, suya doygun, gevşek kum, siltli kum, non-plastik silt ve silt-kum karışımlarının oluşturduğu toplam 41 adet zemin tabakası bulunmuştur. Bu zemin tabakalarına, dinamik yer tepki analizlerinde kullanılan dört adet depremin ivme ve moment büyüklükleri değerleri uygulanmıştır.

NCEER (Ishihara vd., 2001) ve TBDY (2018) yöntemlerine göre, en çok sıvılaşabilir zeminlerin olduğu, yani sıvılaşma güvenlik faktörünün 1.1'den küçük çıktığı senaryo, moment büyüklüğünün ($M=7.5$) ve anakaya ivmesinin ($a_{maks}=0.2g$) olduğu 1999 Kocaeli depremi senaryosu olmuştur. Bu senaryoda, 41 adet sıvılaşma potansiyeli bulunan zemin tabakasının 30'u sıvılaşabilir durumda çıkmıştır. 1992 Doğanbey depremi ($M=6.0$) için 8 adet, 1995 Dinar depremi ($M=6.4$) için 14 adet sıvılaşabilir tabaka çıkmıştır. 1977 İzmir depremi senaryosu için de, depremi oluşturabilecek İzmir Fayı'nın inceleme alanına çok yakın mesafede olması nedeniyle yüzey ivmelerinin yüksek olması sonucunda 26 adet sıvılaşabilir tabaka belirlenmiştir. Bir diğer bulgu ise, inceleme alanındaki bütün düşük plastisiteli silt (ML) türü zeminlerin 4 deprem senaryosunda da sıvılaşabilir durumda çıkmasıdır.

Iwasaki vd. (1984) yöntemine göre ise, 1999 Kocaeli depremi için ($M=7.5$) belirlenen 30 adet sıvılaşabilir zemin tabakasının güvenlik faktörleri, bu yöntemde veri olarak kullanılmıştır. İnceleme alanında açılmış olan SK-8, 9, 10, 12, 13, 14, 15 ve 16 no'lu sondaj kuyularından elde edilen I_L değerleri ve bu değerlere karşılık gelen sıvılaşma riskleri, Tablo 6'da verilmektedir.

Tablo 6. Sondaj kuyuları için Iwasaki vd. (1984) yöntemine göre belirlenen I_L değerleri ve sıvılaşma riskleri (I_L values determined from Iwasaki et al., 1984 method and liquefaction risks for boreholes)

Sondaj No.	I_L	Sıvılaşma Riski
SK-8	6.64	Yüksek
SK-9	1.15	Düşük
SK-10	7.07	Yüksek
SK-12	1.58	Düşük
SK-13	19.58	Çok Yüksek
SK-14	6.98	Yüksek
SK-15	12.89	Yüksek
SK-16	7.66	Yüksek

Iwasaki vd. (1984) yöntemi, sadece Tablo 6'da verilen, birden fazla sıvılaşabilir zemin tabakasının bulunduğu sondaj kuyularında uygulanabilmektedir. Diğer sondaj kuyularında birden fazla sıvılaşabilir tabaka bulunmadığından ve bu sondaj kuyularında eğer oluşacaksa sadece noktasal sıvılaşmanın oluşabileceği göz önüne alındığında, I_L değerlerinin hesaplanmasına gerek duyulmamıştır. Bu sonuçlara göre, SK-1, 2, 3 ve 4'te sıvılaşma riski bulunmazken, SK-5, 6 ve 11'de sadece tek tabakada oluşabilecek noktasal bir sıvılaşma gözlemlenmiştir. SK-9 ve 12'de düşük sıvılaşma riski belirlenirken, SK-8, 10, 14, 15 ve 16'da yüksek sıvılaşma riski, SK-13'te çok yüksek sıvılaşma riski oluşabileceği saptanmıştır.

5. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Bu çalışma kapsamında, İzmir ili Bornova ilçesinde bulunan bir inşaat alanı zeminleri için yapılmış olan arazi zemin sondajları ve MASW çalışmaları ile laboratuvar deney bulguları kullanılarak, inşaat alanı zeminlerinin dinamik davranışı ve sıvılaşma riski, dinamik yer tepki analizleri ve yaygın olarak uygulanan sıvılaşma analiz yöntemleri ile incelenmiştir. Ayrıca, inceleme alanı zeminlerine özel olarak kayma dalgası hızı (V_s) ile standart penetrasyon direnci (SPT- N_{30}) arasında bir korelasyon ilişkisi geliştirilmiş, literatürde mevcut ilişkiler ile kıyaslandığında anlamlı sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Bu ilişki çıkarılırken arazide MASW yöntemi ile ölçülen kayma dalgası hızı değerleri de kullanılmıştır. Böylece, zeminde kayma dalgası hızının ölçülemediği derinlik

seviyelerinde, bu korelasyon ilişkisi yardımıyla kayma dalgası hızını yaklaşık olarak belirleyebilmek ve dinamik analizlerde kullanabilmek mümkün olabilecektir.

Dinamik zemin davranışı analizleri yapılırken, bir boyutlu ve frekans tanım alanında eşdeğer doğrusal analiz yönteminin uygulanması uygun görülmüştür. Bu yöntemin seçiminde, alanda mevcut bulunan suya doygun, kalın alüvyon zemin koşulları ve TBDY (2018)'e uygunluk çerçevesinde karar verilmiştir. Dinamik zemin davranışı analizleri, DEEPSOIL programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Dinamik zemin davranışı analizlerinin sonucunda elde edilen zemindeki en büyük yer ivmesi (PGA) ve spektral ivme (PSA) değerlerinin alandaki dağılımı, SURFER haritalama programı yardımıyla elde edilmiştir. Yakın mesafe depremi olarak 1977 İzmir (M=5.3) depremi ile analiz yapıldığında, PGA değerleri 0.38 g-0.56 g, PSA değerleri ise 1.45 g-2.25g aralığında değişmektedir. Uzak mesafe depremi olarak 1992 Doğanbey (M=6.0) depremi ile analiz yapıldığında ise, PGA değerleri 0.21 g-0.3 g, PSA değerleri 0.7 g-0.94 g aralığında değişim göstermiştir. Bu değerler, inceleme alanının yakın olduğu bölgeler için daha önceden yapılan RADIUS (1999), Bozkurt (2010), Kuruoglu ve Eskişar (2015) çalışmalarında elde edilen sonuçlarla uyum göstermektedir. 1995 Dinar (M=6.4) ve 1999 Kocaeli (M=7.5) depremleri ile de dinamik analizler yapılmış, 1995 Dinar depremi için PGA değerleri 0.32g-0.44 g, PSA değerleri ise 1.33 g-1.66 g aralığında, 1999 Kocaeli depremi için ise PGA değerleri 0.24 g-0.4 g, PSA değerleri ise 1.05 g-1.8 g aralığında değerler almıştır. Dört depremin ivme kayıtlarının analiz edilmesiyle en yüksek yüzey ivmesi (PGA) değerleri ele alındığında, bu değerlerin 0.21 g ile 0.56 g arasında değiştiği belirlenmiştir. TBDY (2018)'deki hesap yöntemlerine temel oluşturan Türkiye Deprem Tehlike Haritaları uygulamasında, inşaat alanı için yaklaşık PGA değeri 0.454 g olarak verilmektedir. Bu değer, inceleme alanına oldukça yakın olan 1977 İzmir depremi için elde edilen ortalama PGA değeriyle (0.47 g) yakınlık göstermektedir.

İnceleme alanındaki gibi suya doygun alüvyon zemin profillerinde, alana göreceli olarak uzak mesafede oluşacak depremlerin etkilerinin incelenmesi, önem taşımaktadır. Bu sayede, uzak mesafeden gelen deprem hareketi inceleme alanına ulaştığında kısa periyot harmoniklerinin filtrelenmesi ve uzun periyot harmoniklerinin, hâkim periyotları yüksek olan alüvyon zemin koşullarında büyütme etkisi oluşturmaları söz konusudur. 1992 Doğanbey (M=6.0) depremi için analiz yapıldığında, PGA değerleri için 3.5-5 kat arasında zemin büyütme oranları belirlenmiştir. En yüksek spektral ivme (PSA) değerlerinde, PGA değerlerine benzer büyütme oranları saptanmıştır. Bu çalışmada uzak mesafe depremleri için elde edilen zemin büyütme oranları, RADIUS (1999), Bozkurt (2010), Kuruoglu ve Eskişar (2015) çalışmalarında belirlenen zemin büyütme oranlarına yakın sonuçlar vermektedir. Söz konusu çalışmalarda 1977 İzmir depremi için 2-2.5 kata, 1992 Doğanbey depremi için 4.5-5 kata ulaşan zemin büyütme oranları elde edilmiştir.

Dinamik zemin davranışı analizlerinden bulunan sonuçlar ele alınacak olursa, inşaat alanının zemin özelliklerini temsil eden alüvyon zemin koşullarının, kuvvetli depremlerin gerçekleşmesi durumunda en yüksek yer ivmesi ve spektral ivme değerlerini arttırabileceği, yani zemin büyütmesinin ortaya çıkabileceği belirlenmiştir. 1992 Doğanbey (M=6.0), 1995 Dinar (M=6.4) ve 1999 Kocaeli (M=7.5) depremlerine ait ivme-zaman kayıtları analiz edildiğinde, aynı anakaya ivme değerleri girdi olarak alındığında, aynı zemin profillerinde depremin karakteristik özelliğinin de oluşan en yüksek yer ivmesi ve spektral ivme değerlerini etkileyebileceği saptanmıştır. Alanın ivme dağılım haritaları göz önüne alındığında ise, 1977 İzmir depremi de dahil edildiğinde, incelenen dört depremde de inceleme alanının sınırlarına yakın konumlarda bulunan sondaj kuyuları için (SK-3, 8, 9, 14 gibi), en yüksek ivme değerlerinin ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bu yüksek ivme değerlerinin inşaat alanının sınırlarında bulunması ve merkeze doğru gidildikçe ivmelerin küçülmesi, alanın merkezinde yer alan yapıların güvenliğini olumlu yönde etkileyeceği kanaatini uyandırmaktadır.

Sıvılaşma analizi, iki farklı yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemlerin tercih edilme nedenleri, uygulanabilirliği yaygın olan, arazi çalışmaları bulgularına dayalı olarak sıkça tercih edilen yöntemler olmalarıdır. Sıvılaşma analiz yöntemleri sayesinde 16 sondaj kuyusundaki zemin profillerinin sıvılaşma riskleri belirlenmiştir. Sondaj kuyularından çıkartılan zemin profilleri incelendiğinde, alanda ilk 20 m'de gözlemlenen ve "sıvılaşmaz" kabul edilen killi zemin profilinin yaygın olması, başlangıçta inceleme alanında sıvılaşma riskinin düşük olabileceği kanaatini uyandırmıştır. Ancak yapılan sıvılaşma analizleri sonucunda, 1999 Kocaeli depremi (M=7.5) için alanda 30 adet sıvılaşabilir nitelikte tabakanın belirlenmesi, ayrıca Iwasaki vd. (1984) yöntemi ile 5 sondaj kuyusuna ait zemin profilinin sıvılaşma riski yüksek ve 1 sondaj kuyusuna ait zemin profilinin sıvılaşma riskinin çok yüksek çıkması, incelenen alanda sıvılaşmanın birkaç konumda meydana gelebileceğinin bir göstergesidir. RADIUS (1999), Bozkurt (2010), Kuruoglu ve Eskişar (2015) çalışmalarında da incelenen alanların belirli konumlarında ve büyüklüğü 6.0'dan yüksek depremlerin gerçekleşmesi durumunda sıvılaşma meydana gelebileceği sonucuna varılmıştır. Bu çalışma ile önceki çalışmaların sonuçları birbirleriyle uyum göstermektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Athanasopoulos, G.A., 1995. Empirical correlations V_{so} - N_{SPT} for soils of Greece: a comparative study of reliability, Proceedings of the 7th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering Computation Mechanics Publications, Southampton, Boston, 19-25.
- Bozkurt, B.H., 2010. İzmir Körfezi Güney Kıyı Zeminleri için Bir Geoteknik Deprem Mühendisliği Araştırması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 119 s.
- Ceren, K., Karakan, E. 2020. Zemin Analizleriyle Dinamik Davranış Özelliklerinin Belirlenmesine Yönelik Pilot Bir Çalışma: Kahramanmaraş İli Üngüt Mahallesi Örneği, Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 6 (1), 1-11.
- Çetin, K.Ö., Altun, S., Askan, A., Akgün, M., Sezer, A., Kıncal, C., vd., 2022a. The site effects in İzmir Bay of October 30, 2020 M7.0 Earthquake. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 152, Art. No. 107051, Doi: 10.1016/j.soildyn.2021.107051
- Çetin, K.Ö., Mylonakis, G., Sextos, A., Stewart, J.P., 2022b. Reconnaissance of 2020 M7.0 Samos Island (Aegean Sea) Earthquake. Bulletin of Earthquake Engineering, 20 (14), 7707-7712. Doi: 10.1007/s10518-021-01212-y
- Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A., Park, D., 2016. "DEEPSOIL 7, User Manual". Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
- Edinçliler, A., Çalıkoğlu, M., 2018. Nonlinear site response analysis for the İzmir region: A case study, Eurasian Journal of Civil Engineering and Architecture, 2 (2), 51-58.
- Ege Temel Sondajcılık Ltd. Şti., 2015. İzmir ili Bornova ilçesinde bir parsel için Zemin Etüdü Raporu, Bornova-İzmir.
- Eskişar, T., 2008. İzmir Körfezi Kuzey Kıyılarındaki Zemin Özelliklerinin ve Geoteknik Sorunlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Eskişar, T., Kuruoğlu, M., Altun, S., Özyalın, Ş., Yılmaz, H.R., 2014a. Site response of deep alluvial soils in the northern coast of İzmir Bay (Turkey) and a microzonation study based on geotechnical aspects. Engineering Geology, 172, 95-116.
- Eskisar, T., Karakan, E., Altun, S., 2014b. Evaluation of cyclic stress strain and liquefaction behavior of İzmir sand, Arabian Journal Science Engineering, 39 (11), 7513-7524.
- 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 (2), 203-213.
- Iyisan, R., 1996. Correlations between shear wave velocity and in situ penetration test results. Teknik Dergi, İnşaat Mühendisleri Odası, 7, 371-374.
- Iwasaki, T., Arakawa, T., Tokida, K.I., 1984. Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes. International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 3 (1), 49-58.
- Kale, P., 2008. Yerel Arazi Etkilerinin Bir ve İki Boyutlu Analizlerle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 161 s.
- Kiku, H., Yoshida, N., Yasuda, S., Irisawa, T., Nakazawa, H., Shimizu, Y., Ansal, A., Erkan, A., 2001. In situ penetration tests and soil profiling in Adapazari, Turkey. Proceedings of the ICSMGE/TC4 satellite conference on lessons learned from recent strong earthquakes, 259-265.
- Kıran, B. Maheshwari, B.K., Muley, P., 2016. Correlation between shear wave velocity (V_s) and SPT resistance (N) for Roorkee region. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2 (1), 9 p.
- Kramer, S.L., 1996. Geotechnical Earthquake Engineering, Pearson Education India.
- Kuruoğlu, M., 2004. Geographical Information System (GIS) Based Database Development and Evaluation Study for Soils of Northern Coast of İzmir Bay. Doktora Tezi (İngilizce), Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 151 s.
- Kuruoğlu, M., 2019. The effect of local site characteristics on dynamic site response analyses of a major urban area: Warnings of moderate scale earthquakes. Journal of Modern Technology and Engineering, 4 (3), 195-210.
- Kuruoğlu, M., Eskişar, T., 2015. Effect of local soil conditions on dynamic ground response in the southern coast of İzmir Bay, Turkey. Russian Geology and Geophysics, 56 (8), 1201-1212.
- Mert, M., 2018. Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analizlerle Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 140 s.
- Nar, D., 2016. Kocaeli Gölçük İlçesi çöküntü bölgesi yerel zemin özelliklerinin sismolojik ve bir boyutlu zemin davranış analizleri ile karşılaştırılması olarak araştırılması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 176 s.
- Ohba, S., Toriumi, I., 1970. Dynamic response characteristics of Osaka Plain, In: Proceedings of the annual meeting, AIJ (in Japanese).
- Ohta, Y., Goto, N., 1976. Estimation of s-wave velocity in terms of characteristic indices of soil, Butsuri-Tanko, 29 (4), 34-41.
- Ohta, Y., Goto, N., 1978. Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 6 (2), 167-187.
- Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Ground Motion Database, <https://ngawest2.berkeley.edu/>.
- RADIUS, 1999. Earthquake Scenario and Master Plan for the City of İzmir, Final Report, Ed. Prof. Dr. Mustafa Erdik, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul. <https://www.izmir.bel.tr/izmirdeprem/#4sekiller>
- RockWorks, 2020. Golden CO USA: RockWare, Inc.
- Seed, H.B., Idriss, I.M., 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of Soil Mechanics and Foundations Div., 97 (9), 1249-1273.
- Surfer, 2020. Contouring, Gridding, & 3D Surface Mapping, Surfer® from Golden Software, LLC (www.goldensoftware.com)
- Thaker, T.P., Rao, K.S., 2011. Development of statistical correlations between shear wave velocity and penetration resistance using MASW technique. Pan-Am CGS. Geotechnical Conference.

- TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması, 2018. <https://tdth.afad.gov.tr/>
- Uma Maheswari, R., Boominathan, A., Dodagoudar, G.R., 2010. Use of surface waves in statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance of Chennai soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28 (2), 119-137.
- Vucetic, M., Dobry, R., 1991. Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. *Journal of the Geotechnical Engineering*, 117 (1), 89-107.
- Yakut, A., Sucuoğlu, H., Binici, B., Canbay, E., Donmez, C., vd., 2022. Performance of structures in Izmir after the Samos Island Earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20 (14), 7793-7818. Doi: 10.1007/s10518-021-01226-6
- Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., Stokoe, 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*, 127 (4), 297-313.