



T.C. İÇİŞLERİ BAKANLIĞI  
AFET VE ACİL DURUM  
YÖNETİMİ BAŞKANLIĞI

AFAD

# TÜRK DEPREM ARAŞTIRMA DERGİSİ

Haziran  
June

**2021**

Cilt  
Volume

**3**

Sayı  
Number

**2**

TURKISH  
JOURNAL OF  
EARTHQUAKE  
RESEARCH



TUSAK  
Türkiye Ulusal  
Sismoloji ve Arazi  
Fizik Komisyonu  
Ankara / TÜRKİYE

e-ISSN: 2687-301X

**Türk Deprem Araştırma Dergisi (TDAD)**

*Turkish Journal of Earthquake Research*  
( *Turk. J. Earthq. Res.* )

(c) 2021

# Cilt 3 - Sayı 2

Türkiye Ulusal Sismoloji ve Arziçi Fiziği Komisyonu ( TUSAK )  
Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD)

20.12.2021

<i>Sıra</i>	<b>İÇİNDEKİLER</b>	<i>Sayfa No</i>
1	Sonlu Elemanlar Modeli Anomaliliklerinin Sıvı Depolama Tanklarının Sismik Performans Değerlendirmesine Etkisi <i>Kayahan Akgül, Ali Sarı ve Cenk Alhan</i>	110
2	24 Ocak 2020 Sivrice (Türkiye) Depremi (Mw 6.8): Yer Hareketi Tahmin Denklemlerinin Değerlendirilmesi ve Mikrotremor Çalışmaları <i>Erdem Bayrak, Çağlar Özer, Hamit Çakıcı ve Mustafa Engin Kocadağıstan</i>	125
3	Dairesel Tipteki Çöktürme Havuzunun Deprem Altındaki Çalkalanma Analizi <i>Murat Aksel</i>	149
4	Ganos Fayı ile Tekirdağ Baseni Arasında Meydana Gelen Mikro Depremlerin Moment Tensör ve Gerilme Analizleri <i>Burçin Didem Tamtaş, Eşref Yalçınkaya ve Ethem Görgün</i>	167
5	Depremler Arası Sürelerin Dağılım Modelleriyle Değerlendirilmesinde Yeni Bir Yöntem, Türkiye Örneği <i>Hakan Karaca</i>	193



## Effect of Imperfections in FEM Modelling on the Seismic Performance Assessment of Liquid Storage Tanks

Kayahan Akgul<sup>1</sup>, Ali Sari<sup>2</sup> and Cenk Alhan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Istanbul University-Cerrahpasa, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Istanbul, Turkey

<sup>2</sup> Istanbul Technical University, Civil Engineering Faculty, Istanbul, Turkey

ORCID: 0000-0001-7116-529X, 0000-0002-6888-1276, 0000-0002-6649-8409

### Keywords

Atmospheric Tank, 3D Laser Scan, Finite Element Method, Fluid-Structure Interaction, SPH Modelling

### Highlights

- \* Influence of imperfection in Finite Element Method (FEM) modelling
- \* Fluid-Structure Interaction (FSI) modelling with SPH technique
- \* Seismic performance evaluation of atmospheric tanks

### Acknowledgements

--

### Aim

Evaluate influence of imperfections in fem modelling of seismic performance assessment

### Location

--

### Methods

Fluid-structure interaction (FSI) algorithms with SPH technique

### Results

Influence of imperfection in FEM modelling should be ignore in terms of seismic failure mechanism

### Supporting Institutions

--

### Manuscript

Research Article

Received: 27.09.2021

Revised: 10.11.2021

Accepted: 11.11.2021

Printed: 31.12.2021

### DOI

10.46464/tdad.1001504

### Corresponding Author

Kayahan Akgul

Email: kayahanakgul@gmail.com

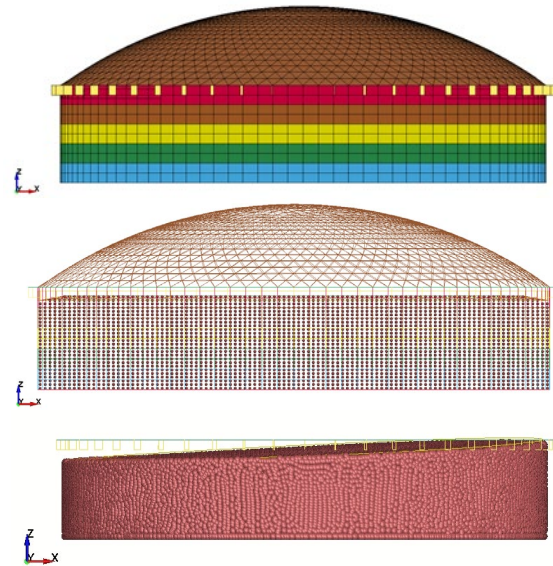


Figure  
Fluid-Structure Interaction of FEM

### How to cite

Akgul K., Sari A., Alhan C., 2021. Influence of Imperfections in FEM Modelling of Seismic Performance Assessment, Turk. J. Earthq. Res. 3 (2), 110-124, <https://doi.org/10.46464/tdad.1001504>



## Sonlu Elemanlar Modeli Anomaliliklerinin Sıvı Depolama Tanklarının Sismik Performans Değerlendirmesine Etkisi

Kayahan Akgül<sup>1</sup>, Ali Sarı<sup>2</sup> ve Cenk Alhan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

ORCID: 0000-0001-7116-529X, 0000-0002-6888-1276, 0000-0002-6649-8409

### ÖZET

Tank-sıvı etkileşiminin doğrusal olmayan (nonlineer) davranış kaynaklarını göz önüne alabilen sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak, sıvı ihtiva eden üç boyutlu atmosferik tankların deprem yükleri altında doğrusal olmayan davranışları incelenmiştir. Sayısal analiz modeli hem tasarım çizim verileri hem de üç boyutlu (3D) Lazer Tarama sonucu elde edilen nokta bulut verileri ile hazırlanmıştır. Sismik performans değerlendirmesi her iki farklı model tipi için üç doğrultulu zaman tanım alanı analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Yapı-sıvı etkileşimi SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) metodu tekniği ile modellenmiştir. Sismik analizlerde deprem yer hareketleri fay mesafelerinin yakınlığı ve kayıt frekans muhtevasına göre seçilmiştir. İki farklı modelleme yaklaşımının karşılaştırılması sismik hasar mekanizmaları üzerinden değerlendirilmiştir.

### Anahtar kelimeler

Atmosferik Tank, 3D Lazer Taraması, Sonlu Elemanlar Metodu, Yapı-Sıvı Etkileşimi, SPH Modelleme

### Öne Çıkanlar

- \* Geometri anomalilerinin sonlu elemanlar modeline yansıtılması
- \* Yapı-sıvı etkileşiminin SPH tekniği ile modellenmesi
- \* Atmosferik tankların sismik performans değerlendirilmesi

### Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 27.09.2021

Düzeltilme: 10.11.2021

Kabul: 11.11.2021

Basım: 31.12.2021

### DOI

10.46464/tdad.1001504

### Sorumlu yazar

Kayahan Akgül

Eposta:

kayahanakgul@gmail.com

## Effect of Imperfections in FEM Modelling on the Seismic Performance Assessment of Liquid Storage Tanks

Kayahan Akgül<sup>1</sup>, Ali Sarı<sup>2</sup> and Cenk Alhan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Istanbul University-Cerrahpasa, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Istanbul, Turkey

<sup>2</sup> Istanbul Technical University, Civil Engineering Faculty, Istanbul, Turkey

ORCID: 0000-0001-7116-529X, 0000-0002-6888-1276, 0000-0002-6649-8409

### ABSTRACT

Fluid-structure interaction (FSI) algorithms of the finite element method (FEM) is employed to evaluate the seismic response of three dimensional (3D) atmospheric tanks containing fluid under seismic loading by taking into account sources of nonlinearity of tanks. Numerical analysis model was generated both design drawing data and point cloud data obtained from 3D Laser Scan Process. All FEA Model was analysed and evaluated by performing dynamic time-history analysis under multi-dimensional. Fluid-structure interaction (FSI) was modelled with SPH technique. 5 pairs of horizontal ground motion time history components (two horizontal components for each ground motion record orthogonal to each other and vertical ground motion) was selected complying with near fault distance and frequency content of motion. Influence of imperfection in FEM modelling was evaluated in terms of seismic failure mechanism.

### Keywords

Atmospheric Tank, 3D Laser Scan, Finite Element Method, Fluid-Structure Interaction, SPH Modelling

### Highlights

- \* Influence of geometrical imperfection in Finite Element Method (FEM) modelling
- \* Fluid-Structure Interaction (FSI) modelling with SPH technique
- \* Seismic performance evaluation of atmospheric tanks

### Manuscript

Research Article

Received: 27.09.2021

Revised: 10.11.2021

Accepted: 11.11.2021

Printed: 31.12.2021

### DOI

10.46464/tdad.1001504

### Corresponding Author

Kayahan Akgül

Email:

kayahanakgul@gmail.com

## 1. GİRİŞ

Türkiye gibi sismik aktivitesi yüksek olan bölgelerde en önemli tehlikelerden bir tanesi depremdir. Deprem etkisi göz önüne alınmamış tesisler için yapılan her risk analizi eksik veya yanlış olacaktır. Geçmişte gözlenen büyük depremler esnasında, sıvı ihtiva eden tanklarda, rezervuarlarda, su alma kulelerinde ve nükleer yapılarda büyük hasarların oluşması, tankların deprem performanslarının değerlendirilmesini yeniden gündeme getirmiştir. Kuvvetli yer hareketi esnasında atmosferik tanklarda sıklıkla görülen hasar mekanizmaları aşağıda sıralanmıştır:

- Fil ayağı burkulması
- Elmas şekil burkulması
- Sıvı serbest yüzeyinde büyük genlikli çalkalanmaların oluşması (sloshing effect)
- Boru bağlantı hasarları
- Tank cidarının burkulması ve büyük genlikli şekil değiştirmesi
- Çatı hasarları
- Kaynak / civata bağlantılarının kopması
- Korozyon
- Tank temelinde oluşan farklı oturmalarından kaynaklı oluşan hasarlar
- Tank içeriğindeki ani boşalma sonucunda oluşan negatif basınç ve patlama

Sıvı ihtiva eden tankların dinamik yüklemeler (tekrarlı) altındaki davranışlarının incelenmesi pek çok bilimsel araştırmaya konu olmuştur. Yapı-sıvı etkileşimi konusunda yapılan ilk çalışma Westergaard (1931) tarafından barajlar üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Housner (1954; 1957; 1963) değişik geometrilere sahip tanklarda, yatay yükler altında oluşan hidrodinamik etkileri incelemek için kısmi diferansiyel denklemler ve seriler içermeyen yaklaşık bir çözüm yöntemi geliştirmiştir. Tankların sismik analizi için hazırlanan API 650 (2018) şartnamesinin temeli, Housner'in 1954 yılında gerçek sıvı akış davranışını basitleştirerek oluşturduğu bu hesaplama işlemine dayanmaktadır. Sismik performans değerlendirme yönteminin temellerinin oluşturulmasının ardından birçok araştırmacı konu üzerinde çalışmıştır (Yang ve Veletsos 1977, Haroun ve Housner 1981, Malhotra ve diğ. 2000, Ozdemir, 2010).

Bu çalışmada tank-sıvı etkileşiminin doğrusal olmayan (nonlinear) davranış kaynaklarını göz önüne alabilen sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak sıvı ihtiva eden üç boyutlu atmosferik tankların, deprem yükleri altında doğrusal olmayan davranışları incelenmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal analiz modeli hazırlanırken ideal geometri için tasarıma esas olan çizim verileri kullanılabilir. Ancak diğer taraftan tesis içerisinde kullanıma devam eden mevcut tank geometrisinde; tank duvarındaki deformasyonlar, tank yuvarlaklığının bozulması (out-of-roundness effects) ve kalıcı deformasyonlar gibi etkenlerden dolayı anomaliler oluşabilir. Sonlu elemanlar modeline tüm bu etkilerin yansıtılması üç boyutlu (3D) Lazer Taraması ile mümkündür. Sayısal analiz modeline, işlenmiş nokta bulut verileri kullanılarak mevcut geometrinin tüm anomalileri aktarılabilir.

3D lazer tarama, objelerin özel ışık yardımıyla nokta bulutları oluşturularak dijitalleştirilmesi teknolojisidir. Fiziksel bir objenin tüm geometrik özelliklerinin üç boyutlu olarak bilgisayara ortamına aktarılması işlemlerini kapsamaktadır (3D Lazer Scan Process). Tarama işlemi sonucu obje (atmosferik tank) bilgisayar ortamında milyonlarca nokta bulutu olarak kaydedilmektedir. Atmosferik tank nokta bulutu, ilk olarak herhangi bir kayıt hatasına karşı modelleme doğruluğunu etkilememesi için kontrol edilir. Verilerin kalitesi ve doğruluğu onaylandıktan sonra, örtüşen noktaları engellemek ve birçok nokta yerine tek bir nokta bulutu oluşturmak için işlenir. Birleştirilmiş veriler üzerinden belirli yüzeydeki tüm deformasyonları

temsil eden eşdeğer ağ modeli ile katı model hazırlanır. Ardından bu model, sonlu elemanlar ağında bölünerek sayısal analiz modeli oluşturulur.

Atmosferik tanklar çatı türlerine göre sabit veya koni çatılı tank, üstü açık içte yüzen çatılı tank ve üstü sabit çatılı içte yüzen çatılı tank olarak gruplandırılabilir. Yanıcı sıvılar genelde büyük konik çatılı tanklarda, daha düşük basınçlı, düşey veya yatay tanklarda veya yer altı tanklarında depolanır. Bu çalışma kapsamında içte yüzen tavana (floating roof) sahip sabit çatılı sistem kullanılmıştır.

## 2. YÖNTEM

LS-Dyna R11.0 (2017), yapı-sıvı ve yapı-zemin etkileşimleri de dâhil olmak üzere, çeşitli türdeki dinamik mühendislik problemleri için başarıyla kullanılabilen dolaylı (explicit) sonlu elemanlar yazılımıdır. Bu çalışmada, yüksek derecedeki esnekliği ve doğrusal elastik olmayan davranışlarının modellenenime başarısından ötürü LS-Dyna, sayısal analiz platformu olarak seçilmiştir. Ayrıca, mevcut malzeme modellerinin çeşitliliği ve sıvı, yapı malzemelerinin şekil değiştirme oranı hassaslığı (strain rate sensitivity) da modellenenilmektedir. Yapı-sıvı etkileşimi problemlerinin çözümü için, Lagrange, Euler, ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) ve SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) yöntemleri bulunmaktadır. Diğer yöntemlere olan üstünlüklerinden ötürü, bu çalışmada, tankların sismik performans analizlerinde SPH metodu tercih edilmiştir.

SPH metodu, sonlu elemanlar analizinde katı-sıvı etkileşiminde kullanılan metotlardan birisidir. Bu metot esas olarak 1977 yılında astrofizik problemleri çözmek için geliştirilmiştir. SPH yöntemi, 90'lı yılların ortalarından itibaren (Monaghan 1994) serbest su yüzeyli akış problemlerinin modellenmesinde kullanılmaktadır. Yöntem, Kernel fonksiyonu kullanarak akışkanın fiziksel davranışını bir interpolasyon üzerinden tanımlamaktadır. Her bir parçacığın fiziksel özellikleri (yoğunluk, basınç, hız, vb.) her zaman adımında güncellenmekte ve böylece her bir parçacığın fiziksel özelliklerinin zamana göre değişimi anlık olarak takip edilebilmektedir (Özbulut 2019).

SPH metodu, sonlu elemanlar ağına sahip olmayan (meshless) bir metottur. Sonlu elemanlar ağında tanımlı ve düğüm noktalarıyla birbirine bağlanmış elemanlar yoktur. Model nokta bulut sistemini temsil eden partiküllerden teşkil edilmektedir. SPH metodunun en önemli dezavantajı ise analiz süresinin yüksek olmasıdır. Bu çalışma kapsamında yapı-sıvı etkileşimi SPH metodu ile modellenip yapısal sistem performansı değerlendirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında (Akgül 2021) endüstriyel tesis içerisinde aktif faaliyet gösteren bir atmosferik tankın sismik performans analizi yapılmıştır. Sayısal analiz modeli hem tasarım çizim verileri (Ideal Perfect Model) hem de 3D Lazer Tarama verileri ile hazırlanmıştır. İki farklı modelleme yaklaşımının karşılaştırılması sismik hasar mekanizmaları üzerinden değerlendirilmiştir.

## 3. VERİ

Tank-sıvı etkileşiminin bütün doğrusal olmayan davranış kaynaklarını göz önüne alabilen sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanan LS-Dyna yazılımı ile sıvı ihtiva eden üç boyutlu atmosferik tankların, deprem yükleri altında doğrusal olmayan davranışları incelenmiştir. Tank ve sıvının malzeme özellikleri için gerçek değerler kullanılmıştır.

### 3.1) Tank Geometrilerinin Hazırlanması

Çalışma kapsamında kullanılan analiz modeli için; geçmişteki büyük depremlerin etkisi altında hasar mekanizmaları gözlemlenen tank tipleri (tank yüksekliği, çapı ve çatı tipi) incelenmiştir (NIST GCR 97-720, D'Amico ve Buratti 2019). Seçilen tank geometrisine ait özellikler aşağıda sunulmuştur:

- Yükseklik : 10.50 m
- Çap : 52.50 m
- Doluluk Oranı: %90
- Çatı Tipi : İçte Yüzer Tavan + Sabit Çatı

API 650 (2018) yönetmeliği ile uyumlu olarak kullanılan duvar kalınlıkları Tablo 1'de sunulmuştur. Tank duvarı, yüksekliği boyunca 5 farklı donamdan teşkil edilmiştir. Kuvvetli yer hareketi altında atmosferik tanklarda sıklıkla görülen hasar mekanizmalarının çoğunluğu; tank duvarında oluşan korozyon etkisiyle kalınlığın azalmasından veya geçmiş yönetmeliklerdeki duvar kalınlık koşullarının sismik tasarım açısından yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır. Tüm bu etkilerin analiz modeline yansıtılabilmesi için 3 farklı kalınlık tasarımı dikkate alınmıştır (Tablo 1).

Tablo 1: Tank Duvar Kalınlıkları

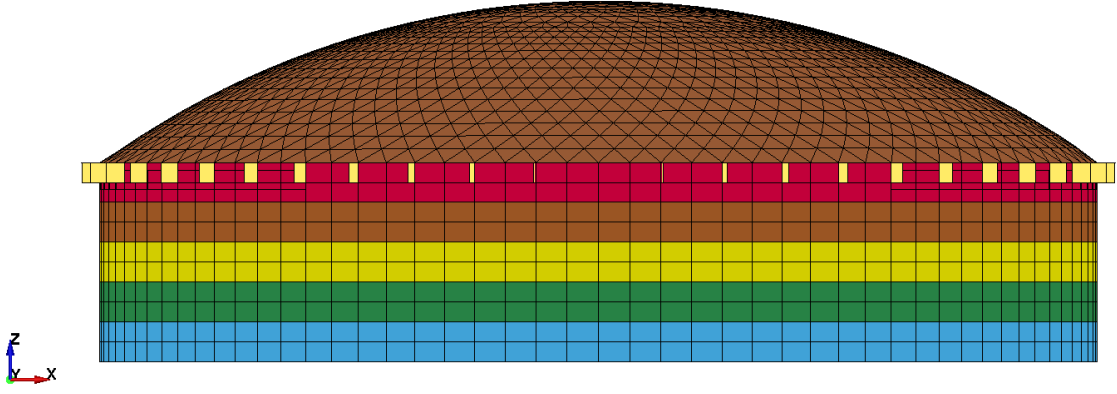
Eleman Tipi	Kalınlık-A [mm]	Kalınlık-B [mm]	Kalınlık-C [mm]
1. Donam	20.0	17.0	14.0
2. Donam	17.5	14.9	12.3
3. Donam	15.0	12.8	10.5
4. Donam	10.0	8.5	7.0
5. Donam	8.0	6.8	5.6

LS-Dyna ortamında çizim verileri kullanılarak hazırlanan sonlu elemanlar modeli Şekil 1'de sunulmuştur. Yapı-sıvı etkileşiminde kullanılan SPH partikülleri Şekil 2'de sunulmaktadır. Sayısal analiz modelinden tüm doğrusal olmayan etkileri yakalayabilmek adına sıvı modeli için 223172 adet SPH partikül kullanılmıştır. Benzer şekilde LS-Dyna ortamında 3D Lazer Tarama nokta bulut verileri kullanılarak diğer sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır. Tablo 2, sonlu elemanlar sistemi içerisinde yer alan elemanların boyutunu göstermektedir.

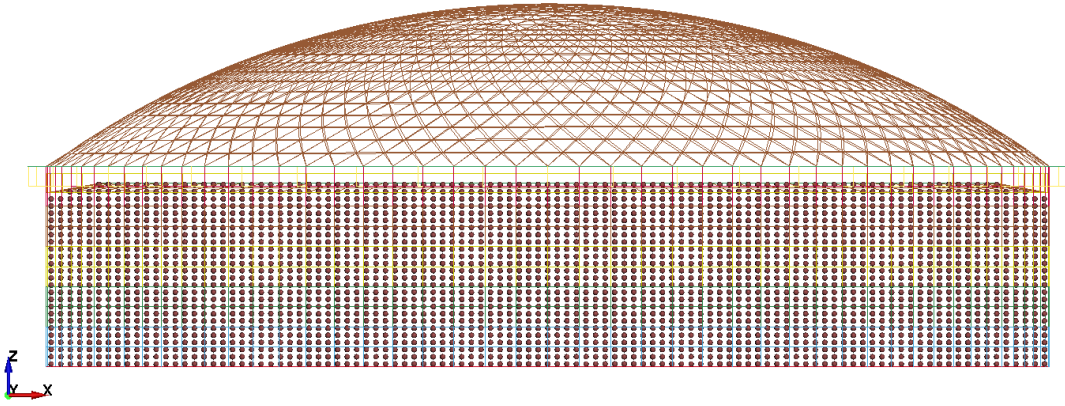
Tablo 2: Analiz Modeli Sonlu Eleman Boyutları

Eleman Tipi	Maksimum Boyut [m]	Minimum Boyut [m]
Tank Tabanı	2.97	1.00
Tank Duvarı	1.65	1.05
Yüzer Çatı	2.97	1.00
Sabit Çatı	1.93	0.60



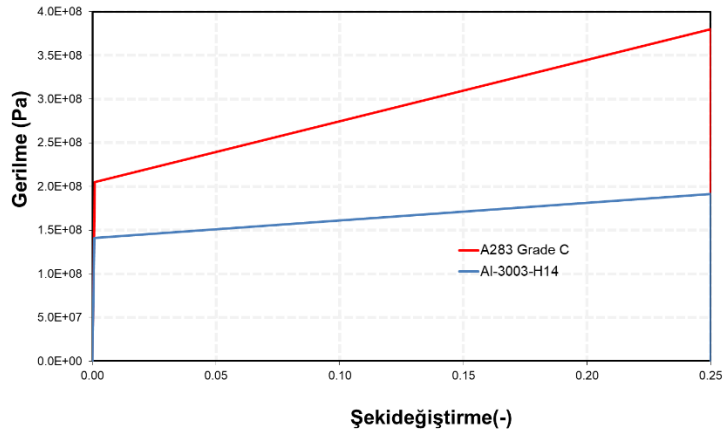


Şekil 1: Sayısal Analiz Modeli



Şekil 2: Sayısal Analiz Modeli Yapı-Sıvı Etkileşimi

Sonlu elemanlar ağı içerisinde yer alan kabuk (shell) elemanlar için doğrusal olmayan malzeme modeli kullanılmıştır. Bu model LS-Dyna ortamında \*Mat\_Piecewise\_Plasticity kartı aracılığıyla kullanılmıştır. Tank sisteminde tüm çelik elemanlar için A283 Grade C kullanılırken çatı sistemi için alüminyum malzeme kullanılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3: Gerilme-Şekil Değişirme İlişkisi

Bu çalışma kapsamında kullanılan sayısal analiz modelleri Tablo 3'te özetlenmiştir. 3 farklı kalınlık tasarımı ve 2 farklı geometrik model referansı olmak üzere 6 farklı model incelenmiştir.

Tablo 3: Sayısal Analiz Modelleri

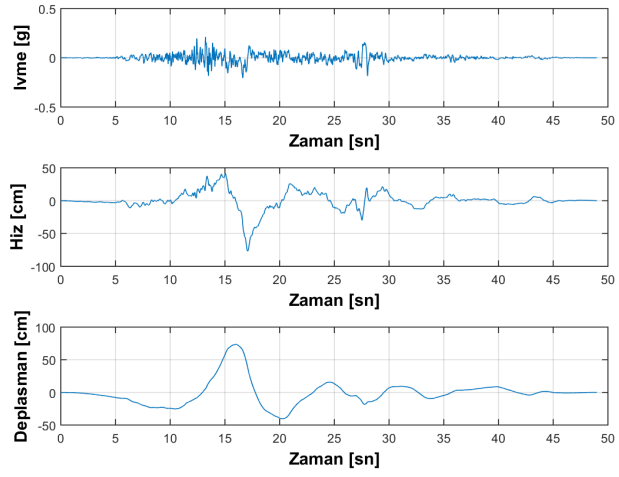
Model Adı	Geometri	Kalınlık Kategorisi
M1-KA	İdeal	A
M1-KB	İdeal	B
M1-KC	İdeal	C
M2-KA	3D Lazer	A
M2-KB	3D Lazer	B
M2-KC	3D Lazer	C

### 3.2) Deprem Yer Hareketlerinin Seçimi

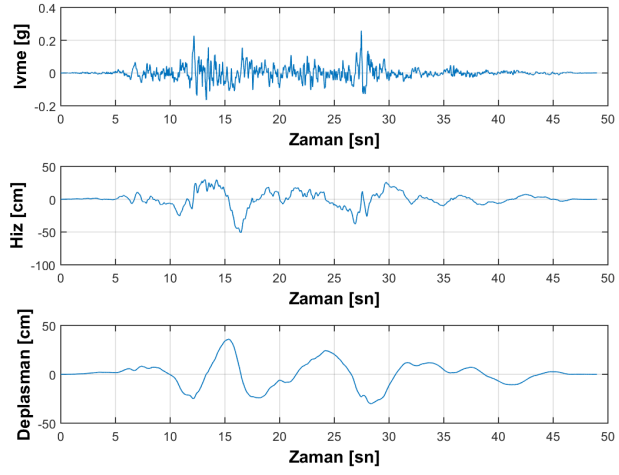
Zaman tanım alanı analizlerinde kullanılan deprem yer hareketlerinin seçimi; depremlerin büyüklükleri, fay mesafeleri ve kaynak mekanizmaları dikkate alınarak yapılmıştır (Tablo 4). Faya yakın mesafelerde elde edilen kayıtlarda büyük bir genliğe ve periyoda sahip ani sıçrama (yakın fay etkisi) tepkisi gözlenmektedir. Üç doğrultulu zaman tanım alanı analizlerinde, toplam beş farklı kuvvetli yer hareketi seçilmiştir (her kayıt için birbirine dik iki yatay bileşen (X, Y) ve düşey bileşen (Z)). Yakın saha karakteristiği gösteren kayıtlar için Gazi ve Alhan (2019) çalışmasından yararlanılmıştır. Kuvvetli yer hareketleri için herhangi bir ölçeklendirme prosedürü uygulanmamıştır. Atmosferik tankların sismik performansları; farklı PGA (en büyük yer ivmesi),  $M_w$  ve frekans muhtevasına sahip deprem yer hareketleri etkisi altında hasar mekanizmaları incelenerek değerlendirilmiştir. Şekil 4'te örnek olarak verilen deprem bileşenlerinden hız-zaman grafiği incelendiğinde ani sıçrama (pulse) görülmektedir. Deprem yer hareketlerine ait spektral ivme grafikleri üç doğrultu için Şekil 5'te verilmiştir.

Tablo 4: Deprem Yer Hareketi (PGA: En büyük yer ivmesi değeri, PGV: En yüksek hız değeri, PGD: En büyük yer değiştirme değeri)

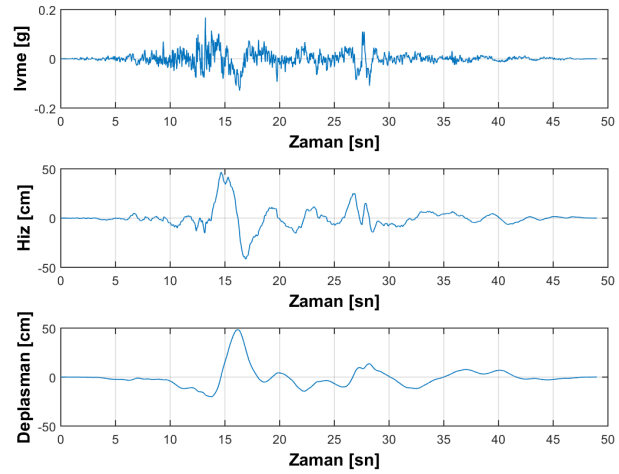
Analiz Adı	Deprem Adı	İstasyon	Yıl	$M_w$	r [km]	Fay Tipi	Bileşen	PGA [g]	PGV [cm/sn]	PGD [cm]
EQ01	ChiChi	TCU101	1999	7.62	2.11	Reverse Oblique	X	0.21	76.81	73.51
							Y	0.26	50.98	35.95
							Z	0.17	46.70	48.37
EQ02	Kocaeli	Gebze	1999	7.51	10.92	Strike Slip	X	0.26	44.67	41.41
							Y	0.14	32.61	29.91
							Z	0.19	14.11	5.65
EQ03	Kocaeli	Duzce	1999	7.51	15.37	Strike Slip	X	0.31	58.87	44.14
							Y	0.36	55.65	24.87
							Z	0.21	21.12	14.17
EQ04	Japonya	Iwate	208	6.9	6.02	Reverse	X	1.07	42.91	18.47
							Y	0.90	58.44	20.84
							Z	0.95	27.71	11.87
EQ05	San Fernando	Pacoima Dam	1971	6.61	1.81	Reverse	X	1.24	57.42	12.79
							Y	1.22	114.51	39.00
							Z	0.69	59.39	29.32



(X)

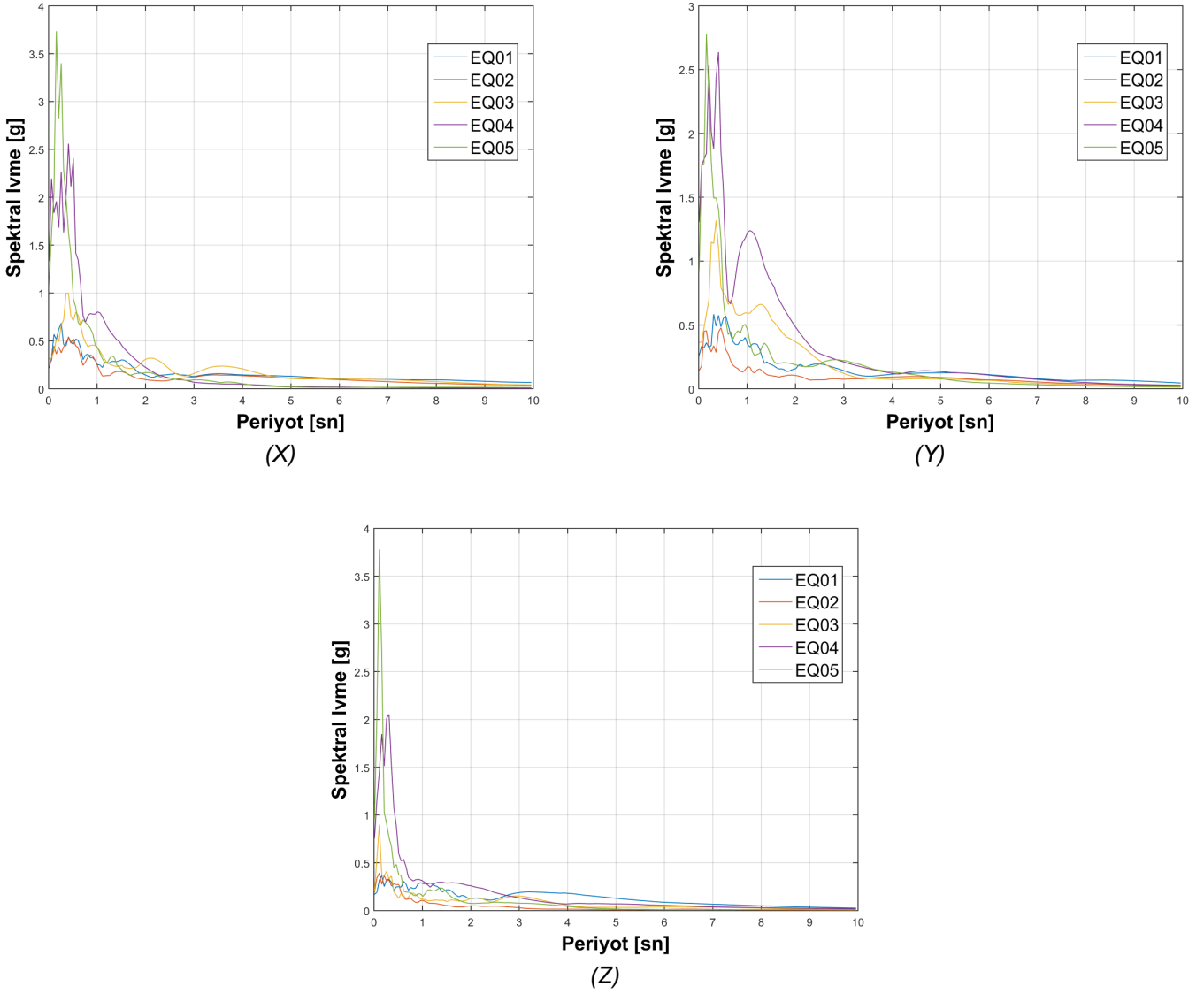


(Y)



(Z)

Şekil 4: Deprem Yer Hareketi Bileşenleri-EQ01

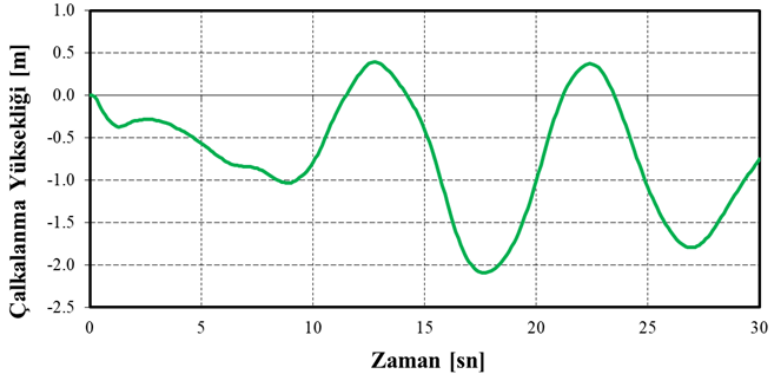


Şekil 5: Deprem Yer Hareketleri için Spektral İvme Grafikleri

#### 4. BULGULAR

Atmosferik tankların, tank-sıvı etkileşiminin doğrusal olmayan davranış kaynaklarını SPH tekniği ile göz önüne alabilen sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak sismik yükler altında doğrusal olmayan davranışları incelenmiştir. Yerçekimi yükleri ve bu yüklerin tank duvarına oluşturduğu hidrostatik basınçların tank sistemine uygulanmasının ardından sonlu eleman modeline zaman tanım alanında sismik yükler uygulanmıştır.

Tank-sıvı etkileşimi içerisinde; büyük deformasyona sahip serbest sıvı yüzeyindeki çalkalanma hareketinin doğru bir şekilde yakalanması en büyük zorluklardandır. SPH tekniği ile çalkalanma hareketi sorununun önüne geçilmektedir. Şekil 6, M1-KA tank tipi için serbest sıvı yüzeyindeki düşey yer değiştirmelerin zamana bağlı değişimini göstermektedir.



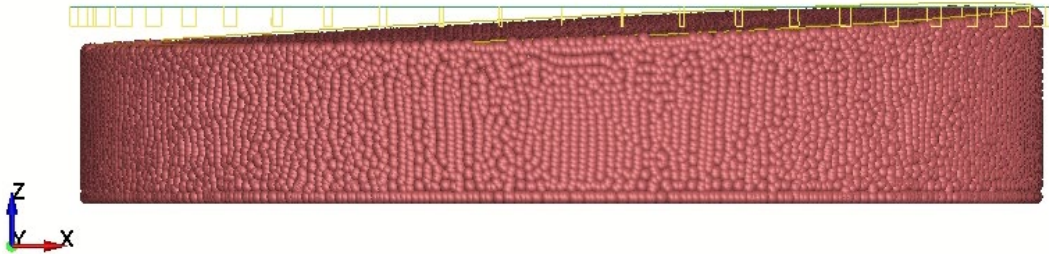
Şekil 6: M1-KA Modeli Sıvı Serbest Yüzey Hareketi-EQ01

Tablo 5, farklı yönetmeliklerde yer alan bağıntılara göre hesaplanan çalkalanma periyotlarını (convective period) göstermektedir. Çalkalanma hareketi periyodunun verilen analitik bağıntılar yardımıyla elde edilen değerler ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Tablo 5: Çalkalanma Periyotları ( $T_c$ )

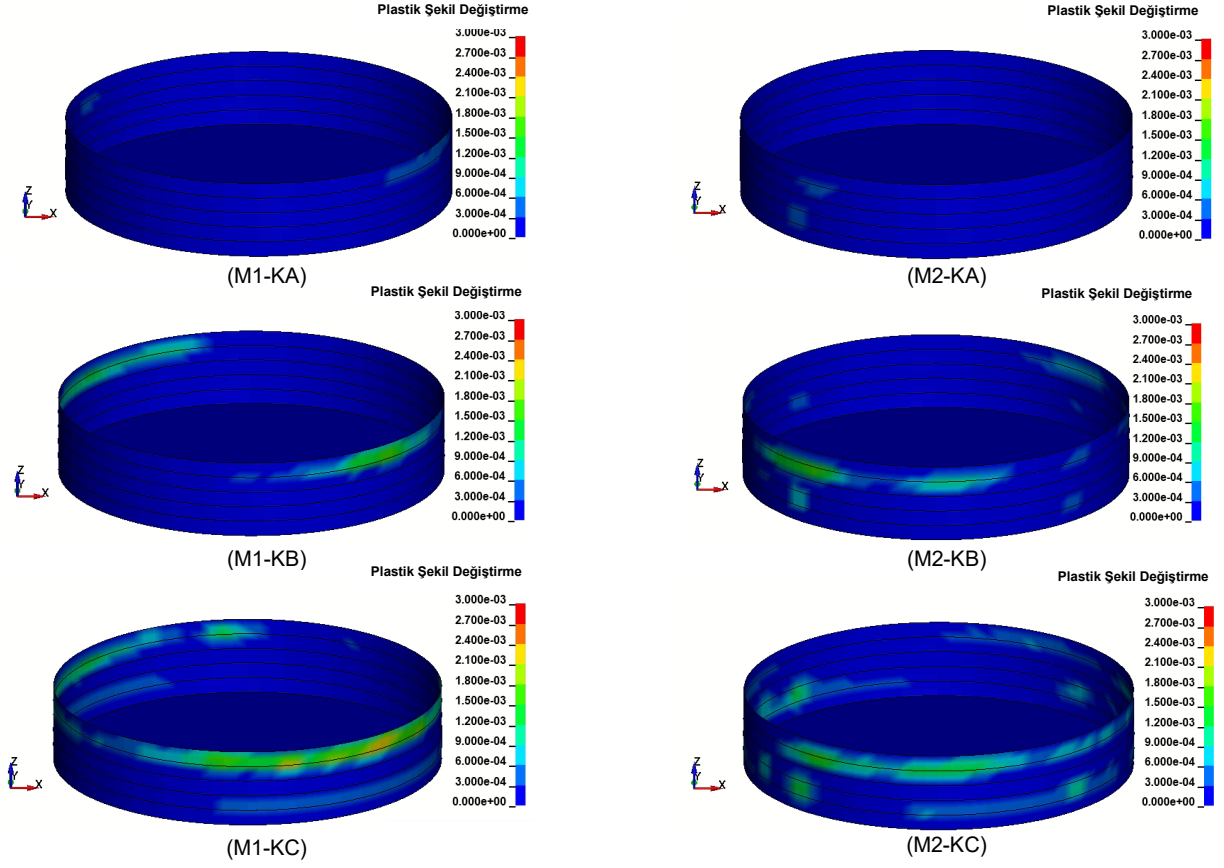
Yönetmelik	$T_c$ [sn]
API-650	9.89
Eurocode 8 (Yang ve Veletsos 1977)	9.94
Eurocode 8 (Malhotra ve diğ. 2000)	9.22
<b>Ortalama</b>	9.69
<b>Sayısal Model</b>	9.625

İncelenen atmosferik tank tipleri için çalkalanma fenomeninden kaynaklı önemli bir seviyede yapısal hasar ve sıvı çıkışı oluşmamaktadır. Çalkalanma hareketi farklı M1-KA tank modeli için sunulmuştur. Tüm performans analizleri incelendiğinde; tank deprem performansı çalkalanma hareketi ve sıvı çıkış kontrolleri açısından kabul edilebilir seviyede yer almaktadır.

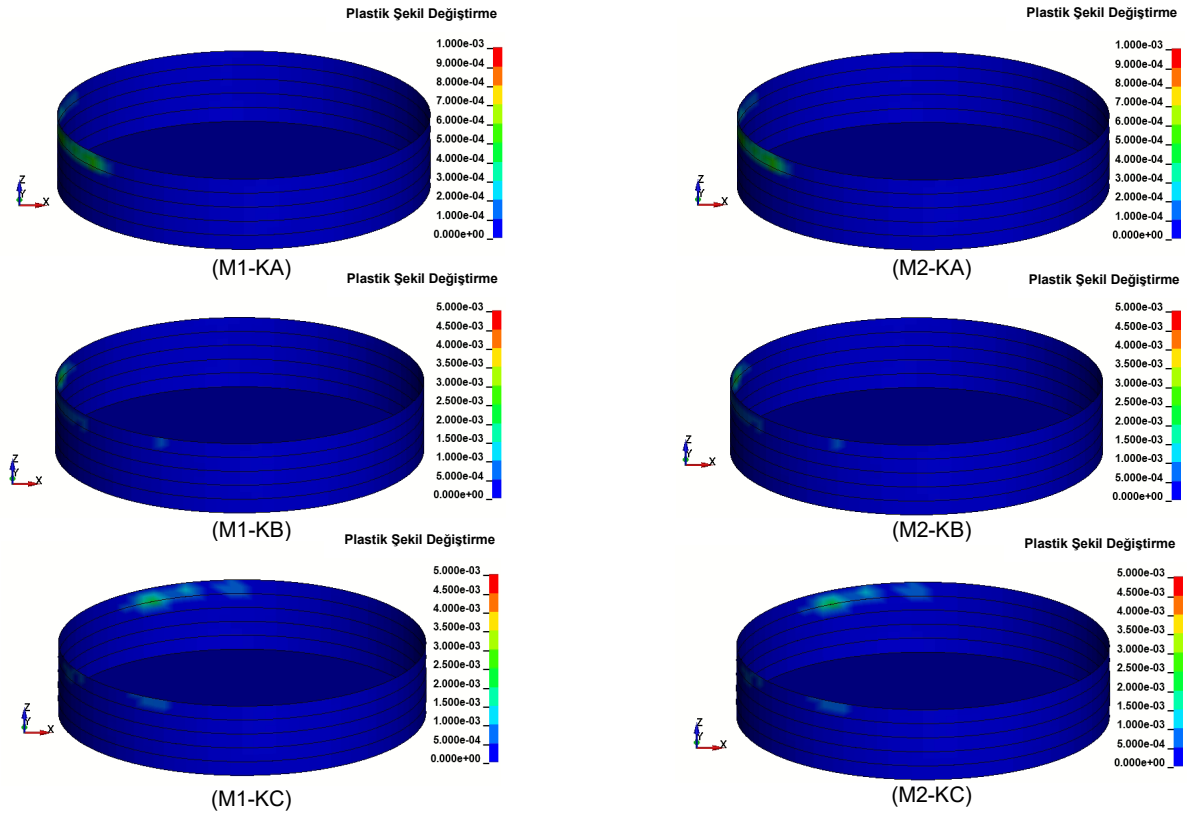


Şekil 7: M1-KA modeli çalkalanma hareketi-EQ01-12.80sn.

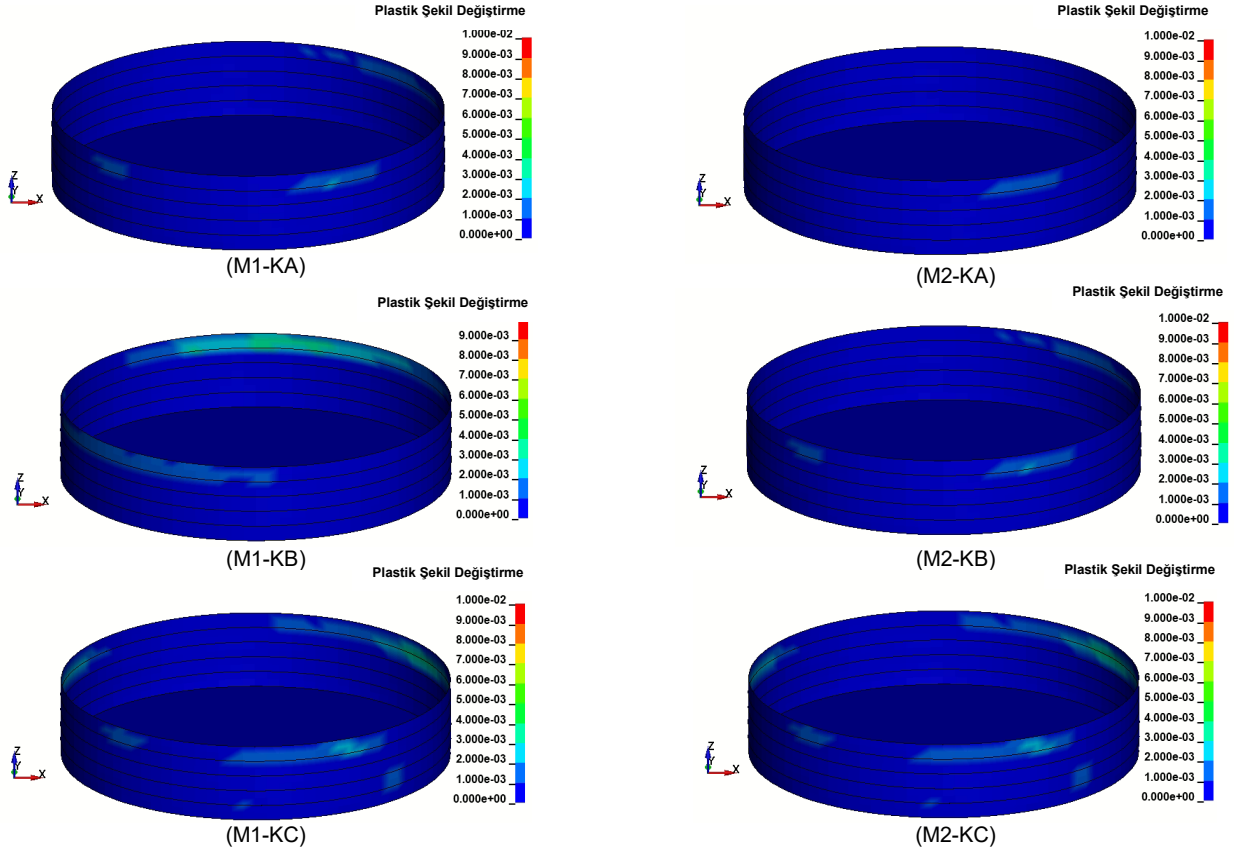
Tankların deprem performansları plastik şekil değiştirmeler açısından Şekil 8 ile Şekil 12 arasında incelenmiştir. Tank duvarı hasar şekil değiştirme (Failure Strain) limiti %20 olarak kabul edilmiştir. Tüm performans analizleri incelendiğinde; tank deprem performansı plastik şekil değiştirmeleri açısından kabul edilebilir seviyede yer almaktadır.



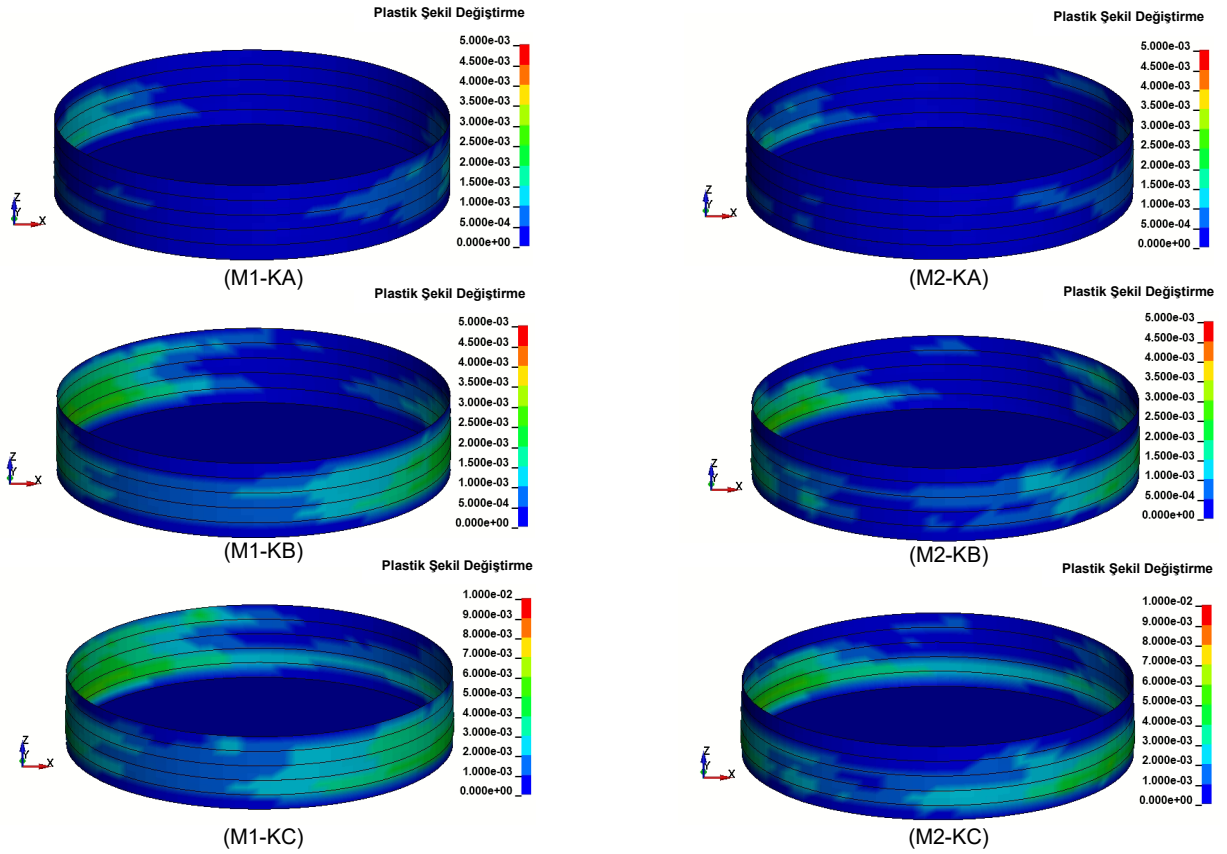
Şekil 8: Plastik Şekil Değişirme Dağılımları-EQ01



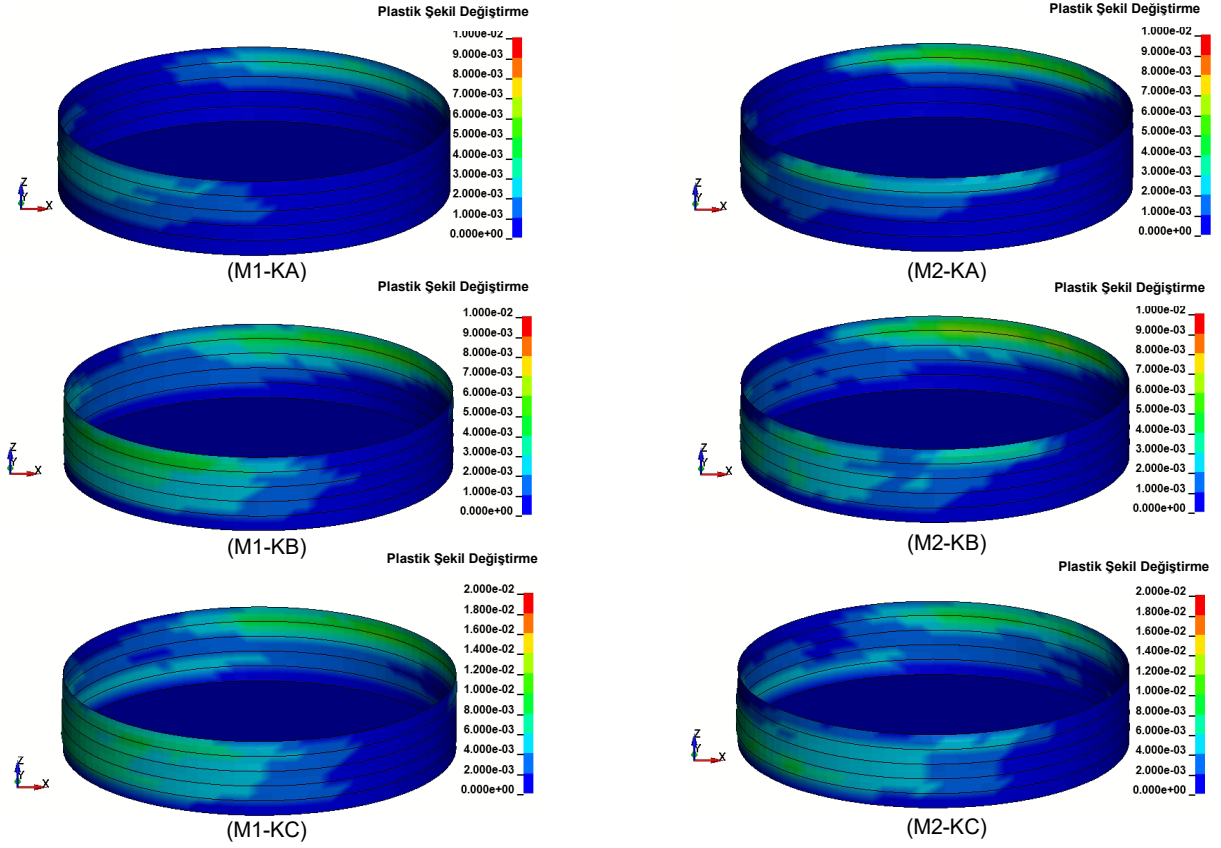
Şekil 9: Plastik Şekil Değişirme Dağılımları-EQ02



Şekil 10: Plastik Şekil Değişirme Dağılımları-EQ03

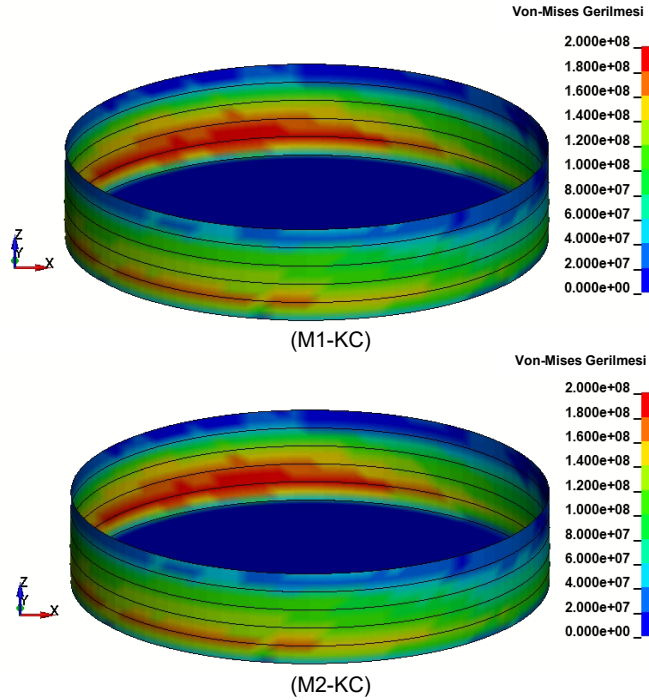


Şekil 11: Plastik Şekil Değişirme Dağılımları-EQ04



Şekil 12: Plastik Şekil Değişirme Dağılımları-EQ05

İki farklı modelleme yaklaşımı için de sonuçlar birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Sismik hasar mekanizmaları birbirine yakın olduğundan, von-mises gerilme dağılımları örnek bir model üzerinde incelenmiştir (Şekil 13).



Şekil 13: Von-Mises Gerilme Dağılımları-EQ01



## 5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında tank-sıvı etkileşiminin doğrusal olmayan davranış kaynaklarını göz önüne alabilen sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak sıvı ihtiva eden üç boyutlu atmosferik tankların, deprem yükleri altında doğrusal olmayan davranışları incelenmiştir.

Endüstriyel tesis içerisinde aktif faaliyet gösteren atmosferik tankın sismik performans analizi beş farklı yakın-fay deprem yer hareketleri etkisi altında gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz modeli hem tasarım çizim verileri hem de 3D Lazer Tarama verileri ile hazırlanmıştır. Kuvvetli yer hareketi atmosferik tanklarda sıklıkla görülen hasar mekanizmalarının çoğunluğu; tank duvarında oluşan korozyon etkisiyle kalınlığın azalmasından veya geçmiş yönetmeliklerdeki duvar kalınlık koşullarının sismik tasarım açısından yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır. Tüm bu etkilerin incelenebilmesi için 3 farklı kalınlık tasarımı dikkate alınmıştır. Ayrıca, 2 farklı geometrik model referansı da dikkate alınarak toplam 6 farklı model incelenmiştir. Geometrik model referansı açısından sayısal analiz modeli hem tasarım çizim verileri hem de üç boyutlu (3D) Lazer Tarama sonucu elde edilen nokta bulut verileri ile hazırlanmıştır.

Sismik performans değerlendirmesi, her üç doğrultulu doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri (time-history analysis) ile gerçekleştirilmiştir. Analizlerde deprem yer hareketleri fay mesafelerinin yakınlığı ve kayıt frekans muhtevasına göre seçilmiştir. Tank duvarı hasar şekil değiştirme limiti ise %20 olarak kabul edilmiştir

İki farklı modelleme yaklaşımı karşılaştırıldığında, incelenen tank tipi için sismik hasar mekanizmalarının birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Tüm performans analizleri incelendiğinde; tank deprem performansı plastik şekil değiştirmeleri açısından kabul edilebilir seviyede yer almaktadır. Tank duvarında ciddi seviyede bir dinamik burkulma oluşmamıştır. Çalkalanma sorunundan kaynaklı herhangi bir yapısal hasar gözlemlenmemiştir. Ayrıca, yapı-sıvı etkileşiminde kullanılan SPH yaklaşımı, büyük genlikli çalkalanma hareketi ve yüksek deformasyonlar ile başa çıkabildiği tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR

Akgül K., 2021. Atmosferik Tankların Yapısal Risk Değerlendirmesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Doktora tezi (sürmekte)

API 650, 2018. Welded Tanks for Oil Storage, American Petroleum Institute, 12th Ed., Mar. 2013; (Addendum 3 - Aug. 2018) 449 p.

D'Amico M, Buratti N., 2019. Observational Seismic Fragility Curves for Steel Cylindrical Tanks, *J. Press. Vess-T. ASME* 141 (1), 1-14

Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 4: Silos, tanks and pipelines, prEN 1998-4: (2003), 83 p.

Gazi H., Alhan C., 2019. Reliability of elastomeric-isolated buildings under historical earthquakes with/without forward-directivity effects, *Engineering Structures* 195, 490-507

Haroun M.A., Housner G.W., 1981. Seismic Design of Liquid Storage Tanks, *Journal of the Technical Councils of ASCE* 107 (1), 191-207

Housner G.W., 1954. Earthquake Pressures on Fluid Containers, The Eighth Technical Report under Office of Naval Research, California Institute of Technology Pasadena, California, 42 p.

Housner G.W., 1957. Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers, *Bulletin of the Seismological Society of America* 47 (1), 15-35

Housner G.W., 1963. The Dynamic Behaviour of Water Tanks, *Bulletin of the Seismological Society of America* 53 (2), 381-387

LS-DYNA R11.0., 2017. Keyword User's Manual Volume I-II, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California, 4805 p.

Malhotra P.K., Wenk T., Weiland M., 2000. Simple Procedure of Seismic Analysis of Liquid Storage Tanks, *Structural Engineering International* 10 (3), 197-201

Monaghan J.J., 1994. Simulating free surface flow with SPH, *Journal of Computational Physics* 110 (1034), 399-406

NIST GCR 97-720, 1995. A Study of the Performance of Petroleum Storage Tanks During Earthquakes, United States Department of Commerce Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 118 p.

Ozdemir Z., 2010. Nonlinear Fluid-Structure Interaction for Multi-Dimensional Seismic Analyses of Liquid Storage Tanks, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, 237 s.

Özbulut M, 2019. Düzenli Dalgalar Üreten Bir Sayısal Dalga Tankının SPH Yöntemi ile Modellenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 24 (2) , 551-570

Westergaard H. M., 1931. Water Pressures on Dams during Earthquakes, ASCE Transactions, pp. 418-433, November 1931.

Yang J.Y, Veletsos A.S, 1977, Earthquake Response of Liquid Storage Tanks, Advances in Civil Engineering through Engineering Mechanics, 1-24 May 1977, North Caroline, 1-24

## ARAŞTIRMA VERİSİ

--

## ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ

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

## YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI

Katkı Türü	Yazarlar
Çalışmanın tasarlanması	K.A.
Literatür araştırma	K.A.
Saha çalışması, veri temini/derleme	K.A.
Verilerin işlenmesi/analiz edilmesi	K.A.
Şekil/Tablo/Yazılım hazırlanması	K.A.
Bulguların yorumlanması	K.A.
Makale yazımı, düzenleme, kontrol	K.A.



## January 24, 2020 Sivrice (Turkey) Earthquake ( $M_w$ 6.8): Evaluation of Ground-Motion Prediction Equations and Microtremor Studies

Erdem Bayrak<sup>1,2</sup>, Çağlar Ozer<sup>1,2</sup>, Hamit Cakici<sup>3</sup> and Mustafa Engin Kocadagistan<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ataturk University, Earthquake Research Centre, Erzurum, Turkey

<sup>2</sup> Ataturk University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Erzurum, Turkey

<sup>3</sup> Ataturk University, Pasinler Vocational College, Department of Architecture and Urban Planning, Erzurum, Turkey

<sup>4</sup> Ataturk University, Engineering Faculty, Departments of Metallurgical and Materials Engineering, Erzurum, Turkey

ORCID: 0000-0001-9907-1463, 0000-0001-5401-2013, 0000-0003-1743-676X, 0000-0001-6298-0348

### Keywords

Ground-Motion Prediction Equations, Microtremor, Vulnerability Index,  $V_s30$ , Sivrice Earthquake

### Highlights

\* The ground motion prediction equations in the literature have been compared using the strong ground motion records of the Sivrice earthquake

\* The damage in Sivrice district is less than expected is related to the local soil condition

\* It has been calculated that the riskiest soil is the Elazığ City Center according to the shear deformation values

### Acknowledgements

We would like to thank Atatürk University Rectorate for providing logistics and support to ATA-DAM in the field study carried out on 25.01.2020 for the examination of structural damages in the earthquake area, and AFAD Earthquake Department, which provided earthquake location information and data online in this study. The fault information has been digitized from the MTA drawing editor. Microtremor measurements were analyzed using Geopsy software.

### Aim

The  $V_s30$ , vulnerability index and plastic-elastoplastic values were obtained with the help of empirical relations using the period and amplification values. Also, different ground-motion prediction equations were compared with the observed peak ground acceleration values.

### Location

Elazığ-Turkey

### Methods

Ground-Motion Prediction Equations and Microtremor

### Results

The highest vulnerability index was obtained in Elazığ Center and the lowest value was observed in Sivrice

### Supporting Institutions

Ataturk University

### How to cite

Bayrak E., Ozer C., Cakici H., Kocadagistan M.E., 2021. January 24, 2020 Sivrice (Turkey) earthquake ( $M_w$  6.8): Evaluation of Ground-Motion Prediction Equations and Engineering Seismology Studies, Turk. J. Earthq. Res. 3 (2), 125-148, <https://doi.org/10.46464/tdad.1003057>

### Manuscript

Research Article

Received: 30.09.2021

Revised: 04.11.2021

Accepted: 15.11.2021

Printed: 31.12.2021

### DOI

10.46464/tdad.1003057

### Corresponding Author

Erdem Bayrak

Email: erdembayrak@atauni.edu.tr



Figure  
The damaged structure and Microtremor measurement



## 24 Ocak 2020 Sivrice (Türkiye) Depremi (Mw 6.8): Yer Hareketi Tahmin Denklemlerinin Değerlendirilmesi ve Mikrotremor Çalışmaları

Erdem Bayrak<sup>1,2</sup>, Çağlar Özer<sup>1,2</sup>, Hamit Çakıcı<sup>3</sup> ve Mustafa Engin Kocadağistan<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Atatürk Üniversitesi, Deprem Araştırma Merkezi, Erzurum, Türkiye

<sup>2</sup> Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

<sup>3</sup> Atatürk Üniversitesi, Pasinler Meslek Yüksek Okulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Erzurum, Türkiye

<sup>4</sup> Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye  
ORCID: 0000-0001-9907-1463, 0000-0001-5401-2013, 0000-0003-1743-676X, 0000-0001-6298-0348

### ÖZET

Doğu Anadolu Fay Zonu'nda (DAFZ) 24 Ocak 2020 tarihinde meydana gelen  $M_w$  6.8 büyüklüğündeki deprem can ve mal kayıplarına sebep olmuştur. Yapısal hasarların zemin açısından araştırılması amacı ile üç farklı hasar gören yapının çevresinde mikrotremor ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümler sonucu elde edilen zeminin frekans ve büyütme faktörleri kullanılarak ampirik bağıntılar yardımıyla  $V_s30$ , hasar görebilirlik indisi (Kg) ve zemin deformasyon tahmini gibi parametreler elde edilmiştir. Mikrotremor ölçümlerinden elde edilen zemin hâkim frekans ve büyütme faktörü değerleri Kesrik, Elazığ ve Sivrice için sırasıyla  $\sim 1.75$  Hz;  $\sim 0.55$  Hz ve  $\sim 1.4$  Hz olarak elde edilirken büyütme faktörü değerleri ise  $\sim 5.1$ ,  $\sim 4.2$  ve  $\sim 2.3$  olarak hesaplanmıştır. En yüksek hasar görebilirlik indisi Elazığ Merkez'de en düşük değer ise Sivrice'de elde edilmiştir. Ayrıca gözlenen en büyük yer ivmesi değerleri ile beş farklı yer hareketi tahmin denklemi karşılaştırılmış ve en iyi uyum sağlayan model belirlenmiştir.

### Anahtar kelimeler

Yer Hareketi Tahmini, Mikrotremor, Hasar İndeksi,  $V_s30$ , Sivrice depremi

### Öne Çıkanlar

- \* Sivrice depremine ait kuvvetli yer hareketi kayıtları kullanılarak literatürde kullanılan yer hareketi tahmin denklemleri karşılaştırılmıştır
- \* Sivrice ilçesindeki hasarın beklenenden az olması yerel zemin koşulları ile ilişkilidir
- \* Kayma şekil değiştirme değerlerine göre en riskli zeminin Elazığ Merkez olduğu hesaplanmıştır

### Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 30.09.2021

Düzeltilme: 04.11.2021

Kabul: 15.11.2021

Basım: 31.12.2021

### DOI

10.46464/tdad.1003057

### Sorumlu yazar

Erdem Bayrak

Eposta:

erdembayrak@atauni.edu.tr

## January 24, 2020 Sivrice (Turkey) Earthquake (Mw 6.8): Evaluation of Ground-Motion Prediction Equations and Microtremor Studies

Erdem Bayrak<sup>1,2</sup>, Çağlar Özer<sup>1,2</sup>, Hamit Çakıcı<sup>3</sup> and Mustafa Engin Kocadağistan<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ataturk University, Earthquake Research Centre, Erzurum, Turkey

<sup>2</sup> Ataturk University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Erzurum, Turkey

<sup>3</sup> Ataturk University, Pasinler Vocational College, Department of Architecture and Urban Planning, Erzurum, Turkey

<sup>4</sup> Ataturk University, Engineering Faculty, Departments of Metallurgical and Materials Engineering, Erzurum, Turkey  
ORCID: 0000-0001-9907-1463, 0000-0001-5401-2013, 0000-0003-1743-676X, 0000-0001-6298-0348

### ABSTRACT

The  $M_w$  6.8 January 24, 2020, earthquake has occurred on the Eastern Anatolian Fault Zone (EAFZ) caused loss of life and property. Microtremor measurements have been applied near three different damaged buildings to investigate structural damages in terms of soil features. The parameters such as  $V_s30$ , vulnerability index, and soil deformation estimation are obtained with the help of empirical relations using the soil dominant frequency and soil amplification factors calculated as a result of these survey measurements. The soil dominant frequencies have been obtained as  $\sim 1.75$  Hz;  $\sim 0.55$  Hz and  $\sim 1.4$  Hz while the amplification factor values have been calculated as  $\sim 5.1$ ,  $\sim 4.2$ , and  $\sim 2.3$  for Kesrik, Elazığ, and Sivrice; respectively. The highest vulnerability index is obtained in Elazığ City center and the lowest value is observed in Sivrice. In addition, five different ground-motion prediction equations are compared with the observed peak ground acceleration values, and the best fitted model has been determined.

### Keywords

Ground-Motion Prediction Equations, Microtremor, Vulnerability Index,  $V_s30$ , Sivrice Earthquake

### Highlights

- \* The ground motion prediction equations in the literature have been compared using the strong ground motion records of the Sivrice earthquake
- \* The damage in Sivrice district is less than expected is related to the local soil condition
- \* It has been calculated that the riskiest soil is the Elazığ City Center according to the shear deformation values

### Manuscript

Research Article

Received: 30.09.2021

Revised: 04.11.2021

Accepted: 15.11.2021

Printed: 31.12.2021

### DOI

10.46464/tdad.1003057

### Corresponding Author

Erdem Bayrak

Email:

erdembayrak@atauni.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) Deprem Dairesi Başkanlığı tarafından rapor edilen bilgilere göre Elazığ ili Sivrice ilçesi Çevrimtaş Köyünde moment magnitudü ( $M_w$ ) 6.8 olan bir deprem meydana gelmiştir. Bu deprem sonrası 1000'i aşkın yapı hafif, orta ve ağır düzeyde hasar almış olup, 41 kişi yaşamını yitirmiş ve yaklaşık 1500 kişi hafif ve orta derecede yaralanmıştır. 42 il merkezinde hissedilen Sivrice depreminde en büyük yer ivmesi 0.29 g ile 2308 kodlu AFAD-Sivrice istasyonunda kaydedilmiştir (TADAS 2020). 24 Ocak'tan sonraki bir yıllık periyotta yaklaşık 6.000 artçı deprem meydana gelmiş olup, fay kinematik çözümleri bu depremin sol yönlü doğrultu atımlı fay tarafından karakterize edildiğini göstermektedir (AFAD 2020, Jamalreyhani ve diğ. 2020, Gallovic ve diğ. 2020, Taymaz ve diğ. 2021).

Sivrice depremi, Kuzey Anadolu Fay Zonu'ndan (KAFZ) sonra Anadolu'nun en büyük ikinci yanal atımlı fay zonu olan Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) üzerinde meydana gelmiştir. DAFZ, yaklaşık 550 km uzunluğunda sol yönlü doğrultu atımlı fay karakteristiğine sahip olup altı ana parçadan oluşmaktadır (Şaroğlu ve diğ. 1992). Bu parçalar KKD'dan (Karlıova) GGB yönüne (Türkoğlu) doğru sırasıyla; Bingöl-Karlıova, Hazar-Palu, Sincik-Hazar (bu parça iki alt bölümden oluşur), Gölbaşı-Çelikhhan, Türkoğlu-Gölbaşı ve Antakya-Türkoğlu parçalarıdır (Şaroğlu ve diğ. 1992, Duman ve Emre 2013). Sivrice depremi Hazar-Sincik parçasının Pütürge alt bölümü üzerinde meydana gelmiştir (Duman ve Emre, 2013, AFAD 2020).

Hazar-Sincik parçasının üzerinde yer alan Hazar Gölü Havzası (HGH); 5 km genişliğinde 32 km uzunluğunda KD-GB doğrultulu sol yanal doğrultu atımlı faylar tarafından yönetilen çek ayır bir havzadır (Burchfiel ve Stewart 1966, Hempton ve Dunne 1984, Aksoy ve diğ. 2007). Moreno ve diğ. (2011) HGH'nin gelişmiş bir çek-ayır havzasını temsil ettiğini, Palu ve Sincik arasındaki fay parçalarının daha büyük depremler üretebileceğini belirtmiştir.

Cetin ve diğ. (2003) yürüttükleri paleosismoloji çalışmasında Hazar-Palu parçasının 7.1 ile 7.7 büyüklüğü arasında deprem üretme potansiyelinin 100 ( $\pm 35$  yıl) ile 360 ( $\pm 35$  yıl) yıl arasında değiştiğini iddia etmişlerdir. Nalbant ve diğ. (2002) Coulomb gerilme analizi ile Doğu Anadolu Fay Zonu boyunca gerilme değişimini modelleyerek Sivrice depreminin meydana geldiği alanda gerilmenin arttığını ortaya koymuştur. Sertcelik (2012) Hazar-Sincik parçasındaki soğrulma değerlerinin DAFZ ortalamasına göre yüksek olduğunu belirtmiştir. Bayrak ve diğ. (2015) Doğu Anadolu Fay Zonu'nu bölgelere ayırarak yapmış olduğu olasılıksal deprem tehlike analizinde bölgedeki deprem tehlikesinin yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Ozer ve diğ. (2019) Hazar-Sincik parçasının bulunduğu alanda düşük P- dalga hızları rapor etmişlerdir. Coban ve Sayil (2020) yapmış oldukları çalışmada farklı istatistiksel dağılım modellerini kullanarak bölge için kısa zaman periyodunda bir depremin ( $M_w \geq 5.5$ ) olma olasılığının yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, deprem tehlike değerlendirme çalışmalarının birden çok istatistiksel dağılım modeli ile yapılmasının daha tutarlı sonuçlar verdiğini vurgulamışlardır. Pousse-Beltran ve diğ. (2020) uydu verileri kullanarak Sivrice depreminin yüzey kırığı davranışlarını inceleyerek 1893 (7.1) ve 1905 (6.9) Malatya depremlerinin karakteristiğinin tam olarak açıklığa kavuşturulmadığını vurgulamışlardır. Hubert-Ferrari ve diğ. (2020) Hazar Gölü'nün son 3800 yılda defalarca önemli sismik sarsıntılara maruz kaldığını ve bu dönem içinde yaklaşık 190 yıllık bir geri dönüş periyoduna sahip olduğunu elde etmişlerdir. Jamalreyhani ve diğ. (2020) Sivrice depreminin ve artçı sarsıntılarının Pütürge parçasının en batı ucunu yaklaşık 30 km'lik bir zonda kirdiğini ve bu zonda gerilme yüklemesinden dolayı benzer büyüklükteki depremlerin gelecekte meydana geleceğini iddia etmişlerdir. Zülfikar (2020) Sivrice depremi için yer hareketi parametreleri ile ivme kayıtlarını karşılaştırarak ASK14 (Abrahamson ve diğ. 2014) denkleminin en uygun denklem olduğunu belirtmiştir. Coulomb gerilme hesaplamaları sonucunda Sivrice depreminin Pütürge ve Palu parçasının batı kısımlarında gerilme seviyesini arttırdığı farklı araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir (Cheloni ve Akinci 2020, Dogru ve diğ. 2021, Taymaz ve diğ. 2021). Xu ve diğ. (2020) Sivrice depreminin DAFZ'nin kilitli bir alanında meydana geldiği için sismik aktiviteyi arttırdığını ve halen sismik boşlukta bulunan iki kırılmamış parçanın gelecekte tehlikeli olabileceğini

belirtmişlerdir. Ragon ve diğ. (2021) Sivrice depreminin Küresel Konumlama Uydu Sistemleri (KKUS) verileri kullanılarak yürüttükleri çalışmada Palu parçasının sismojenik olduğunu göstermişlerdir. Ozer (2021) Sivrice depremi sonrasında yeraltındaki P- dalga hızlarının ( $V_p$ ) ve  $V_p/V_s$  oranlarının değiştiğini belirtmiştir. Şahin ve Öksüm (2021) 2007-2019 yılları arasında kayıt edilen depremlerin Hazar-Sincik fayı üzerinde soğurulmanın arttığını tespit etmişlerdir. Cetin ve diğ. (2021) Sivrice depremi sonrasında yaptıkları saha gözlemlerinde kaya düşmesi, sıvılaşma kaynaklı kum kaynamaları ve yüzey çatlakları gözlemlenmiştir. Tüm yapılan bu çalışmalar halen DAFZ'nin ve Hazar-Sincik parçasının sismik tehlikesinin yüksek olduğunu ve gelecekte yakın büyüklükteki depremlerin tekrarlanabileceğini göstermektedir. Bu çalışmalar bölgede yapılacak mühendislik çalışmalarının önemli olduğunu göstermektedir.

Sivrice depreminden bir gün sonra 25 Ocak 2020 tarihinde Atatürk Üniversitesi yerbilimcilerinden oluşan ekip Elazığ ve çevresinde yüzey gözlemleri ve mühendislik çalışmaları yürütmüştür. Elazığ ve çevresinde ağır hasar gören/yıkılan üç yapının çevresinde tek istasyon mikrotremor yöntemi ile oluşan hasarlarda zemin etkisinin ortaya çıkarılması hedeflenmiştir. Bu ölçümler sonucunda zemin hakim frekans ve büyütme faktörü değerleri kullanılarak ampirik bağıntılar yardımıyla en üst 30m'deki zemin tabakalarının ortalama kesme dalgası hızı ( $V_{s30}$ ), hasar görülebilirlik indisi ( $K_g$ ) ve zeminin plastik-elastoplastik değerleri elde edilmiştir. Ayrıca farklı zemin sınıflarına göre 38 adet kuvvetli yer hareketi istasyon verileri ile beş farklı yer hareketi tahmin denklemi karşılaştırılmıştır.

## 2. VERİ

Bu çalışmada literatürde sıklıkla kullanılan yer hareketi tahmin denklemleri kullanılarak hesaplanan en büyük yer ivmesi değerleri (PGA) ile Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından işletilen kuvvetli yer hareketi istasyonlarında kaydedilen PGA değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu amaç için 24 Ocak 2020 tarihinde Elazığ'ın Sivrice ilçesinde meydana gelen depremde kaydedilen kuvvetli yer hareketi verileri elde edilmiştir (TADAS 2020). Bu çalışmada kullanılan istasyonlara ait bilgiler, kaydedilen en büyük yer ivmesi değerleri ve ana şoka olan episantr uzaklıkları Tablo 1'de verilmiştir. En düşük  $V_{s30}$  değeri 376 m/sn ile 6304 nolu istasyona ait iken en yüksek  $V_{s30}$  değeri ise 1380 m/sn ile 4404 nolu istasyona aittir. İstasyonların deprem episantrına olan uzaklıkları ise 24 km ile 150 km arasında değişmekte olup, en yakın istasyon 2308 nolu Sivrice istasyonudur. Kaydedilen en yüksek ivme değeri ise 0.29 g ile deprem episantrına en yakın konumda olan Sivrice istasyonunda olduğu rapor edilmiştir.

Ayrıca anaşok meydana geldikten bir gün sonra Elazığ şehir merkezi ile Kesrik mahallesi ve Sivrice ilçelerinde ağır hasar almış/yıkılmış üç yapı çevresinde Güralp marka CMG-6TD tipi sensör kullanılarak mikrotremor ölçüsü alınmıştır (Şekil 1a-d). Ölçümlerin süresi en az 40 dk. olup örnekleme aralığı ise 100 Hz olarak belirlenmiştir. Mikrotremor ölçümleri sırasında en büyüğü 4.1 olan çokça artçı sarsıntı kaydedilmiştir (Şekil 1e). Şekil 2'de ise mikrotremor ölçüm noktaları ve çalışmada kullanılan kuvvetli yer hareketi istasyonları gösterilmiştir.

Tablo 1: 24 Ocak 2020 Sivrice depremi kuvvetli yer hareketi kayıt bilgileri (TADAS 2020)

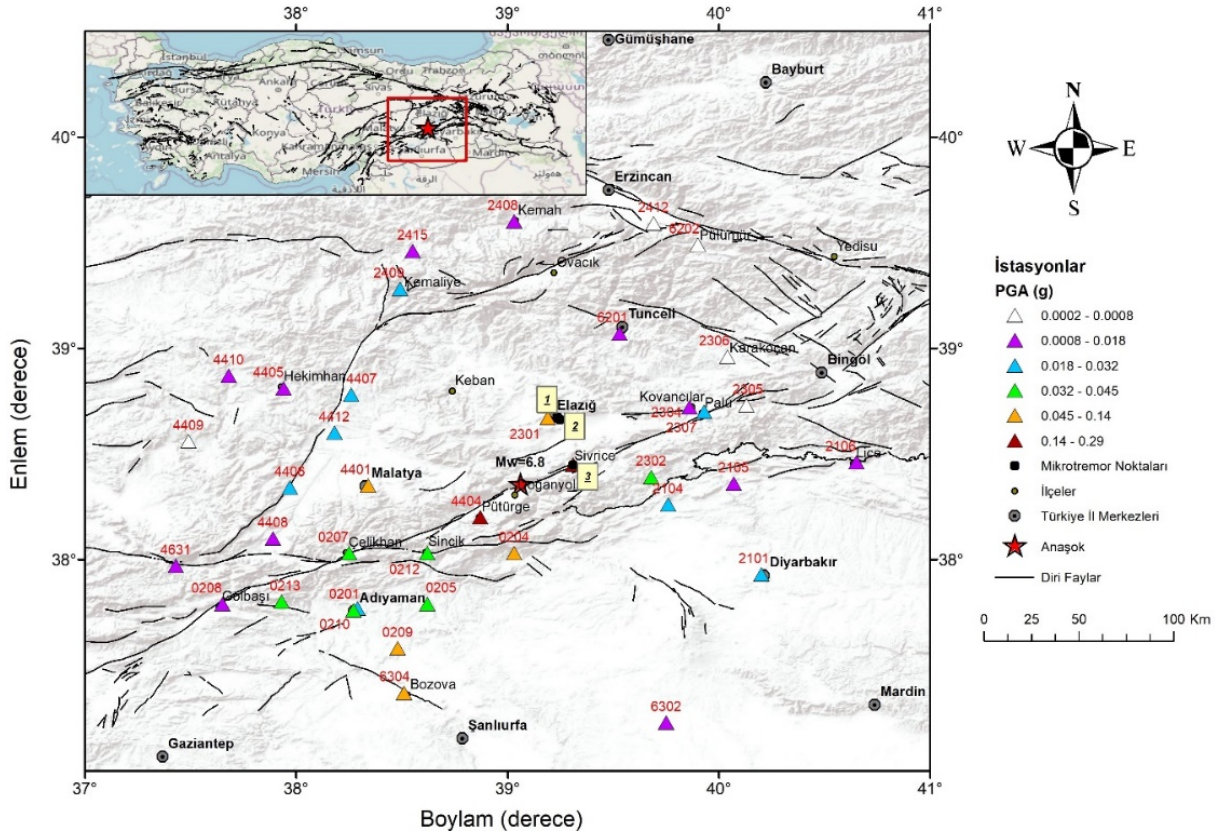
No	Kod	İl	İlçe	PGA (g)	R <sub>epi</sub> (km)	V <sub>s30</sub> (m/sn)
1	2308	Elazığ	Sivrice	0.29	23.81	450
2	4404	Malatya	Pütürge	0.24	24.55	1380
3	2301	Elazığ	Merkez	0.14	36.39	407
4	0204	Adıyaman	Gerger	0.11	36.81	555
5	0212	Adıyaman	Sincik	0.046	53.21	-
6	2302	Elazığ	Maden	0.034	53.51	907
7	2104	Diyarbakır	Ergani	0.027	61.64	-
8	4401	Malatya	Merkez	0.087	63.04	481
9	0205	Adıyaman	Kâhta	0.042	74.25	660
10	0207	Adıyaman	Çelikhan	0.033	80.00	660
11	2304	Elazığ	Kovancılar	0.014	80.36	489
12	4412	Malatya	Yazıhan	0.022	80.96	-
13	4407	Malatya	Arguvan	0.032	83.78	735
14	2307	Elazığ	Palu	0.021	84.35	329
15	2105	Diyarbakır	Dicle	0.011	87.92	-
16	6201	Tunceli	Merkez	0.012	89.46	-
17	0210	Adıyaman	Merkez	0.028	94.63	-
18	4406	Malatya	Akçadağ	0.024	95.00	815
19	0201	Adıyaman	Merkez	0.045	96.30	391
20	0209	Adıyaman	Samsat	0.073	100.72	-
21	2305	Elazığ	Beyhan	0.004	101.52	907
22	4408	Malatya	Doğanşehir	0.016	106.78	654
23	2306	Elazığ	Karakocan	0.005	107.88	663
24	4405	Malatya	Hekimhan	0.012	109.79	579
25	2101	Diyarbakır	Bağlar	0.027	110.47	519
26	2409	Erzincan	Kemaliye	0.021	113.82	875
27	0213	Adıyaman	Tut	0.036	117.29	-
28	6304	Ş.Urfa	Bozova	0.079	120.63	376
29	2415	Erzincan	İliç	0.013	130.16	444
30	4410	Malatya	Kuluncak	0.016	132.83	-
31	2408	Erzincan	Kemah	0.017	138.19	416
32	2106	Diyarbakır	Lice	0.011	138.48	-
33	4409	Malatya	Darende	0.008	138.71	-
34	0208	Adıyaman	Gölbaşı	0.018	138.88	469
35	6302	Ş.Urfa	Viranşehir	0.017	138.94	936
36	6202	Tunceli	Pülümür	0.008	144.69	-
37	2412	Erzincan	Çağlayan	0.002	147.42	955
38	4631	K.Maraş	Nurhak	0.015	149.50	543

\* (-) ile gösterilen istasyonlar için V<sub>s30</sub> bilgisi bulunmamaktadır



Şekil 1: Mikrotremor ölçümlerinin alındığı alanlar ve örnek veri a) Kesrik Köyü kerpiç ev (kırmızı kesik çizgili alanda 2010 Kovancılar depremi sonra alınan amatör tedbirlere bir örnektir), b) Elazığ İl Merkezinde deprem yönetmeliklerine uygun dizayn edilmeyen bir yapı, c) Sivrice Merkez Cami, d) Hasar gören alanlarda mikrotremor çalışmaları, e) Örnek mikrotremor kayıtları. Sarı kesikli çizgiler magnitudü 3'ten küçük artçı sarsıntıları gösterirken, beyaz kesikli çizgi magnitudü  $M_w$  4.1 olan depremi temsil etmektedir.





Şekil 2: Çalışmada kullanılan ivme istasyonları ve mikrotremor ölçülerinin lokasyonları. Üçgenler çalışmada kullanılan ivme istasyonlarının lokasyonunu göstermekte olup, renklendirmesi kaydedilen en büyük ivme değerine (PGA) göre yapılmıştır.

### 3. YÖNTEM

#### 3.1) Yer Hareketi Tahmin Denklemleri (YHTD)

Bir bölgede depremin etkisini belirlemek için yaygın olarak yer hareketi denklemleri kullanılmaktadır (Campbell 2003). Yıllardır farklı araştırmacılar depremlerin ve zeminlerin özelliklerini kullanarak YHTD geliştirmişlerdir (örneğin Campbell 1997, Sadıgh ve diğ. 1997, Kalkan ve Gulkan 2004, Boore ve Atkinson 2008, Akkar ve Bommer 2010, Akkar ve diğ. 2014, Campbell ve Bozorgnia 2014, Graizer ve Kalkan 2015). Bu çalışma kapsamında Kalkan ve Gulkan (2004), Sadıgh ve diğ. (1997), Ambraseys ve diğ. (1996), Akkar ve Bommer (2010) ve Akkar ve diğ. (2014) denklemleri kullanılmıştır.

##### 3.1.1) Kalkan ve Gulkan (2004) Yer Hareketi Tahmin Denklemi

Kalkan ve Gulkan (2004) Türkiye’de 1976-2003 yılları arasında meydana gelen 57 adet depreme ait 112 kuvvetli yer hareketi kaydını kullanarak denklem 1’i elde etmiştir:

$$\ln Y = b_1 + b_2(M - 6) + b_3(M - 6)^2 + b_5 \ln r + b_v \ln \left( \frac{V_S}{V_A} \right) \quad (1)$$

Denklemden, Y: yer hareketi parametresini (en büyük yer ivmesi), M: magnitüdü,  $b_1=0.393$ ,  $b_2=0.576$ ,  $b_3=-0.107$ ,  $b_4=-0.899$ ,  $b_v=-0.2$ ,  $V_A=1112$ ,  $V_S=S$  dalgası hızı ve r ise depremden çalışma alanına olan hiposantr uzaklığını  $((r_{epi}^2 + h^2)^{1/2})$  ifade etmektedir.  $V_A$  değeri gerçek olmayan bir hız değeri olup regresyon sonucunda belirlenmiş bir değerdir (Kalkan ve Gulkan

2004). Kalkan ve Gulkan (2004), bu denklemin magnitudü 4.0 ile 7.4 arasında olan depremlerde maksimum 250 km mesafe için kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

### 3.1.2) Sadigh ve diğ. (1997) Yer Hareketi Tahmin Denklemi

Sadigh ve diğ. (1997), Kaliforniya'da meydana gelen depremleri kullanarak iki farklı zemin sınıfı için farklı denklemler önermişlerdir. Bu denklemler magnitudü 4'ten büyük depremler için ve maksimum 200 km uzaklık için kullanılabilir. Sağlam zeminler için denklem 2 önerilmektedir:

$$\ln y = C_1 + C_2 M + C_3 (8.5 - M)^{2.5} + C_4 \ln(r_{rup} + \exp(C_5 + C_6 M)) + C_7 \ln(r_{rup} + 2) \quad (2)$$

Denklemde,  $C_1=-1.92$ ,  $C_2=1.11$ ,  $C_3=0$ ,  $C_4=-2.1$ ,  $C_5=-0.4845$ ,  $C_6=0.524$ ,  $C_7=0$ .

Daha gevşek zeminler için ise denklem 3 önerilmiştir:

$$\ln y = C_1 + C_2 M - C_3 \ln(r_{rup} + C_4 e^{C_5 M}) + C_6 + C_7 (8.5 - M)^{2.5} \quad (3)$$

Denklemde,  $M$ =magnitudü,  $r_{rup}$  hiposantr uzaklığını ( $(r^2+h^2)^{1/2}$ ),  $C_1=-2.17$ ,  $C_2=1$ ,  $C_3=-1.7$ ,  $C_4=0.3825$ ,  $C_5=0.5882$ ,  $C_6=0$ ,  $C_7=0$  ifade etmektedir.

### 3.1.3) Ambraseys ve diğ. (1996) Yer Hareketi Tahmin Denklemi

Ambraseys ve diğ. (1996), Avrupa ve civarında meydana gelen depremleri kullanarak bir denklem geliştirmiştir. Bu bağıntı (Denklem 4) magnitudü  $4.0 < M_s < 7.5$  olan depremler ve maksimum 200 km uzaklık için kullanılabilir:

$$\log y = C_1 + C_2 M + C_4 \log r_{rup} + C_A S_A + C_S S_S \quad (4)$$

Denklemde,  $M$ =magnitudü,  $r_{rup}$  hiposantr uzaklığını ( $(r^2+h^2)^{1/2}$ ),  $C_1=-1.48$ ,  $C_2=0.266$ ,  $C_4=-0.922$ ,  $C_A=0.117$ ,  $C_S=0.124$  ifade etmektedir.

Denklemde bulunan  $S_A$  ve  $S_S$  ise zemin sınıfına göre aşağıda gösterildiği gibi farklı değerler almaktadır.

$V_s > 750$  m/s,  $S_A=0$ ,  $S_S=0$ ,  
 $360 < V_s \leq 750$  m/s,  $S_A=1$ ,  $S_S=0$ ,  
 $180 < V_s \leq 360$  m/s,  $S_A=0$ ,  $S_S=1$ ,  
 $V_s \leq 180$  m/s,  $S_A=0$ ,  $S_S=1$ .

### 3.1.4) Akkar ve Bommer (2010) Yer Hareketi Tahmin Denklemi

Akkar ve Bommer (2010), çoğunluğu Avrupa ve civarında meydana gelen magnitudü 5.0 ile 7.6 arasında değişen 131 adet depreme ait 532 kuvvetli yer hareketi kaydı kullanarak denklem 5'te gösterilen bağıntıyı geliştirmiştir:

$$\log y = b_1 + b_2 + b_3 M^2 + (b_4 + b_5 M) \log \sqrt{R_{jb}^2 + b_6^2} + b_7 S_S + b_8 S_A + b_9 F_N + b_{10} F_R \quad (5)$$

Denklemde,  $b_1=1.04159$ ,  $b_2=0.91333$ ,  $b_3= -0.08140$ ,  $b_4= -2.92728$ ,  $b_5=0.28120$ ,  $b_6=7.86638$ ,  $b_7=0.08753$ ,  $b_8=0.01527$ ,  $b_9=-0.04189$ ,  $b_{10}=0.08015$ ,  $R_{jb}$  Joyner-Boore uzaklığını ve  $M$  ise magnitudü ifade etmektedir.  $F_N$  ve  $F_R$  katsayıları farklı fay türlerine göre aşağıdaki gibi değer almaktadır;

Normal faylar için:  $F_N=1, F_R=0$

Ters faylar için:  $F_N=0, F_R=1$

Doğrultu atımlı faylar için:  $F_N=0, F_R=0$ .

$S_S$  ve  $S_A$  katsayıları ise farklı zemin sınıflarına göre aşağıdaki gibi değer almaktadır;

Zayıf Zemin:  $S_S=1, S_A=0$

Sağlam Zemin:  $S_S=1, S_A=0$

Ana Kaya:  $S_S=0, S_A=0$ .

### 3.1.5) Akkar ve diğ. (2014) Yer Hareketi Tahmin Denklemi

Akkar ve diğ. (2014), daha önce Avrupa'da yapılmış olan yer hareketi tahmin denklemlerine (Ambraseys ve diğ. 1996, Akkar ve Bommer 2010, Bommer ve diğ. 2003) daha fazla veri ekleyerek güvenilir bir ilişki geliştirmiştir. Özellikle yeni formda  $V_{S30}$  hızının eklenmesi ve magnitüd aralığının genişletilmesi ile modelin kullanım aralığı da arttırılmıştır. Akkar ve diğ. (2014) tarafından hazırlanan yer hareketi tahmini denklem 6-8'de verilmektedir:

$$\ln(Y) = \ln[Y_{REF}(M_w, R, SoF)] + \ln[S(V_{S30}, PGA_{REF})] + \varepsilon\sigma \quad (6)$$

Denklemde,

$$\ln(Y_{REF}) = \begin{cases} a_1 + a_1(M_w - c_1) + a_3(8.5 - M_w)^2 + [a_4 + a_5(M_w - c_1)] \ln(\sqrt{R^2 + a_6^2}) + \\ a_8 F_N + a_9 F_R & M_w \leq c_1 \text{ için} \\ a_1 + a_7(M_w - c_1) + a_3(8.5 - M_w)^2 + [a_4 + a_5(M_w - c_1)] \ln(\sqrt{R^2 + a_6^2}) + \\ a_8 F_N + a_9 F_R & M_w > c_1 \text{ için} \end{cases} \quad (7)$$

$$\ln(S) = \begin{cases} b_1 \ln\left(\frac{V_{S30}}{V_{REF}}\right) + b_2 \ln\left[\frac{PGA_{REF} + c(V_{S30}/V_{REF})^n}{(PGA_{REF} + c)(V_{S30}/V_{REF})^n}\right] & V_{S30} \leq V_{REF} \text{ için} \\ b_1 \ln\left[\frac{\min(V_{S30}, V_{CON})}{V_{REF}}\right] & V_{S30} > V_{REF} \text{ için} \end{cases} \quad (8)$$

Denklemde,  $c_1$  magnitüd için kritik bir değer olan 6.75 olarak kullanılmaktadır.  $V_{REF}$  ve  $V_{CON}$  ise sırasıyla 750 ve 1000 m/sn olarak verilmiştir.  $PGA_{REF}$  ise denklem 7 ile verilen referans yer hareketi modelinden hesaplanmaktadır.

Denklem katsayıları ise,  $a_1=2.52977$ ,  $a_2=0.0029$ ,  $a_3=-0.05496$ ,  $a_4=-1.31001$ ,  $a_5=0.2529$ ,  $a_6=7.5$ ,  $a_7=-0.5096$ ,  $a_8=-0.1091$ ,  $a_9=0.0937$ ,  $b_1=-0.41997$ ,  $b_2=-0.28846$ ,  $c_1=6.75$ ,  $c=2.5$ ,  $n=3.2$  ve  $\sigma=0.7312$ 'dir. Bu denklem için ivme değerleri hesaplanırken Akkar ve diğ. (2014) tarafından sunulan Excel dosyası kullanılmıştır.

### 3.2) Tek İstasyon Mikrotremor (Nakamura) Yöntemi

Bu yöntem, mikrotremorlerin yüzeye yakın kaynaklardan gelen titreşimlerden oluştuğunu varsaymaktadır (Nakamura 1989; 2019). Bu yöntemde göre titreşimlerin düşey bileşenleri zemin tabakalarından etkilenmemesine rağmen yatay bileşenler yer altı tabakalarının yoğunluk ve hızlarına bağlı olarak değişimlerden büyük oranda etkilenmektedir. Bu motivasyon ile denklem 9'da görüldüğü gibi yatay bileşen spektrumunun düşey bileşen spektrumuna oranlanması ile zemine ait dinamik özellikler elde edilebilir (Nakamura 1989; 2019).

$$HVSr = \sqrt{(NS^2) + (EW^2)} / V \quad (9)$$

Denklemden, NS, EW ve V sırasıyla Kuzey-Güney, Doğu-Batı ve düşey bileşenin genlik spektrumunu ifade etmektedir.

Zemin ve yapı periyodunu belirlemek için tek istasyon mikrotremor yöntemi günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çalışma alanına ait zemin hâkim frekans ( $1/T$ ) ve büyütme faktörü ( $A$ ) değerleri Nakamura yöntemi kullanılarak elde edilmiştir (Nakamura 1989; 2019). Düşük zemin hâkim frekans değerlerinde elde edilen zemin büyütme faktörü değerleri gevşek zeminler ile yüksek frekanslardaki büyütme faktörü kompakt birimler ile ilişkilendirilmektedir (Borcherdt ve diğ. 1991, Park ve diğ. 1999, Louie 2001, Okada 2003, Pamuk ve diğ. 2017, Subasi ve diğ. 2019).

Bu çalışmada mikrotremor verileri değerlendirilirken veri işlem aşamasında bant geçişli filtre (0.05-20 Hz) ve %5 işleçli kosinüs törpü uygulanmıştır. En az 25 sn'lik pencereler kullanılarak en az 12 pencere seçilmiştir. Hesaplanan spektrumlarda b- katsayısı 40 olarak belirlenmiş ve Konno-Ohmachi yuvarlatması uygulanmıştır (Konno ve Ohmachi 1998).

Yatay/Düşey Spektral Oran (HVSR) tekniği hem gürültü kaydı hem de deprem kaydı kullanılarak hesaplanabilmektedir (Lermo ve Chavez-Garcia 1993, Bonilla ve diğ. 1997, Yalcinkaya ve Alptekin 2005, Parolai 2012, Ozer 2019, Pamuk ve Ozer 2020, Aydın ve diğ. 2021). Bu yöntem genellikle kuvvetli yer hareketi istasyonlarının bulunduğu lokasyonların zemin dinamik özelliklerini ortaya çıkarmak için tercih edilmektedir. Hesaplamalar uygulanırken S-dalga genliğinden birkaç saniye öncesinden deprem kaydının bitişine kadar tek pencere kullanılarak hesaplamalar yapılır. Daha sonra aynı istasyona ait HVSR eğrilerinin ortalaması alınarak ilgili lokasyonu temsil edecek tek bir eğri elde edilir. Bu çalışmada Sivrice ilçesinde mikrotremor çalışmaları sürdürülürken birçok artçı şok da kaydedilmiştir. Sivrice ilçesinde yürütülen mikrotremor ölçümleri sırasında kaydedilen deprem kayıtları kullanılarak zemin hâkim frekans ( $1/T$ ) ve büyütme faktörü ( $A$ ) değerleri hesaplanmıştır. Böylelikle Sivrice'deki ölçüm noktası için gürültü ve deprem kayıtları kullanılarak elde edilebilen parametreler farklı teknikler ile değerlendirilerek karşılaştırılmıştır.

### 3.2.1) Ampirik $V_{s30}$ değerleri

Nakamura yöntemi ile belirlenen zemin hakim frekans ve büyütme faktörü kullanılarak ölçüm alınan noktalara ait  $V_{s30}$  değerini hesaplamak için Stanko ve Markusic (2020) tarafından geliştirilen ampirik ilişki kullanılmıştır (Denklem 10).

$$V_{s30} = e^{(5.34+0.46*\ln(\frac{1}{T}))} \quad (10)$$

Denklemden, T Nakamura yöntemi ile hesaplanan periyot değerini ifade etmektedir.

### 3.2.2) Hasar Görebilirlik İndisi ( $Kg$ )

Nakamura (1997; 2000) yapmış olduğu çalışmalarda hasar görebilirlik indisi ( $Kg$ ) ile maksimum genlik-frekans değerleri arasında bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Bu yöntem kullanılarak deprem meydana gelmeden önce çalışma alanına ait tehlikeli alanların tespitinin yapılabileceği belirtilmiştir.  $Kg$  değeri denklem 11'de görüldüğü gibi hesaplanabilmektedir.

$$Kg = A^2 * T \quad (11)$$

Denklemden,  $Kg$  hasar görebilirlik indisi,  $A$  büyütme faktörü ve  $T$  hakim periyot ( $1/f$ ) değerleridir.

### 3.2.3) Zemin Dinamik Analizleri

Hasar görebilirlik indisi ve anakayada beklenen en büyük ivme değeri kullanılarak kuvvetli yer hareketi sırasında meydana gelebilecek kayma şekil değiştirmeleri hesaplanabilmektedir (Nakamura 1996; 1997; 2000). Nakamura (1997) tarafından önerilen bu yöntem ile kayma şekil değiştirmesi denklem 12'de verildiği gibi hesaplanmaktadır;

$$\gamma_e = Kg * \frac{e}{(\pi^2 * V_b)} * a_{max} \quad (12)$$

Denklemde, Kg hasar görebilirlik indisini,  $V_b$  anakayaya ait kesme dalgası hızını  $a_{max}$  ise deprem nedeniyle anakayada oluşabilecek ivme değerini gal cinsinden ifade etmektedir.  $e$  ise sabit katsayıdır ve değeri 0.6 (%60)'dır (Nakamura 2000).

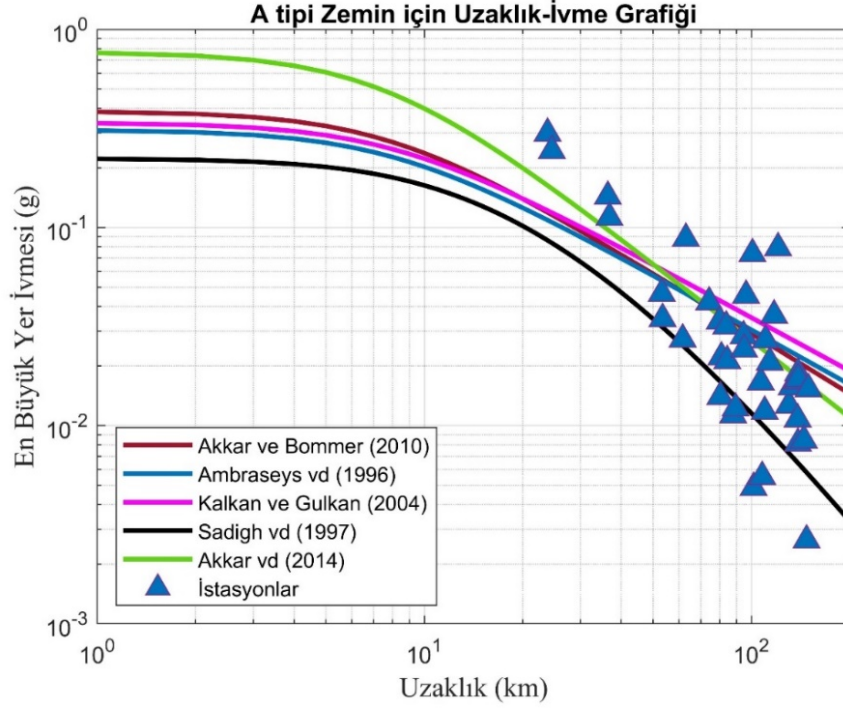
## 4. BULGULAR

### 4.1) Yer Hareketi Tahmin Denklemleri

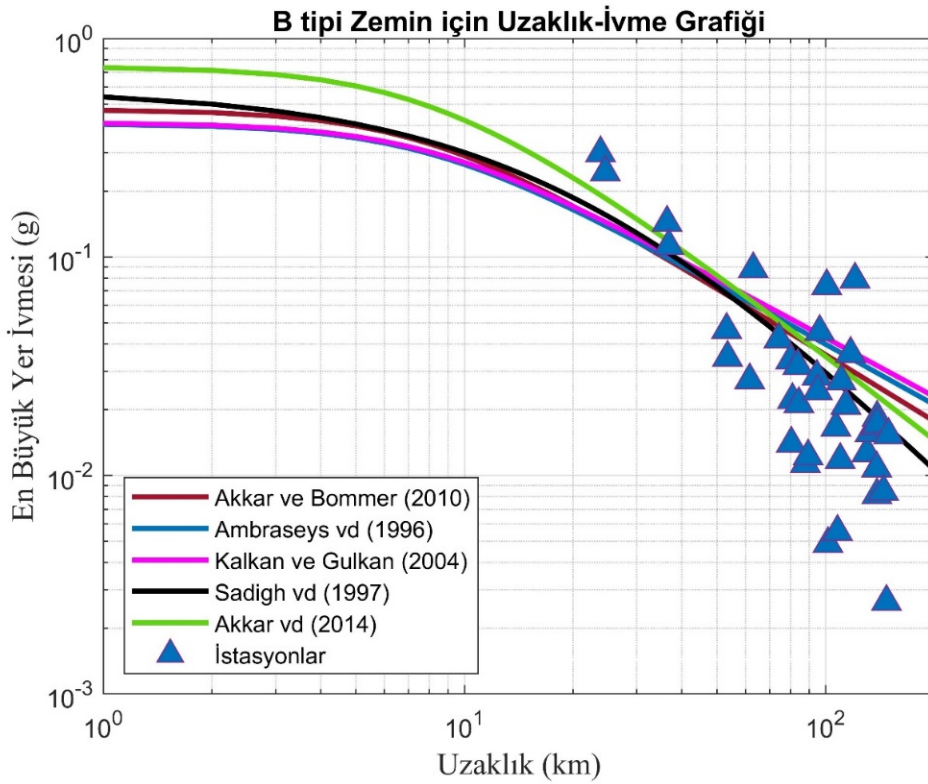
Bu çalışmada 24 Ocak 2020 tarihinde Elazığ ili Sivrice ilçesinde meydana gelen 6.8 büyüklüğündeki depreme ait ivme kayıtları ve literatürde kullanılan yer hareketi tahmin denklemlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu amaç için ilk olarak farklı araştırmacılar tarafından hazırlanan yer hareketi tahmin denklemleri kullanılarak uzaklık-ivme değerleri farklı zemin sınıfları dikkate alınarak hesaplanıp grafikleri çizdirilmiştir. Ayrıca bu grafikler üzerinde Sivrice depreminde istasyonlarda kaydedilen en büyük yer ivmesi değerleri de gösterilmektedir. Bu çalışma kapsamında zemin sınıfları oluşturulurken Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018)'nde belirtilen  $V_{s30}$  hızlarına göre üç farklı zemin sınıfına göre tasarlanmıştır.

A tipi zemin grafiği incelendiğinde ( $V_{s30}=760$  m/sn), yaklaşık 40 km uzaklığa kadar en büyük ivme değerleri Akkar ve diğ. (2014) ilişkisi ile hesaplanırken en küçük ivme değerleri ise Sadigh ve diğ. (1997) ile hesaplanmıştır. Fakat 40 km uzaklıktan sonra Akkar ve diğ. (2014) değerleri hızlı bir azalış göstererek ölçülen ivme değerlerine daha yakın değerler tespit edilmiştir. A tipi zemin için kullanılan yer hareketi tahmin denklemlerinden Akkar ve diğ. (2014) ilişkisinin daha iyi uyum sağladığı görülmektedir (Şekil 3).

B tipi zemin grafiği incelendiğinde ( $V_{s30}=360$  m/sn), 40 km uzaklığa kadar en yüksek değerler Akkar ve diğ. (2014) ile hesaplanırken, diğer dört yer hareketi tahmin denkleminde benzer bir davranış sergilenmiştir. Yaklaşık 60 km uzaklıkta beş denklem de benzer bir karakter göstermektedir. B tipi zemin için hesaplanan ivme değerleri gözlenen ivme değerlerinden daha yüksek olduğu gözlenmiştir (Şekil 4).

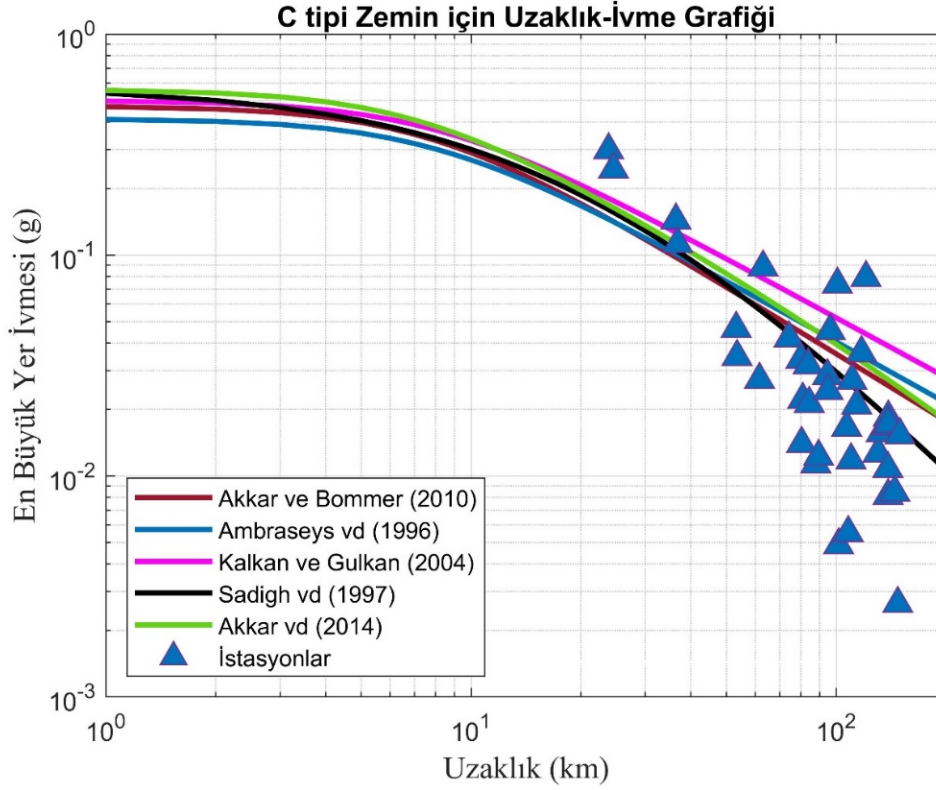


Şekil 3: A tipi zemin için ( $V_s30=760$  m/sn) yer hareketi tahmin denklemleri ve kuvvetli yer hareketi istasyonlarında kaydedilen ivme değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4: B tipi zemin için ( $V_s30=360$  m/sn) yer hareketi tahmin denklemleri ve kuvvetli yer hareketi istasyonlarında kaydedilen ivme değerlerinin karşılaştırılması

C tipi zemin grafiği incelendiğinde ( $V_{s30}=180$  m/sn), ~40 km uzaklığa kadar yer hareketi tahmin denklemleri benzer bir trend gösterirken bu uzaklıktan sonra trend değişmektedir. Artan uzaklıklarda en yüksek ivme değerleri Kalkan ve Gulkan (2004) denklemi kullanılarak elde edilirken en düşük ivme değerleri ise Sadigh ve diğ. (1997) ilişkisi kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 5).



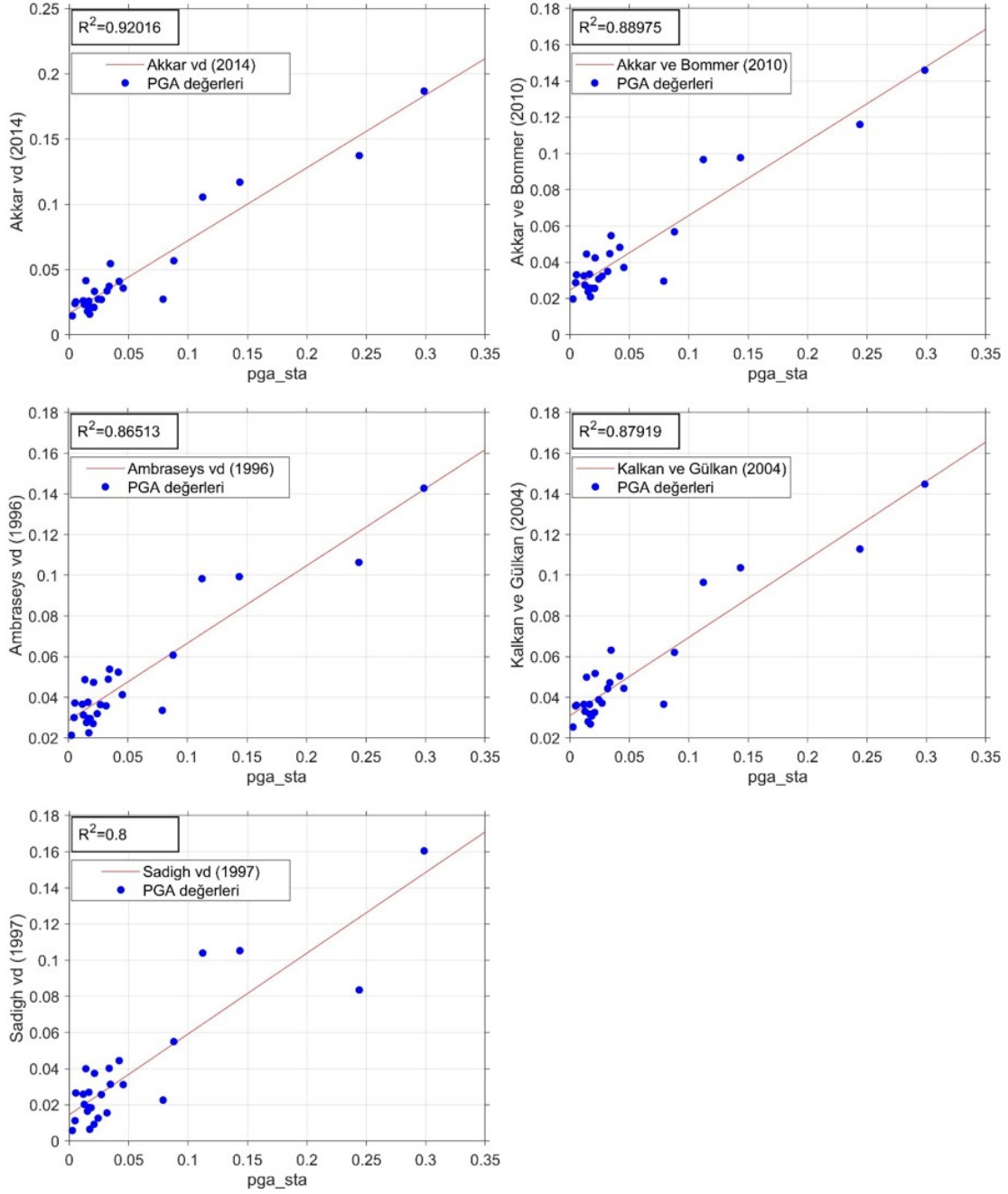
Şekil 5: C tipi zemin için ( $V_{s30}=180$  m/sn) yer hareketi tahmin denklemleri ve kuvvetli yer hareketi istasyonlarında kaydedilen ivme değerlerinin karşılaştırılması

Çalışmada 38 ivme istasyonu içerisinde 26 ivme istasyonuna ait  $V_{s30}$  hızları bilinmektedir (TADAS, 2020). Bu sismik hızlar ile birlikte her bir yer hareketi tahmin denklemi kullanılarak 26 ivme istasyonuna ait ivme değerleri hesaplanmıştır (Tablo 2). Kalkan ve Gülkan (2004) ilişkisi ile Akkar ve diğ. (2014) denkleminde  $V_{s30}$  hızı doğrudan bir girdi verisi olmasına rağmen diğer üç denklemde yerel zemin durumuna göre bir katsayı şeklindedir. Hesaplanan ve ölçülen ivme değerlerinin uyumunu incelemek için en küçük kareler regresyon analizi yapılmıştır. Yapılan regresyon analizi sonucunda  $R^2$  değerleri 0.80 ile 0.92 arasında elde edilmiştir (Şekil 6). En düşük  $R^2$  değeri Sadigh ve diğ. (1997) ilişkisi için elde edilirken en yüksek  $R^2$  değeri ise Akkar ve diğ. (2014) ilişkisi için hesaplanmıştır (Şekil 6). Bu durumun Akkar ve diğ. (2014) denkleminde  $V_{s30}$  hızının doğrudan kullanılması ile daha doğru bir yaklaşım yapabildiği olarak değerlendirilmektedir.

**Tablo 2:**  $V_s30$  hızı bilinen istasyonlara ait bilgiler ve yer hareketi tahmin denklemlerinden hesaplanan ivme değerleri (Kısaltmalar: ZS: Zemin Sınıfı, Amb96: Ambraseys ve diğ. (1996), AB10: Akkar ve Bommer (2010), KG04: Kalkan ve Gulkan (2004), Sdg07: Sadigh ve diğ. (1997), Ak14: Akkar ve diğ. (2014), Zemin sınıfı  $V_s30$  hızlarına göre şu şekilde belirlenmiştir:  $V_s30 \leq 360$  m/sn ise ZS=3,  $360 \leq V_s30 \leq 760$  ise ZS=2 ve  $V_s30 \geq 760$  ise ZS=1 olarak belirlenmiştir.)

No	Kod	PGA	$V_s30$	ZS	Amb96	AB10	KG04	Sdg97	Ak14
1	2308	0.29	450	2	0.14	0.15	0.14	0.16	0.19
2	4404	0.24	1380	1	0.11	0.12	0.11	0.08	0.14
3	2301	0.14	407	2	0.10	0.10	0.10	0.11	0.12
4	0204	0.11	555	2	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11
5	2302	0.034	907	1	0.05	0.05	0.06	0.03	0.05
6	4401	0.087	481	2	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06
7	0205	0.042	660	2	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04
8	0207	0.033	660	2	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04
9	2304	0.014	489	2	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04
10	4407	0.032	735	1	0.04	0.03	0.04	0.02	0.03
11	2307	0.021	329	3	0.05	0.04	0.05	0.04	0.03
12	4406	0.024	815	1	0.03	0.03	0.04	0.01	0.03
13	0201	0.045	391	2	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04
14	2305	0.004	907	1	0.03	0.03	0.04	0.01	0.02
15	4408	0.016	654	2	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03
16	2306	0.005	663	2	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03
17	4405	0.012	579	2	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03
18	2101	0.027	519	2	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03
19	2409	0.021	875	1	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02
20	6304	0.079	376	2	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03
21	2415	0.013	444	2	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02
22	2408	0.017	416	2	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02
23	0208	0.018	469	2	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02
24	6302	0.017	936	1	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02
25	2412	0.002	955	1	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01
26	4631	0.015	543	2	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02



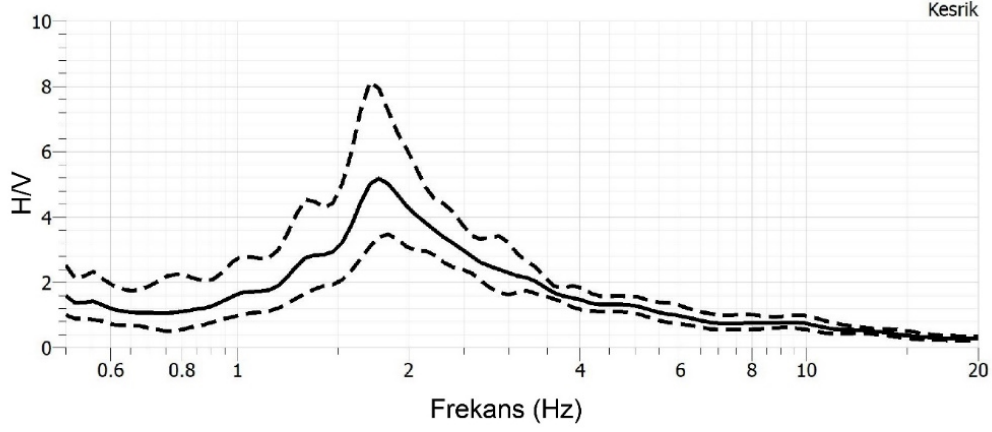


Şekil 6: Yer hareketi tahmin denklemleri ile hesaplanan ve gözlenen ivme değerlerinin karşılaştırılması

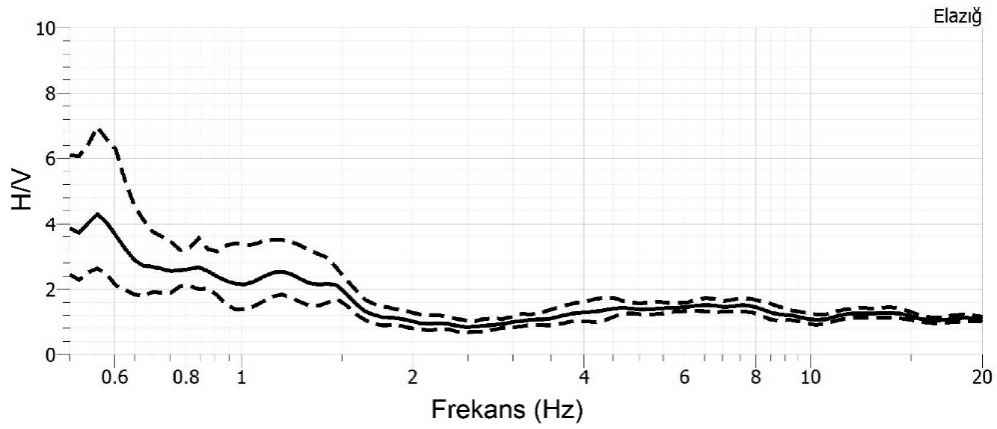
#### 4.2) Tek İstasyon Mikrotremor Çalışmaları

Sivrice depreminden bir gün sonra ana şok civarındaki üç farklı hasarlı bina önünde mikrotremor ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlerin alındığı noktaların koordinatları ve ana şoka olan uzaklıkları Tablo 3'te verilmiştir. Elde edilen periyot ve büyütme faktörü değerleri girdi olarak kullanılarak, denklem 10, 11 ve 12 yardımıyla mikrotremor ölçümleri yapılan noktalarda  $V_{s30}$ , hasar görebilirlik indisi ( $K_g$ ) ve kayma şekil değiştirme (Plastik-Elastoplastik) değerleri elde edilmiştir (Tablo 3). Plastik-Elastoplastik değeri hesaplanırken en iyi uyum sağlayan yer hareketi tahmin denklemi olan Akkar ve diğ. (2014) denklemi ile elde edilen ivme değeri kullanılmıştır.

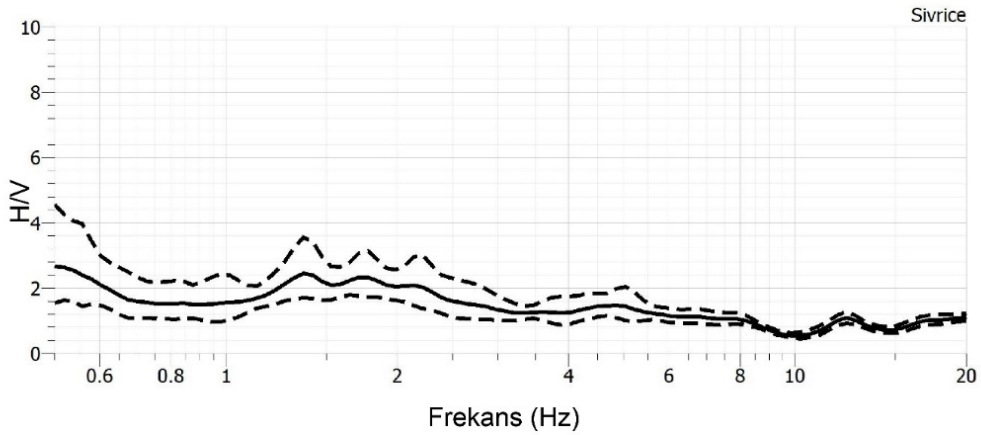
Nakamura yöntemi kullanılarak elde edilen zemin hâkim frekans ( $f$ ) ve büyütme faktörü değerleri (A) Tablo 3'te verilmiştir. Zemin hâkim frekans değerleri Kesrik, Elazığ ve Sivrice için sırasıyla  $\sim 1.75$  Hz;  $\sim 0.55$  Hz ve  $\sim 1.4$  Hz olarak elde edilirken büyütme faktörü değerleri ise  $\sim 5.1$ ,  $\sim 4.2$  ve  $\sim 2.3$  olarak elde edilmiştir (Şekil 7, 8 ve 9).



Şekil 7: Kesrik Köyünde alınan mikrotremor ölçümlerinin Nakamura (1989) yöntemine göre sonuçları



Şekil 8: Elazığ Şehir merkezinde alınan mikrotremor ölçümlerinin Nakamura (1989) yöntemine göre sonuçları



Şekil 9: Sivrice ilçesinde alınan mikrotremor ölçümlerinin Nakamura (1989) yöntemine göre sonuçları

En yüksek ampirik  $V_{s30}$  hızı 273 m/sn ile Kesrik ilçesinde hesaplanırken en küçük değer ise 158 m/sn ile Elazığ merkezde hesaplanmıştır. Sivrice için ise 243 m/sn  $V_{s30}$  hızı elde edilmiştir.

Dikmen ve diğ. (2016) yapmış oldukları çalışmada  $K_g$  değerini dört sınıfa ayırmıştır. Bunlar küçük  $K_g$  değerleri (0–5), orta  $K_g$  değerleri (6–10), yüksek  $K_g$  değerleri (11–20) ve çok yüksek  $K_g$  değerleridir (>20). Mikrotremor ölçümü alınan lokasyonlar için en yüksek  $K_g$  değeri 32 ile Elazığ merkezde elde edilirken en düşük değer ise 4 ile Sivrice’de elde edilmiştir. Kesrik ilçesinde alınan ölçüde ise  $K_g$  değeri 14 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2’de verilen  $a_{hes}$  değerleri ise Akkar ve diğ. (2014) ilişkisi kullanılarak hesaplanmıştır. En yüksek ivme değeri 0.18 g ile Sivrice’de elde edilirken en düşük değer ise 0.10 g ile Elazığ Merkez’de elde edilmiştir. Kesrik’de ise 0.12 g hesaplanmıştır (Tablo 3).

Ishihara (1996) kayma şekil değiştirme değerlerine göre zeminlerin davranışını elastik ve plastik durumlarını incelemiştir. Bu değer arttıkça ( $10^{-1}$  değerine yaklaştıkça) zeminlerin elastik özellikleri kaybolmakta ve üzerinde bulunan yapılarda hasar görme ihtimali artmaktadır (Tablo 4). Hesaplanan kayma şekil değiştirme değerlerine göre en riskli zemin Elazığ Merkez ölçüsünün alındığı lokasyon iken en risksiz zeminin ise Sivrice’de olduğu görülmektedir.

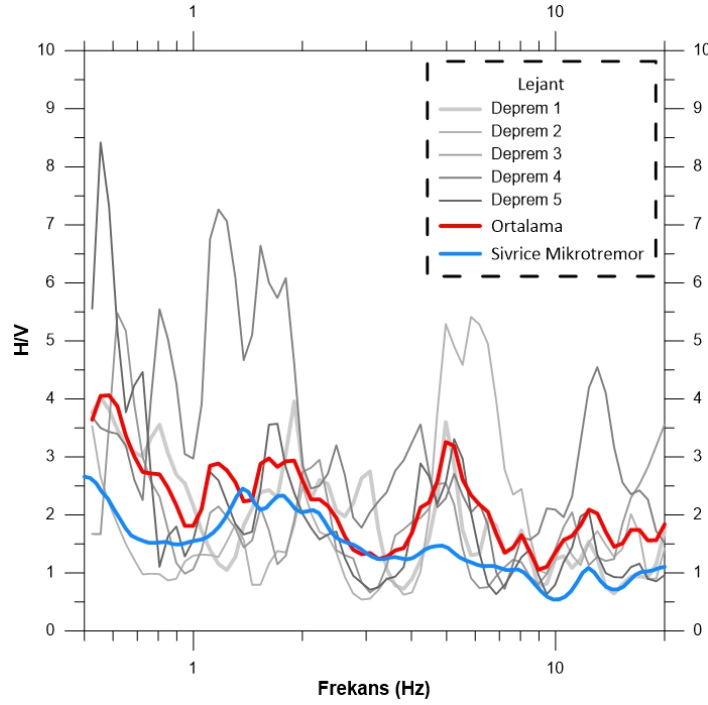
Tablo 3: Tek istasyon mikrotremor ölçülerine ait bilgiler

Lokasyon	Ölçü No	Enlem	Boylam	R (km)	f (Hz)	A	$V_{s30}$ (m/sn)	$K_g$	$Y_e$	$a_{hes}$ (g)
Kesrik- Elazığ	1	38.6613 <sup>0</sup>	39.2483 <sup>0</sup>	37	1.75	5.1	273	14	0.001430	0.12
Merkez- Elazığ	2	38.6751 <sup>0</sup>	39.2356 <sup>0</sup>	38	0.55	4.2	158	32	0.002570	0.10
Sivrice- Elazığ	3	38.4483 <sup>0</sup>	39.3088 <sup>0</sup>	24	1.40	2.3	243	4	0.000540	0.18

Tablo 4: Zeminin dinamik özelliklerinin kayma şekil değiştirme ile ilişkisi (Ishihara 1996; Nakamura, 1997).

Kayma-Şekil değiştirme ( $\gamma$ )	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$
Durum	Titreşim		Çatlak, oturma		Heyelan, Zemin Sıkışması, Sıvılaşma	
Dinamik özellikler	Elastik		Elasto-Plastik		Göçme	

Ateş (2021) deprem ve gürültü kayıtları kullanılarak aynı ölçüm noktasına ait zemin dinamik özelliklerini karşılaştırmış ve elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olduğunu belirtmiştir. Sivrice ilçesinde mikrotremor ölçümleri devam ederken (Şekil 1d) en büyüğü 4.1 olan yedi deprem kaydedilmiştir (Şekil 1e). Aynı kayıt içinde deprem ve gürültü kayıtlarının bulunması sebebiyle iki farklı teknik kullanılarak (gürültü ve deprem) zemin hâkim frekans ve zemin büyütme faktörü değerleri hesaplanmıştır (Şekil 10). Yedi adet deprem kaydı içinden sinyal/gürültü oranı yüksek olan beş adet deprem kaydı kullanılmıştır. Elde edilen beş depreme ait HVSR değerlerinin aritmetik ortalaması alınmıştır. Aynı noktada gürültü oranı düşük olan kayıtlar kullanılarak tek istasyon mikrotremor yöntemi ile HVSR değerleri hesaplanmıştır (Şekil 9). İki farklı tekniğe göre yapılan değerlendirmelerdeki (Şekil 10 mavi ve kırmızı eğriler), anomali karakteri uyum içerisindedir. Gerçek zemin büyütme değerlerini temsil edebilecek deprem kayıtlarından elde edilen HVSR eğrileri, mikrotremor kayıtlarından elde edilen HVSR eğrilerine göre nispeten bir miktar büyüktür ( $\sim 1$ ).



Şekil 10: Sivrice ilçesinde alınan ölçümlerinin deprem ve gürültü kayıtları kullanılarak elde edilen bulguların karşılaştırılması

## 5. SONUÇLAR

Elazığ ve çevresinde yapılan saha gözlemleri sonucunda mühendislik hizmeti almamış birçok yapı olduğu gözlemlenmiştir. Hasar gören kerpiç yapıların (birçoğu yaklaşık 70-80 yıllık) büyük bir çoğunluğuna 2010 yılındaki Kovancılar depremi de hafif ya da orta hasara yol açmıştır. 10 yıllık süre zarfında hasar gören taşıyıcı elamanlarda bazı amatör tedbirler alındığı gözlenmiştir. 2020 Sivrice depreminde bu tip yapıların büyük çoğunluğu yeniden farklı derecelerde hasar görmüştür. Yapı stokundaki yetersizliklere rağmen can ve mal kayıplarının beklenenden az olmasının en önemli sebebi zemindir. Yüksek  $V_{s30}$  hızlarından da takip edilebileceği üzere özellikle Sivrice depremi merkez üstünde rijit kayalar bulunmaktadır. Depremin episantrına en yakın iki istasyon olan 2308 ve 4404 istasyonlarında ivmeler düşüktür. Çalışma alanı içerisindeki 38 ivmeölçer içinde en düşük  $V_{s30}$  hızı 326 m/sn olup tüm  $V_{s30}$  hızlarının aritmetik ortalaması 638 m/sn olarak hesaplanmıştır. Bu durum ivme değerlerinin düşük olmasını ve hasarın beklenenden az olmasını açıklamaktadır. İvme istasyonlarında Sivrice depremi sonrasında hesaplanan PGA değerleri ile farklı yer hareketi tahmin denklemleri ile elde edilen ivme değerleri karşılaştırıldığında Akkar ve diğ. (2014) modelinin yakınsadığı görülmektedir. Bu modelde yakın istasyonlar gerçeğe göre çok daha küçük ivmeler hesaplarken, uzaklık arttıkça gerçek ve yer hareketi tahmin denklemlerinden elde edilen ivmelerin çok büyük ölçüde uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Hasar alan farklı yerleşim yerlerinden Kesrik, Elazığ ve Sivrice seçilerek yapılan mikrotremor ölçümlerinden elde edilen zemin hâkim frekansı değerleri sırasıyla  $\sim 1.75$  Hz;  $\sim 0.55$  Hz ve  $\sim 1.4$  Hz olarak elde edilirken, büyütme faktörü değerleri ise  $\sim 5.1$ ,  $\sim 4.2$  ve  $\sim 2.3$  olarak hesaplanmıştır. Ayrıca ampirik bağıntılar yardımıyla hesaplanan  $V_{s30}$ ,  $K_g$  ve kayma-şekil değiştirme değerleri zeminin dinamik özelliklerini ortaya çıkarmıştır. Elazığ Merkez'de kırsal yerleşim yerine beton dayanımı daha yüksek olarak nitelendirilebilecek malzemeler kullanılmasına rağmen birçok yapı farklı derecelerde hasar görmüşlerdir. Merkezde hasar alan yapıların çevresindeki zeminin  $V_{s30}$  hızı düşüktür ( $V_{s30} < 200$  m/sn) ve hasar görülebilirlik indisi 20'nin üzerindedir. Nakamura (1997; 2000)'ya göre hasar indisi 20'nin üzerindeki bölgeler

zemin açısından risklidir. Elazığ şehir merkezindeki hasarların birincil sebebi mühendislik hizmeti almayan yapılar ve yerel zemin koşulları olduğu düşünülmektedir. Ayrıca episantra en yakın olan 2308 istasyonunda hesaplanan ivme 0.29 g olup, Türkiye Deprem Tehlike Haritasındaki (TDTH 2018) 475 yıllık geri dönüş periyoduna göre PGA değeri 0.6 g'dir. Kesik köyünün yapı stokunun büyük çoğunluğu kerpiç evlerden oluşmaktadır. Bu lokasyonda hasar indisi 14 olarak hesaplanmış olup kritik eşiğe yakındır. Bu alanda hasar gören evlerin çoğunluğu Kerpiç olup, Kovancılar depreminde de hasar görmüş yapılarıdır. Sivrice depreminde 475 yıllık geri dönüş periyoduna göre beklenen ivmenin çok altında ivmeye sahip olmasına rağmen hasar gözlenmiştir. Episantra en yakın konumda bulunan Sivrice'de yapı stoku Kerpiç ve yığmadır. Kerpiç evlerin büyük çoğunluğu farklı derecelerde hasar görmüşlerdir. Bu bölgede en büyük hasar Sivrice Merkez Camide gözlenmiştir. Yol ve kırsal alandaki minör yüzey çatlakları incelendiğinde zayıflık zonu bu yapıya çok yakın bir lokasyonda bulunmaktadır. Sivrice ilçesinde hasar görülebilirlik indisi 4 olarak hesaplanmıştır. Episantra en yakın yerleşim yeri olmasına rağmen hasar çok daha azdır. Bu durum deprem yerleşim yerinin kompakt kayaçların üzerinde dağılması ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada deprem bölgesinde yapısal hasarların incelenmesine yönelik 25.01.2020 tarihinde gerçekleştirilen arazi çalışmasında ATA-DAM'a lojistik ve destek sağlayan Atatürk Üniversitesi Rektörlüğü'ne (ATA-DAM, 2020) ve deprem lokasyon bilgilerini ve ivme verileri internet üzerinden sağlayan AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı'na teşekkür ederiz. Fay bilgileri MTA çizim editöründen sayısallaştırılmıştır (Emre ve diğ. 2013; 2018). Mikrotremor ölçümleri Geopsy yazılımı (Wathelet ve diğ. 2020) kullanılarak analiz edilmiştir. Atatürk Üniversitesi'nde lisansı bulunan Arcgis ve Matlab programları bazı şekillerin ve hesaplamaların yürütülmesinde kullanılmıştır.

## KAYNAKLAR

Abrahamson N.A., Silva W.J., Kamai R., 2014. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions, *Earthquake Spectra* 30 (3), 1025-1055

AFAD, 2020. 24 Ocak 2020 Sivrice (Elazığ)  $M_w$  6.8 Depremi Raporu, Ankara. Erişim adresi: <https://deprem.afad.gov.tr/depremdokumanlari/1831>

Akkar S., Bommer J.J., 2010. Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East, *Seismological Research Letters* 81(2), 195-206

Akkar S., Sandikkaya M.A., Bommer J.J., 2014. Empirical ground-motion models for point-and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East, *Bulletin of Earthquake Engineering* 12 (1), 359-387

Aksoy E., Inceoz M., Kocyigit A., 2007. Lake Hazar basin: A negative flower structure on the east anatolian fault system (EAFS), SE Turkey, *Turkish Journal of Earth Sciences* 16(3), 319-338

Ambraseys N.N., Simpson K.U., Bommer J.J., 1996. Prediction of horizontal response spectra in Europe, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 25(4), 371-400

ATA-DAM, 2020. 24 Ocak 2020 (20:55 TS)  $M_w$ =6.8 Elazığ-Sivrice Depremi Değerlendirme Raporu, Erişim adresi: <https://atauni.edu.tr/yuklemeler/6e78326bb6db9ebe8d4c82123bfb62c.pdf>

Ateş E., 2021. Mikrotremor, Deprem ve Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analiz Yöntemi Kayıtları Kullanılarak Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi: AFAD Kampüsünden Örnek Bir Uygulama, *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi* 7(2), 240-251

Aydin U., Pamuk E., Ozer C., 2021. Investigation of soil dynamic characteristics at seismic stations using H/V spectral ratio method in Marmara Region, Turkey, *Natural Hazards* 1-20

Bayrak E., Yilmaz Ş., Softa M., Turker T., Bayrak Y., 2015. Earthquake hazard analysis for East Anatolian fault zone, Turkey, *Natural Hazards* 76(2), 1063-1077

Bommer J.J., Douglas J., Strasser F.O., 2003. Style-of-faulting in ground-motion prediction equations, *Bulletin of Earthquake Engineering* 1(2), 171-203

Bonilla L.F., Steidl J.H., Lindley G.T., Tumarkin A.G., Archuleta R.J., 1997. Site amplification in the San Fernando Valley, California: variability of site-effect estimation using the S-wave, coda, and H/V methods, *Bulletin of the Seismological Society of America* 87(3), 710-730

Boore D.M., Atkinson G.M., 2008. Ground-motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV and 5% Damped PSA at Spectral Periods Between 0.01 s and 10 s, *Earthquake Spectra* 24(1), 99-138

Borcherdt R.D., Wentworth C.M., Glassmoyer G., Fumal T., Mork P., Gibbs J., 1991. On the observation and predictive GIS mapping of ground response in the San Francisco Bay region, California. In Fourth International Conference on Seismic Zonation, Stanford, California Procs., *Earth. Eng. Res. Inst.* 3, 545-552

Burchfiel B.C., Stewart J.H., 1966. "Pull-apart" origin of the central segment of Death Valley, California, *Geological Society of America Bulletin* 77(4), 439-442

Campbell K.W., 1997. Empirical Near-Source Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Pseudo-Absolute Acceleration Response Spectra, *Seismological Research Letters* 68(1), 154-179

Campbell K.W., 2003. Strong-motion attenuation relations, *International Geophysics Series* 81(B), 1003-1012

Campbell K.W., Bozorgnia Y., 2014. NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra, *Earthquake Spectra* 30(3), 1087-1115

Cetin H., Guneyli H., Mayer L., 2003. Paleoseismology of the Palu-Lake Hazar segment of the East Anatolian fault zone, Turkey, *Tectonophysics* 374 (3-4), 163-197

Cetin K.O., Cakir E., Ilgac M., Can G., Soylemez B., Elsaid A., Cuceoglu F., Gulerce Z., Askan A., Aydin S., Gör M., 2021. Geotechnical aspects of reconnaissance findings after 2020 January 24th, M6. 8 Sivrice-Elazig-Turkey earthquake, *Bulletin of Earthquake Engineering* 1-45

Cheloni D., Akinci A., 2020. Source modelling and strong ground motion simulations for the 24 January 2020, M w 6.8 Elazig earthquake, Turkey, *Geophysical Journal International* 223 (2), 1054-1068

Coban K.H., Sayil N., 2020. Different probabilistic models for earthquake occurrences along the North and East Anatolian fault zones, *Arabian Journal of Geosciences* 13(18), 1-16

Dikmen Ü., Hasançebi N., Arısoy M.Ö., Demirci İ., 2016. Estimation of source, path and site effect from S-waves of local earthquakes in Izmir, western Turkey, *Jeofizik* 18, 14-35

Dogru A., Bulut F., Yaltirak C., Aktug B., 2021. Slip distribution of the 2020 Elazig Earthquake (Mw 6.75) and its influence on earthquake hazard in the Eastern Anatolia, *Geophys. J. Int.* 224:389-400, <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa471>

Duman T.Y., Emre O., 2013. The East Anatolian Fault: geometry, segmentation and jog characteristics, Geological Society London, Special Publications, 372, 495-529

Emre O., Duman T.Y., Ozalp S., Elmaci H., Olgun Ş., Saroglu F., 2013. Active Fault Map of Turkey with an Explanatory Text. 1:1,250,000 Scale, General Directorate of Mineral Research and Exploration, Special Publication Series-30, Ankara-Turkey. ISBN: 978-605-5310-56-1

Emre O., Duman T.Y., Ozalp S., Saroglu F., Olgun S., Elmaci H., Can T., 2018. Active fault database of Turkey, *Bulletin of Earthquake Engineering* 16(8), 3229-3275

Gallovic F., Zahradnik J., Plicka V., Sokos E., Evangelidis C., Fountoulakis I., Turhan F., 2020. Complex rupture dynamics on an immature fault during the 2020 Mw 6.8 Elazig earthquake, Turkey, *Communications Earth & Environment* 1(1), 1-8

Graizer V.M., Kalkan E., 2015. Update of the Graizer-Kalkan ground-motion prediction equations for shallow crustal continental earthquakes (p. 79), US Department of the Interior, US Geological Survey.

Hempton M.R., Dunne L.A., 1984. Sedimentation in pull-apart basins: active examples in eastern Turkey, *The Journal of Geology* 92(5), 513-530

Hubert-Ferrari A., Lamair L., Hage S., Schmidt S., Cagatay M.N., Avsar U., 2020. A 3800 yr paleoseismic record (Lake Hazar sediments, eastern Turkey): Implications for the East Anatolian Fault seismic cycle, *Earth and Planetary Science Letters* 538, 116152

Ishihara K., 1996. Soil behaviour in earthquake geotechnics, Oxford Engineering Science Series.

Jamalreyhani M., Buyukakpinar P., Cesca S., Dahm T., Sudhaus H., Rezapour M., Isken M.P., Asayesh B.M., Heimann S., 2020. Seismicity related to the eastern sector of Anatolian escape tectonic: the example of the 24 January 2020 Mw 6.77 Elazig-Sivrice earthquake, *Solid Earth Discussions* 1-22

Kalkan E., Gulkan P., 2004. Site-dependent spectra derived from ground motion records in Turkey, *Earthquake Spectra* 20(4), 1111-1138

Konno K., Ohmachi T., 1998. Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components, *Bulletin of the Seismological Society of America* 88, 1, 228-241

Lermo J., Chavez-Garcia F.J., 1993. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bulletin of the seismological society of America* 83(5), 1574-1594

Louie J.N., 2001. Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays, *Bulletin of the Seismological Society of America* 91(2), 347-364

Moreno D.G., Hubert-Ferrari A., Moernaut J., Fraser J.G., Boes X., Van Daele M., Avsar U., Cagatay N., De Batist M., 2011. Structure and recent evolution of the Hazar basin: A strike-slip basin on the East Anatolian fault, eastern Turkey, *Basin Research* 23(2), 191-207

Nakamura Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, 30(1)

Nakamura, Y., 1996. Real-time information systems for seismic hazards mitigation UrEDAS, HERAS and PIC. Quarterly Report-Rtri, 37(3), 112-127

Nakamura Y., 1997. Seismic vulnerability indices for ground and structures using microtremor, In World Congress on Railway Research in Florence, Italy

Nakamura Y., 2000. Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications, In Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering, New Zealand: Auckland, 24, 25-30

Nakamura Y., 2019. What Is the Nakamura Method?, *Seismological Research Letters* 90(4), 1437-1443

Nalbant S.S., McCloskey J., Steacy S., Barka A.A., 2002. Stress accumulation and increased seismic risk in eastern Turkey, *Earth and Planetary Science Letters* 195(3-4), 291-298

Okada H., 2003. The microseismic survey method: Society of Exploration Geophysicists of Japan, *Geophysical Monograph Series*, 12

Ozer C., 2019. Investigation of the local soil effects of Erzurum and its surroundings using SSR and HVSR methods, *DEU Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering* 21(61), 247-257

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

Ozer C., Ozyazicioglu M., Gok E., Polat O., 2019. Imaging the crustal structure throughout the East Anatolian fault zone, Turkey, by local earthquake tomography, *Pure and Applied Geophysics*, 176(6), 2235-2261

Pamuk E., Ozdag O.C., Ozyalin S., Akgun M., 2017. Soil characterization of Tinaztepe region (İzmir/Turkey) using surface wave methods and Nakamura (HVSR) technique, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 16(2), 447-458

Pamuk E., Ozer Ç., 2020. The Site Effect Investigation with Using Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio Method on Earthquake Data, South of Turkey, *Geotectonics* 54(4), 563-576

Park C.B., Miller R.D., Xia J., 1999. Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics* 64(3), 800-808

Parolai S., 2012. Investigation of site response in urban areas by using earthquake data and seismic noise. In New manual of seismological observatory practice 2 (NMSOP-2), 1-38

Pousse-Beltran L., Nissen E., Bergman E.A., Cambaz M.D., Gaudreau E., Karasozen E., Tan F., 2020. The 2020 M w 6.8 Elazig (Turkey) earthquake reveals rupture behavior of the East Anatolian Fault, *Geophysical Research Letters* 47, e2020GL088136



Ragon T., Simons M., Bletery Q., Cavalie O., Fielding E., 2021. A stochastic view of the 2020 Elazig Mw 6.8 earthquake (Turkey), *Geophysical Research Letters* 48, e2020GL090704

Sadigh K., Chang C.Y., Egan J.A., Makdisi F., Youngs R.R., 1997. Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data, *Seismological research letters* 68(1), 180-189

Sertçelik F., 2012. Estimation of coda wave attenuation in the east Anatolia fault zone, Turkey, *Pure and applied Geophysics* 169(7), 1189-1204

Stanko D., Markusic S., 2020. An empirical relationship between resonance frequency, bedrock depth and  $V_{s30}$  for Croatia based on HVSR forward modelling, *Natural Hazards* 103(3), 3715-3743

Subasi O., Hasal M.E., Ozaslan B., Iyisan R., 2019. Yamanaka, H., Chimoto, K., Bir Boyutlu Dinamik Analiz ve Mikrotremor Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması, *Teknik Dergi* 30(5), 9459-9481

Şahin Ş., Öksüm E., 2021. The Relation of Seismic Velocity and Attenuation Pattern in the East Anatolian Fault Zone with Earthquake Occurrence: Example of January 24, 2020 Sivrice Earthquake, *Maden Tetkik ve Arama Dergisi* 164, 1-26

Şaroglu F., Emre O., Kuşçu I., 1992. The East Anatolian fault zone of Turkey, *Annales Tectonicae* 99-125 (Special Issue-Supplement to Volume VI)

TADAS, 2020. Türkiye İvme Veritabanı ve Analiz Sistemi, AFAD.

Erişim adresi: <https://tadas.afad.gov.tr>

Taymaz T., Ganas A., Yolsal-Cevikbilen S., Vera F., Eken T., Erman C., Keles D., Kapetanidis V., Valkaniotis S., Karasante I., Tsironi V., Gaebler P., Melgar D., Ocalan T., 2021. Source Mechanism and Rupture Process of the 24 January 2020 Mw 6.7 Doganyol-Sivrice Earthquake obtained from Seismological Waveform Analysis and Space Geodetic Observations on the East Anatolian Fault Zone (Turkey), *Tectonophysics* 804, 228745

TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

TDTH, 2018. Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması.

Erişim adresi: [tdth.afad.gov.tr](http://tdth.afad.gov.tr)

Wathelet M., Chatelain J.L., Cornou C., Di Giulio G., Guillier B., Ohrnberger M., Savvaidis A., 2020. Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing, *Seismological Research Letters* 91(3), 1878-1889

Xu J., Liu C., Xiong X., 2020. Source Process of the 24 January 2020 Mw 6.7 East Anatolian Fault Zone, Turkey, Earthquake, *Seismological Society of America* 91(6), 3120-3128

Yalcinkaya E., Alptekin O., 2005. Site effect and its relationship to the intensity and damage observed in the June 27, 1998 Adana-Ceyhan earthquake, *Pure and Applied Geophysics* 162(5), 913-930

Zülfikar A.C., 2020. 24 Ocak 2020. Elazığ Depreminin Kuvvetli Yer Hareketi Verilerinin Değerlendirilmesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 35(3), 821-834

## ARAŞTIRMA VERİSİ

Bu çalışmada deprem lokasyon bilgileri ve verileri Türkiye Deprem Veri Merkezi (TDVM) üzerinden elde edilmiştir. Fay bilgileri Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) çizim editöründen sayısallaştırılmıştır. Sahada yapılan mikrotremor ölçümlerinde Atatürk Üniversitesi Deprem Araştırma Merkezi sismometreleri kullanılmıştır.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ

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

## YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI

Katkı Türü	Yazarlar
Çalışmanın tasarlanması	E.B., Ç.Ö., H.Ç., M.E.K.
Literatür araştırma	E.B.
Saha çalışması, veri temini/derleme	Ç.Ö., H.Ç., M.E.K.
Verilerin işlenmesi/analiz edilmesi	E.B., Ç.Ö.
Şekil/Tablo/Yazılım hazırlanması	E.B., Ç.Ö.
Bulguların yorumlanması	E.B., Ç.Ö.
Makale yazımı, düzenleme, kontrol	E.B., Ç.Ö., H.Ç., M.E.K.



## Earthquake-Induced Sloshing Analysis of Circular Type Clarifier

Murat Aksel<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Alanya Alaaddin Keykubat University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Alanya, Antalya, Turkey  
ORCID: 0000-0002-6456-4396

### Keywords

Earthquake, Treatment Plant, Sloshing, Public and Environment Health

### Highlights

- \* Hydrodynamic variations in the circular type clarifier conditions were investigated during earthquake
- \* Sloshing wave heights were calculated
- \* Temporal variations were examined on hydrodynamics forces acting on vulnerable equipment

### Acknowledgements

The author would like to thank to Prof. Dr. Eren Uçkan and Assoc. Dr. Cengiz İpek about their encouragement and final review of the paper and also would like to thank to Izmit Water and Sewerage Directorate for sharing information of the clarifier.

### Aim

Aim of the study to understand earthquake-induced sloshing hydrodynamics of a water treatment unit, circular type clarifier.

### Location

Study area was Kocaeli Kullar Wastewater Treatment Plant

### Methods

Computational fluid dynamics was used to examine response of a circular type clarifier under sloshing and was calculated acting forces on vulnerable equipment.

### Results

Clarifiers and other water treatment units are vulnerable units for earthquake-induced sloshing. Computational fluid dynamics methods are useful to understand water treatment units response under sloshing.

### Supporting Institutions

--

### Manuscript

Research Article

Received: 25.10.2021

Revised: 28.11.2021

Accepted: 08.12.2021

Printed: 31.12.2021

### DOI

10.46464/tdad.1014192

### Corresponding Author

Murat Aksel

Email: murat.aksel@alanya.edu.tr

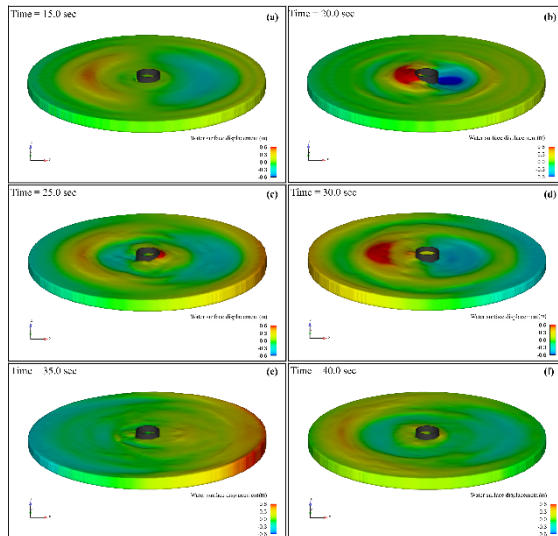


Figure  
Figure: Instantaneous earthquake-induced sloshing waves for (a)  $t = 15$  s, (b)  $t = 20$  s, (c)  $t = 25$  s, (d)  $t = 30$  s, (e)  $t = 35$  s and (f)  $t = 40$  s.

### How to cite

Aksel M., 2021. Earthquake-Induced Sloshing Analysis of Circular Type Clarifier, Turk. J. Earthq. Res. 3 (2), 149-166, <https://doi.org/10.46464/tdad.1014192>



## Dairesel Tipteki Çöktürme Havuzunun Deprem Altındaki Çalkalanma Analizi

Murat Aksel<sup>1</sup>

<sup>2</sup> Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Alanya, Antalya, Türkiye

ORCID: 0000-0002-6456-4396

### ÖZET

Büyük tanklar ve içinde hassas karıştırma ekipmanları bulunduran atık su arıtma tesisleri deprem açısından kritik altyapılardır. Depremler sırasında bu tür tesislerdeki yapıların hasar görmesi çevre kirliliğine neden olabilmekte ve halk sağlığına tehdit oluşturabilmektedir. Arıtma tesislerindeki gömülü havuzlar farklı geometri ve boyutlarda olmamasından dolayı çalkalanmaya bağlı dalga yüksekliğinin hava payını aşabilir. Bunu sonucunda deprem sırasında meydana gelebilecek taşmalar yeraltı suyunu kirleterek çevre problemine yol açabilir. Ayrıca bu havuzların içindeki yapısal olmayan elemanların deprem sırasında hasar görmesi sonucu arıtma birimleri devre dışı kalabilir. Bu durum deprem sonrasında tüm tesisin hizmet vermesini aksatacağı için halk sağlığını tehdit edecektir. Bu çalışma kapsamında Kocaeli il sınırları içinde yer alan Kullar Atıksu Arıtma Tesisindeki dairesel tipteki bir son çöktürme havuzunun Kocaeli 1999 deprem sinyali altındaki çalkalanma analizi sayısal modelleme yardımıyla incelenmiştir. Çalkalanmaya bağlı olarak havuz içinde 90 cm yüksekliğinde çalkantı dalgası ve havuz duvarının taban yakınında 5000 Pa hidrodinamik basınç hesaplanmıştır.

### Anahtar kelimeler

Deprem, Arıtma Tesisi, Çalkalanma, Çevre Kirliliği

### Öne Çıkanlar

- \* Dairesel tipteki arıtma ünitesinde depreme bağlı hidrodinamik koşullarda değişim incelenmiştir
- \* Çalkalanmaya bağlı olarak meydana gelen dalga yükseklikleri hesaplanmıştır
- \* Hassas ekipmanlarda çalkalanmaya bağlı kuvvet değerleri zaman serisi halinde hesaplanmıştır

### Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 25.10.2021  
Düzeltilme: 28.11.2021  
Kabul: 08.12.2021  
Basım: 31.12.2021

### DOI

10.46464/tdad.1014192

### Sorumlu yazar

Murat Aksel  
Eposta:  
murat.aksel@alanya.edu.tr

## Earthquake-Induced Sloshing Analysis of Circular Type Clarifier

Murat Aksel<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Alanya Alaaddin Keykubat University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Alanya, Antalya, Turkey

ORCID: 0000-0002-6456-4396

### ABSTRACT

Wastewater treatment plants with large tanks and sensitive mixing equipment are earthquake-critical infrastructures. Damage to the structures in such facilities during earthquakes can cause environmental pollution and threaten public health. Since the embedded pools in the treatment plants are not of different geometries and sizes, they may exceed the air share of the wave height due to the sloshing event. As a result, overflows that may occur during an earthquake can cause environmental problems by polluting the groundwater. Besides, treatment units may be disabled due to damage to non-structural elements in these units during an earthquake. This situation will threaten public health as it will disrupt the service of the entire facility after the earthquake. In this study, sloshing analysis under Kocaeli 1999 earthquake signal of a circular type clarifier in Kullar Wastewater Treatment Plant located in Kocaeli district was analyzed using numerical modeling tools. Due to the sloshing, 90 cm high water surface displacement in the clarifier and 5000 Pa hydrodynamic pressure near the bottom of the clarifier wall were calculated.

### Keywords

Earthquake, Treatment Plant, Sloshing, Public and Environment Health

### Highlights

- \* Hydrodynamic variations in the circular type clarifier conditions were investigated during earthquake
- \* Sloshing wave heights were calculated
- \* Temporal variations were examined on hydrodynamics forces acting on vulnerable equipment

### Manuscript

Research Article

Received: 25.10.2021  
Revised: 28.11.2021  
Accepted: 08.12.2021  
Printed: 31.12.2021

### DOI

10.46464/tdad.1014192

### Corresponding Author

Murat Aksel  
Email:  
murat.aksel@alanya.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Geçmişteki ve yakın zamandaki önemli depremler (örneğin, Loma Prieta 1989, Kobe 1995, Kocaeli 1999, Tohoku 2011) konutlara olduğu kadar sivil ve endüstriyel altyapılara da zarar vermiştir. Karayolları, havaalanları, köprü ve viyadükler, fabrikalar, depo sahaları, su iletim ve arıtma sistemleri vb. altyapılar örnek olarak verilebilir. Altyapı tesisleri deprem sonrasında fonksiyonelliğini koruması gereken kritik tesislerdir.

Deprem, su ve atıksu arıtma tesislerine (SAT ve AAT) direkt ve dolaylı etkilerde bulunur (EERI 1995, Kuraoka ve Rainer 1996, Schiff 1998, EERI 2001, Erdik 2001, Eindinger 2002, Rodriguez-Marek vd. 2003, Eidinger ve Yashinsky 2004, Yashinsky 2004, Kayen vd. 2007, Strand ve Masek 2007, EERI 2010, Tang ve Schiff 2010, Evans ve McGhie 2011, Tang vd. 2011, Eindinger ve Tang 2012, Wareham ve Bourke 2013, Panico vd. 2017). Tsunami, sel ve uzun süreli elektrik kesintileri depremin arıtma tesislerine dolaylı etkileridir. Direkt etkiler ise yapısal elemanlarda deformasyon ve kırılmalar (borular, tank duvarları, havuz perdeleri, taşıyıcı elemanlar vb.), zemin sıvılaşmasına bağlı farklı hasarlar (oturmalar, çökmeler, göçmeler, şev akması vb.) ve yapısal olmayan elemanlarda meydana gelen hasarlar (sıyırıcılar, karıştırıcılar, havalandırma başlıkları, ayırıcı panel ve perdeler, izleme ve kontrol ekipmanları vb.) (NIST 2014). Hasar nedenleri üç başlık altında toplanarak incelenebilir. Bu tür hasarlar genellikle kuvvetli yer hareketi, zemin göçmesi ve atalet kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır (Panico vd. 2017). Atalet kuvvetler, havuz geometrisi, derinliği ve deprem özelliklerine bağlı olarak arıtma havuzları içinde çalkalanmaya neden olmaktadır. Fay kırılmasına bağlı yer değiştirme sonucunda meydana gelen yapısal olmayan eleman hasarlarına ek olarak havuzlarda meydana gelen çalkalanma da yapısal olmayan elemanlarda hasara neden olmaktadır (Chung vd. 1996, Ballantyne ve Crouse 1997, Rodriguez-Marek vd. 2003, Meneses vd. 2010, Evans ve McGhie 2011, Eindinger ve Tang 2012, Wareham ve Bourke 2013, Panico vd. 2017).

Çalkalanma sadece yapısal olmayan elemanlarda hasarlara neden olarak tesisin kullanım dışı kalmasına sebep olmamakta ayrıca yetersiz hava payı sebebiyle havuzlardan suyun taşmasına da neden olmaktadır. Havuzlardan taşan atık veya kimyasal içerikli su yeraltı suyunu kirletmekte ve çevre sağlığını olumsuz etkilemektedir (Standley vd. 2008, McArthur vd. 2012, El Heloui vd. 2016). Arıtma sisteminde meydana gelecek hasarlar deprem sonrası halk sağlığı açısından kritik görevde olacak arıtma tesislerinin işlevselliği yitirmesine neden olacaktır. Hasarlı tesisler sebebiyle faaliyetini sürdüremeyen SAT ve AAT'ler, deprem sonrasında halkın temiz suyu erişimine ve kanalizasyonun sağlıklı arıtımına engel olacak ve halk sağlığını bozacaktır. Bu durum daha önceki deprem vakalarında da görüldüğü üzere salgın hastaların görülmesine ve hatta can kayıplarına neden olacaktır (Watson vd. 2007, Du vd. 2012, Kouadio vd. 2012, Marahatta 2015, Nelson vd. 2015, Lee vd. 2020, Maleki vd. 2020).

Deprem öncesinden arıtma tesislerindeki ünitelerin deprem kırılabilirliğinin ve hassasiyetinin tespit edilerek önlem alınması hem çevre ve halk sağlığının korunması açısından hem de sonrasında yaşanacak ekonomik kayıpların azaltılması açısından önemlidir. Arıtma tesisi üniteleri ile ilgili kırılabilirlik ve tesislerin deprem hassasiyetlerinin tespit edilmesi ile ilgili literatürde bazı tahmin yöntemleri bulunmaktadır (FEMA 2003, Pitilakis vd. 2007, Zare vd. 2010, Kakderi ve Argyroudís 2014, Yazıcı vd. 2015). Ancak bu yöntemler limit tasarım standartlarını net olarak belirlememekte sadece tesislerin zemin koşulu, yapım yılı, kullanılan yapı malzeme özelliği ve deprem etki bölgesine göre risk tahmini yapılmasına olanak tanımaktadır. Arıtma tesislerinin deprem sonrasında hasarlarının tespiti ve tespit edilen hasarların onarılması ve tesislerin tekrar devreye alınması olası risklerin azaltılması ile karşılaştırıldığında daha zor, uzun ve pahalı bir yaklaşımdır (Wang ve Fu 2011, Liu vd. 2013).

Literatürdeki arıtma tesisleri için hazırlanan yönetmelik, standart ve şartnameler çevre mühendisliği açısından hazırlanmıştır. Ülkemizdeki deprem tehlikesinin yüksek olduğu bölgelerde bu tür büyük ölçekli tesisler bulunmaktadır. Örneğin, İstanbul, Kocaeli, İzmir, Muğla,

Antalya vb. nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde özellikle bu tür tesisler daha büyük ölçekte dirler. Diğer taraftan bu tür tesisler su toplama kolaylığı açısından şehrin düşük kotlu ve genellikle alüvyonlu karakterdeki bölgelerinde konumlanmaktadır. Bu sebeple bu tür tesisler yüksek deprem riski barındıran kritik tesisler sınıfına dâhil edilebilir (Panico vd. 2013, Yazıcı vd. 2015). Mevcut deprem yönetmeliklerinde bu tür tesislerin deprem tasarım ve performanslarına ilişkin yeterli bilgi bulunmamaktadır.

Önemli depremler sonrasında yapılan saha incelemelerinde görülmektedir ki arıtma tesislerinde çalkalanmaya bağlı yapısal olmayan eleman hasarları en çok son çöktürme havuzlarında meydana gelmektedir (Wang ve Fu 2011, Eindinger ve Tang 2012, Panico vd. 2013, Kakderi ve Argyroudis 2014, NIST 2014, Panico vd. 2017). Son çökeltme havuzları çevre mühendisliği prosesi optimizasyonu gereği genellikle dairesel kesitli ve çap/derinlik oranı 4-9 olacak şekilde projelendirilirler (Metcalf ve Eddy 2003, Alpaslan vd. 2004). Bu boyutlar hem Türkiye’de hem de pek çok dünya ülkesinde uygulanan uluslararası standartlardır. Oranları ve içinde bulundukları kırılğan yapısal olmayan elemanları sebebiyle de arıtma tesislerinde deprem sonrasında en çok yapısal olmayan hasar gözlenen ünitelerdir.

Literatürde dairesel kesitli arıtma ünitelerinin çalkalanma analizine dair çalışmalar sınırlıdır. Dikici vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada farklı sonlu eleman yöntemlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Dairesel kesitli rijit tanklarla ilgili yapılmış çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar yakıt depolama üniteleri ve içme/kullanma suyu depolarına ait çalışmalardır (Aslam vd. 1979, Isaacson ve Subbiah 1991, Nezami vd. 2014, Caron vd. 2018, Sun vd. 2020). Bu çalışmalarda referans model olarak seçilmiş senaryolardaki deneysel ve/veya matematiksel modellerde kullanılan dairesel kesitli yapının sıvı dolu iç kısmında herhangi bir yapısal eleman bulunmamaktadır. Silindirik yapının ortası boşken meydana gelen çalkalanma dalgası, kararlı bir çalkalanma dalga yüksekliğinde ve yapının derinlik/çap oranına bağlı olarak karakteristik bir periyotta tekrar eden şekildedir. Çalkalanmanın azaltılması ile ilgili yapılan çalışmalarda ise iç bölgeye çalkalanma sönümleyici perde yapılar kullanılmaktadır. Bu perdeler iki şekilde konumlanmaktadır: 1) yatay, 2) düşey. İki durumda da perdeler çalkalanmayı azaltmakta, çalkalanma dalgalarındaki düzenli periyodu ve dalga yüksekliği karakterini etkilemektedir. Bu perdeli tank yapıları çöktürme havuzları ile geometrik benzerlikler taşımaktadır.

Gömülü çöktürme havuzları geometrilerinin deprem hareketine bağlı sıvı çalkalanmasında ne derece etkin bir rol oynadığı bilinmemektedir. Havuz içindeki yapısal olmayan elemanların çalkalanma sonucunda hasara açık noktaları ve hasar başlangıç durumları da belirsizlik taşınmaktadır. Ek olarak, bu havuzlarda meydana gelecek çalkalanma yükseklikleri de eksik olduğundan planlamada kullanılan şartname ve yönetmeliklerde deprem sebebiyle çalkalanma için hava payı gereksinimin de belirtilmesi gerekmektedir. Bu eksikliklerden yola çıkarak yapılan bu çalışmada arıtma tesisi ünitesinin önemli bir parçası olan dairesel tipli çöktürme havuzunun deprem altındaki davranışı incelenmiştir.

## 2. YÖNTEM

Türkiye için dönüm noktası olan 1999 Kocaeli Depremi sonrasında ülke genelinde inşa edilmiş pek çok arıtma tesisi bulunmaktadır. Özellikle deprem riski yüksek, deprem şiddeti büyük ve nüfus yoğunluğu fazla olan il ve ilçelerdeki arıtma tesislerinde tasarım kriterleri en uç değerlerde tutulmaktadır. Bunun başlıca nedeni arazi maliyetleri ve arıtma gerektiren debi miktarının da nüfusla orantılı şekilde yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında tasarım kriterleri açısından literatür değer üst limitinde çap 45 m olarak verilmektedir (Metcalf ve Eddy 2003, Alpaslan vd. 2004). Bu değer bahse konu olan İstanbul, Kocaeli, İzmir, Antalya gibi nüfus yoğun bölgelerde de sıklıkla kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında da bu durum göz önüne alınarak Kocaeli ili sınırları içinde bulunan Kullar Atıksu Arıtma Tesisinde (Şekil 1) çapı 45 m ve ortalama derinliği 3,5 m olan son çöktürme havuzuna ait geometri kullanılmıştır.



Şekil 1: Kullar Atıksu Arıtma Tesisi yerbulduru haritası

Dairesel kesitli havuza ait geometri kullanılarak hidrodinamik modelleme metodu yardımıyla havuzun Kocaeli deprem verisi altında çalkalanma analizi gerçekleştirilmiştir.

## 2.1) Hidrodinamik Modelleme

Çalkalanma analizi, farklı uygulama alanlarında farklı disiplin ve akademik çevreler tarafından hidrodinamik problemlerin çözülmesinde kullanılan, Flow-3D yazılımı yardımıyla Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri kullanılarak yapılmıştır (Richardson ve Panchang 1998, Smith ve Foster 2005, Najafi-Jilani vd. 2014, Bayon vd. 2016, Ghasemi ve Soltani-Gerdefaramarzi 2017, Musa vd. 2017, Chen ve Tfwala 2018, Li vd. 2020). Program çalkalanma analizlerinde de deneysel çalışmalarla doğrulamalı olarak kullanılmakta ve deney sonuçlarıyla uyumlu sonuçlar hesaplanmaktadır (Ransau ve Hansen 2006, Brizzolara vd. 2009, Ma ve Oka 2020).

Kullanılan temel denklemler aşağıda açıklanmıştır.

$$V_F = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (1)$$

Denklem 1'de  $V_F$  akıma açık hacmi,  $u$ ,  $v$  ve  $w$  hız bileşenlerini,  $\rho$  akışkan yoğunluğunu,  $R_{DIF}$  türbülans difüzyon katsayısını ve  $R_{SOR}$  kütle parametresini göstermektedir (FLOW-3D Version 12.0 Users Manual 2018).

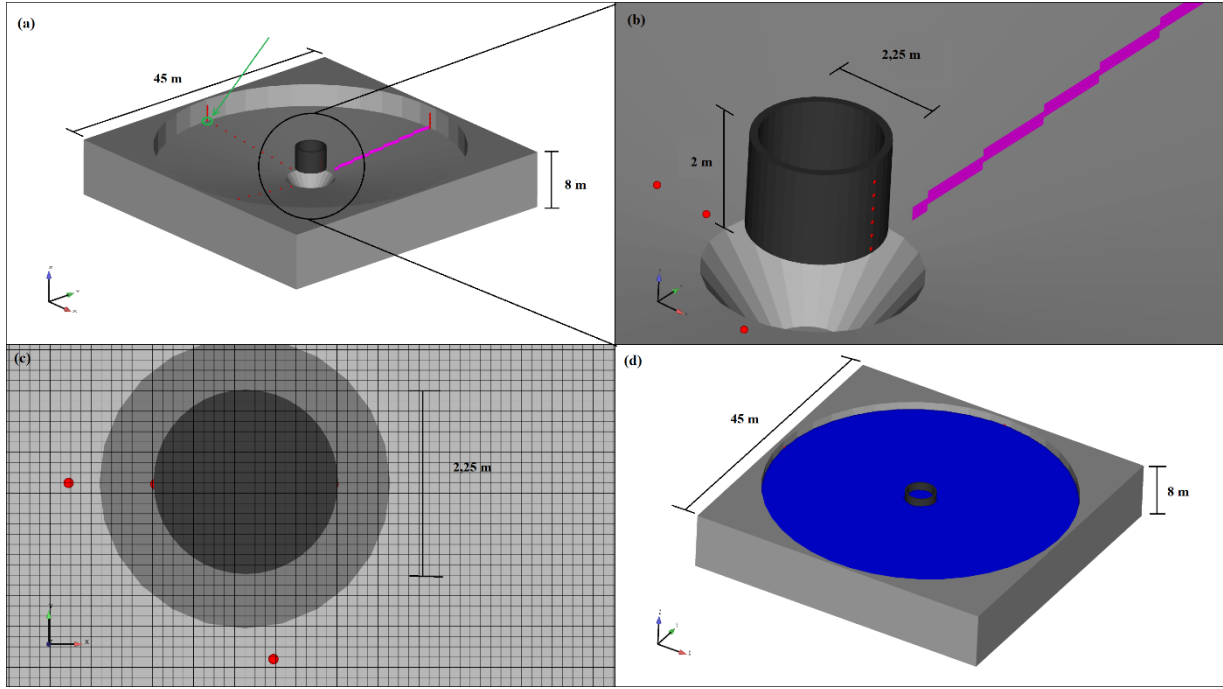
$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + R v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + R v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \left( R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + R v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \end{aligned} \quad (2)$$

Denklem 2'de  $G$  ( $G_x$ ,  $G_y$ ,  $G_z$ ) kütle kuvveti,  $f$  viskoz kuvvet,  $b$  porozite,  $U_w$  ( $u_w$ ,  $v_w$ ,  $w_w$ ) hız kaynağı bileşenlerini,  $U_s$  ( $u_s$ ,  $v_s$ ,  $w_s$ ) akışkan hızını ifade etmektedir (FLOW-3D Version 12.0 Users Manual 2018).

Modelleme kapsamında katı elemanlar hareketli eleman olarak işaretlenmiş hareket sınırları ve koşulları bir sonraki bölüm içinde tarif edilmiştir.

### 2.1.1) Modelin Tanıtımı, Koşulları ve Kabuller

Modelleme aşamalarının ilk adımında çöktürme havuzunun geometrik ölçüleri kullanılarak üç boyutlu katı bir modeli hazırlanmıştır. Hazırlanan katı model dikdörtgenler prizması olarak hazırlanmış, çözüm hacmi içine yüklenmiş ve kare ağ elemanları ile sonlu hacimlere ayrılmıştır. Çözümleme de kullanılan eleman boyutu 12,5 x 12,5 x 12,5 cm olarak seçilmiştir. Sınır koşulları olarak üst sınır atmosfere açık sınır diğer beş sınır ise geçirimsiz olarak alınmıştır. Akışkan ortamı sürekli kabul edilmiş ve ünite içindeki çamur/su fazı ayrımı ihmal edilmiştir. Yerçekimi ivmesi (-z) doğrultusunda 9,81 m<sup>2</sup>/s kabul edilmiş ve akışkan özellikleri olarak 20 °C sıcaklıktaki su özelliklerinde akışkan başlangıç durumunda işletme derinliğinde hesaplama hacmi içine işaretlenmiştir.

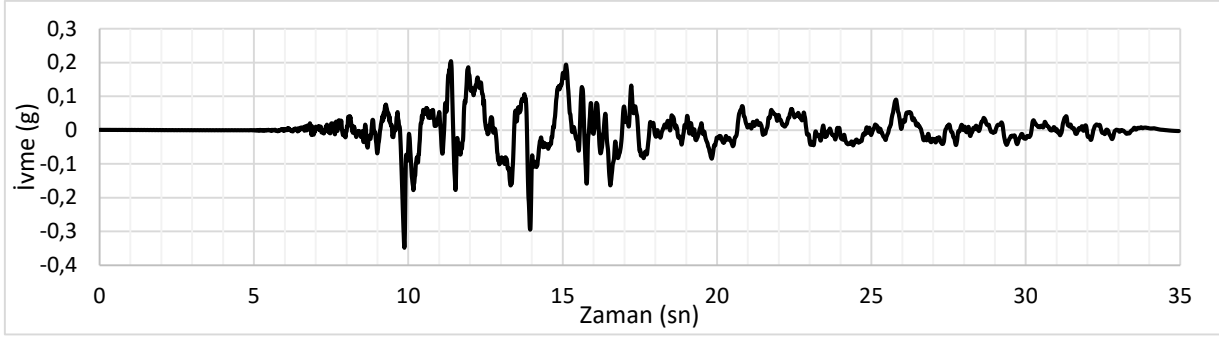


Şekil 2: Sayısal modellemede kullanılan (a) katı modelin isometrik görünümü (b) toplama konisi ve besleme kuyusunun yakın görünümü (c) eleman yapısı ve (d) başlangıç durumu

Şekil 2’de modelin geometrik özelliklerinin ve eleman yapısının bir görseli sunulmaktadır. Aynı görselde izleme noktaları kırmızı ile işaretlenmiştir. Ayrıca görselde (a) ve (b)’de görülen mor renkle işaretli bir yüzey izleme bölgesi de tanımlanmıştır. Bu tür ünitelerde bulunan taban sıyrıcılarına gelecek olan hidrodinamik kuvvetin hesaplanması adına bu bölge işaretlenmiştir. Deprem hareketi modelde x doğrultusunda tanımlanmış, model merkez noktası koordinat sisteminde orijin noktası olarak model hazırlanmıştır. Çamur sıyrıcının çalkalanma durumunda en olumsuz koşulda bulunması durumu olan harekete dik yüzey normaline sahip olacak şekilde yerleşim planlaması yapılmıştır.

Model içine belirlenen arıtma ünitesine ait katı kısım hareketli katı kısım olarak seçilmiştir. Hareketli kısımdaki hareket tanımı 1999 Kocaeli Depremi’nin Şekil 3’te verilen ivme kaydına göre ivme-hız dönüşü yapıldıktan sonra hız- zaman serisi halinde tanımlanmıştır. Katı elemanlarda elastik deformasyon ihmal edilmiş, yapısal elemanlar rijit kabul edilerek çözüm yapılmıştır.

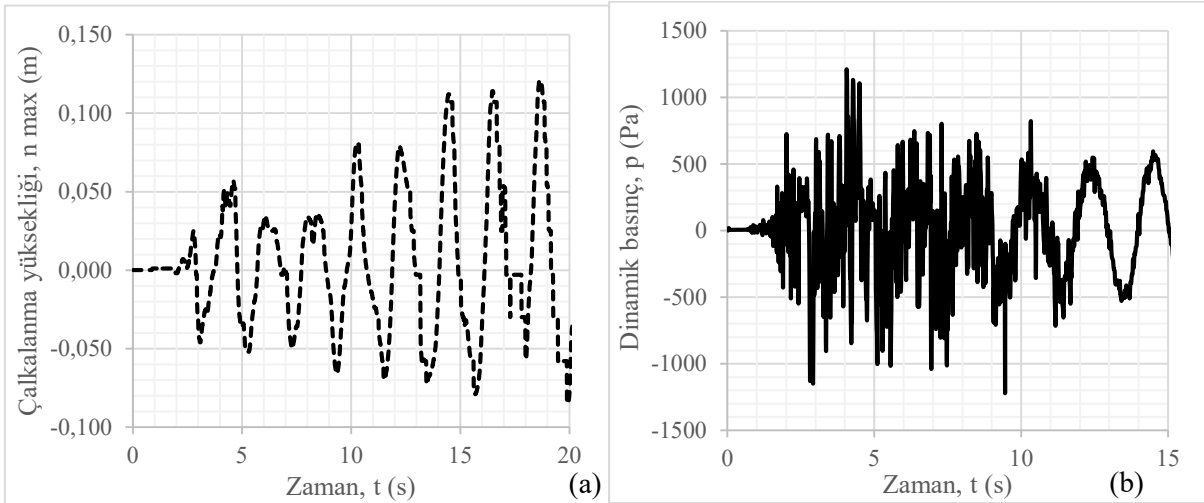




Şekil 3: Analizde kullanılan deprem sinyali (Kocaeli, 1999)

### 2.1.2) Modelin Doğrulanması ve Kalibrasyonu

Yerçekimi ivmesi dışında ilave ivmeye maruz kalan akışkanların davranışı yıllardır üzerinde farklı araştırmacıların çalıştığı önemli bir akışkanlar mekaniği sorunudur. Özellikle deprem ivmesi altında sıvı yakıt tankları ve su depoları ile ilgili literatürde pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar kapsamında akışkan davranışının hesaplanması için çeşitli teoriler geliştirilmiş, farklı geometrilerde ve akışkan özellikleri kullanılarak deneysel çalışmalar yürütülmüş, vaka çalışmaları ve sahadan hasar bilgileri paylaşılmış ve sayısal modelleme yardımıyla koruma önlemleri ve durum analizleri yapılmıştır (Faltinsen 1974, Shemer 1990, Waterhouse 1994, Minowa ve Kiyosumi 1997, Pilipchuk ve Ibrahim 1997, Solaas ve Faltinsen 1997, Faltinsen vd. 2000, Faltinsen ve Timokha 2001, Ibrahim vd. 2001, Lee vd. 2002, Xu ve Dai 2005, Hernandez vd. 2007, Kim 2007, Liu ve Lin 2008, Eswaran ve Saha 2011, Faltinsen vd. 2011, Luo ve Chen 2011, Eswaran ve Saha 2012, Ji vd. 2012, Xue vd. 2012, Buldakov 2013, Chen vd. 2013, Elahi vd. 2016, Liu vd. 2016, Chen ve Xue 2018, Guray vd. 2018, Dikici vd. 2019, Dinçer 2019, Pradeepkumar vd., 2020, Barrows ve Orr 2021, Zhang ve Wei 2021).



Şekil 4: Doğrulama modeline ait (a) çalkalanma yüksekliği- zaman ve (b) dinamik basınç - zaman grafikleri

Bu çalışmada model sınır koşulları, kabuller, başlangıç koşulları ve yöntemin doğrulanması amacıyla ile Phan vd. (2020) çalışmasındaki deney koşulları, sayısal modelleme girdileri ve sonuçları kullanılmıştır. Çalışma kapsamında konu alınan model koşullarının doğrulanması için yapılan doğrulama modelinde referans kaynaktaki gibi tankın ivme doğrultusundaki sol kenara

izleme noktası tanımlanmış ve izleme noktasında zamana bağlı çalkalanma yüksekliği ve basınç değerleri hesaplatılmıştır. Hesap sonuçları Şekil 4'te verilmektedir. Phan vd. (2020) tarafından çalışmalarında paylaşılan (Şekil 6, 7) ile genlik ve periyod açısından son derece uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Model yaklaşımının doğrulaması sonrasında modelin kalibrasyonu için parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu parametrik analizler kapsamında ağ yapısı hassasiyeti ve geometrik katsayıların etkisi incelenmiştir. Bu hassasiyet ve etki incelemelerinde kullanılan yöntemler standartlarda belirtilen şekilde uygulanmıştır (Coleman 2009). Bu kalibrasyonlarla doğru eleman sayısı oranı ve başta katı cidar pürüzlülük katsayısı olmak üzere değerlerin model üzerindeki etkisinin <math><1\%</math> olduğu hesaplanmıştır.

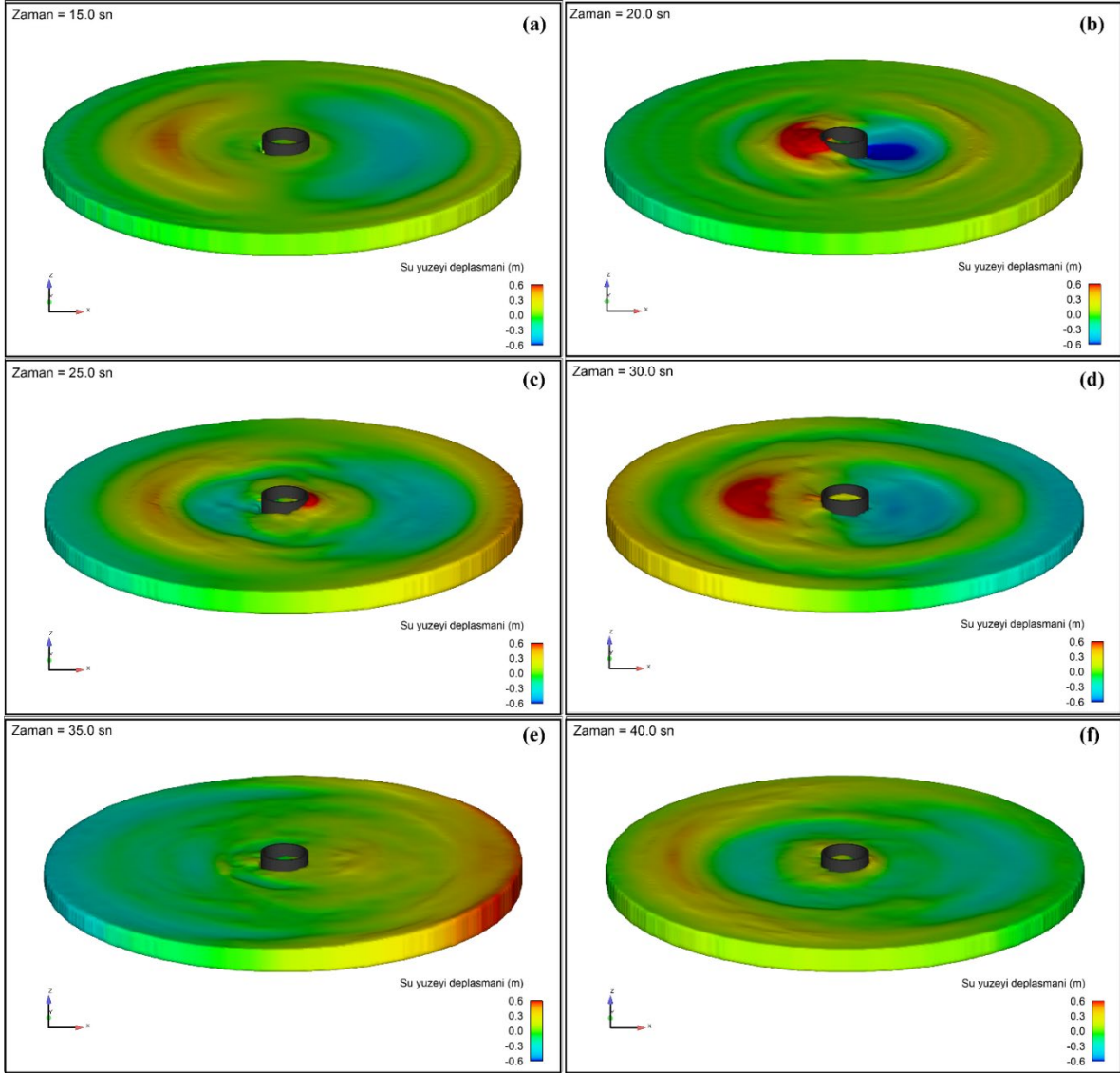
### 3. MODEL SONUÇLARI

Kocaeli Depremi sinyaline bağlı zamansal hareketini tamamlayan Kullar AAT'deki çöktürme havuzunda çalkalanma hesaplanmıştır. Deprem sırasında ve sonrasında su yüzeyi değişimi tüm çözüm hacmi için hesaplatılmış olup belirli zaman adımları için görselleştirilerek Şekil 5(a-f)'te sunulmuştur. Şekil 5'te verilen görsellerin aralığı 10 saniyedir ve 10 saniyelik periyod içinde havuz içindeki suyun çalkantı profili verilmiştir.

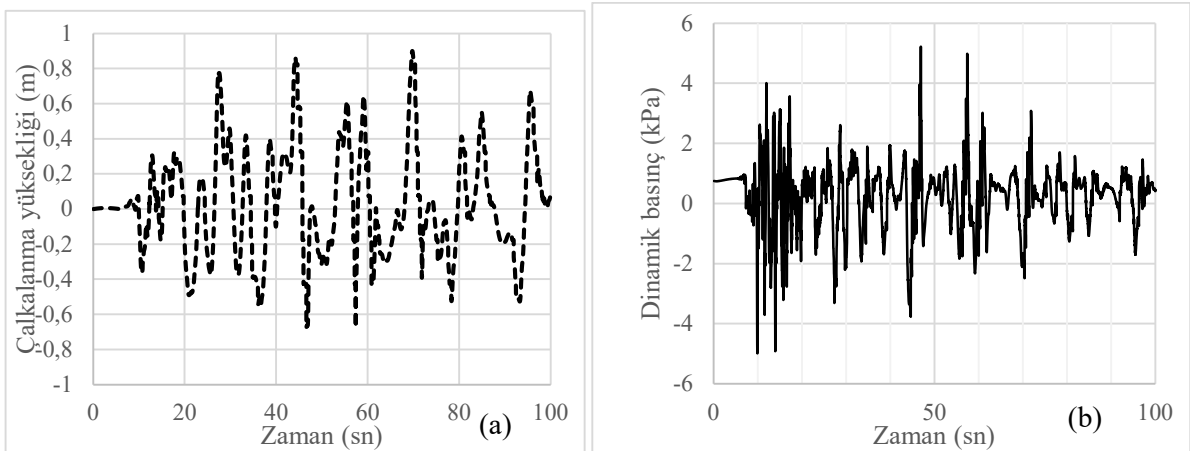
Havuzun içindeki besleme kuyusunda ve havuzun kendisinde ayrı ayrı farklı periyotlarda çalkantı hesaplanmıştır. Çalkantı sebebiyle meydana gelen çalkalanma yüksekliğinin (su yüzeyi değişimi) zamanla değişimi Şekil 6a'da sunulmuştur. Çöktürme havuzunun geometrik yapısı, su derinliği ve deprem ivme karakteristiğinin bir fonksiyonu olarak yaklaşık 10 sn periyodunda bir büyük salınım, yaklaşık 4 sn periyodunda ise küçük bir salınım hesaplanmıştır. Özellikle iki salınımın çakıştığı durumlarda sakin durumdaki su seviyesinden yaklaşık 90 cm yüksekliğinde çalkalanma yüksekliği hesaplanmıştır. Alçalma durumuna bakıldığında ise su seviyesi en fazla 70 cm aşağıya kadar düşmüştür.

Sunulan diğer bir sonuç grafiği ise Şekil 6b'de verilmekte olan ve Şekil 6a'daki hesaplama noktası ile aynı noktadaki statik basınç değerinin toplam basınç değerinden çıkartılması ile hesaplanmış dinamik basıncın zamanla değişim grafiğidir. Hesaplama noktasında özellikle 10 - 20 saniye aralığında en fazla - 5 kPa negatif basınç hesaplanmıştır. Yine aynı zaman aralığında en fazla 4 kPa pozitif basınç hesaplanmıştır. Model analizin 40 - 60 saniye aralığındaki zaman ise pozitif basınç değerinin 5 kPa'ın üzerine iki kere çıktığı görülmektedir. 70 inci saniyeden sonrasında çalkantının şiddetinin azaldığı ve giderek sönümlendiği tespit edilmiştir.

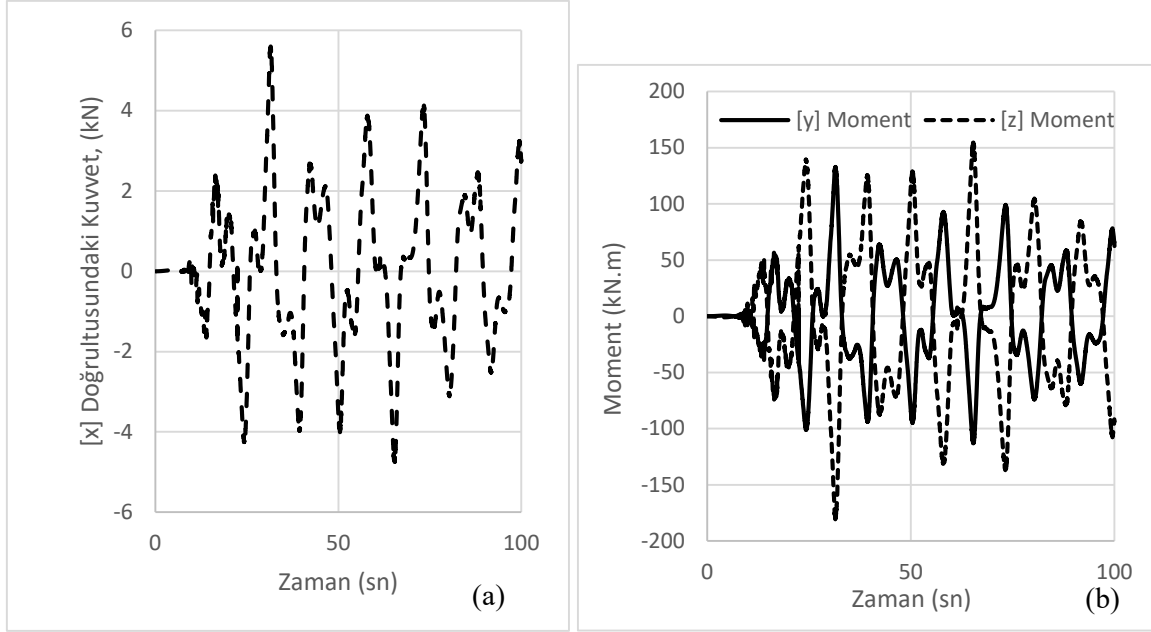
Şekil 7a'da Şekil 2'de mor ile işaretlenmiş ve tabandaki bir sıyırıcıyı temsil edecek alanda meydana gelen kuvvet değerinin zamana göre değişimi sunulmuştur. Havuz tabanında yer alan bir sıyırıcının 5,8 kN kuvvete maruz kalacağı hesaplanmış bu kuvvet serisine ek olarak Şekil 7b'de [y] ve [z] doğrultularında sıyırıcının maruz kalacağı moment değerleri verilmiştir.



Şekil 5: Hesaplanan su yüzeyi değişimine bağlı renklendirilmiş akışkan hacminin (a)  $t = 15$  sn, (b)  $t = 20$  sn, (c)  $t = 25$  sn, (d)  $t = 30$  sn, (e)  $t = 35$  sn ve (f)  $t = 40$  sn için görselleri



Şekil 6: Deprem doğrultusundaki duvarda tabandan 0.2 m yukarıdaki bir noktada (a) çalkalanma yüksekliği - zaman ve (b) dinamik basınç - zaman grafikleri (İzleme noktası Şekil 2'de yeşil daire ile işaretlenmiştir.)



Şekil 7: Sıyırıcı olarak işaretlenmiş alanda hesaplanan (a) deprem doğrultusundaki [x] kuvvet - zaman ve (b) [y] ve [z] doğrultularında hesaplanan moment - zaman grafikleri (Sıyırıcı alanı Şekil 2'de fuşya renk ile renklendirilmiş alandır.)

#### 4. TARTIŞMA

Modelleme sonuçlarına göre 1999 Kocaeli Depremi ile eşdeğer enerjide bir deprem gerçekleşmesi durumunda Kullar Arıtma Tesisine ait dairesel kesitli çöktürme havuzunda meydana gelebilecek taşma riski mevcuttur. Deprem anında işletme durumunda bulunan havuz en yüksek yük durumunda ise taşma riskinin daha da artacağı söylenebilir.

Çalkalanma dalga karakteri açısından sonuçlar incelendiğinde çalkalanma önleyici batık dikey perde yapılar bulunan tankların çalkalanma karakterine benzer su yüzeyi profili hesaplanmıştır. Ancak perdeli dairesel tank çalkalanmasında bulunan iki veya daha fazla farklı periyotta çalkalanma dalgası yerine çöktürme havuzunun merkezinde bulunan besleme yapısı kaynaklı tamamen kaotik bir çalkalanma izlenmiştir.

Literatürdeki hasar tespitleri ile havuz içinde hesaplanan dinamik basınç yükü değerleri birlikte değerlendirildiğinde özellikle bakımı yapılmayan, montajı düzgün yapılmamış ve yeterli ankrajlaması bulunmayan yapısal olmayan elemanlarda hasar meydana gelecektir. Kullar AAT çöktürme havuzunun Kocaeli Deprem sinyali etkisinde hesaplanan dinamik basınç değerleri Chi-Chi Deprem sinyali kullanılarak hesaplanmış ve Phan vd. (2020) tarafından sunulmuş çalışmadaki yakıt tankının maruz kaldığı değerlerle karşılaştırıldığında yıkıcılığı daha anlaşılır durumdadır.

Hesaplanan kuvvet ve moment değerlerine bağlı olarak imal edilecek veya kullanımda olan yapısal olmayan elemanların ve bağlantı sistemlerinin gözden geçirilmesi ve yetersiz bulunması durumunda ilave bağlantı sayısı ile güçlendirilmesi önem arz edecektir.

#### 5. SONUÇLAR

Arıtma tesisleri deprem etkisi altında meydana gelen çalkalanma sonucunda kırılabilirliğe sahip olan pek çok yapısal olmayan elemana sahiptirler ve çalkalanmaya bağlı taşma ile yeraltı

suyunu kirletme riski teşkil ederler. Kullar AAT çöktürme havuzuna ait yapılan bu çalışma sonucunda elde edilen önemli çıkarımlar aşağıda maddeler halinde özetlenmektedir.

- Arıtma tesislerindeki havuzların hava payları hesaplanırken mutlaka inşa edilecekleri bölgedeki deprem özellikleri dikkate alınmalı, gerekli olması durumunda hava payı arttırılmalı veya çalkalanmaya bağlı olası atıksu taşması durumunda yeraltı suyuna sızmayı önleyici tedbirler planlanmalıdır.
- Başta çöktürme havuzları olmak üzere kırılğanlığa sahip yapısal olmayan elemanların depreme bağlı çalkalanma sonucundaki kırılğanlık analizlerinin yapılması ve gerekli tedbirlerin alınması deprem gibi bir afet sonucunda meydana gelebilecek tesis devre dışı kalma ve halk sağlığı bozulmasını engellenmesi açısından önemlidir.
- Arıtma tesisleri ile ilgili kırılğanlık tespitlerinin yapılması için sayısal modelleme metodu uygun bir araç olup, hasar öncesi önlemlerin doğru planlamasında kullanılabilir.

Arıtma ünitelerindeki çalkalanma problemi literatürde farklı araştırmacılarca çalışılmış kimyasal deposu, yakıt tankı ve su depolarındaki çalkalanma problemlerinden akışkanın viskozitesi ve yapı içindeki yapısal ve yapısal olmayan elemanlar kaynaklı davranışlar sebebiyle ayrı tutularak incelenmelidir.

Bu çalışmanın devamında arıtma tesislerindeki dairesel tipli çöktürme havuzlarının dışındaki ünitelerin durumlarının incelenmesi, kapsayıcı bir standart çalışması yürütülmesi, çamur/su karışımli fazlı modellemelerin gerçekleştirilerek daha gerçekçi araştırmaların yürütülmesi planlanmaktadır.

## TEŞEKKÜR

Yazar, çalışmanın planlamasında ve son okumasında desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Eren Uçkan ve Doç. Dr. Cengiz İpek'e ve ayrıca modelleme çalışmasındaki tesis bilgilerini paylaşan Kocaeli Büyükşehir Belediyesi Kocaeli Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü'ne teşekkür eder.

## KAYNAKLAR

Alpaslan M.N., Dölgen D., Sarptaş H., 2004. Atıksu Arıtma Tesisleri Tasarım ve İşletme Esasları, Dokuz Eylül Üniversitesi Çevre Araştırma ve Uygulama Merkezi (ÇEVMER), İzmir, Türkiye, 268 p.

Aslam M., Godden W.G., Scalise D.T., 1979. Earthquake Sloshing in Annular and Cylindrical Tanks, *ASCE J. Eng. Mech. Div.* 105 (3), 371-389.

Ballantyne D., Crouse C., 1997. Reliability and Restoration of Water Supply Systems for Fire Suppression and Drinking Following Earthquakes, National Institute of Standards and Technology, Report Number NIST/GCR-97-730, 206 p.

Barrows T., Orr J. 2021. Dynamics and Simulation of Flexible Rockets, Academic Press, 327p.

Bayon A., Valero D., Garcia-Bartual R., Valles-Moran F.J., Lopez-Jimenez P.A., 2016. Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump, *Environmental Modelling and Software* 80, 322-335. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.018>.

Brizzolara S., Savio L., Viviani M., Chen Y., Temarel P., Couty N., Iglesias, A.S. 2009. Comparison of experimental and numerical sloshing loads in partially filled tanks. Analysis and Design of Marine Structures: Including CD-ROM, (Lloyd 1989), 13-26. <https://doi.org/10.1201/9780203874981.ch2>.

Buldakov E., 2013. Lagrangian modelling of fluid sloshing in moving tanks, *Journal of Fluids and Structures* 45 (1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2013.12.003>.

Caron P.A., Cruchaga M.A., Larreteguy A.E., 2018. Study of 3D sloshing in a vertical cylindrical tank, *Physics of Fluids*, 30 (8), 82112. <https://doi.org/10.1063/1.5043366>.

Chen S.C., Tfwala S. S., 2018. Performance assessment of FLOW-3D and X flow in the numerical modelling of fish-bone type fishway hydraulics, 7th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, 15-18 May 2018, Aachen-Germany, p:272-282. <https://doi.org/10.15142/T3HH1J>.

Chen Y., Xue M.A., 2018. Numerical Simulation of Liquid Sloshing with Different Filling Levels Using OpenFOAM and Experimental Validation, *Water* 10, 1752. <https://doi.org/10.3390/w10121752>.

Chen Z., Zong Z., Li H. T., Li J., 2013. An investigation into the pressure on solid walls in 2D sloshing using SPH method, *Ocean Engineering* 59 (1), 129-141. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.12.013>.

Chung R.M., Ballantyne D.B., Comeau E., Holzer T.L., Madrzykowski D.M., Schiff A.J., Stone W.C., Wilcoski J., Borchardt R.D., Cooper J.D., Lew H.S., Moehle J.P., Sheng L.H., Taylor A.W., Bucker I., Hayes J.R., Leyendecker E.V., O'rourke T., Singh M.P., Whitney M., 1996. The January 17, 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) Earthquake: Performance of Structures, Lifelines, and Fire Protection Systems, National Institute of Standards and Technology (NIST) Special Report, Gaithersburg, Maryland, USA.

Coleman H., Members C., 2009. ASME V&V 20-2009 Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer, (V&V20 Committee Chair and principal author), ASME.

Dikici M., Aksel M., Kaya E.S., İpek C., 2019. Earthquake Induced Sloshing Analysis for Circular Type Clarifier, VI. International Earthquake Symposium, 25-27 September 2019, Kocaeli, Türkiye, p: 548-552.

Dinçer A., 2019. Investigation of the Sloshing Behavior Due to Seismic Excitations Considering Two-Way Coupling of the Fluid and the Structure, *Water* 11, 2664. <https://doi.org/10.3390/w11122664>.

Du P., Chen J., Chen C., Liu Y., Liu J., Wang H., Zhang X., 2012. Environmental risk evaluation to minimize impacts within the area affected by the Wenchuan earthquake, *Science of The Total Environment* 419, 16-24. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.12.017>.

EERI, 1995. Earthquake of January 17, 1995: Reconnaissance Report, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, USA.

EERI, 2001. The Nisqually Earthquake of 28 February 2001: Preliminary Reconnaissance Report, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, USA.

EERI, 2010. El Mayor Cucapah, Baja California Earthquake of April 4, 2010: Reconnaissance Report, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, USA.

Eindinger J., 2002. Performance of water systems in the Mw 8.4 Atico (Peru) earthquake of June 23, 2001. (In: Atico, Peru, Mw 8.4 Earthquake of June 23, 2001: Lifeline Performance, Editor: Edwards, C.L., ASCE, 163 p), 27-30.

Eidinger J., Yashinsky M., 2004. Oil and water system performance - Denali M 7.9 earthquake of November 3, 2002. (In: San Simeon Earthquake of December 22, 2003 and Denali, Alaska, Earthquake of November 3, 2002, Editor: Yashinsky, M., ASCE, Reston VA, USA, 148 p), 53-56.

Eidinger J., Tang, A., Editors, 2012. Christchurch, New Zealand Earthquake Sequence of Mw 7.1 September 04, 2010 Mw 6.3 February 22, 2011 Mw 6.0 June 13, 2011: Lifeline Performance, Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, Monograph 40, ASCE, Reston, VA.

El Heloui M., Mimouni R., Hamadi F., 2016. Impact of treated wastewater on groundwater quality in the region of Tiznit (Morocco), *Journal of Water Reuse and Desalination* 6 (3), 454-463. <https://doi.org/10.2166/wrd.2015.061>.

Elahi R., Passandideh-Fard, M., Javanshir, A., 2016. Simulation of liquid sloshing in 2D containers using the volume of fluid method, *Ocean Engineering*, 96, 226-244. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.12.022>.

Erdik M., 2001. Report on 1999 Kocaeli and Düzce (Turkey) Earthquakes, Structural Control for Civil and Infrastructure Engineering, World Scientific. Publishing, 149-186. [https://doi.org/10.1142/9789812811707\\_0018](https://doi.org/10.1142/9789812811707_0018).

Eswaran M., Saha U. 2011. Sloshing of liquids in partially filled tanks-A review of experimental investigations, *Ocean Systems Engineering* 1(2), 131-155. <https://doi.org/10.12989/ose.2011.1.2.131>.

Eswaran M., Saha U., 2012. Finite Difference Based Sigma - Transformation Approach for Liquid Sloshing in a Rectangular Tank under Regular Wave Excitation, *CFD Letters*, 4, 173-192.

Evans N.L., Mc Ghie C., 2011. The performance of lifeline utilities following the 27th February 2010 Maule Earthquake Chile, Proceedings of the 9th Pacific Conference on Earthquake Engineering Building and Earthquake.14-16 April 2011, Auckland, New Zealand, p:36.

Faltinsen O., 1974. A Nonlinear Theory of Sloshing in Rectangular Tanks, *Journal of Ship Research* 18, 224-241. <https://doi.org/10.5957/jsr.1974.18.4.224>.

Faltinsen O., Firoozkoobi R., Timokha A., 2011. Analytical modeling of liquid sloshing in a two-dimensional rectangular tank with a slat screen, *Journal of Engineering Mathematics* 70, 93-109. <https://doi.org/10.1007/s10665-010-9397-5>.

Faltinsen O., Rognebakke O., Lukovsky I., Timokha A., 2000. Multidimensional modal analysis of nonlinear sloshing in a rectangular tank with finite water depth, *Journal of Fluid Mechanics* 407, 201-234. <https://doi.org/10.1017/S0022112099007569>.

Faltinsen O., Timokha A., 2001. An adaptive multimodal approach to nonlinear sloshing in a rectangular tank, *Journal of Fluid Mechanics* 432, 167-200. <https://doi.org/10.1017/S0022112000003311>.

FEMA (Federal Emergency Management Agency), 2003. Multi-hazard Loss Estimation Methodology (HAZUS) Manual.

FLOW-3D Version 12.0 Users Manual 2018. Flowscience 2019. FLOW-3D [Computer software]. Santa Fe, NM: Flow Science, Inc. Erişim adresi: <https://www.flow3d.com>

- Ghasemi M., Soltani-Gerdefaramarzi S., 2017. The Scour Bridge Simulation around a Cylindrical Pier Using Flow-3D, *Journal of Hydrosiences and Environment* 1(2), 46-54. <https://doi.org/10.22111/JHE.2017.3357>.
- Guay E., Yazıcı G., Aksel M., 2018. Analysis of Seismic Sloshing Displacements in Rectangular Liquid Storage Tanks with SPH Method, *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering* 18(1), 375-381. <https://doi.org/10.5578/fmbd.66714>.
- Hernandez H., Heredia-Zavoni E., Aldama-Rodríguez A., 2007. Nonlinear sloshing response of cylindrical tanks subjected to earthquake ground motion, *Engineering Structures* 29, 3364-3376. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.08.023>.
- Ibrahim R., Pilipchuk V., Ikeda T., 2001. Recent Advances in Liquid Sloshing Dynamics. *Applied Mechanics Reviews* 54 (2), 133-199. <https://doi.org/10.1115/1.3097293>.
- Isaacson M., Subbiah K., 1991. Earthquake-induced sloshing in a rigid circular tank, *Canadian Journal of Civil Engineering* 18(6), 904-915. <https://doi.org/10.1139/I91-112>.
- Ji Y., Shin Y., Park J., Hyun J., 2012. Experiments on non-resonant sloshing in a rectangular tank with large amplitude lateral oscillation, *Ocean Engineering* 50, 10-22. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.04.007>.
- Kakderi K., Argyroudis S., 2014. Fragility Functions of Water and Waste-Water Systems. In *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering* 27, 221-258. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-7872-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7872-6_8).
- Kayen R., Collins B., Abrahamson N., Ashford S., Brandenberg S. J., Cluff L., Youso K., 2007. Investigation of the M6.6 Niigata-Chuetsu Oki, Japan, Earthquake of July 16, 2007, Report 2007-1365, USGS.
- Kim Y., 2007. Experimental and numerical analyses of sloshing flows, *Journal of Engineering Mathematics* 58, 191-210. <https://doi.org/10.1007/s10665-006-9124-4>.
- Kouadio I.K., Aljunid S., Kamigaki T., Hammad K., Oshitani H., 2012. Infectious diseases following natural disasters: prevention and control measures. *Expert Review of Anti-Infective Therapy* 10(1), 95-104. <https://doi.org/10.1586/eri.11.155>.
- Kuraoka S., Rainer J. H., 1996. Damage to water distribution system caused by the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, *Canadian Journal of Civil Engineering* 23(3), 665-677. <https://doi.org/10.1139/I96-882>.
- Lee J., Perera D., Glickman T., Taing L., 2020. Water-related disasters and their health impacts: A global review, *Progress in Disaster Science* 8, 100123. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2020.100123>.
- Lee T., Zhou Z., Cao Y., 2002. Numerical Simulations of Hydraulic Jumps in Water Sloshing and Water Impacting, *Journal of Fluids Engineering* 124(1), 215-226. <https://doi.org/10.1115/1.1436097>.
- Li J., Alinaghian S., Joksimovic D., Chen L., 2020. An Integrated Hydraulic and Hydrologic Modeling Approach for Roadside Bio-Retention Facilities, *Water* 12(5), 1248. <https://doi.org/10.3390/w12051248>.



- Liu D., Lin P., 2008. A numerical study of three-dimensional liquid sloshing in tanks, *Journal of Computational Physics* 227, 3921-3939. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.12.006>.
- Liu D., Tang W., Wang J., Xue H., Wang K., 2016. Comparison of laminar model, RANS, LES and VLES for simulation of liquid sloshing, *Applied Ocean Research* 59, 638-649. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.07.012>.
- Liu M., Giovinazzi S., MacGeorge R., Beukman P., 2013. Wastewater Network Restoration Following the Canterbury, NZ Earthquake Sequence: Turning Post-Earthquake Recovery into Resilience Enhancement. Sixth China-Japan-US Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering, 28 May-1 June 2013, Chengdu, China, 160-167. <https://doi.org/10.1061/9780784413234.021>.
- Luo Z., Chen Z., 2011. Sloshing simulation of standing wave with time-independent finite difference method for Euler equations, *Applied Mathematics and Mechanics* 32, 1475-1488. <https://doi.org/10.1007/s10483-011-1516-6>.
- Ma C., Oka M., 2020. Numerical Investigation on Sloshing Pressure for Moss-Type LNG Tank Based on Different SPH Models, The 30th International Ocean and Polar Engineering Conference, Virtual, October 2020, 3248.
- Maleki F., Hemati S., Pourashraf R., 2020. Prevalence Waterborne Infections after Earthquakes Considered as Serious Threat to Increasing Victims in Disaster-Affected Areas, *Egyptian Journal of Veterinary Sciences* 51(1), 111-117. <https://doi.org/10.21608/ejvs.2019.18629.1114>.
- Marahatta S.B., 2015. Control of the Outbreak of Disease Aftermath Earthquake: an Overview, *Nepal Journal of Epidemiology* 5(2), 468-469. <https://doi.org/10.3126/nje.v5i2.12828>.
- McArthur J.M., Sikdar P.K., Hoque M.A., Ghosal U., 2012. Waste-water impacts on groundwater: Cl/Br ratios and implications for arsenic pollution of groundwater in the Bengal Basin and Red River Basin, Vietnam, *Science of The Total Environment* 437, 390-402. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.068>.
- Meneses J., Anderson R., Angel J., Edwards C., Everingham L., Garcia-delgado V., Poland C., 2010. California Earthquake, Exponent Failure Analysis Associates, EERI Special Earthquake Report, July 2010.
- Metcalf and Eddy I., 2003. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4th Edition, McGraw-Hill, New York, USA, 1819 p.
- Minowa C., Kiyosumi K., 1997. Sloshing impact analysis of roof damaged water tank in Kobe earthquake, ASME Symposium Adv. Anal. Exper. Comp. Tech. Fluid Str. Trans. Nat. Hazards, 27-31 June 1997, Orlando, Florida, USA, 355, 271-278.
- Musa A., Maliki Y., Ahmad M., Sani W.N., Yaakob, O., Samo, K., 2017. Numerical Simulation of Wave Flow Over the Overtopping Breakwater for Energy Conversion (OBREC) Device, *Procedia Engineering* 194, 166-173. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.131>.
- Najafi-Jilani A., Niri M.Z., Naderi N., 2014. Simulating three dimensional wave run-up over breakwaters covered by antifer units, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 6(2), 297-306. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0180>.

Nelson E.J., Andrews J.R., Maples S., Barry M., Clemens J.D., 2015. Is a Cholera Outbreak Preventable in Post-earthquake Nepal?, *PLOS Neglected Tropical Diseases* 9(8), e0003961. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0003961>.

Nezami M., Mohammadi M.M., Oveisi A., 2014. Liquid Sloshing in a Horizontal Circular Container with Eccentric Tube under External Excitation, *Shock and Vibration* 2014, 507281. <https://doi.org/10.1155/2014/507281>.

NIST, 2014. Disaster Resilience Framework, National Institute of Standards and Technology, USA, [https://www.nist.gov/system/files/documents/el/building\\_materials/resilience/Disaster\\_Resilience\\_Chapter\\_9\\_Water\\_and\\_Wastewater\\_50-Draft\\_102014.pdf](https://www.nist.gov/system/files/documents/el/building_materials/resilience/Disaster_Resilience_Chapter_9_Water_and_Wastewater_50-Draft_102014.pdf)

Panico A., Basco A., Lanzano G., Pirozzi F., Santucci de Magistris F., Fabbrocino G., Salzano E., 2017. Evaluating the structural priorities for the seismic vulnerability of civilian and industrial wastewater treatment plants, *Safety Science* 97, 51-57. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.12.030>.

Panico A., Lanzano G., Salzano E., De Magistris F.S., Fabbrocino G., 2013. Seismic vulnerability of wastewater treatment plants, *Chemical Engineering Transactions* 32(January), 13-18. <https://doi.org/10.3303/CET1332003>.

Phan H. N., Paolacci F., Di Filippo R., Bursi O. S., 2020. Seismic vulnerability of above-ground storage tanks with unanchored support conditions for Na-tech risks based on Gaussian process regression, *Bulletin of Earthquake Engineering* 18(15), 6883-6906. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00960-7>.

Pilipchuk V., Ibrahim R., 1997. The dynamics of a non-linear system simulating liquid sloshing impact in moving structures, *Journal of Sound and Vibration* 205, 593-615. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1034>.

Pitilakis K., Anastasiadis A., Kakderi K., Argyroudis S., Alexoudi M., 2007. Vulnerability Assessment and Risk Management of Lifelines, Infrastructures and Critical Facilities: The Case of Thessaloniki's Metropolitan Area, 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 25-28 June 2007, Thessaloniki, Greece, 1774.

Ransau S., Hansen E., 2006. Numerical Simulations of Sloshing in Rectangular Tanks, 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 4-9 June 2006, Hamburg, Germany, 675-682. <https://doi.org/10.1115/OMAE2006-92248>.

Richardson J.E., Panchang V.G., 1998. Three-Dimensional Simulation of Scour-Inducing Flow at Bridge Piers, *Journal of Hydraulic Engineering* 124(5), 530-540, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:5\(530\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:5(530))

Rodriguez-Marek A., Williams J., Wartman J., Repetto, P., 2003. Ground motion and site response Southern Peru Earthquake of June 21, 2001, *Earthquake Spectra* 19 (1), 11-34. <https://doi.org/10.1193/2F1.1737246>.

Pradeepkumar K.S., Selvan V., Satheshkumar K.R.P., 2020. Review of Numerical Methods for Sloshing, *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology* 8 (6), 247-252. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2020.32116>.

Schiff A.J., 1998. Hyogoken-Nanbu (Kobe), Earthquake of January 17, 1995, Lifeline Performance, Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering (TCLEE) Monograph 14, ASCE, 335 p.

- Shemer L., 1990. On the directly generated resonant standing waves in a rectangular tank, *Journal of Fluid Mechanics* 217, 143-165, <https://doi.org/10.1017/S0022112090000660>.
- Smith H.D., Foster D.L., 2005. Modeling of Flow Around a Cylinder Over a Scoured Bed, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 131(1), 14-24. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2005\)131:1\(14\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2005)131:1(14)).
- Solaas F., Faltinsen O.M., 1997. Combined numerical and analytical solution for sloshing in two-dimensional tanks of general shape, *J. Ship Res.* 41 (2), 118-129.
- Standley L.J., Rudel R.A., Swartz C.H., Attfeld K.R., Christian J., Erickson M., Brody J. G., 2008. Wastewater-contaminated groundwater as a source of endogenous hormones and pharmaceuticals to surface water ecosystems, *Environmental Toxicology and Chemistry* 27(12), 2457-2468. <https://doi.org/10.1897/07-604.1>.
- Strand C., Masek J., 2007. Sumatra-Andaman Islands Earthquake and Tsunami of December 26, 2004: Lifeline Performance. ASCE Reston, VA, USA, 342 p.
- Sun Y., Zhou D., Wang J., Han H., 2020. Liquid Sloshing in a Cylindrical Tank with Multiple Baffles Under Horizontal and Pitching Motions, *International Journal of Applied Mechanics* 12(07), 2050080. <https://doi.org/10.1142/S1758825120500805>.
- Tang A.K., Schiff A., 2010. Kashiwazaki, Japan, Earthquake of July 16, 2007: Lifeline Performance, ASCE, Reston VA, USA, 324 p.
- Tang A.K., Eng P., Eng C.F., 2011. Lifelines Performance of the Mw 8.8 off Shore Biobío, Chile Earthquake, *Procedia Engineering* 14, 922-930. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.116>.
- Wang X.Y., Fu A.M. 2011. Earthquake Impact on the Sewage Treatment Plant and Emergency Measures, *Advanced Materials Research* 243-249, 5076-5079, 5076-5079. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.243-249.5076>.
- Wareham D.G., Bourke M., 2013. The 2010-2011 Canterbury earthquakes: impact on the liquid waste management system of Christchurch, New Zealand, *Civil Engineering and Environmental Systems* 30(1), 1-14. <https://doi.org/10.1080/10286608.2012.709507>.
- Waterhouse D., 1994. Resonant sloshing near a critical depth, *Journal of Fluid Mechanics* 281, 313-318. <https://doi.org/10.1017/S0022112094003125>.
- Watson J.T., Gayer M., Connolly M.A., 2007. Epidemics after Natural Disasters, *Emerging Infectious Diseases* 13(1), 1-5. <https://doi.org/10.3201/eid1301.060779>.
- Xu L., Dai L., 2005. A Numerical Approach of Assessing Fluid Oscillatory Motions in 3D Partially Filled Horizontal Cylindrical Tanks, In American Society of Mechanical Engineers, Design Engineering Division Publication, Vol. 118. <https://doi.org/10.1115/IMECE2005-81301>.
- Xue M.A., Zheng J., Lin P., 2012. Numerical Simulation of Sloshing Phenomena in Cubic Tank with Multiple Baffles, *Journal of Applied Mathematics* 2012, Article ID 245702, 21 p. <https://doi.org/10.1155/2012/245702>.
- Yashinsky M., 2004. San Simeon Earthquake of December 22, 2003, and Denali, Alaska, Earthquake of November 3, 2002, ASCE, Reston, VA, USA, 147 p.

Yazıcı G., Köroğlu A., Aksel M., Önen Y.H., 2015. Seismic Vulnerability of Treatment Plants in Istanbul, International Burdur Earthquake and Environment Symposium, 7-9 May 2015, Burdur, Türkiye, 260-266.

Zare M. R., Wilkinson S., Potangaroa R., 2010. Vulnerability of Wastewater Treatment Plants and Wastewater Pumping Stations to Earthquakes, *International Journal of Strategic Property Management* 14(4), 408-420, <https://doi.org/10.3846/ijspm.2010.30>.

Zhang Q., Wei W., 2021. Numerical Simulation on the Sloshing Characteristics of Gasliquid Flow in Cargo Tank and Anti-sloshing Methods, *Journal of Physics: Conference Series* 1746, 12046, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1746/1/012046>.

## ARAŞTIRMA VERİSİ

Çalışma kapsamında kullanılan arıtma ünitesine ait geometri Kocaeli Büyükşehir Belediyesi Kocaeli Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü'nden (İSU) temin edilmiştir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ

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

## YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI

Katkı Türü	Yazarlar
Çalışmanın tasarlanması	M.A
Literatür araştırma	M.A.
Saha çalışması, veri temini/derleme	M.A.
Verilerin işlenmesi/analiz edilmesi	M.A
Şekil/Tablo/Yazılım hazırlanması	M.A.
Bulguların yorumlanması	M.A
Makale yazımı, düzenleme, kontrol	M.A.



## Moment Tensor Analysis and Stress Analysis of Microearthquakes Occurred Between Ganos Fault and Tekirdag Basin

Burcin Didem Tamtas<sup>1</sup>, Esref Yalcinkaya<sup>1</sup> and Ethem Gorgun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Istanbul University-Cerrahpasa, Engineering Faculty, Department of Geophysics, Istanbul, Turkey  
ORCID: 0000-0001-7713-5067, 0000-0003-0593-0656, 0000-0002-4563-3296

### Keywords

Microearthquakes, Moment Tensor Inversion, Stress Tensor Inversion, Ganos Fault, ISOLA

### Highlights

- \* Moment tensor inversions of the microearthquakes
- \* Moment tensor inversions of the seismograms of the seismic network with poor azimuthal coverage
- \* Effects of the crustal models on the moment tensor inversions of the near and microearthquakes

### Acknowledgements

--

### Aim

The effect of the poor azimuthal coverage on the moment tensor analysis of the microearthquakes

### Location

Ganos Offshore

### Methods

Moment tensor inversion and stress tensor inversion

### Results

Although the poor azimuthal coverage of the seismic network, moment tensor inversions of the microearthquakes can be successfully applied with an accurate crustal model

### Supporting Institutions

TUBITAK- Project number 118R019

### Manuscript

Research Article

Received: 25.10.2021

Revised: 27.11.2021

Accepted: 08.12.2021

Printed: 31.12.2021

### DOI

10.46464/tdad.1014479

### Corresponding Author

Burcin Didem Tamtas

Email: burcin.tamtas@iuc.edu.tr

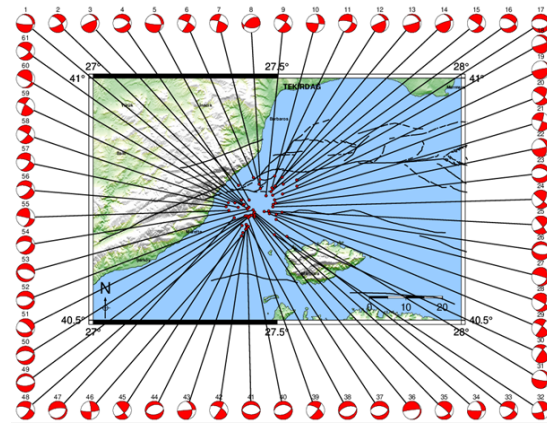


Figure  
Moment Tensor Inversion of Ganos Offshore  
Microearthquakes

### How to cite

Tamtas B.D., Yalcinkaya E., Gorgun E., 2021. Moment Tensor Analysis and Stress Analysis of Microearthquakes Occurred Between Ganos Fault and Tekirdağ Basin, Turk. J. Earthq. Res. 3 (2), 167-192, <https://doi.org/10.46464/tdad.1014479>



## Ganos Fayı ile Tekirdağ Baseni Arasında Meydana Gelen Mikro Depremlerin Moment Tensör ve Gerilme Analizleri

Burçin Didem Tamtaş<sup>1</sup>, Eşref Yalçınkaya<sup>1</sup> ve Ethem Görgün<sup>1</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye  
ORCID: 0000-0001-7713-5067, 0000-0003-0593-0656, 0000-0002-4563-3296

### ÖZET

Bu çalışmada Ganos Fayı üzerinde kurulu MONGAN-1 ve MONGAN-2 sismik ağları ile kaydedilen mikro depremlerin moment tensör ve gerilme analizleri yapılmıştır. MONGAN-1 sismik ağı yaklaşık 10 km<sup>2</sup>lik lokal bir alanda kurulu 40 adet kısa periyot deprem istasyonundan oluşur ve kullanılan depremlerin genel özelliği ağı dışı depremler olmalarıdır. Bu nedenle dar bir azimut aralığında adeta bir nokta alıcı gibi davranan sismik ağı ait kayıtlar kullanılarak azimutal dağılımın çözümler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Seçilen depremler Tekirdağ Baseni ile Ganos Fayı arasında kalan bölgede, Ekim 2017-Haziran 2020 tarihleri arasında meydana gelen, büyüklüğü  $1.5 \leq M_w \leq 3.7$  arasında değişen 61 adet mikro depremden oluşur. Depremlerden büyüklüğü  $2.8 \leq M_w \leq 3.7$  arasında değişen 10 tanesinin geniş bant ulusal ağı kayıtları kullanılarak hem moment tensör hem de P dalgası ilk hareket yönlerinden odak mekanizmaları belirlenerek MONGAN ağı çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen odak mekanizmalarının doğrultu, eğim ve atım açılarında küçük farklar olsa da genellikle her deprem için elde edilen üç odak mekanizmasının da birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Bölgedeki hız yapısını yüksek çözünürlüklü olarak temsil eden bir kabuk modeli ile azimutal dağılımın iyi olmadığı istasyon kayıtlarıyla mikro depremlerin moment tensör analizlerinin başarıyla uygulanabileceği görülmüştür. Gerilme analizi sonucunda  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  asal gerilme eksenlerinin konumu sırasıyla  $277.2/42.8$ ,  $87.7/46.7$  ve  $182.9/4.7$  (azimut/dalim) olarak bulunmuştur. Bölgedeki gerilme oranı ise 0.60 olarak hesaplanmıştır.

### Anahtar kelimeler

Mikro Deprem, Moment Tensör Analizi, Gerilme Analizi, Ganos Fayı, ISOLA

### Öne Çıkanlar

- \* Mikro depremlerin moment tensör analizi
- \* Azimutal dağılımı iyi olmayan sismik ağı ait kayıtların moment tensör analizi
- \* Kabuk modellerinin yakın ve mikro depremlerin moment tensör çözümlerine etkisi

### Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 25.10.2021  
Düzeltilme: 27.11.2021  
Kabul: 08.12.2021  
Basım: 31.12.2021

### DOI

10.46464/tdad.1014479

### Sorumlu yazar

Burçin Didem Tamtaş

Eposta:

burcin.tamtas@iuc.edu.tr

## Moment Tensor Analysis and Stress Analysis of Microearthquakes Occurred Between Ganos Fault and Tekirdag Basin

Burcin Didem Tamtaş<sup>1</sup>, Esref Yalcinkaya<sup>1</sup> and Ethem Gorgun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> İstanbul University-Cerrahpaşa, Engineering Faculty, Department of Geophysics, İstanbul, Turkey  
ORCID: 0000-0001-7713-5067, 0000-0003-0593-0656, 0000-0002-4563-3296

### ABSTRACT

In this study, moment tensor analyses of microearthquakes recorded with the MONGAN-1 and MONGAN-2 seismic networks deployed on the Ganos Fault are done. The MONGAN-1 seismic network consists of 40 short-period stations located in a local area of approximately 10 km<sup>2</sup>, and the general feature of the earthquakes used is that they are out of the network. The effect of the azimuthal coverage of the seismic network, behaving like a point receiver covering a narrow azimuthal range for moment tensor analysis of microearthquakes, is investigated. For this purpose, 61 microearthquakes with magnitudes varying between  $1.5 \leq M_w \leq 3.7$ , occurred between October 2017 and June 2020 in the region between Tekirdağ Basin and Ganos Fault, are analyzed. Broadband national network records of 10 earthquakes with magnitudes ranging between  $2.8 \leq M_w \leq 3.7$  are used to determine the focal mechanisms using both moment tensor inversion and P wave first motion polarities techniques and then are compared with the MONGAN network's solutions. Although there are minor differences in the strike, dip and rake angles of the focal mechanisms obtained, it is observed that the three focal mechanism analysis results are generally compatible with each other. Although the azimuthal coverage of the seismic network is not good, moment tensor inversions of the microearthquakes can be successfully applied with an accurate crustal model. As a result of the stress analysis, the principal stress axes orientations of  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  and  $\sigma_3$  are obtained as  $277.2/42.8$ ,  $87.7/46.7$  and  $182.9/4.7$  (azimuth/dip), respectively. The stress ratio in the region is calculated as 0.60.

### Keywords

Microearthquake, Moment Tensor Inversion, Stress Tensor Inversion, Ganos Fault, ISOLA CMT Software

### Highlights

- \* Moment tensor inversions of the microearthquakes
- \* Moment tensor inversions of the seismograms of the seismic network with poor azimuthal coverage
- \* Effects of the crustal models on the moment tensor inversions of the near and microearthquakes

### Manuscript

Research Article

Received: 25.10.2021  
Revised: 27.11.2021  
Accepted: 08.12.2021  
Printed: 31.12.2021

### DOI

10.46464/tdad.1014479

### Corresponding Author

Burçin Didem Tamtaş

Email:

burcin.tamtas@iuc.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Depremlerin odak mekanizması çözümleri kullanılarak depreme neden olan faylanmanın türü, fay düzleminin doğrultusu, eğimi ve fay düzlemi üzerindeki kaymanın yönü belirlenebilir. Faylanmayla ilgili elde edilen bu parametreler sayesinde bölgenin tektoniği ve gerilme rejimi hakkında bilgi sağlanır. Odak mekanizması çalışmalarında kullanılan depremlerin büyüklükleri, tüm dalga formu modellemesi yöntemi sayesinde mikro deprem büyüklüğüne kadar inmektedir. Deprem oluş sayısı ve deprem büyüklüğü açısından bir değerlendirme yapıldığında mikro deprem etkinliğinin çok fazla sayıda olması, odak mekanizması çalışmaları için mikro depremleri zengin bir veri kaynağı yapar. Literatürde küçük depremlerin odak mekanizmalarının moment tensör analizi yöntemiyle elde edildiği çalışma sayısı son yıllarda giderek artmaktadır (Ardeleanu ve diğ. 2005, Benetatos ve diğ. 2013, Carvalho ve diğ. 2016, Fojtikova ve diğ. 2010, Barros ve diğ. 2014, Villegas ve diğ. 2016). Ancak mikro depremlerin odak mekanizmalarını belirlemek için yaygın olarak kullanılan P dalgası ilk hareket yönleri ve tüm dalga formunu kullanan moment tensör çözüm yöntemlerinin başarısı koşullara bağlı olarak değişmektedir. İstasyon sayısının yetersiz olduğu bölgelerde ya da az sayıda kayda sahip mikro depremlere ait verilerle P dalgası ilk hareket yönlerinden odak mekanizmalarını belirlemek oldukça güçtür. Ayrıca bu yöntemde filtresiz veriden polarite okuması yapıldığı için verinin sinyal gürültü oranının yüksek olması çok önemlidir. Ancak deprem büyüklüğü küçüldükçe sismogramlarda sinyal gürültü oranı azalmakta ve polarite okumaları güç hale gelmektedir. Moment tensör analizi yöntemi ise tüm dalga formunu kullanan bir yöntem olduğu için azimutal dağılımın iyi olmadığı yerlerde, tek istasyon 3 bileşen kaydıyla bile mikro depremlerin odak mekanizmasının belirlenmesine imkan verir (Fojtikova ve Zahradnik 2014, Kumar ve diğ. 2015b). Mikro depremler yapıları gereği yüksek frekans içeriğine sahip sinyaller üretirler. Dolayısıyla bu depremlerin doğru modellenmesi, sentetik olarak üretilebilecek yüksek frekans içeriğine bağlıdır. Bu konuda en büyük etken yüksek çözünürlüklü kabuk modelinin varlığıdır. Moment tensör analizi yöntemi ile yüksek frekans içeriğine sahip mikro depremler modellenenilmektedir (Ardeleanu ve diğ. 2005, Fojtikova ve diğ. 2010).  $M_w=0.3$  büyüklüğündeki depremlerin bile yüksek frekanslarda moment tensör analizi başarılı bir şekilde yapılabilir (Benetatos ve diğ. 2013). Ancak yüksek frekans içeriğine sahip depremler, sentetik dalga formlarınının üretilmesinde kullanılan kabuk hız yapısına büyük depremlere kıyasla daha duyarlıdır. Moment tensör analizlerinin başarısı esasen hız modelinin doğruluğuna bağlıdır (Robertson 2008). Bölgenin hız yapısını gerçeğe yakın bir şekilde temsil eden hız modelleri kullanılarak hesaplanan Green's fonksiyonları sayesinde deprem odağı ve alıcı istasyonlar arasındaki sismik dalgaların seyahat zamanları doğru şekilde hesaplanabilir. Böylece Green's fonksiyonları kullanılarak üretilen sentetik dalga formları da gözlemsel dalga formlarıyla uyumlu olarak üretilmiş olur ve moment tensör analizlerinin de başarıyla yapılmasını sağlar.

Mikro depremlerin odak mekanizması çözümleri sadece tektonik özelliklerin keşfedilmesi açısından değil, aynı zamanda gaz ve petrol sondajı sırasında rezarvuardaki sıkışma, jeotermal üretim çalışmaları, madencilik ve şeyl gazı çıkarma faaliyetleri sırasındaki hidrolik kırılma nedeniyle mevcut fayların harekete geçmesi sonucu indüklenen mikro depremselliğin araştırılması açısından da önemlidir (Chan ve Zoback 2007, Li ve diğ. 2011, Miyazawa ve diğ. 2008, Sarkar 2008). İndüklenen mikro depremlerin odak mekanizmalarının belirlenmesinde de benzer nedenlerle P dalgası ilk hareket yönleri yerine moment tensör analizi yöntemi tercih edilir (Abd el-aal ve diğ. 2021, Guilhem ve diğ. 2014, Li ve diğ. 2011, Yu ve diğ. 2018).

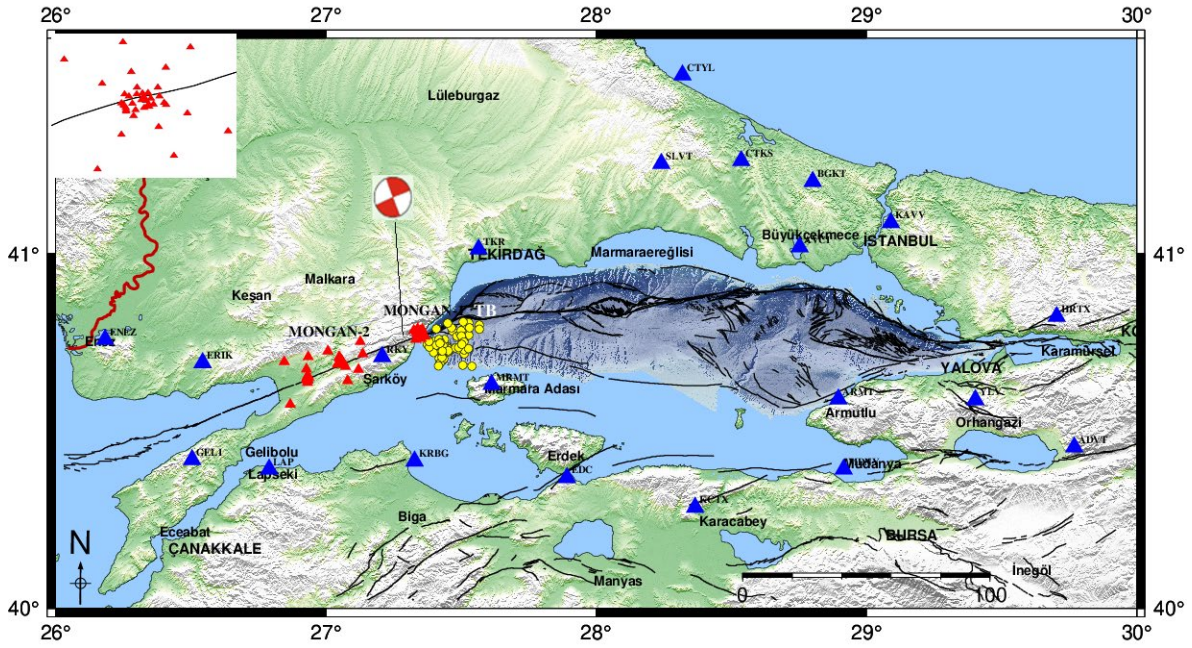
Bu çalışmada Ganos Fayı üzerinde kurulan, MONGAN sismik ağı ile kaydedilmiş yakın ve yüksek frekans içerikli mikro depremlerin moment tensör analizleri yapılmıştır. MONGAN-1 sismik ağı fay zonu üzerinde yaklaşık  $10\text{km}^2$ 'lik bir alan içinde 40 adet kısa periyot (1Hz ve 4.5Hz sensörler) istasyondan oluşur (Şekil 1). Kullanılan mikro depremler GF ile Tekirdağ Baseni arasında meydana gelen ve Batı Marmara Denizi'nin ağırlıklı depremselliğini oluşturan, büyüklüğü  $1.5 \leq M_w \leq 3.7$  arasında değişen depremlerdir. MONGAN istasyonlarının çok lokal bir alanda toplanması nedeniyle kullanılan depremlerin tamamı ağ dışı depremlerdir ve ağ

istasyonları çok dar bir azimut aralığı içinde kalarak adeta bir nokta alıcı gibi davranırlar. Buna karşın, çok sayıda istasyon yüksek sinyal/gürültü oranına sahip kayıt seçmeye imkan verir. Literatürde bu bölgede meydana gelen  $3.0 \leq M_w \leq 4.6$  arasında değişen küçük ve orta büyüklükteki depremlerin moment tensör analizlerinin yapıldığı ve bölgesel gerilme yönlerinin belirlendiği çalışmalar mevcuttur (Orgulu 2011, Pinar ve diğ. 2003). Aynı zamanda P dalgası ilk hareket yönlerinden faydalanarak bölgede meydana gelen büyüklüğü  $2.0 \leq M_w \leq 4.4$  arasında değişen küçük ve orta büyüklükteki depremlerin odak mekanizmalarının belirlendiği çalışmalar da bulunmaktadır (Coskun 2021, Korkusuz 2012). Çalışmada, literatürden farklı olarak bölgede meydana gelen  $M_w \leq 2.5$  büyüklüğündeki depremlerin de moment tensör çözümleri yapılmıştır. Böylece zengin veri kaynağı olan mikro depremlerin bölgedeki faylanma rejiminin belirlenmesine ek katkı sağlaması ve çok küçük büyüklüklerdeki mikro depremlerin moment tensör analizi çözümlerinin doğruluğunun denetlenmesi amaçlanmıştır. Farklı yöntemler ve farklı veri setleri kullanarak elde edilen odak mekanizması çözümlerinin karşılaştırılması, çözümlerde ve kaynak parametrelerinde bir değişiklik olup olmadığının denetlenmesi için; kısa periyod verilerin moment tensör analizleri ile elde edilen odak mekanizması çözümleri, ulusal ağ geniş bant verilerinin P dalgası ilk hareket yönlerinden ve moment tensör analizlerinden elde edilen odak mekanizmaları ile karşılaştırılmıştır.

## 2. BÖLGENİN SİSMOTEKTONİĞİ

Ganos Fayı, Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun (KAFZ) en batı ucunda yer alır. KAFZ'nin Ketin (1948) tarafından aktif sağ yanal doğrultu atımlı fay olarak tanımlanmasının ardından Pavoni (1961), Ganos fay sistemini (GF) KAFZ'nin kuzey kolu olarak tanımlamıştır. GF, Marmara Denizi'nin batısını ve Kuzey Ege Çukurunu kapsayan bir fay sistemidir. Bu faylar, genellikle karada doğrultu atım ve denizde oblik fay özelliği gösterirler (Yaltırak 1996, Yaltırak ve diğ. 1998). Ganos Bölgesi genellikle sağ yanal doğrultu atımlı hareketlerle karakterizedir (Başarı 2011). KAFZ'nin kuzey kolu ile Kuzey Ege Çukuru arasındaki bağlantıyı temsil eden GF'nin doğusunda, Marmara Denizi'nin altındaki en derin üç yapıdan biri olan Tekirdağ Baseni yer alır (Janssen ve diğ. 2009, Okay ve diğ. 2004). GF, doğuda Tekirdağ Havzası'ndan batıda Semadirek Adası'na kadar uzanır ve Gaziköy ilçesi ile Saros Çukuru'ndan geçer (Armijo 1999, Karabulut ve diğ. 2006, Seeber ve diğ. 2004). GF'nin önemine rağmen, Ganos Bölgesi'nin fay yapısı ve depremselliği hala iyi bir şekilde tanımlanmamıştır (Tuysuz ve diğ. 1998, Okay ve diğ. 1999, Okay ve diğ. 2004, Seeber ve diğ. 2004, Altunel ve diğ. 2004, Armijo ve diğ. 2005). 9 Ağustos 1912  $M_w=7.4$  (Şekil 1) Şarköy-Mürefte Depremi bu bölgede ve KAFZ'nin KAFZ'nin batı ucunda meydana gelen son büyük depremdir (Aksoy ve diğ. 2010, Ambraseys ve Jackson 1998; 2000, Janssen ve diğ. 2009). Armijo ve diğ. 2005, deniz tabanı gözlemlerine dayanarak 1912 deprem kırığının Marmara Denizi'ne kadar uzandığını ileri sürmüşlerdir. Batı Marmara Denizi'nin depremselliğine bakıldığında deprem aktivitesinin özellikle Marmara Adası'nın kuzeybatısı ve Tekirdağ Havzası'nda yoğunlaştığı görülür (Janssen ve diğ. 2009).





Şekil 1: MONGAN-1, MONGAN-2(kırmızı üçgenler), Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (KRDAE-BDTİM) sismik istasyonları (mavi üçgenler), Analizleri yapılan depremlerin lokasyonları (sarı daireler), 1912 Şarköy-Mürefte Depreminin odak mekanizması (kırmızı plaj topu, Tekirdağ Baseni (TB). (Emre ve diğ. 2013; 2018).

### 3. VERİ

Moment tensör ters çözüm analizlerinde TÜBİTAK Uluslararası İkili İş birliği projesi kapsamında “Ganos fayı üzerindeki 1912 depremi kırığının güncel etkinliğinin görüntülenmesi” amacıyla kurulan MONGAN-1 (Monitoring Ganos) ve MONGAN-2 sismik ağları tarafından kaydedilen kısa periyod deprem verileri kullanılmıştır (Şekil 1). Elde edilen sonuçların karşılaştırmasını yapmak için ise Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü sismik ağı tarafından kaydedilen geniş bant deprem verileri, moment tensör analizi ve P dalgası ilk hareket yönlerinden elde edilen odak mekanizması çözümlerinde kullanılmıştır (Şekil 1).

MONGAN-1 ve MONGAN-2 sismik ağları (Şekil 1) Ganos Fayı üzerine kurulan 10 adet 4.5 Hz’lik jeofon Cube kayıtcı ve 30 adet 1 Hz’lik sismometre EDL kayıtcıdan oluşmaktadır. Ekim 2017-Temmuz 2019 tarihleri arasında kayıt yapan MONGAN-1’de iki istasyon arasındaki en kısa mesafe yaklaşık 25 metre ve en uzak mesafe ise yaklaşık 4 km’dir. Fay zonu baş dalgalarını araştırmak amacıyla istasyonlar birbirlerine yakın mesafelerde konumlandırılmıştır. Temmuz 2019-Haziran 2020 tarihleri arasında kayıt yapan MONGAN-2 ağı ise daha geniş istasyon aralığı dağılımına sahiptir. MONGAN ağlarının özellikle ağın dışında meydana gelen depremler için azimutal dağılımları iyi değildir, ancak yüksek sinyal gürültü oranına sahip deprem kayıtları ile mikro depremlerin analizine olanak sağlamışlardır.

### 4. YÖNTEM

Depremlerin odak mekanizmalarını hesaplamak için deprem esnasında ortaya çıkan sismik dalgaların yayılım ve hareketlerinden yararlanarak geliştirilmiş birçok yöntem mevcuttur. Bu çalışmada odak mekanizmalarını belirlemek için deprem sırasında kaydedilen sismik dalga formlarının tamamını kullanan moment tensör analiz yöntemi kullanılmıştır. Farklı veri seti kullanılarak elde edilen çözümlerin karşılaştırmasını yapmak için P dalgalarının ilk hareket yönlerinden de odak mekanizması çözümü yapılmıştır.

#### 4.1) Moment Tensör Analizi

Moment tensör analizi yöntemi, depreme neden olan sismik kaynağın kuvvet çiftlerinden oluşan bir tensör ile temsil edilmesini sağlar (Stein ve Wysession 2003, Udias ve Buforn 1996). Gözlemsel sismogramların ters çözümü ile faylanma parametrelerinin hesaplanmasına olanak sağlar (Kılıç ve Utkucu 2012). Bu çalışmada, Sokos ve Zahradnik (2008) tarafından geliştirilen ISOLA programı kullanılmıştır. Program, Fortran programlama dilinde yazılmış olup Matlab üzerinde çalışmaktadır. Tüm dalga formunu kullanan ISOLA, Green fonksiyonlarını Bouchon (1981)'in ayırık dalga sayısı yöntemiyle hesaplayarak Kikuchi ve Kanamori (1991)'nin telesismik olaylar için geliştirdiği yöntemin bölgesel ve yerel olaylarda kullanılmasını sağlar (Kılıç ve Utkucu 2012). Kikuchi ve Kanamori (1991) algoritmasında yapay sismogramlar 6 tane temel moment tensör elemanı ile hesaplanır. Bunların 5 tanesi ikili kuvvet çiftinden (DC) oluşurken 6'ncısı da hacimsel değişimi ifade eder (Şekil 2). Kaynak-istasyon kombinasyonları (x,y) için temel moment tensör ve Green tensörün konvolüsyonundan oluşan 6 tane 3 bileşen temel sismogram hesaplanır (Denklem 1).

$$G_i(x, y, t), i = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

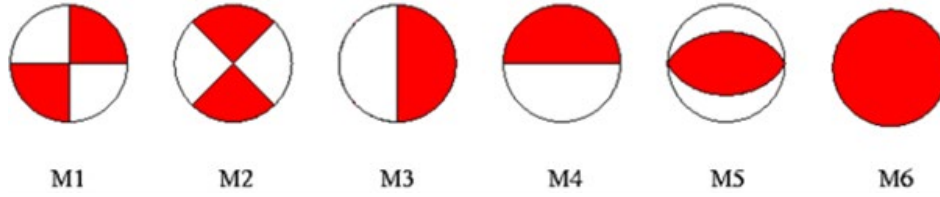
şeklinde gösterilir. Bir moment tensör nedeniyle oluşan sismogram, Denklem 2'deki gibi temel sismogramların ( $G_i$ ) lineer kombinasyonundan oluşur:

$$d(x, y, t) = \sum_{i=1}^6 a_i G_i(x, y, t) \quad (2)$$

Buraki  $a_i$ , moment tensör ve skaler moment ( $M_0$ ) ile ilişkilidir.

$$d = G \cdot a \quad (3)$$

şeklinde matris olarak gösterecek olursak burada  $d$ ,  $N$  tane istasyona ait dalga şekli matrisidir (Denklem 3). Matrisin her kolonu temel sismogramları içerir ve  $a$  ise katsayılarından oluşan bir kolon matristir. Özetle moment tensör analizi, bir lineer ters çözüm problemidir. Ters çözüm işleminde  $d$ : veri matrisini,  $G$ : hesaplanmış Green fonksiyonlarını ve  $a$ : parametre matrisini ifade eder. Hacimsel değişimin olmadığı durumlarda  $a_6=0$  olur ve parametre matrisi 5 elemana düşer. Bu durumda çözüm, "deviatorik moment tensör" olarak adlandırılır. Sonuçların ikili kuvvet çifti (DC) şeklinde verilmesi için moment tensör matrisinin determinantı sıfır olarak kabul edilir. Bu durumda çözüm, "sınırlandırılmış DC moment tensör" olarak adlandırılır. Eğer  $N \gg 6$  ise tek bir çözüm yoktur. Bu durumda en küçük kareler yaklaşımı ile çözüm yapılır. En küçük kareler yönteminin artık hatasının minimum olduğu kaynak pozisyonu ve zamanı aranır (Irmak ve diğ. 2020, Zahradnik ve Sokos 2018). Çeşitli derinlikler için ters çözüm yinelemesi yaparak moment tensör parametreleri hesaplanır. Gözlemsel ve sentetik sismogram arasındaki farkın minimum ve korelasyonun maksimum olduğu çözümler tercih edilir. ISOLA yazılımı, gözlemsel veriye en iyi uyumu veren nokta kaynak konum ve zamanının, kullanıcı tarafından tanımlanan değerleri için kareler araştırmasıyla bulunmasına da olanak tanımaktadır. Moment tensör analizi, çoklu kaynak tanımlamasına dayandığından her bir kaynak için ayrı çözüm bulunur (Kılıç 2009). Elde edilen çözümlerin güvenilirliği ve doğruluğu, Koşul Sayısı (CN), Varyans Azalımı (VR), odak mekanizması çözümünün kaynak konumu-zamana bağlı korelasyonunu gösteren odak mekanizması değişim indeksi (Focal Mechanism Variability Index-FMVAR), konum ve zaman korelasyonunun boyutunu veren Konum-Zaman değişim indeksi (Space-time variability index-STVAR) parametreleri ile denetlenir (Sokos ve Zahradnik 2013). Kararlı, güvenilir ve doğru bir çözüm için  $VR > 0.40$ ,  $CN < 10$ ,  $FMVAR < 30$ ,  $STVAR > 0.30$  olmalıdır.



Şekil 2: Yapay sismogramların hesaplandığı temel odak mekanizmaları (Kikuchi ve Kanamori 1991)

#### 4.2) P Dalgalarının İlk Hareket Yönünden Odak Mekanizmasının Belirlenmesi

P dalgalarının ilk hareketlerinden deprem odağındaki hareketin özellikleri belirlenebilir. Deprem odağından çıkıp sismik istasyonlara ulaşan P dalgalarının ilk hareket yönlerinin bazıları odaktan dışarı yani istasyona doğru bazıları ise istasyondan odağa doğrudur. Hareket yönlerinin yerküre yüzeyindeki yerleşimleri, biri odaktan geçen fay düzlemi ve diğeri yine odaktan geçip bu düzleme dik olan başka düzlemin oluşturduğu genişleme ve sıkışma kadranslarına göreir. İlk hareketin yönü odağa doğru ise genişleme, odaktan dışarı doğru ise sıkışma bölgesinde yer alır (Kalafat 1995). İki sıkışma ve iki genişleme bölgesinden oluşan kadransları birbirinden fay düzlemi ve yardımcı düzlem ayırır (Stein ve Wysession 2003). Çalışmada zSacWin Programı ile P dalgası ilk hareket yönlerinden odak mekanizmaları belirlenmiştir (Yilmazer 2003).

#### 4.3) Stres Tensörü Ters Çözüm Analizi

Depremlerin odak mekanizmalarından tektonik stres veya asal gerilme eksenlerinin yönelimlerini ve stres oranını belirlemek için birçok yöntem mevcuttur. Çalışmada bu yöntemlerden biri olan Michael metodu kullanılmıştır (Michael 1984;1987). Yöntem, üç ana gerilme eksenini ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$ ) ve odak mekanizmalarına en uygun gerilme tensörünü bulmaya yarar (Mutlu 2020). Gerilme tensörü, üç ana gerilme ekseninin kombinasyonudur. Bunlardan;  $\sigma_1$ , maksimum sıkışma eksenini,  $\sigma_2$  orta sıkışma eksenini ve  $\sigma_3$  ise minimum sıkışma eksenidir.  $\sigma_1$  düşey olduğu zaman açılma,  $\sigma_2$  düşey olduğu zaman doğrultu-atım ve  $\sigma_3$  düşey olduğu zaman ise sıkışma rejimleri görülmektedir. Bu üç ekseninin konumlanmasına göre stres oranı (R),

$$R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1) \quad (4)$$

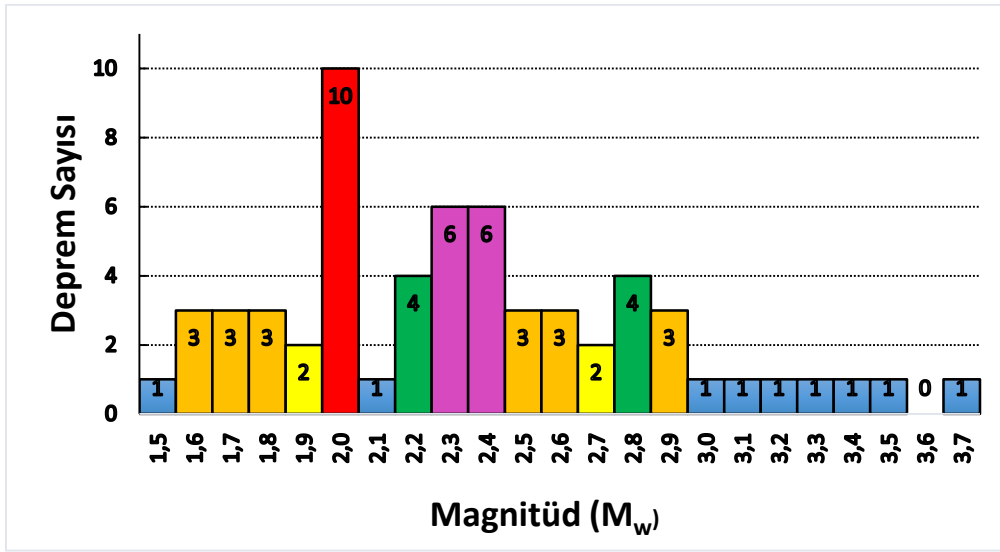
4 numaralı bağıntı ile hesaplanır ve değeri 0 ile 1 arasında değişir. R değeri, bölgede etkili olan baskın stres rejiminin bir göstergesidir.  $R=0$  ise  $\sigma_1=\sigma_2$ ,  $R=1$  ise  $\sigma_2=\sigma_3$  ve  $R=0.5$  ise  $\sigma_1>\sigma_2>\sigma_3$ 'tür (Christove ve Tspanos 2000).  $R=0.5$  ise doğrultu atımlı faylanma,  $R>0.5$  ters faylanma ve  $R<0.5$  ise normal faylanma söz konusudur. Michael Metodu, doğrusal bir ters çözüm yöntemidir. Fay düzleminin tanımlanması gerekmez. Düğüm düzlemlerinden fay düzlemini seçmek için bootstrap yeniden örnekleme yöntemini kullanır (Delvaux ve Barth 2010). Çalışmada stres ters çözüm analizi için Vavrycuk (2014) tarafından geliştirilen, Michael metoduna dayanan STRESSINVERSE programı kullanılmıştır. Matlab üzerinde çalışan ve yinelemeli stres ters çözümü yapan program ile ana gerilme eksenleri ve bölgesel stres oranı (R) belirlenmiştir.

## 5. BULGULAR

Azimutal dağılımı iyi olmayan bir sismik ağa ait kayıtlar kullanılarak azimutal boşlukların, yakın mikro depremlerin moment tensör çözümlerine etkisi değerlendirilmiştir. Çalışmada, Ekim 2017-Haziran 2020 tarihleri arasında Ganos Fayı'nın doğusunda, Tekirdağ Baseni ve Marmara Adası arasında meydana gelen mikro depremlerin ISOLA programı ile moment tensör çözümleri yapılmıştır. MONGAN-1 ve MONGAN-2 sismik ağları tarafından kaydedilen sinyal gürültü

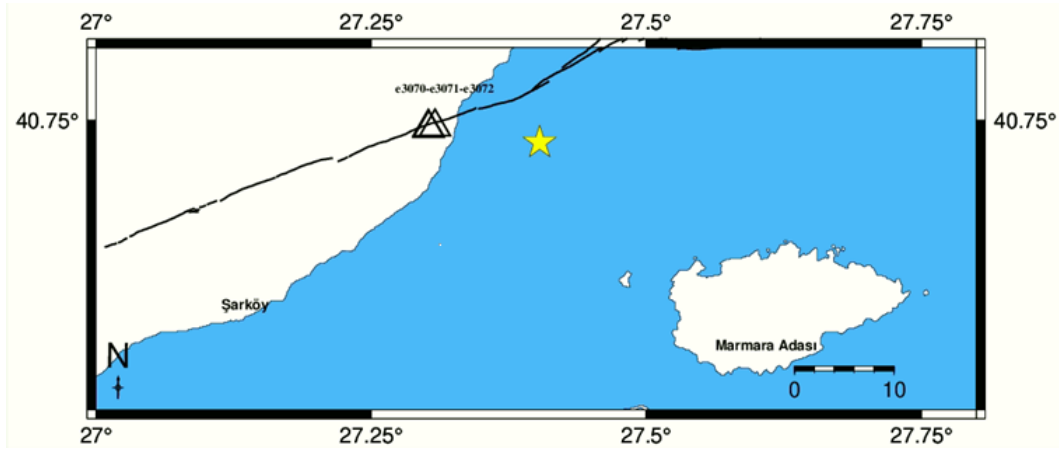
oranı yüksek, 61 adet deprem kaydı kullanılmıştır. Büyüklüğü  $1.5 \leq M_w \leq 3.7$  arasında değişen depremlerin deprem büyüklüğü ve deprem sayısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik incelendiğinde %69'unun büyüklüğünün  $M_w \leq 2.5$  olduğu görülmektedir (Şekil 3).

Analizde kullanılan depremlerin lokasyon, büyüklük ve derinlik bilgileri T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) ve KRDAE-BDTİM'e ait ulusal deprem kataloglarından elde edilmiştir. En az üç istasyonda kaydedilmiş, sinyal gürültü oranı yüksek kayıtlara sahip depremler seçilmiştir. Depremlerin Şekil 1'de yer alan episantr dağılımları incelendiğinde, MONGAN-1 ağı kayıtları için en yakın epicenter uzaklığı 4 km ve en uzak epicenter uzaklığı 20 km'dir. MONGAN-2 sismik ağı istasyonlarının deprem lokasyonlarına olan en yakın mesafesi ise yaklaşık 22 km'dir.



Şekil 3: Çalışma alanında Ekim 2017-Haziran 2020 tarihleri arasında meydana gelen depremlerin büyüklük ve sayı grafiği

Yakın episantr uzaklığındaki mikro ve küçük depremler kabuk modeline oldukça duyarlıdır (Zahradnik ve Sokos 2018). Bölgeyi temsil eden en iyi kabuk modelinin seçilmesi doğru çözümler elde etmek açısından çok önemlidir. Özellikle MONGAN-1 ağı gibi yoğun, azimutal dağılımı iyi olmayan ve deprem episantrlarına uzaklığı <20 km olan sismik ağlar için kabuk modelinin çözümler üzerindeki etkisinin araştırılması gerekir. Bu nedenle özellikle MONGAN-1 sismik ağıyla kaydedilen yakın, mikro depremlerin analizlerinde hangi kabuk modelinin kullanılacağını belirlemek için bölge çalışmalarında yoğun olarak kullanılan Kalafat ve diğ. (1987), Özalaybey ve diğ. (2002), Akyol ve diğ. (2006), Karabulut ve diğ. (2011) ve Yamamoto ve diğ. (2015) kabuk hız modelleri kullanılarak moment tensör analizleri test edilmiştir. Şekil 4'te kabuk modeli analizi için kullanılan depremlerden biri olan 25 Ekim 2017 tarihinde 40.7255 K enlemi ve 27.3911 D boylamında meydana gelen  $M_w=3.4$  büyüklüğündeki depremin episantrı görülmektedir.



Şekil 4: Deprem episantrı (sarı yıldız) ve analizde kullanılan istasyonlar (siyah üçgen)

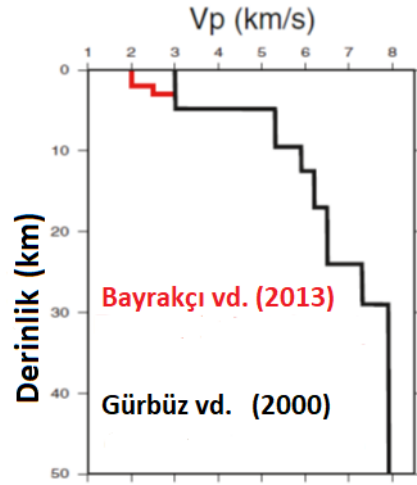
MONGAN-1 sismik ağı tarafından kaydedilen en az 3 istasyona ait sismogramlar kullanılarak beş farklı kabuk modeli ile ayrı ayrı moment tensör çözümü yapılmıştır. Ters çözüm frekans aralığı, sinyal gürültü oranının ve depremin enerjisinin yüksek olduğu 1.1-2.5 Hz'dir. Tüm kabuk modelleri için aynı frekans aralığı kullanılmıştır. Depremin beş farklı kabuk modeli ile yapılan moment tensör analizi sonuçlarından elde edilen çözüm parametreleri (Tablo 1) (VR, CN, FMVAR, STVAR) incelendiğinde tüm kabuk modellerinin CN parametresi hariç, güvenilir sonuç için gerekli olan  $VR > 0.40$ ,  $FMVAR < 30$ ,  $STVAR > 0.30$  koşullarını sağladığı görülmektedir.

Tablo 1: Kabuk modeli seçmek için yapılan analizlerden bir örnek (TÇFB: Ters Çözüm Frekans Bandı,  $\phi$ : Doğrultu Açısı-derece,  $\delta$ : Eğim Açısı-derece,  $\lambda$ : Kayma Açısı-derece)

Kabuk Modeli	$M_w$	TÇFB(Hz)	VR	CN	FMVAR	STVAR	DC (%)	CLVD (%)	$\phi$	$\delta$	$\lambda$
Kalafat ve diğ. (1987)	3.5	1.1-2.5	0.60	27.9	5±5	0.01	86.2	13.8	300/50	66/53	-41/-150
Ozalaybey ve diğ. (2002)	3.6	1.1-2.5	0.65	29.6	11±12	0.01	91.8	8.2	298/42	74/50	-42/-159
Akyol ve diğ. (2006)	3.6	1.1-2.5	0.66	37.6	7±7	0.01	94.9	5.1	298/45	72/48	-45/-155
Karabulut ve diğ. (2011)	3.8	1.1-2.5	0.60	34.0	1±1	0.01	92.4	7.6	297/37	78/49	-42/-164
Yamamoto ve diğ. (2015)	3.4	1.1-2.5	0.80	9.8	5±6	0.02	88.6	11.4	305/44	75/60	-31/-163

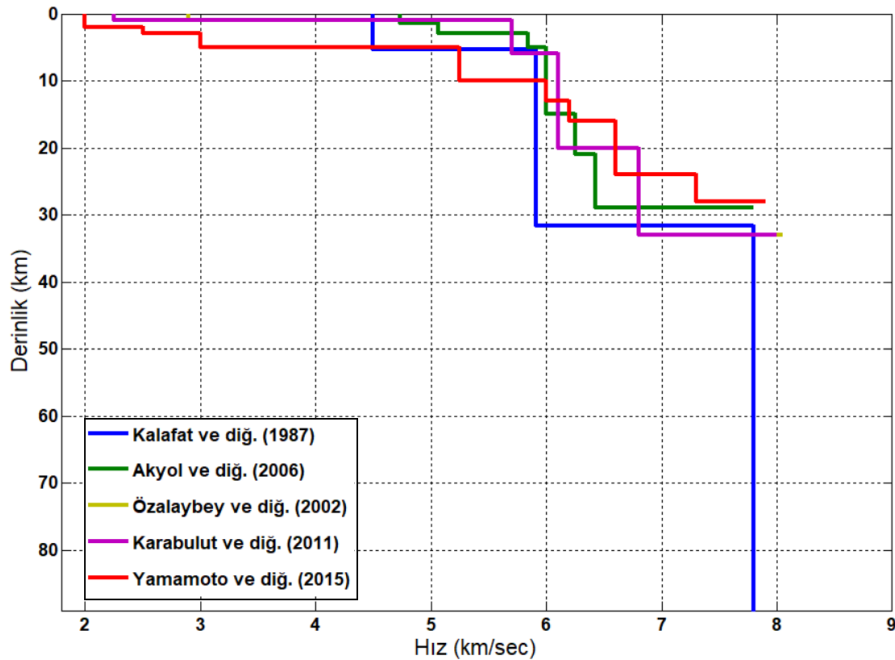
CN katsayısı, G (Green's fonksiyon) matrisine, dolayısıyla kaynak-istasyon konumları ve hız modeline bağlıdır (Stanek ve diğ. 2017). İstasyonların sismik ağıdaki konumları, hız modelindeki belirsizliklerin etkisini azalttığı için baskın bir öneme sahiptir (Sileny 2009). Ancak MONGAN-1 istasyon diziliminde olduğu gibi azimutal dağılımın iyi olmadığı ağlara ait kayıtlar analiz edilirken kabuk modelinin çözümler üzerindeki etkisi daha baskın hale gelmektedir. Bu nedenle kullanılan kabuk modelindeki hızların gerçeğe yakın, doğru hız değerleri olması çok önemlidir. Analiz edilen depremin episantr uzaklığının 8 km olduğu düşünülürse bu yüksek frekanslı depremin analizinden elde edilen CN değerlerinde kabuk modelinin etkisinin görülmesi olasıdır. Kararlı ve doğru moment tensör çözümü için  $CN < 10$  olmalıdır (Langston vd. 1982). İkili kuvvet çifti (DC) ve dengelenmiş lineer vektör dipolü (CLVD) değerleri incelendiğinde DC'in tüm kabuk modelleri için yüksek olduğu görülür. Doğrultu, eğim ve kayma açısının aksine DC% çok değişkendir (Kılıç 2009). Bu nedenle DC'in başta VR olmak üzere diğer parametrelerle birlikte değerlendirilmesi gerekir. Analizlerin sonucunda diğer koşulların yanısıra  $CN < 10$  koşulunu da sağlayan ve DC değeri de yüksek olan Yamamoto ve diğ. (2015) kabuk modeli analizlerde kullanılmak üzere seçilmiştir. Yamamoto ve diğ. (2015) kabuk

Tamtas et al. / Turkish Journal of Earthquake Research 3 (2), 167-192, December 2021  
modeli, Gürbüz ve diğ. (2000) ve Bayrakçı ve diğ. (2013) tarafından geliştirilen kabuk modellerinin kombinasyonundan oluşmaktadır (Şekil 5).



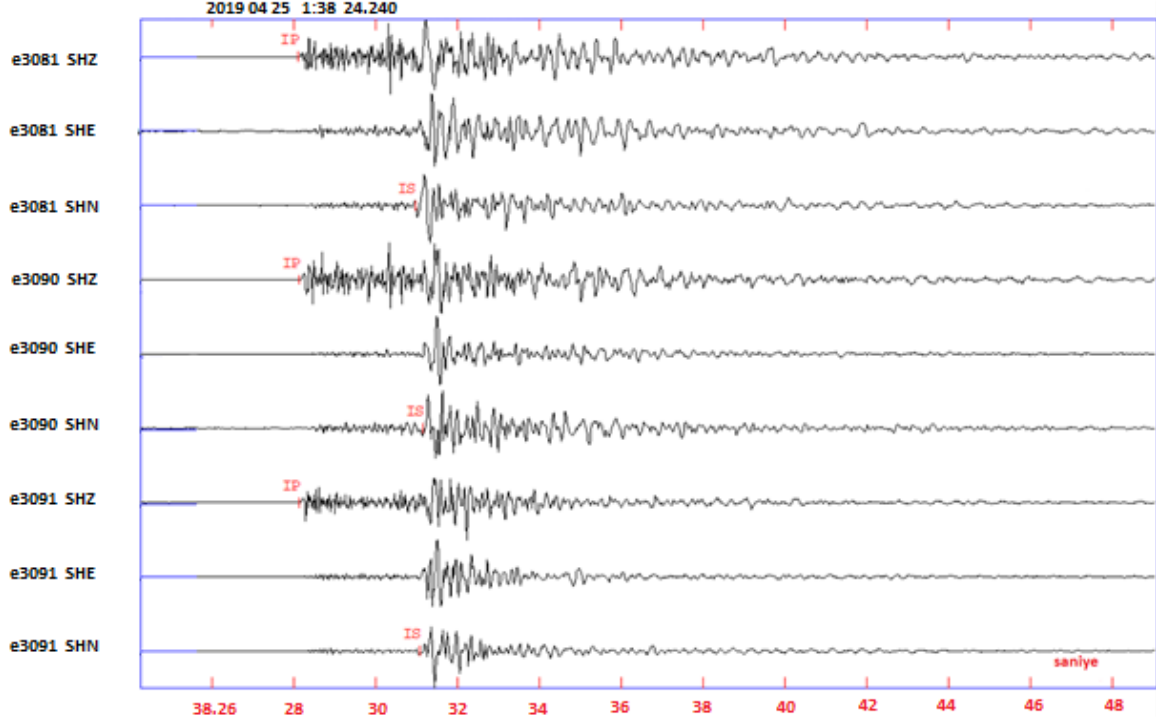
Şekil 5: Yamamoto (2015) kabuk modeli (Siyah çizgi Gürbüz vd. (2000) hız modeli ve kırmızı çizgi ise Gürbüz vd. (2000) modelinin Bayrakçı vd. (2013) modeline dayanarak modifiye edilmiş halidir.)

Yamamoto ve diğ. (2015) kabuk modeli diğer dört kabuk modeli ile karşılaştırıldığında özellikle ilk 10 km'deki sismik dalga hızlarının diğer kabuk modellerinden daha düşük olduğu görülür (Şekil 6).

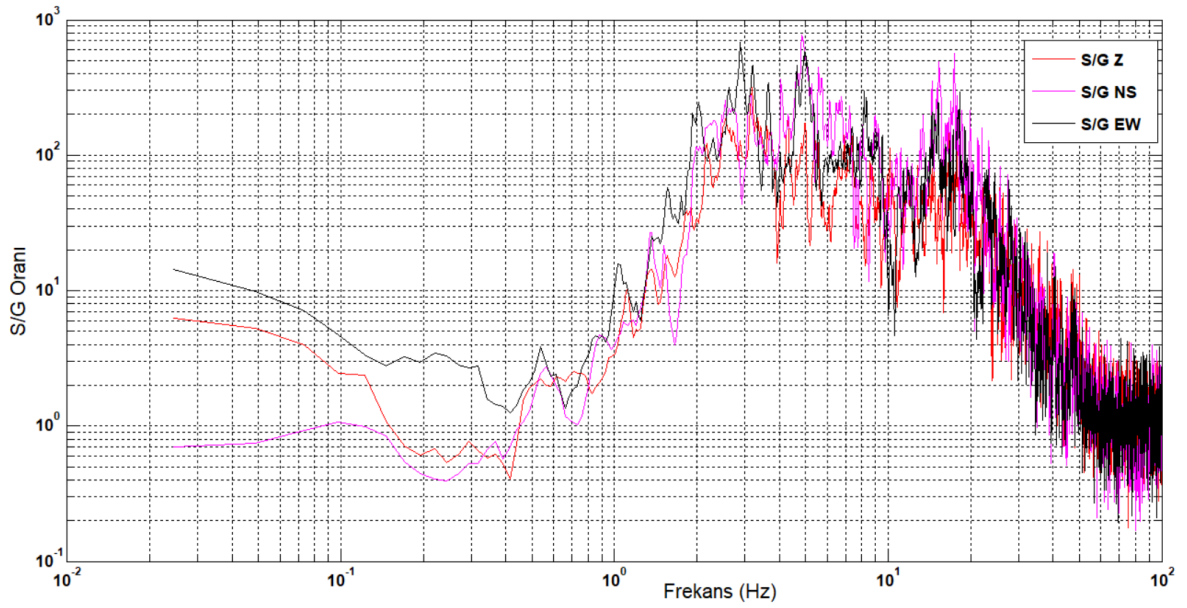


Şekil 6: Kabuk modelleri

Tüm analizlerde sinyal gürültü oranı yüksek, en az 3 istasyona ait, 3 bileşen veri kullanılmıştır. Şekil 7'de MONGAN-1 ağı ile kaydedilen, 25 Nisan 2019 tarihinde meydana gelen  $M_w=2.0$  büyüklüğündeki depremin 3 istasyon, 3 bileşen ham deprem kaydı yer almaktadır. Mikro deprem olmasına rağmen sinyal gürültü oranı yüksek bir kayıt görülmektedir (Şekil 8).

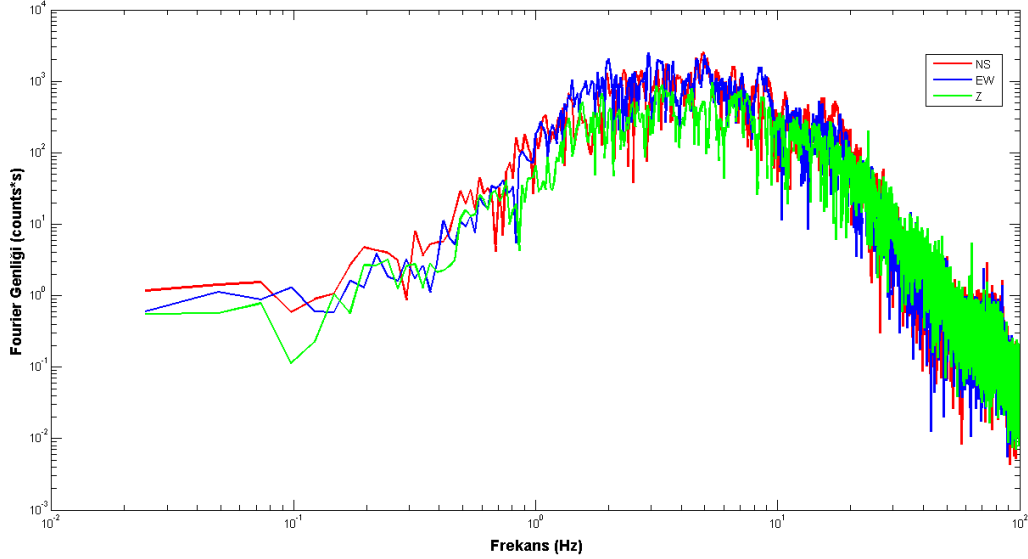


Şekil 7: 25 Nisan 2019 saat 01:38' de meydana gelen  $M_w=2.0$  büyüklüğündeki depremin 3 istasyon 3 bileşen kaydı



Şekil 8: e3091 istasyonu üç bileşen sinyal gürültü oranı

Şekil 9'da depremin moment tensör analizinde kullanılan e3091 istasyonunun üç bileşen ham verisinin hızlı Fourier transformu sonunda elde edilen frekans-genlik değerlerini gösteren grafik yer almaktadır. Bu grafik dikkate alınarak deprem enerjisinin ve sinyal gürültü oranının yüksek olduğu 2.3-3.8 Hz aralığında moment tensör çözümü yapılmış ve depremin odak mekanizması belirlenmiştir.



Şekil 9: e3091 istasyonu üç bileşen ham verisinin Fourier genliği-frekans grafiği.

ISOLA programı ile elde edilen çözüm parametreleri, gözlemsel ve sentetik sismogramların uyumu sırasıyla Şekil 10 ve Şekil 11'de görülmektedir. Depremin merkez üssünün istasyonlara olan uzaklığı 15-16 km arasında ve istasyonların azimut değerleri 259 derecedir. İstasyonların birbirlerine olan uzaklıkları MONGAN-1 sismik ağının bir özelliği olarak oldukça yakındır. e3081 ile e3090 istasyonlarının arası 94 metre, e3081-e3091 arası 518 metre ve e3090-e3091 istasyonlarının arası ise 516 metredir. Bu kadar yakın konumlandırılmış ve azimutal dağılımı iyi olmayan istasyon ağının moment tensör çözümü üzerindeki etkisi denetlenmiştir. İstasyonlar arasındaki mesafenin az olması tek istasyon davranışı sergilemelerine ve Şekil 7'den de görülebileceği gibi sismik dalgaların istasyonlara hemen hemen aynı zamanda varmasına neden olmaktadır. Her ne kadar ISOLA tek istasyon ve azimutal dağılımın iyi olmadığı kayıtlarla moment tensör çözümü yapılabilse de çözüme katılan her istasyon ve bileşenin ağırlığı farklı olacağından çözümün kalitesi de artacaktır (Kumar ve diğ. 2015a; 2015b). Ayrıca ISOLA'nın üç bileşen veriden herhangi bir tanesini kullanarak da çözüm üretebildiği düşünülürse her bileşenin çözümlere katkı sağladığı söylenebilir (Irmak ve diğ. 2020). Bu nedenle moment tensör çözümleri yapılırken tek istasyon yerine en az üç istasyon kullanılmıştır.



## MOMENT TENSÖR ÇÖZÜMÜ

## İÇ MERKEZ LOKASYONU (IUC)

Oluş Zamanı: 20190425 01:38:24.00  
Enlem : 40.7653 Boylam : 27.4782 Derinlik : 12.8

## CENTROID

Denenen Kaynak Numarası: 2 ( Sabit Dış Merkez Ters Çözümü)  
Centroid Enlem (K): 40.7653 Boylam (D): 27.4782  
Centroid Derinlik (km) : 13  
Centroid Zamanı : +3.2 (s) oluş zamanına göre

Moment (Nm) : 4.820e+012

Mw= 2.06

Ters Çözüm Tipi : Deviatoric

VOL % : 0

DC %: 42

CLVD %: 58

Var. Red. ( Ters çözümde kullanılan tüm istasyonlar için ) : 0.8

SNR

CN

FMVAR

STVAR

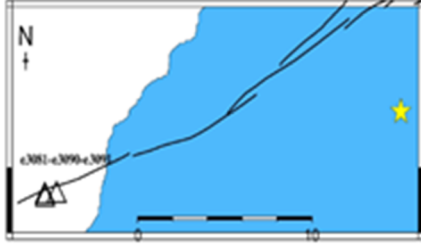
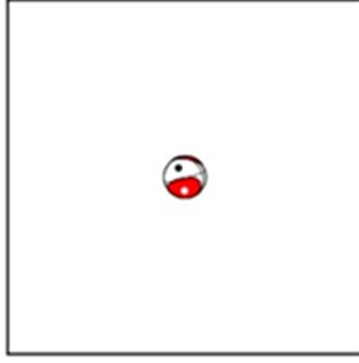
Var. Red. ( Tüm istasyonlar için ) :

NaN

7.4

5±3

0.02



Doğrultu Eğim Kayma Açısı

330 21 -15

Doğrultu Eğim Kayma Açısı

74 85 -110

P - Eksen Azimut Dalım

323 47

T - Eksen Azimut Dalım

182 36

Ters çözümde kullanılan frekans bandı (Hz)

2.3 - 3.8

İstasyonlar - Kullanılan Bileşenler - Uzaklık

	KG	DB	Düsey	U(km)
e3091	+	+	+	15
e3081	+	+	+	16
e3090	+	-	+	16

Mrr Mtt Mpp

-0.318 2.272 -1.953

Mrt Mrp Mtp

-4.233 -0.575 -0.664

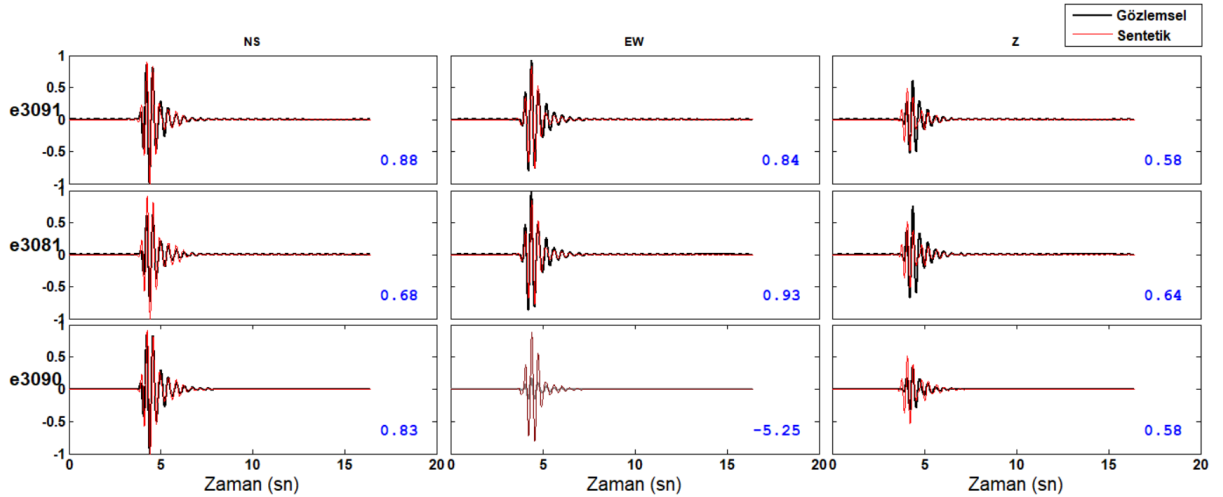
Exponent (Nm): 12

Şekil 10: 25.04.2019 tarihinde meydana gelen  $M_w=2.0$  büyüklüğündeki depremin moment tensör çözümü parametreleri

Deprem Tarih-saat: 190425\_01\_38\_24.00 Yerdeğiştirme (m). Ters Çözüm Frekans Bandı (Hz) 2.3 - 3.8

Gri dalga formları ters çözümde kullanılmadı.

VR değerleri, mavi sayılarla gösterilmiştir.



Şekil 11: Gözlemsel ve sentetik dalga formu uyumları

Moment tensör analizlerinin kararlı, güvenilir ve doğru çözümler için  $VR > 0.40$ ,  $CN < 10$ ,  $FMVAR < 30$ ,  $STVAR > 0.30$  koşullarını sağlaması gerekir. Tablo 2'de yer alan 61 adet depreme ait moment tensör analizi sonuçları bu koşullar açısından değerlendirilmiştir. Gözlemsel ve sentetik dalga formu uyumlarını gösteren VR değerleri 0.40 ile 0.85 arasında değişmektedir. Bu değerler, güvenilir bir sonuç elde etmek için gerekli olan  $VR > 0.40$  koşulunu sağlamaktadır. Kabuk modeli ve istasyon dizilimine bağlı olan CN parametresinin  $CN < 10$  olması gerekmektedir. Çözümlerden elde edilen CN parametrelerinin 2.6 ile 9.9 arasında değişen değerler aldığı görülmektedir. Gerek sentetik ve gözlemsel dalga formlarının uyumunu gösteren VR değerlerinin yüksek olması gerekse istasyon-kaynak arasındaki mesafeye ve kabuk modeline bağlı olan CN değerlerinin istenilen aralıklarda olması azimutal dağılımın çözümler üzerinde olumsuz etkisinin kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığını göstermektedir. Aynı zamanda analizler için seçilen kabuk modelinin de bölgesel hız yapısını yüksek doğrulukla temsil ettiğinin göstergesi olarak düşünülebilir. Odak mekanizması çözümünün kaynak konumu-zamana bağlı korelasyonunu gösteren odak mekanizması değişim indeksi (FMVAR) değerlerinin hepsi 30'dan küçüktür. Konum ve zaman korelasyonunun boyutunu veren Konum-Zaman değişim indeksi (STVAR) değerleri de kararlı ve doğru bir çözüm elde etmek için gerekli olan  $STVAR \leq 0.30$  koşulunu sağlamaktadır.

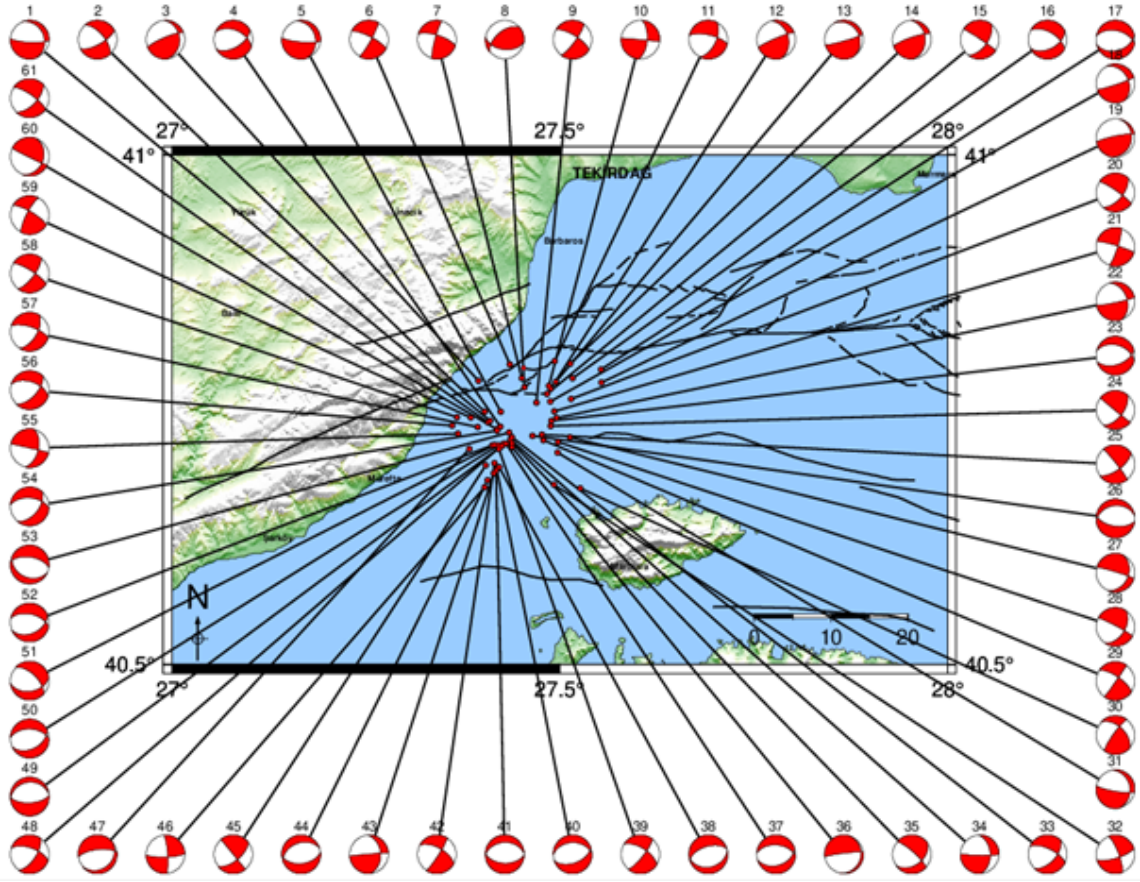
Tablo 2: MONGAN sismik ağları ile kaydedilen 61 adet depremin moment tensör analizi sonuçları ( $h$ =Centroid derinliği-km)

No	Tarih	Oluş Zamanı	Enlem	Boylam	Mw	h	TÇFB(Hz)	VR	CN	FMVAR	STVAR	$\phi$	$\delta$	$\lambda$
1	03.11.2017	04:38:29	40.7270	27.3935	1.8	7.0	1.6-3.3	0.74	3.8	16±25	0.02	339/93	26/79	-26/-114
2	21.05.2019	13:17:37	40.7360	27.3868	3.7	7.0	1.0-3.2	0.54	4.2	6±12	0.02	61/319	70/62	-150/-23
3	22.10.2017	21:15:36	40.7663	27.3786	2.0	9.0	2.0-3.5	0.48	6.1	17±25	0.01	247/356	80/27	116/21
4	29.10.2019	15:38:41	40.7210	27.4071	3.3	7.0	1.2-2.0	0.65	4.7	3±4	0.01	293/60	48/56	-48/-126
5	27.05.2019	13:14:14	40.7360	27.4075	2.2	9.0	1.4-3.6	0.58	4.5	17±24	0.02	345/94	27/80	-22/-115
6	27.10.2019	02:01:37	40.7823	27.4193	2.9	7.0	1.6-2.5	0.51	7.5	5±7	0.02	29/297	82/77	-166/-8
7	23.02.2020	23:16:23	40.7688	27.4346	2.6	9.0	1.4-2.4	0.50	7.1	1±1	0.01	195/161	82/71	161/8
8	01.04.2020	19:03:24	40.7598	27.4381	3.5	8.0	1.0-2.1	0.41	4.7	5±5	0.01	230/97	53/47	57/126
9	16.12.2018	15:37:25	40.7448	27.4533	2.3	8.0	1.0-2.0	0.43	3.0	8±10	0.02	36/302	78/70	-160/-13
10	07.10.2018	20:32:46	40.7611	27.4693	2.5	15.0	1.4-2.4	0.46	6.7	10±9	0.02	5/95	61/90	0/-151
11	09.09.2018	10:42:07	40.7856	27.4770	2.3	10.0	1.8-3.6	0.42	6.5	3±4	0.01	26/283	58/70	-156/-34
12	01.06.2019	18:52:02	40.7585	27.4718	2.6	11.0	1.3-1.8	0.71	3.6	25±25	0.03	247/346	84/36	126/11
13	25.04.2019	01:38:24	40.7653	27.4782	2.0	13.0	2.3-3.8	0.80	7.4	5±3	0.02	330/74	21/85	-15/-110
14	19.12.2018	14:02:00	40.7830	27.4973	2.8	18.0	1.4-2.4	0.47	8.3	14±25	0.02	251/357	80/32	120/18
15	09.10.2018	23:19:02	40.7535	27.4673	2.4	9.0	1.2-3.9	0.66	4.8	6±7	0.01	304/35	87/57	-33/-177
16	09.09.2018	10:05:35	40.7686	27.5000	3.0	9.0	2.4-3.9	0.65	7.6	2±3	0.01	300/63	57/50	-50/-134
17	13.05.2020	15:45:34	40.7772	27.5368	2.2	9.0	1.8-3.9	0.55	8.8	8±10	0.01	282/75	51/42	-72/-111
18	17.04.2018	02:08:25	40.7458	27.4711	2.4	15.0	1.4-3.6	0.50	7.4	3±3	0.02	333/72	33/85	-10/-123
19	07.01.2018	02:29:35	40.7646	27.5371	2.4	9.0	1.0-2.4	0.60	3.9	2±2	0.01	13/258	18/82	26/107
20	23.11.2019	21:27:34	40.7483	27.4983	2.3	9.0	1.2-3.4	0.41	7.8	1±1	0.01	305/40	82/60	-31/-171
21	16.12.2018	18:32:00	40.7361	27.4763	2.3	8.0	1.0-1.9	0.42	3.0	3±4	0.02	18/287	81/83	-173/-9
22	25.03.2018	06:26:24	40.7297	27.4795	2.5	13.0	1.4-3.0	0.53	5.7	6±5	0.02	78/342	85/40	-129/-8
23	01.12.2019	10:09:31	40.7270	27.4728	2.3	9.0	1.0-2.8	0.79	6.1	3±4	0.01	286/72	44/51	-64/-113
24	11.03.2018	07:09:41	40.7220	27.4717	2.8	10.0	1.0-1.7	0.48	4.2	7±5	0.01	129/38	88/58	32/178
25	13.05.2018	18:01:13	40.7133	27.4607	3.1	4.0	1.4-2.4	0.52	5.0	28±29	0.02	54/322	65/85	-175/-25
26	01.12.2019	03:05:04	40.7122	27.4482	2.7	9.0	1.4-2.9	0.56	8.5	1±1	0.01	262/98	33/58	-104/-81
27	21.03.2018	16:23:49	40.7107	27.4965	2.4	18.0	1.4-3.0	0.57	9.1	4±3	0.02	23/287	33/86	-173/-57
28	12.09.2018	23:53:51	40.7063	27.481	2.6	12.0	1.6-2.9	0.70	6.5	6±5	0.01	298/32	85/50	-41/-174

29	01.12.2019	02:52:32	40.7078	27.4622	3.2	9.0	1.4-2.8	0.52	8.5	2±2	0.01	35/304	88/70	-160/-2
30	15.09.2019	09:48:57	40.6605	27.5100	2.5	8.00	1.2-2.2	0.60	6.6	3±5	0.01	313/215	51/80	12/140
31	18.01.2019	11:18:02	40.6957	27.4807	2.9	13.00	1.8-3.5	0.42	6.6	1±1	0.01	350/101	26/80	-22/-114
32	11.03.2018	11:35:35	40.6641	27.4761	1.9	5.00	2.5-3.5	0.43	5.9	3±5	0.04	73/339	74/76	-166/-16
33	11.01.2020	06:34:30	40.7107	27.4218	1.6	6.00	1.1-2.1	0.51	5.0	8±9	0.01	43/296	56/67	-151/-37
34	14.01.2020	15:02:51	40.7088	27.4201	2.0	8.00	1.2-3.8	0.47	6.8	4±4	0.01	357/91	45/87	-5/-134
35	26.03.2018	13:36:20	40.7050	27.4220	1.9	9.00	1.2-3.9	0.59	3.9	3±2	0.01	312/55	79/42	-49/-163
36	11.01.2020	03:40:27	40.7012	27.4220	1.5	7.00	1.8-3.8	0.59	9.8	2±2	0.02	272/35	68/36	-60/-141
37	11.01.2020	06:57:31	40.7045	27.4145	1.8	9.00	1.2-2.8	0.85	7.6	2±2	0.02	274/73	50/42	-76/-106
38	11.01.2020	09:24:00	40.6815	27.4055	2.2	9.00	1.0-2.4	0.42	5.4	3±3	0.01	78/254	34/56	-86/-93
39	11.01.2020	04:38:18	40.6993	27.4048	2.0	9.00	1.0-2.8	0.43	6.1	5±4	0.01	302/39	63/78	-14/-152
40	11.01.2020	09:56:41	40.6795	27.4021	2.8	9.00	2.5-3.9	0.64	9.8	3±2	0.01	268/71	39/53	-76/-101
41	11.01.2020	05:33:57	40.6780	27.4011	2.8	5.00	1.0-2.4	0.77	6.8	4±3	0.01	92/268	52/38	-87/-93
42	11.01.2020	03:45:49	40.6855	27.3993	1.6	9.00	1.4-3.8	0.40	6.9	3±4	0.01	299/32	62/83	-8/-152
43	11.01.2020	05:12:17	40.6755	27.3985	2.4	8.00	1.6-3.6	0.84	9.3	5±7	0.02	265/356	89/40	130/1
44	11.01.2020	03:36:07	40.6685	27.3906	2.1	8.00	2.1-3.9	0.69	9.9	3±2	0.02	251/84	40/51	-100/-82
45	12.01.2020	12:51:20	40.6831	27.3880	2.0	9.00	1.6-3.9	0.40	8.8	4±6	0.01	141/51	90/62	28/180
46	09.10.2017	07:26:29	40.6617	27.3865	1.7	9.00	1.4-2.2	0.48	3.6	4±5	0.01	88/356	78/80	-170/-12
47	15.01.2020	03:03:19	40.6993	27.3671	2.4	9.00	2.1-3.9	0.43	9.9	4±4	0.01	263/51	70/23	-78/-119
48	11.01.2020	04:39:19	40.7043	27.4110	2.2	7.00	1.4-3.4	0.43	8.7	3±5	0.01	34/289	64/62	-149/-30
49	11.01.2020	04:42:50	40.7023	27.4087	1.7	8.00	1.4-3.4	0.57	8.6	6±5	0.01	87/263	63/27	-88/-94
50	11.01.2020	06:31:15	40.7028	27.4046	2.0	5.00	1.4-3.4	0.44	9.6	12±9	0.01	272/63	49/44	-71/-111
51	10.03.2018	09:37:23	40.7033	27.4000	1.6	6.00	1.4-2.4	0.52	2.6	14±25	0.03	314/80	60/44	-56/-135
52	11.12.2019	21:06:24	40.7031	27.3965	2.0	10.00	1.6-3.9	0.41	8.2	6±5	0.02	283/66	54/43	-66/-119
53	11.01.2020	07:49:49	40.7153	27.4183	1.7	9.00	1.1-3.9	0.52	6.6	15±18	0.02	279/114	58/33	-98/-77
54	26.11.2019	17:48:55	40.7171	27.4025	1.8	9.00	1.2-3.4	0.48	6.7	3±5	0.01	275/38	54/53	-49/-133
55	04.02.2019	18:03:49	40.7143	27.3525	2.0	7.00	2.4-3.9	0.75	5.3	8±13	0.02	283/14	89/53	-37/-178
56	11.01.2020	03:33:16	40.7223	27.3448	2.9	9.00	1.5-3.9	0.50	7.1	1±1	0.01	288/42	54/60	-38/-138
57	14.04.2018	11:45:26	40.7208	27.3775	2.7	9.00	1.4-3.0	0.45	6.9	1±1	0.01	288/31	69/60	-33/-156
58	17.02.2018	18:52:48	40.7305	27.3508	2.0	5.00	2.9-3.9	0.41	7.0	14±20	0.01	37/303	71/77	-166/-20
59	25.03.2020	19:15:07	40.7300	27.3686	2.3	9.00	1.8-3.9	0.69	9.6	6±8	0.01	207/301	77/75	165/13
60	25.12.2018	11:14:41	40.7186	27.4023	2.0	16.00	1.4-2.9	0.57	8.3	6±4	0.02	21/116	30/87	174/60
61	25.10.2017	11:05:09	40.7255	27.3911	3.4	14.00	1.1-2.5	0.80	9.9	5±6	0.02	305/44	75/60	-31/-163

Tablo 2’de yer alan depremlerin odak mekanizma topları ile gösterimi şekil 12’de görülmektedir. Depremlerin faylanma mekanizmaları incelendiğinde her üç faylanma türüne ait özellikler sundukları görülür. Aslında bu durum çalışma alanı için beklenmedik bir durum değildir. Korkusuz (2012), Ganos Fayı ile Tekirdağ Baseni arasında kalan bölgede meydana gelen depremlerin normal, ters ve doğrultu atımlı faylanma özellikleri gösterdiğini ve bölgedeki normal faylanmadan ters faylanmaya geçiş nedeniyle meydana gelen sağ yanal atımlı deformasyon sisteminde meydana geldiğini belirtmiştir. Çalışma bölgesinde KD-GB doğrultulu ters faylanma bileşenine sahip oblik faylanma özelliği gösteren odak mekanizmaları elde edilmiştir. Pınar ve diğ. (2003), bölgede yaptıkları çalışmada KD-GB doğrultulu ters bileşene sahip oblik faylanma özelliği gösteren odak mekanizmaları belirlemişlerdir. Analizlerden elde edilen KD-GB doğrultulu ters faylanma özelliğine sahip odak mekanizmaları Coskun (2021)’in aynı bölgede yaptığı odak mekanizması sonuçlarıyla da tutarlıdır. Coskun (2021), Ganos Fayı ve Tekirdağ Baseni arasında meydana gelen depremlerin sağ yönlü doğrultu atım ve normal faylanma mekanizması ile KB doğrultulu sıkışma gerilmesi ile ters faylanma mekanizmasına sahip olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca ters faylanma özelliği gösteren odak mekanizmalarının

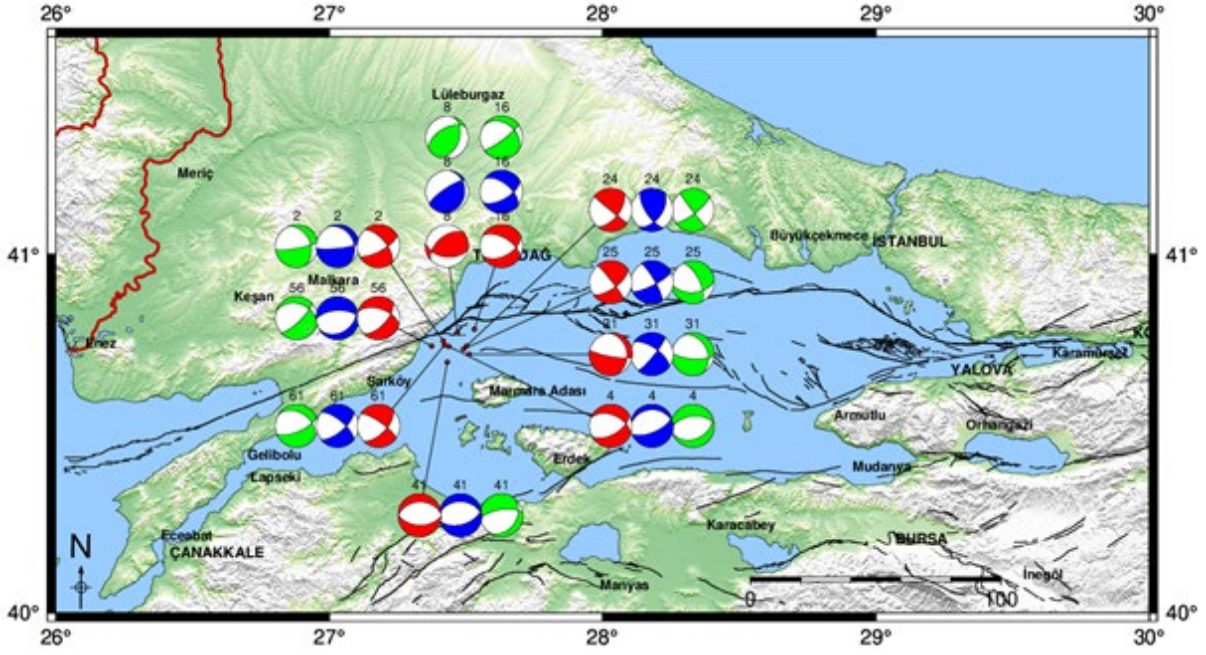
27 Nisan 1985 yılında meydana gelen  $M_w=4.4$  büyüklüğündeki Mürefte Depreminin faylanma mekanizması ile tutarlı olduğunu belirtmiştir.



Şekil 12: MONGAN sismik ağlarına ait veriler kullanılarak yapılan moment tensör analizlerinden elde edilen odak mekanizmaları

MONGAN ağı kayıtları ile yapılan moment tensör analizlerinden elde edilen odak mekanizmaları, iyi bir azimutal dağılıma sahip KRDAE-BDTİM sismik ağı geniş bant kayıtları kullanılarak yapılan moment tensör çözümü ve P dalgası ilk hareket yönlerinden belirlenen odak mekanizmaları ile karşılaştırılmıştır. Böylece farklı yöntemler ve farklı veri seti kullanarak elde edilen odak mekanizması çözümlerinin karşılaştırması yapılmış, çözümlerde ve kaynak parametrelerinde bir değişiklik olup olmadığı denetlenmiştir.

KRDAE-BDTİM sismik ağı tarafından kaydedilmiş büyüklükleri  $2.8 \leq M_w \leq 3.7$  arasında değişen Tablo 2'de yer alan depremlerden 10 tanesinin odak mekanizmaları iki farklı yöntemle belirlenmiştir. Seçilen depremler ve çözüm parametreleri Tablo 3'te listelenmektedir. Bu depremler, P dalgası ilk varışlarının filtresiz veriden okunabilmesi için sinyal gürültü oranlarının yüksek ve yöntemin başarılı olabilmesi için azimutal dağılımları iyi olan istasyonlarla kaydedilmiş olması koşullarına göre seçilmiştir. P dalgası ilk hareket yönlerinden odak mekanizması belirlenirken en az 10 istasyondan polarite okuması yapılmıştır. İki farklı sismik ağı ait kayıtlar ve iki farklı yöntemle elde edilen odak mekanizmaları Şekil 13'te görülmektedir.



Şekil 13: Moment tensör analizlerinden elde edilen odak mekanizmaları (MONGAN verileri (kırmızı plaj topu), KRDAE-BDTİM verileri (mavi plaj topu) ve KRDAE-BDTİM verileri ile P dalgası ilk hareket yönlerinden elde edilen odak mekanizmaları (yeşil plaj topu), mavi üçgenler KRDAE-BDTİM istasyonlarını, kırmızı üçgenler MONGAN istasyonlarını göstermektedir.)

Tablo 3'te yer alan depremlere ait çözümler incelendiğinde her iki veri seti için moment tensör analizlerinden elde edilen gözlemsel ve sentetik dalga formu uyumlarının  $VR > 0.40$  koşulunu sağladığı görülmektedir. Ancak güvenilir bir sonuç için tek başına bu uyum yeterli olmadığından diğer parametrelerin de koşulları sağlayıp sağlamadığına bakıldığında  $CN < 10$ ,  $FMVAR < 30$ ,  $STVAR > 0.30$  koşullarını sağladığı görülmektedir. KRDAE-BDTİM geniş bant kayıtları ile yapılan ters çözüm frekans aralığı 0.08-0.14 Hz arasında değişirken, kısa periyod kayıtlardan oluşan MONGAN ağı kayıtlarının ters çözümü, bu kayıtlarda deprem enerjisinin yüksek olduğu 1.0-3.9 Hz arasında değişen yüksek frekanslarda yapılmıştır. Kısa periyod kayıtlar  $> 1$  Hz üzerine duyarlı olduğundan yüksek frekanslarda kaydettikleri verilerin analizi ile özellikle küçük depremlerin kaynak parametrelerine dair daha çok bilgi edinilmesini sağlarlar.

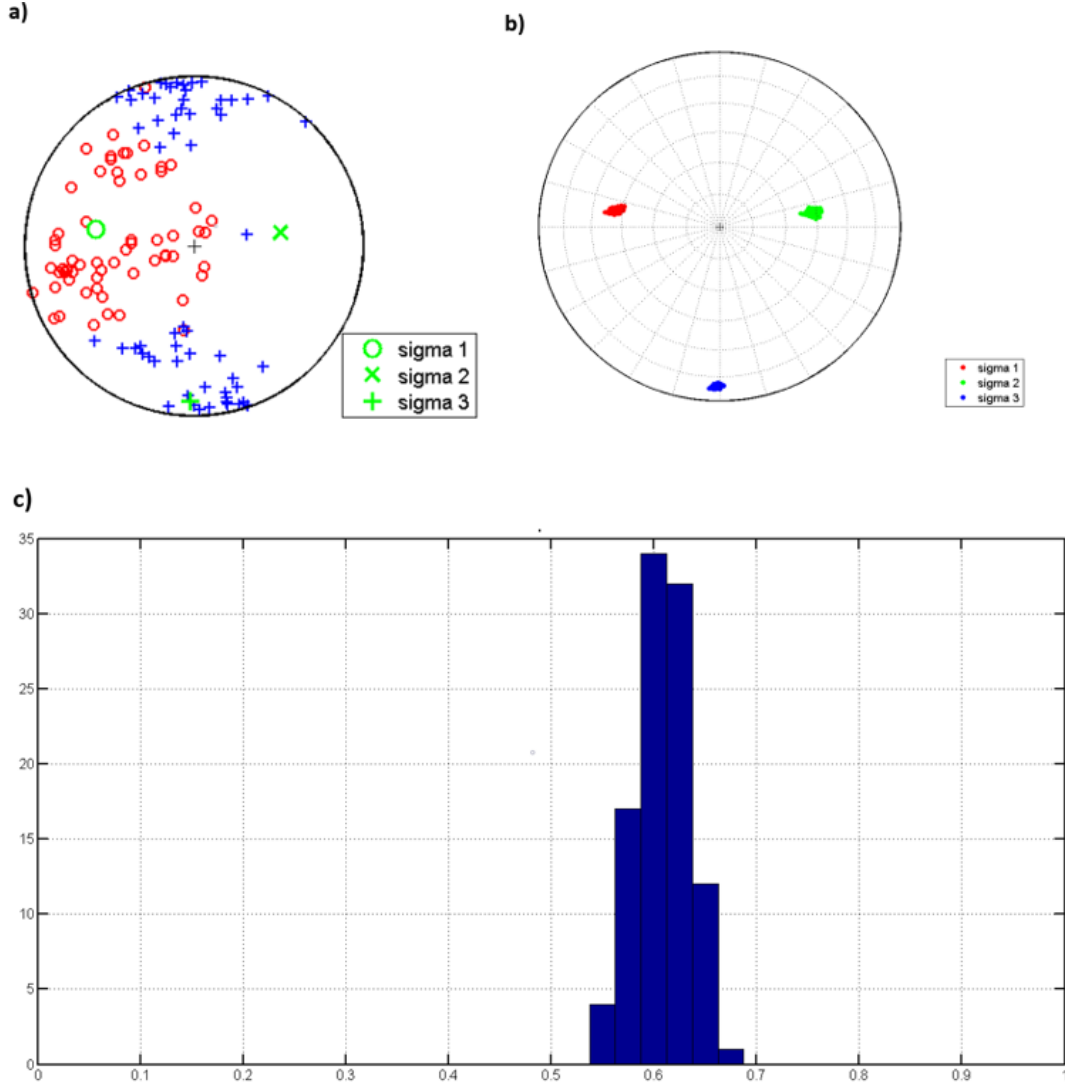
Doğrultu, eğim ve atım açılarında küçük farklar olsa da genellikle her deprem için elde edilen üç odak mekanizmasının da birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. P dalgası ilk hareket yaklaşımı, faydaki kırılma hareketinin başlangıcına ve istasyonlara gelen ilk dalga varışlarına odaklanır. Dolayısıyla P dalgası ilk hareket yönlerinden odak mekanizması hesaplanırken fay düzleminin doğrultusu başlangıç momentinden hesaplanmış olur. Moment tensör analizinde ise faydaki kırılma sürecinin tamamına ait bilgiler taşıyan tam dalga formu kullanılır. Fay düzleminin bir bütün olarak kabul edildiği centroid modele dayanarak hesaplamalar yapılır.

Tablo 3: İki farklı veri seti ve iki farklı yöntemle yapılan analizlerin sonuç parametreleri (MTA: Moment Tensör Analizi)

Deprem No	VERİ-YÖNTEM	TÇFB (Hz)	VR	FMVAR	STVAR	$\phi$	$\delta$	$\lambda$	$\phi$	$\delta$	$\lambda$
8	MONGAN-MTA	1.0-2.1	0.41	5±5	0.01	230	53	57	97	47	126
	KRDAE-MTA	0.08-0.11	0.41	5±4	0.02	236	77	103	11	18	47
	KRDAE-P Varış	-	-	-	-	239	55	114	21	42	60
61	MONGAN-MTA	1.1-2.5	0.80	5±6	0.02	305	75	-31	44	60	-163
	KRDAE-MTA	0.10-0.14	0.41	2±2	0.03	310	68	-26	50	66	-156
	KRDAE-P Varış	-	-	-	-	302	37	-41	67	67	-120
4	MONGAN-MTA	1.2-2.0	0.65	3±4	0.01	293	48	-48	60	56	-126
	KRDAE-MTA	0.09-0.12	0.45	8±8	0.02	267	26	-72	67	65	-99
	KRDAE-P Varış	-	-	-	-	264	53	-80	67	38	-103
25	MONGAN-MTA	1.4-2.4	0.52	28±29	0.02	322	85	-25	54	65	-175
	KRDAE-MTA	0.10-0.13	0.40	12±14	0.02	330	78	-13	63	77	-168
	KRDAE-P Varış	-	-	-	-	333	65	-45	86	50	-147
16	MONGAN-MTA	2.4-3.9	0.65	2±3	0.01	300	57	-50	63	50	-134
	KRDAE-MTA	0.10-0.12	0.51	14±23	0.02	309	57	-35	60	61	-141
	KRDAE-P Varış	-	-	-	-	307	33	-19	53	80	-122
56	MONGAN-MTA	1.5-3.9	0.50	1±1	0.01	288	54	-38	42	60	-138
	KRDAE-MTA	0.10-0.13	0.40	16±16	0.03	267	61	-75	57	32	-116
	KRDAE-P Varış	-	-	-	-	290	33	-30	46	74	-119
2	MONGAN-MTA	1.0-3.2	0.54	6±12	0.02	319	62	-23	61	70	-150
	KRDAE-MTA	0.05-0.07	0.52	12±10	0.01	334	25	-22	84	81	-114
	KRDAE-P Varış	-	-	-	-	337	35	-16	80	81	-124
31	MONGAN-MTA	1.8-3.5	0.42	1±1	0.01	350	26	-22	101	80	-114
	KRDAE-MTA	0.10-0.14	0.42	2±3	0.01	304	65	-10	39	81	-155
	KRDAE-P Varış	-	-	-	-	333	32	-35	94	72	-118
41	MONGAN-MTA	1.0-2.4	0.77	4±3	0.01	268	38	-93	92	52	-87
	KRDAE-MTA	0.08-0.11	0.56	2±3	0.01	272	37	-76	75	54	-100
	KRDAE-P Varış	-	-	-	-	262	69	-68	34	30	-134
24	MONGAN-MTA	1.0-1.7	0.48	7±5	0.01	129	88	32	38	58	178
	KRDAE-MTA	0.08-0.12	0.41	16±11	0.03	147	67	43	37	51	150
	KRDAE-P Varış	-	-	-	-	143	87	15	52	75	177

MONGAN ağı kayıtlarını kullanarak yapılan moment tensör analizlerinden elde edilen odak mekanizmaları bölgesel gerilme eksenlerinin, yönlerinin ve gerilme oranının belirlenmesinde kullanılmıştır. STRESSINVERSE programı ile elde edilen sonuçlar 3 ana gerilme eksenini gösterilmiştir. Şekil 14a'da basınç (P) ve gerilme (T) eksenlerinin dağılımı, Şekil 14b'de ana gerilme eksenlerinin yönelimi ve Şekil 14c'de ise gerilme oranının histogramı görülmektedir. Gerilme ters çözüm analizinden elde edilen sonuçlara göre  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  asal gerilme eksenlerinin konumları sırasıyla  $277.2^\circ/42.8^\circ$ ,  $87.7^\circ/46.7^\circ$  ve  $182.9^\circ/4.7^\circ$  (azimut/dalım) olarak bulunmuştur. En küçük gerilme eksenini  $\sigma_3$ 'ün doğrultusu hemen hemen K-G'dir. Bölgede yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak asal gerilme eksenlerinin yönü yaklaşık doğu-batı doğrultusunda elde edilmiştir. Bu önemli farklılık, analizlerde nispeten daha küçük hatta mikro depremlerin kullanılmasından kaynaklanabilir. Bölgesel kabuk modeline çok daha duyarlı olan bu depremlerin yüksek frekanslardaki moment tensör ters çözümleri kırılma sürecine dair daha hassas bilgiler içermektedir (Zahradnik ve Sokos 2018). Bu durum, mikro depremlerin bölgesel gerilme ters çözüm analizlerindeki önemini de ortaya koymaktadır.

Stres oranını ifade eden R değeri 0.60'tır. Bu değer bölgedeki baskın tektonik rejimin sıkışma olduğunu ifade etmektedir. Korkusuz (2012), Ganos deniz depremleriyle yaptığı çalışmada  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  R değerlerini sırasıyla  $315^\circ-35^\circ$ ,  $141^\circ-50^\circ$ ,  $221^\circ-7^\circ$  olarak hesaplamıştır. Bölge için seçilen gerilme oranını 0.66 bulmuştur. Coskun (2021) de R değerini benzer şekilde 0.60 olarak hesaplamıştır.



Şekil 14: Stres tensörü ters çözüm sonuçları; a) P(kırmızı daireler) ve T (mavi artılar) eksenleri, b) Ana gerilme eksenlerinin yönleri, c) Gerilme oranı (R)

## 6. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Ganos Fayı üzerinde kurulan, azimutal dağılımı iyi olmayan, yoğun bir sismik ağ ile kaydedilen yakın ve yüksek frekanslı sismogramların moment tensör analizleri yapılmıştır. İstasyon dizilimlerinin bu depremlerin moment tensör analizleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Farklı veri seti ve farklı yöntemler kullanılarak elde edilen odak mekanizmaları karşılaştırılmış, çözümlerde ve kaynak parametrelerinde bir değişiklik olup olmadığı denetlenmiştir. Analizlerde, Ganos Fayı'nın doğu ucunda Tekirdağ Baseni ile Marmara Adası arasında kalan bölgede meydana gelen mikro depremlere ait kayıtlar kullanılmıştır.

Mikro depremlerin büyük depremlere kıyasla kabuk modeline daha duyarlı olmasından dolayı analizlere başlamadan önce kullanılacak kabuk modeli belirlenmiştir. Bunun için MONGAN-1 sismik ağı tarafından kaydedilen depremlerin en az 3 istasyona ait sismogramları kullanılarak beş farklı kabuk modeli ile ayrı ayrı moment tensör çözümleri yapılmıştır. Ters çözüm için, sinyal gürültü oranlarının ve depremlerin enerjilerinin yüksek olduğu frekans aralıkları seçilmiştir. Tüm kabuk modelleri için aynı frekans aralığı kullanılmıştır. Depremin beş farklı kabuk modeli ile yapılan moment tensör analizi çözüm parametreleri (Tablo 1) (VR, CN, FMVAR, STVAR) incelendiğinde tüm kabuk modellerinin CN parametresi hariç, güvenilir sonuç için gerekli olan  $VR > 0.40$ ,  $FMVAR < 30$ ,  $STVAR > 0.30$  koşullarını sağladığı görülmektedir. Aynı zamanda tüm kabuk modelleri için yüksek DC değerleri elde edilmiştir. Analizlerde kullanılmak üzere  $CN < 10$  koşulunu da sağlayan Yamamoto ve diğ. (2015) kabuk modeli seçilmiştir.

Bu kabuk modeli ile yapılan 61 adet depremin moment tensör analizinden elde edilen parametreler incelendiğinde kararlı, güvenilir ve doğru çözümler için gerekli olan  $VR > 0.40$ ,  $CN < 10$ ,  $FMVAR < 30$ ,  $STVAR > 0.30$  koşullarını sağladığı görülmüştür.

MONGAN-1 ve MONGAN-2 sismik ağları kısa periyot kayıtları ile moment tensör analizi yapılan 61 adet depremin, büyüklüğü  $2.8 M_w \leq 3.7$  arasında değişen 10 tanesinin odak mekanizması çözümleri farklı yöntem ve farklı veri setleri kullanarak elde edilen odak mekanizması çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen odak mekanizmalarının doğrultu, eğim ve atım açılarında küçük farklar olsa da genellikle her deprem için elde edilen üç odak mekanizmasının da birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Depremlerin odak mekanizmaları incelendiğinde KB-GD sıkışma gerilmesiyle ters bileşenli oblik ve doğrultu atım mekanizmasına sahip depremlerin olduğu görülür. Elde edilen KD-GB doğrultulu ters faylanma bileşenine sahip oblik faylanma özelliği gösteren odak mekanizmaları, Pinar ve diğ. (2003)'in bölgede yaptıkları çalışmada elde ettikleri ters bileşene sahip oblik faylanma özelliği gösteren odak mekanizmaları ile tutarlıdır. Episantr dağılımlarına göre veri setinin güneybatısında yer alan depremlerin K-G açılma etkisindeki normal faylanma mekanizmasına sahip olduğu görülür. KD-GB doğrultulu ters faylanma özelliğine sahip odak mekanizmaları ise Coskun (2021)'in aynı bölgede yaptığı odak mekanizması sonuçlarıyla tutarlıdır. Coskun (2021), Ganos Fayı ve Tekirdağ Baseni arasında meydana gelen depremlerin sağ yönlü doğrultu atım ve normal faylanma mekanizması ile KB doğrultulu sıkışma gerilmesi ile ters faylanma mekanizmasına sahip olduğunu tespit etmiştir.

Moment tensör çözümlerinden elde edilen odak mekanizmaları ile gerilme ters çözüm analizi yapılmıştır.  $\sigma_1$  asal gerilme ekseninin konumu  $277.2/42.8$  (azimut/dalım),  $\sigma_2$  ekseninin konumu  $87.7/46.7$  (azimut/dalım) ve  $\sigma_3$  asal gerilme ekseninin konumu ise  $182.9/4.7$  (azimut/dalım) olarak bulunmuştur. Bölgede yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak asal gerilme eksenlerinin yönü yaklaşık doğu-batı doğrultusunda elde edilmiştir. Analizlerde, bölgesel çalışmalarda kullanılan depremlerden nispeten daha küçük hatta mikro depremlerin kullanılması ve yüksek frekanslarda moment tensör ters çözümü yapılması gerilme eksenlerinin yönlerindeki farklılığın nedeni olabilir. Bu durum, mikro depremlerin bölgesel gerilme ters çözüm analizlerindeki önemini de ortaya koymaktadır. 0.60 gerilme oranı bölgenin sıkışma rejiminin etkisi altında olduğunu göstermektedir. Bölgede, Korkusuz (2012) ve Coskun (2021) tarafından yapılan çalışmalarda da benzer şekilde gerilme oranları sırasıyla 0.66 ve 0.60 olarak hesaplanmıştır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, TÜBİTAK tarafından desteklenen 118R019 numaralı "Ganos Fayı Üzerindeki 1912 Depremi Kırığının Güncel Etkinliğinin Görüntülenmesi" başlıklı proje kapsamında kurulan MONGAN sismik ağları tarafından kaydedilen deprem verileri kullanılmıştır. Yazarlar, verileri paylaştıkları için projede görev alan; Marco Bohnhoff, Hakan Alp, Stephan Bentz, Ali Pinar,



Fatih Alver, Ömer Kılıçarslan ve Burçak Görgün'e teşekkür ederler. Şekillerdeki haritalar GMT programı (Wessel ve diğ. 2013) kullanılarak hazırlanmıştır.

## KAYNAKLAR

Abd el-aal A.K., Al-Enezi A., Saadalla H., Al-Jeri F., 2021. Tectonic and Anthropogenic Characteristics of the November 15, 2019 Micro Earthquakes Sequence, Kuwait, *Geotectonics* 55(1), 112-127.

Aksoy M.E., Meghraoui M., Vallee M., Cakir Z., 2010. Rupture characteristics of the A.D. 1912 Mürefte (Ganos) earthquake segment of the North Anatolian fault (western Turkey), *Geology* 38(11), 991-994.

Akyol N., Zhu L.P., Mitchell B.J., Sozibilir H., Kekovali K., 2006. Crustal structure and local seismicity in Western Anatolia, *Geophysical Journal International* 166,(3), 1259-1269.

Altunel E., Meghraoui, M., Akyuz H.S., Dikbas A., 2004. Characteristics of the 1912 co-seismic rupture along the North Anatolian Fault Zone (Turkey): implications for the expected Marmara earthquake, *Terra Nova* (16), 198-204.

Ambraseys N.N., Jackson J.A., 1998, Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region, *Geophysical Journal International* 133(2), 390-406.

Ambraseys N.N., Jackson J.A., 2000. Seismicity of the Sea of Marmara (Turkey) since 1500, Erişim adresi: <https://academic.oup.com/gji/article/141/3/F1/613019>

Ardeleanu L., Radulian M., Sileny J., Panza G.F., 2005. Source parameters of weak crustal earthquakes of the Vrancea region from short-period waveform inversion, *Pure and Applied Geophysics* 162(3), 495-513.

Armijo R., Meyer B., Hubert A., Barka A., 1999. Westward propagation of the North Anatolian fault into the northern Aegean: Timing and kinematic, *Geology* 27(3), 267-270.

Armijo R., Pondard N., Meyer B., Uçarkus G., Lepinay B.M., Malavieille J., Dominguez S., Gustcher M., Schmidt S., Beck C., Çagatay N., Cakir Z., Imren C., Eris K., Natalin B., Özalaybey S., Tolun L., Lefevre I., Seeber L., Gasperini L., Rangin C., Emre O. and Sarikavak K., 2005. Submarine fault scarps in the Sea of Marmara pull-apart (North Anatolian Fault): Implications for seismic hazard in İstanbul, *Geochemistry Geophysics Geosystems* 6 Q06009, doi:10.1029/2004GC000896.

Barros L.V., Carvalho J., Ferreira V.M., Albuquerque D.F., Von Huelsen M.G., Caixeta D.F., Fontenele D.P., 2014. Determination of source seismic parameters of micro-earthquakes with epicenter in the south of Minas Gerais State-Brazil, *Sociedade Brasileira de Geofísica Este* 1-3.

Başarır N., 2011. Reassessment of the Seismic Parameters from Historical Seismograms of 1912- Mürefte-Sarkoy, 1935-Erdek-Marmara Island and 1963-Cinarcik Earthquakes, Master Thesis, Boğaziçi University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Graduate Program in Geophysics, İstanbul, 226 p.

Bayrakci G., Laigle M., Becel A., Hirn A., Taymaz T., Yolsal-Cevikbilen S., SEISMARMARA team, 2013. 3-D sediment-basement tomography of the Northern Marmara trough by a dense OBS network at the nodes of a grid of controlled source profiles along the North Anatolian fault, *Geophysical Journal International* 194, 1335-1357.

Benetatos C., Malek J., Verga F., 2013. Moment tensor inversion for two micro-earthquakes occurring inside the Haje gas storage facilities, Czech Republic, *Journal of Seismology* 17(2), 557-577.

Bouchon M., 1981. A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, *Bulletin of the Seismological Society of America* 71(4), 959-971.

Carvalho J., Barros L.V., Zahradnik J., 2016. Focal mechanisms and moment magnitudes of micro-earthquakes in central Brazil by waveform inversion with quality assessment and inference of the local stress field, *Journal of South American Earth Sciences* 71, 333-343.

Chan A., Zoback M., 2007. The Role of Hydrocarbon Production on Land Subsidence and Fault Reactivation in the Louisiana Coastal Zone, *Journal of Coastal Research* 23, 771-786.

Christova C., Tsapanos T., 2000. Depth distribution of stresses in the Hokkaido Wadati-Benioff zone as deduced by inversion of earthquake focal mechanisms, *Journal of Geodynamics* 30(5), 557-573.

Coskun Z., 2021. Deformation Styles and Rates Along the North Anatolian Fault Zone in the Sea of Marmara Based on Onshore-Offshore Seismic, Geodetic and Geologic Data, PhD Thesis, Boğaziçi University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Graduate Program in Earthquake Engineering, İstanbul, 162 p.

Delvaux D., Barth A., 2010. African stress pattern from formal inversion of focal mechanism data, *Tectonophysics* 482 (1-4), 105-128.

Emre O., Duman T.Y., Ozalp S., Elmaci H., Olgun S., Saroglu F., 2013. 1/1.250.000 scaled Turkey active fault map, *General Directorate of Mineral Research and Exploration Special Publication*. Erişim adresi: <http://www.mta.gov.tr>

Emre O., Duman T.Y., Ozalp S., Saroglu F., Olgun S., Elmaci H., Çan T., 2018. Active fault database of Turkey, *Bulletin of Earthquake Engineering* 16 (8), 3229-3275.

Gurbuz C., Aktar M., Eyidogan H., Cisternas A., Haessler H., Barka A., Ergin M., Turkelli N., Polat O., Ucer B., Kuleli S., Baris S., Kaypak B., Bekler T., Zor E., Bicmen F., Yoruk A., 2000. The seismotectonics of the Marmara Region (Turkey): Results from a microseismic experiment, *Tectonophysics* 316, 1-17.

Fojtikova L., Vavrycuk V., Cipciar A., Madaras J., 2010. Focal mechanisms of micro-earthquakes in the Dobrá Voda seismoactive area in the Malé Karpaty Mts. (Little Carpathians), Slovakia, *Tectonophysics* 492(1-4), 213-229.

Fojtikova L., Zahradnik J., 2014. A New Strategy for Weak Events in Sparse Networks: The First-Motion Polarity Solutions Constrained by Single-Station Waveform Inversion, *Seismological Research Letters* 85(6), 1265-1274.

Guilhem A., Hutchings L., Dreger D.S., Johnson L.R., 2014. Moment tensor inversions of  $M \sim 3$  earthquakes in the Geysers geothermal fields, California, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 119(3), 2121-2137.

Irmak T. S., Doğan B., Yavuz E., Livaoglu H., Sertçelik F., 2020. 22.01.2020 Akhisar-Manisa Depremi (Mw 5.5) ve Artçıların Sismotektonik Analizi, *Türk Deprem Araştırma Dergisi* 2, 27-46.

Janssen C., Bohnhoff M., Vapnik Y., Gorgun E., Bulut F., Plessen B., Dresen G., 2009. Tectonic evolution of the Ganos segment of the North Anatolian Fault (NW Turkey), *Journal of Structural Geology* 31(1), 11-28.

Kalafat D., Gurbuz C., Ucer S.B., 1987. Batı Türkiye'de Kabuk ve Üst Manto Yapısının Araştırılması, *Deprem Araştırma Bülteni* (59), 43-64.

Kalafat D., 1995. Anadolu'nun Tektonik Yapılarının Deprem Mekanizmaları Açısından İrdelenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü, Deniz Jeolojisi ve Jeofiziği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 412 s.

Karabulut H., Roumelioti Z., Benetatos C., Mutlu A. K., Ozalaybey S., Aktar M., Kiratzi A., 2006. A source study of the 6 July 2003 (Mw 5.7) earthquake sequence in the Gulf of Saros (Northern Aegean Sea): Seismological evidence for the western continuation of the Ganos fault, *Tectonophysics* 412(3-4), 195-216.

Karabulut H., Schmittbuhl J., Ozalaybey S., Lengliné O., Komec-Mutlu A., Durand V., Bouchon M., Daniel G., Bouin M.P., 2011. Evolution of the seismicity in the eastern Marmara Sea a decade before and after the 17 August 1999 Izmit earthquake, *Tectonophysics* 510, 17-27.

Ketin İ., 1948. Ü ber die tektonisch-mechanischen Folgerungen aus den grossen anatolischen Erdbeben des letzten Dezenniums, *Geol. Rund.* 36:77-83.

Kilic T., Utkucu M., 2012. Türkiye'deki  $M \geq 4.0$  Depremler için 2007 ve 2008 Yıllarını Kapsayan Sismik Moment Tensör Katalogu, *Yerbilimleri* 33(3), 219-238.

Kilic T., 2009. Sismik Moment Tensör Analizi İle 2007-2008 Yıllarındaki  $M \geq 4,0$  Türkiye Depremlerinin Kaynak Parametrelerinin Bulunması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 80 s.

Kikuchi M., Kanamori H., 1991. Inversion of complex body waves-III, *Bulletin of the Seismological Society of America* 81(6), 2335-2350.

Korkusuz Y., 2012. The Present-Day Stress States in The Marmara Region, Master Thesis, Boğaziçi University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Graduate Program in Geophysics, İstanbul, 245 p.

Kumar R., Gupta S.C., Kumar A., 2015a. Determination and identification of focal mechanism solutions for Himalayan earthquakes from waveform inversion employing ISOLA software, *Natural Hazards* 76(2), 1163-1181.

Kumar R., Gupta S.C., Kumar A., 2015b. Effect of azimuthal coverage of an earthquake on moment tensor solutions estimated by waveform inversion, *Arabian Journal of Geosciences* 8(8), 5713-5726.

Langston C.A., Barker J.S., Pavlin G.B., 1982. Point-source inversion techniques, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 30(2-3), 228-241.

Li J., Kuleli H., Zhang H., Toksoz M., 2011. Focal Mechanism Determination of Induced Microearthquakes in an Oil Field Using Full Waveforms from Shallow and Deep Seismic Networks, *Geophysics* 76, 87.

Michael A.J., 1984. Determination of stress from slip data: Faults and folds, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 89(B13), 11517-11526.

- Michael A.J., 1987. Use of focal mechanisms to determine stress: A control study, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 92(B1), 357-368.
- Miyazawa M., Venkataraman A., Snieder R., Payne M.A., 2008. Analysis of microearthquake data at Cold Lake and its applications to reservoir monitoring, *Geophysics* 73(3), 15-21.
- Mutlu A.K., 2020. Seismicity, focal mechanism, and stress tensor analysis of the Simav region, western Turkey, *Open Geoscience* 12(1), 479-490.
- Okay A., Demirbag E., Kur H., Okay N., Kucsu İ., 1999. An active, deep marine strike-slip basin along the North Anatolian fault in Turkey, *Tectonics* 18(1), 129-147.
- Okay A.I., Tuysuz O., Kaya S., 2004. From transpression to transtension: changes in morphology and structure around a bend on the North Anatolian Fault in the Marmara region, *Tectonophysics* 391(1-4), 259-282.
- Orgulu G., 2011. Seismicity and source parameters for small-scale earthquakes along the splays of the North Anatolian Fault (NAF) in the Marmara Sea, *Geophysical Journal International* 184, 385-404.
- Ozalaybey S., Ergin M., Aktar M., Tapirdamaz C., Bigmen F., and Yoruk A., 2002, The 1999 Izmit Earthquake Sequence in Turkey: Seismological and Tectonic Aspects, *Bull. Seism. Soc. Am.* 92, 316-386.
- Pavoni N., 1961. Die Nordanatolische Horizontalverschiebung, *Geol. Rund.* 51,122-39.
- Pinar A., Kuge K., Honkura Y., 2003. Moment tensor inversion of recent small to moderate sized earthquakes: implications for seismic hazard and active tectonics beneath the Sea of Marmara, *Geophysical Journal International* 153, 133-145.
- Robertson E., 2008. Seismic Moment Tensor Solutions from GeoNet Data to Provide a Moment Magnitude Scale for New Zealand, Master Thesis, Victoria University of Wellington, School of Geography, Environment and Earth Sciences, Wellington, 186 p.
- Sarkar S., 2008. Reservoir Monitoring Using Induced Seismicity at a Petroleum Field in Oman, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, 261 p.
- Seeber L., Emre O., Cormier M.H., Sorlien C.C., McHugh C.M.G., Polonia, A., Cagatay N., 2004. Uplift and subsidence from oblique slip: The Ganos-Marmara bend of the North Anatolian Transform, Western Turkey, *Tectonophysics* 391(1-4 SPEC.ISS.), 239-258.
- Stein S., Wysession M., 2003. Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure, Blackwell Publishing, *Geological Magazine* 140(6), 733-734.
- Sileny J., 2009. Resolution of non-double-couple mechanisms; simulation of hypocenter mislocation and velocity structure mismodeling, *Bulletin of the Seismological Society of America* 99, 2265-2272.
- Sokos E., Zahradnik J., 2008. ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data, *Computers & Geosciences* 34(8), 967-977.
- Sokos E., Zahradnik J., 2013. Evaluating centroid-moment-tensor uncertainty in the new version of ISOLA software, *Seismological Research Letters* 84(4), 656-665.

Stanek F., Eisner L., Vesnaver A., 2017. Theoretical assessment of the full-moment-tensor resolvability for receiver arrays used in microseismic monitoring, *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 14(2), 235-240.

Tuysuz O., Barka A., Yigitbas E. 1998. Geology of the Saros Graben: its implications on the evolution of the North Anatolian Fault in the Ganos-Saros region, NW Turkey, *Tectonophysics* 293, 105-126.

Udias A., Buforn E., 1996. Source mechanism of earthquakes from seismic waves. Third workshop on 3D modelling of seismic wave generation, propagation and their inversion, Trieste Italy.

Vavrycuk V., 2014. Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms, *Geophysical Journal International* 199(1), 69-77.

Villegas A.R.J., Zahradnik J., Nacif S., Spagnotto S., Winocur D., Leiva M.F., 2016. Waveform inversion and focal mechanisms of two weak earthquakes in Cordillera Principal (Argentina) between 35° and 35.5° S, *Journal of South American Earth Sciences* 71, 359-369.

Wessel P., Smith W.H.F., Scharroo R., Luis J.F., Wobbe F., 2013. Generic Mapping Tools: Improved version released, *EOS Transactions American Geophysical Union* 94, 409-410.

Yaltirak C., 1996. Ganos Fay Sistemi'nin tektonik tarihi, *Türk. Petrol Jeol. Dern. Bül.* 8,137-56.

Yaltirak C., Alpar, B., Yüce, H., 1998. Tectonic elements controlling the evolution of the Gulf of Saros (Northeastern Aegean Sea) *Tectonophysics* 300(1-4), 227-248.

Yamamoto Y., Takahashi N., Cıtaık S., Kalafat D., Pinar A., Gurbuz C., Kaneda Y., 2015. Offshore seismicity in the western Marmara Sea, Turkey, revealed by ocean bottom observation, *Earth Planets Space* 67, 147.

Yilmazer M., 2003. Deprem Kaynak Parametrelerinin Online Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 57 s.

Yu C., Vavrycuk V., Adamova P., Bohnhoff M., 2018. Moment Tensors of Induced Microearthquakes in The Geysers Geothermal Reservoir from Broadband Seismic Recordings: Implications for Faulting Regime, Stress Tensor, and Fluid Pressure, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 123(10), 8748-8766.

Zahradnik J., Sokos E., 2018. ISOLA Code for Multiple-Point Source Modeling-Review (In: Moment Tensor Solutions-A Useful Tool for Seismotectonics, Editor: Sebastiano D'Amico, Springer, 763 p.), 1-28

URL-1; KRDAE-BDTİM, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem ve Tsunami İnceleme Merkezi,  
Erişim adresi: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprem-verileri/sayisal-veriler>

URL-2; AFAD, T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı, Erişim adresi: <http://tdvm.afad.gov.tr>

## ARAŞTIRMA VERİSİ

Çalışma kapsamında kullanılan deprem verileri, TÜBİTAK tarafından desteklenen 118R019 numaralı “Ganos Fayı Üzerindeki 1912 Depremi Kırığının Güncel Etkinliğinin Görüntülenmesi” başlıklı proje kapsamında kurulan MONGAN sismik ağları ve Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem ve Tsunami İnceleme Merkezi (KRDAE-BDTİM) ulusal sismik ağlarından elde edilmiştir. Depremlere ait katalog bilgileri, T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) ve KRDAE-BDTİM’e ait ulusal deprem kataloglarından elde edilmiştir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ

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

## YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI

Katkı Türü	Yazarlar
Çalışmanın tasarlanması	B.D.T., E.Y., E.G.
Literatür araştırma	B.D.T.
Saha çalışması, veri temini/derleme	E.Y., E.G.
Verilerin işlenmesi/analiz edilmesi	B.D.T.
Şekil/Tablo/Yazılım hazırlanması	B.D.T.
Bulguların yorumlanması	B.D.T.
Makale yazımı, düzenleme, kontrol	B.D.T., E.Y.



## A New Method for the Evaluation of Interevent Time Distribution of Earthquakes, Case of Turkey

Hakan Karaca<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Nigde Omer Halisdemir University, Faculty of Architecture, Department of Architecture, Nigde, Turkey  
ORCID: 0000-0003-3291-5822

### Keywords

Interevent Time Distribution (IET), MC algorithm, Synthetic catalogue

### Highlights

- \* Synthetic Catalogs can be Generated by Using Interevent Time Distribution of Earthquakes
- \* A New Evaluation Procedure is Required to Identify the Best Fitting Interevent Time Distribution Model which is to be Used in Generation of Synthetic Catalog
- \* Considering the Interevent Time Distribution of Earthquakes, the Validity of Poisson Distribution Assumption can be Questioned

### Acknowledgements

Data is provided by KOERI

### Aim

The purpose of the study is to identify best IET model by the evaluation of generated catalogues.

### Location

Entire Turkey

### Methods

Identification of best fitting IET model could be performed by putting these models at work; generating synthetic catalogues

### Results

Log-normal distribution was identified as the best fitting model, Poisson distribution assumption might not hold true at all, generation of synthetic catalogues without considering IET is futile

### Supporting Institutions

--

### Manuscript

Research Article

Received: 16.09.2021

Revised: 01.12.2021

Accepted: 06.12.2021

Printed: 31.12.2021

### DOI

10.46464/tdad.996642

### Corresponding Author

Hakan Karaca

Email: hakan.karaca@ohu.edu.tr

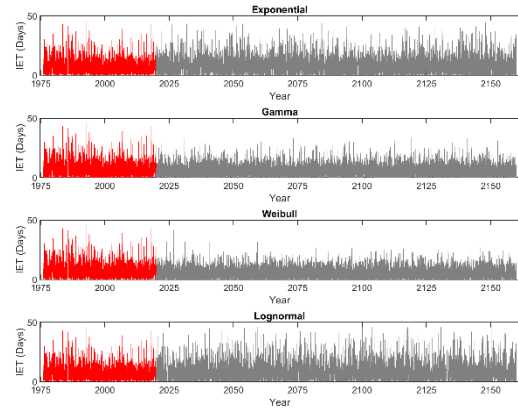


Figure  
IET Distribution of the Original and the Generated Catalogues

### How to cite

Karaca H., 2021. A New Method for the Evaluation of Interevent Time Distribution of Earthquakes, Case of Turkey, Turk. J. Earthq. Res. 3 (2), 193-207, <https://doi.org/10.46464/tdad.996642>



## Depremler Arası Sürelerin Dağılım Modelleriyle Değerlendirilmesinde Yeni Bir Yöntem, Türkiye Örneği

Hakan Karaca<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Niğde, Türkiye  
ORCID: 0000-0003-3291-5822

### ÖZET

Depremler arası sürelerin (DAS) dağılımlarını modellemek amacıyla birçok dağılım modeli kullanılmıştır. Kullanılan dağılım modellerinin başarı ölçütü olarak da, verilerin modellerle olan uyumu göz önüne alınmış ancak bu dağılım modellerinin uygulamadaki başarısı denenmemiştir. Ayrıca, hangi dağılım modelinin daha başarılı olduğu konusunda ise kesinlik derecesinde sonuç elde edilememiştir. Bu bağlamda, çalışmanın amacı Türkiye depremlerinin zaman alanında simülasyonunu gerçekleştirerek hangi modelin daha uyumlu veri ürettiğini test etmektir. Çalışma kapsamında, geçmiş depremlerin zamansal dağılımları kullanılarak DAS verileri elde edilmiş, Monte-Karlo (MK) yöntemi ile de yapay depremler üretilmiştir. Üretilen depremlerin zamansal dağılımları gözlemlenmiş, yıllık deprem sayılarının ortalama ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır. Sonuç olarak, hem verilerin modellenmesi açısından hem de üretilen verilerin benzerliği göz önüne alındığında, log-normal dağılım modelinin en başarılı model olduğu görülmüştür.

### Anahtar kelimeler

Depremler Arası Sürelerin dağılımı, Monte-Carlo algoritması, Sentetik katalog

### Öne Çıkanlar

- \*Depremler Arası Sürelerin Dağılımı Kullanılarak Daha Güvenilir Sentetik Katalog Üretilbilir
- \*Sentetik Katalog Üretimine Yönelik Yeni Bir Depremler Arası Süre Dağılım Modelleri Değerlendirme Yöntemi Gereklidir
- \*Depremler Arası Süreleri Değerlendirildiğinde Poisson Dağılımının Geçerliliği Sorgulanabilir

### Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 16.09.2021  
Düzeltilme: 01.12.2021  
Kabul: 06.12.2021  
Basım: 31.12.2021

### DOI

10.46464/tdad.996642

### Sorumlu yazar

Hakan Karaca  
Eposta:  
hakan.karaca@ohu.edu.tr

## A New Method for the Evaluation of Interevent Time Distribution of Earthquakes, Case of Turkey

Hakan Karaca<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Niğde Omer Halisdemir University, Faculty of Architecture, Department of Architecture, Niğde, Turkey  
ORCID: 0000-0003-3291-5822

### ABSTRACT

Several distribution models are used in order to model the distribution of the inter-event times of earthquakes. The performances of these models are mostly tested through goodness-of-fit tests but not through putting the models into application. Moreover, there is not a definitive conclusion about which model can be the best fitting one. Within this context, the objective of study is to test a number of distribution models in simulating the distribution of Turkish earthquakes in temporal domain. The earthquake time series are subjected to analysis for its IET distribution and future earthquakes are simulated by using Monte-Carlo techniques. The variation of number of earthquakes per unit time and the standard deviations are monitored for each IET model. Finally, log-normal distribution is identified as the most successful distribution model in modelling and simulating the earthquake time series.

### Keywords

Interevent Time Distribution, Monte-Carlo algorithm, Synthetic catalog

### Highlights

- \* Synthetic Catalogs can be Generated by Using Interevent Time Distribution of Earthquakes
- \* A New Evaluation Procedure is Required to Identify the Best Fitting Interevent Time Distribution Model which is to be Used in Generation of Synthetic Catalog
- \* Considering the Interevent Time Distribution of Earthquakes, the Validity of Poisson Distribution Assumption can be Questioned

### Manuscript

Research Article

Received: 16.09.2021  
Revised: 01.12.2021  
Accepted: 06.12.2021  
Printed: 31.12.2021

### DOI

10.46464/tdad.996642

### Corresponding Author

Hakan Karaca  
Email:  
hakan.karaca@ohu.edu.tr



## 1. GİRİŞ

Depremler arası süre (DAS) dağılımının doğru hesaplanması, depremlerin zaman boyutundaki dağılımının belirlenmesi ve geleceğe yönelik tahmin çalışmaları açısından önemlidir. Bu nedenle hâlihazırda uygulanan birçok dağılım modeli DAS dağılımlarının modellenmesinde denenmiş ancak hiçbir modelin bütün veriler için öne çıkamaması nedeniyle uygulama açısından kesin sonuca ulaşılamamıştır. Ayrıca, Poisson dağılımının deprem tehlike haritası, benzer veri üretimi ve tahmin içerikli uygulamalarında pratikliği ile ön plana çıkması da, başka dağılım modellerinin geliştirilmesini ve uygulanmasını da kısıtlamıştır.

Bu konuda gerçekleştirilen çalışmalarda farklı dağılım modelleri denenerek depremlerin zaman tanım alanında ne tür bir dağılım gösterdiği ile ilgili araştırmalar yapılmıştır. Depremlerin oluşum zamanlarının Poisson dağılımına göre olması demek, depremler arası sürelerin de üssel bir dağılım göstermesini gerektirdiğinden (Cornell 1968, Gardner ve Knopoff 1974) üssel dağılım DAS çalışmalarının hemen tamamında kaynak model olarak kullanılmıştır. Hemen hemen bütün ülkelerin farklı verileri kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmalarda üssel dağılımın yanı sıra Weibull, gama ve log-normal dağılım modelleri de kullanılmıştır (Utsu 1984, Anagnos ve Kiremidjian 1988, Parvez ve Ram 1997, Musson 2002, Hasumi vd. 2010, Yazdani ve Kowsari 2011, Chen vd. 2013, Pasari ve Dikshit 2015, Stallone ve Marzocchi 2019, Bountzis vd. 2018, Pasari 2018, Coban ve Sayil 2019).

Her bir dağılımın bir değerine olan üstün yönleri nedeniyle çalışmaların bir kısmında yukarıda sayılan modellerinden bir tanesi başarılı olurken, diğer çalışmalarda ise bir başkası ön plana çıkmıştır (Saichev ve Sornette 2007, Touati vd. 2009, Naylor vd. 2010). Günümüze kadar gerçekleştirilen çalışmalarda herhangi bir modelin başarılı olarak öne çıkamaması aslında sismik tehlike çalışmaları açısından çok önemli bir sonuca da ulaşılmasında yararlı olmuştur. Depremlerin evrensel bir DAS dağılımının olmadığı, özellikle Touati vd. (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da belirtildiği üzere farklı coğrafi bölgelerde farklı dağılım modellerinin öne çıktığı bir gerçek olarak karşımıza çıkmıştır.

Örnek vererek açıklamak gerekirse, log-normal dağılımın yüksek ve uzun kuyruğu depremlerin büyük zaman aralıklarının modellenmesinde (Nishenko ve Buland 1987, Davies vd. 1989, Sornette ve Knopoff 1997), ayrıca zıt eğiklik gerektiren küçük DAS değerlerinin de modellenmesinde daha başarılı olduğu gösterilmiştir. Ancak küçük DAS değerlerinin modellenmesinde yüksek eğrilik çapı gerektiren durumlarda da gama dağılımının tartışmasız daha başarılı olduğu ve böylelikle öncü ve artçı depremler elenmeden derlenmiş katalogların kullanıldığı çalışmalarda dağılım modelleri içerisinde gama dağılımının tartışmasız öne çıktığı da kaydedilmiştir (Bak vd. 2002, Corral 2003). Ayrıca üssel dağılımın tek eğrilik çapına sahip olmasının verilerin modellenmesinde bir eksiklik olduğu da anlaşılabilir bir durum olup, böyle durumlarda çift eğrilik yetisine sahip gama, Weibull ve log-normal modellerinin daha başarılı olduğu da görülmüştür. Bu çalışmaların aksine, üssel dağılımın diğer dağılım modellerine göre daha başarılı olduğu çalışmalar da mevcuttur. Stallone ve Marzocchi (2019), Pasari ve Dikshit (2015) ve Yazdani ve Kowsari (2011)'in çalışmalarında üssel dağılımın diğer dağılım modellerine göre daha üstün performans sergilediği görülmüştür.

Konu ile ilgili olarak sadece Türkiye'de meydana gelen depremlerin kullanıldığı çalışmaların sayısı göreceli olarak daha az olup (Yılmaz vd. 2011, Coban ve Sayil 2019; 2020a; 2020b) bu çalışmalar sadece DAS dağılımını en uygun modelleyen modellerin denenmesi üzerine olmuştur. Yılmaz vd. (2011) Kuzey Anadolu Fay hattı boyunca gerçekleşen depremlerin DAS değerlerinin Weibull dağılımına uyduğunu sadece Kolmogorov-Smirnov (KS) mesafesi değerlerine dayanarak ifade etmiş, Coban ve Sayil (2019) ise sadece Güneybatı Anadolu bölgesi için gerçekleştirdiği çalışmasında moment büyüklükleri 5.5'ten büyük olan depremleri kullanmış ve log-normal dağılımın DAS değerlerini daha iyi modellediğini belirlemiştir. Ayrıca Coban ve Sayil (2020a) önemli fay hatları olarak öne çıkan Kuzey ve Doğu Anadolu fay hatları üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada log-normal ve gama dağılımlarının farklı kriterlere göre

öne çıktığını, 24 Ocak 2020 Elazığ depreminin geçmiş depremlere göre olma olasılığı üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada da (Çoban ve Sayıl 2020b) log-normal dağılımın başarılı olduğunu belirlemişlerdir. Yerel deprem verilerinin kullanıldığı farklı çalışmalar da mevcuttur (Polat vd. 2008, Ozturk 2011; 2014, Sayıl, 2013, Bayrak vd. 2015; 2017).

Bu çalışmalardan da anlaşılacağı üzere, depremler arası sürelerin evrensel bir dağılım göstermediği, aksine hem zaman hem de çalışma alanına göre farklı dağılım gösterdiği görülmüştür. Bu durum bu tür çalışmaların daha da artmasını sağlamış, çalışılan bir bölgede başarılı olan dağılım modelleri ile bölgenin sismik davranışları arasında ilişki kurulması gerektiği dikkatlere sunulmuştur.

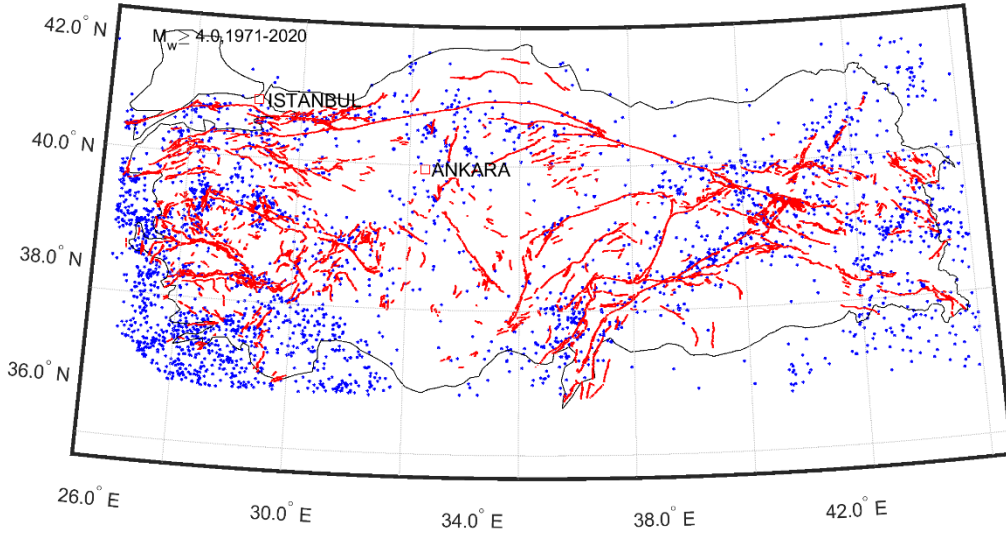
DAS verileri üzerine çalışmalar uzun zamandan beri devam etmekte ancak sadece çıkarımlar ile yetinilen bu çalışmaların çoğunda incelenen dağılım modellerinin uygulanabilirliği ile ilgili kesin sonuçlara ulaşılamamaktadır. Böylesi bir durumda, sismik tehlike çalışmalarında, Poisson dağılımının hala tek seçenek olarak karşımıza çıkması, bahsi geçen bu çalışmaların kesin sonuçlar sunmaktan uzak olması ile açıklanamaz. Aslında en önemli nedenlerden bir tanesi de farklı dağılım modellerinin uygulanmasına yönelik yöntem geliştirilmemesi olarak ileri sürülebilir.

Çalışmada bu bağlamda, Türkiye ve çevresinde meydana gelen depremlerin DAS verileri incelenerek üssel, gama, Weibull ve log-normal dağılımların uyumu araştırılmıştır. Bu noktada şunu da belirtmek gerekir ki sunulan yöntemin vurgulanması açısından çalışmanın daha sade ve öz olması planlanmış ve bu nedenle sınırlı sayıda dağılım modeli kullanılmıştır. Çalışma kapsamında seçilen dağılım modelleri ile üretilen yapay depremler kullanılarak deprem-zaman serileri üretilmiştir. Böylelikle geçmiş deprem verileri kullanarak elde edilen deprem zaman serisi ile yapay depremler kullanılarak elde edilen zaman serilerinin karşılaştırılması hedeflenmiştir.

Ayrıca dağılım modelleri ile veriler arasındaki farklar ya da artık değerler kullanılarak yeni bir performans ölçüğü geliştirilmiş ve dağılım modellerinin verilerle olan uyumu, geliştirilen bu yeni ölçükle değerlendirilmiştir. Kısaca özetlemek gerekirse, depremler arası sürelerin modellenmesinde kullanılan dağılım modellerinin performansının değerlendirilmesinde kullanılmak üzere hem yeni bir ölçük geliştirilmiş, hem de yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Çalışma sonucunda, DAS verilerinin log-normal dağılım modeli ile daha uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

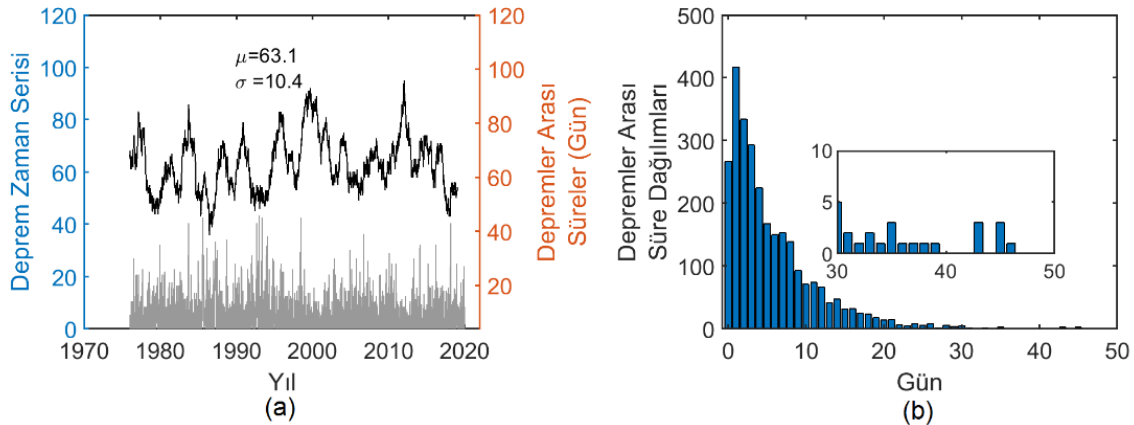
## 2. VERİ

Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi'nin (KRDAE-BDTİM, 2020) anlık derlenen kataloğundan elde edilen deprem verileri, Ulusay vd. (2004), Akkar vd. (2010) tarafından geliştirilen dönüştürme denklemleri kullanılarak büyüklük açısından türdeşleştirilmiştir. Sonrasında, farklı büyüklükler moment büyüklüğüne dönüştürülmüş, Gardner ve Knopoff (1974) denklemleri kullanılarak öncü ve artçı depremler ayıklanmıştır. Ayıklama yönteminin belirlenmesinde Zare vd. (2014) tarafından yapılan değerlendirmeler göz önünde bulundurulmuş ve ayıklama kısıtları daha fazla öne çıkan Gardner ve Knopoff (1974) denklemlerinin uygulanması daha uygun görülmüştür. Böylelikle, çalışma alanında; 1971–2020 arası meydana gelen 6436 deprem öncü ve artçı depremlerden ayıklanmış ve moment büyüklüğü 4.0 ya da daha büyük olan 3675 adet deprem elde edilmiştir. Çalışmada moment büyüklüğü 4.0 ya da daha büyük depremler kullanıldığı için tamlik analizi yapılmasına gerek duyulmamıştır. Türdeşleştirilmiş ve ayıklanmış depremlerin dış merkezlerinin coğrafi dağılımını gösterir harita Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1: 1971-2020 Arası Türkiye'de Meydana Gelen Depremler  $M_w \geq 4.0$  (KRDAE-BDTİM, 2020), (Fay hatları Emre vd. (2013) verileri kullanılarak geliştirilmiştir)

Depremlerin zaman tanım alanındaki kayan pencere yöntemi ile elde edilen yıllık dağılımlarını ve aynı zamanda DAS dağılımını gösterir çizimler de Şekil 2'de sunulmuştur. Özellikle Şekil 2a incelenirse, yıllık deprem sayılarının çok değişken olduğu ve neredeyse periyodik artma ve azalmalara maruz kaldığı dikkat çekicidir. Aynı çizimde DAS değerlerinin de zamana göre nasıl değiştiği ve DAS değerlerinin azalıp arttığı dönemlere göre yıllık deprem sayılarının değişkenliği de izlenebilir. Özellikle düşük DAS değerlerinin gözlemlendiği dönemlerde depremlerin sıklaşmasına bağlı olarak deprem sayılarında artış olduğu ve aksi durumlarda da deprem sayılarında düşüş olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 2: a) Deprem Zaman Serisi ve DAS Değerleri Dağılımı, b) DAS Değerlerinin Sıklık Dağılımı

Şekil 2b'de verilen DAS değerlerinin sıklık dağılımı da aslında depremlerin zaman tanım alanındaki dağılımı ile ilgili ipuçlarını barındırmaktadır. Özellikle 0 gün sıklık değerinin kendinden sonra gelen 1,2 ve 3 gün sıklık değerinden daha az olması DAS değerlerinin üssel olarak dağılım göstermediği, aynı şekilde DAS değerlerinin 30 günden sonraki sıklık değerlerinin değişiminin de üssel olmayan yüksek kuyruklu bir dağılımla modellenebileceği anlaşılabilir. Şekil 2b grafiklerinden de izlenebileceği üzere 40 gün üzeri DAS değerleri dağılımının 43, 45 ve 46 günlerde 0'da büyük olduğu ve bu değerlerin neredeyse 30 gün ve üzeri DAS değerleri büyüklükleri ile benzer olduğu görülmektedir.

### 3. YÖNTEM

Benzer deprem verilerinin zaman tanım alanında üretilmesi için geçmiş depremlerin bu alandaki dağılımının belirlenmesi gereklidir. Sırasıyla, DAS olasılık dağılımının belirlenmesi, dağılımın modellenmesi ve modellere bağlı olarak Monte-Karlo (MK) yönteminin yapay deprem üretiminde kullanılabilmesi için bu modellerin artımsal olarak hazırlanması gerekmektedir. Bu bağlamda DAS olasılık dağılımı ve artımsal olasılık dağılım fonksiyonu; üssel, gama, Weibull ve log-normal dağılım modelleri kullanılarak modellenmiş ve değerlendirilmiştir (Tablo 1).

Bu bağlamda seçilen dağılım modelleri kullanılarak geliştirilmiş modeller ile asıl veri arasındaki uyumun sayısallaştırılması ise belirtme katsayısı ( $R^2$ ) ile olabirlik (LL), ki-kare ve Kolmogorov-Smirnov (KS) testleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. MATLAB (2018) hazır fonksiyonlarından fitnlm kullanılarak elde edilen belirtme katsayıları ve olabirlik değerleri doğrusal olmayan regresyon analizi sonucunda belirlenmiş, model katsayıları yinelemeli en küçük kareler yöntemi ile hesaplanmıştır (Tablo 1). Yinelemeli yöntem gereği, model katsayılarının başlangıç değerleri varsayılarak fitnlm fonksiyonuna veri olarak girilmiştir.

Ki-kare testi, sadece dağılım modeli ile DAS değerleri arasındaki uyumun belirlenmesi açısından değil, benzer verilerin üretilmesi bağlamında da önemli bilgiler sunabilir. DAS değerleri ile model değerleri arasındaki farkların karelerinin toplamı olan ki-kare değerleri, eğer model ile modellenen değer arasındaki fark büyükse, değerlendirilen dağılım modelinin başarısızlığını belirginleştirmekte ancak farklar küçükse modeli öne çıkartmaktadır. Böylesi bir uyum ölçüğü, benzer verilerin üretilmesi sırasında, üretilen verilerin hâlihazırdaki veriler ile uyumu hakkında da ipuçları verebilir. Şöyle ki, eğer DAS değerleri ile model değerleri arasındaki fark büyükse, üretilen benzer depremlerin zaman dağılımı özellikle uzun vadede çok fazla etkilenir, çünkü üretilen çok büyük sayıda ki yapay depremlerin DAS aralıkları da gerçek değerlerden sapsmış olur. Ancak ve ancak DAS değerleri ile model değerleri arasındaki farklar bütün DAS değerleri boyunca az ise, üretilen yapay depremlerden elde edilen deprem sayısı zaman serileri gerçeğe daha yakın olabilir.

Tablo 1: Olasılık Dağılım İşlevleri ile Yığılımlı Olasılık Dağılım Modelleri

Dağılım Modeli	Olasılık Dağılım Fonksiyonu	Yığılımlı Olasılık Dağılım Fonksiyonu
Üssel	$\alpha e^{-\alpha t}$	$1 - e^{-\alpha t}$
Gama	$\frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} t^{(\alpha-1)} e^{-\beta t}$	$\frac{\Gamma(\alpha, \beta t)}{\Gamma(\alpha)}$
Weibull	$\frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$	$1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$
Log-normal	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}t} e^{-(\log(t)-\mu)^2/2\sigma^2}$	$1 - \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)$

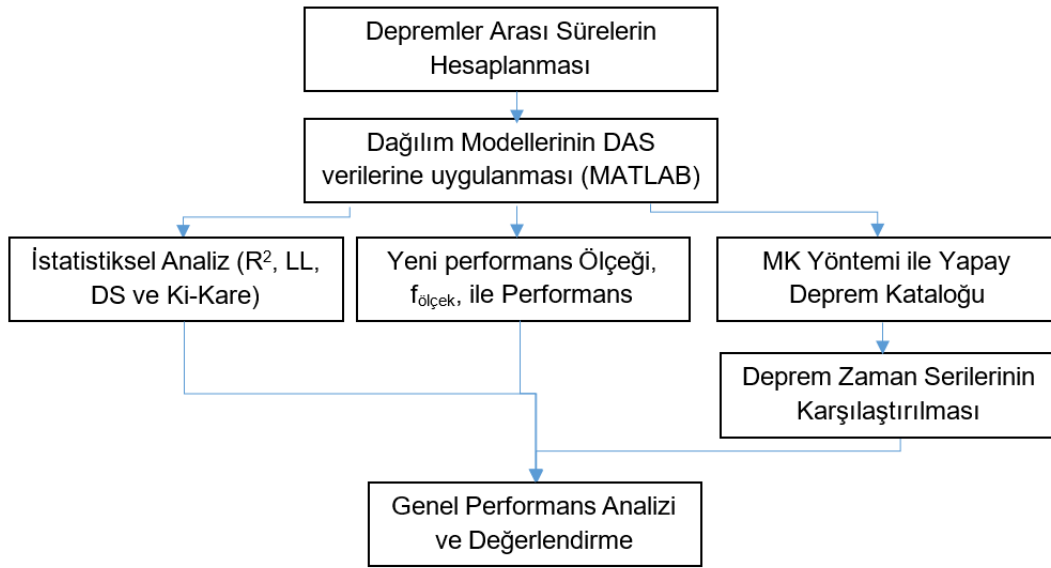
Aynı şekilde KS mesafesi de modellerin uyum oranlarının değerlendirilmesi açısından önemli bir ölçektir. Modellenen DAS değerleri ile model değerleri arasındaki en büyük mesafe olan KS mesafesi de aynı ki-kare yönteminde olduğu gibi, özellikle zaman-tanım alanında üretilen yapay depremler kullanılarak elde edilen deprem-zaman serilerinin uyumu hakkında ipucu verebilir ancak KS mesafesinin bilinmesi tek başına yeterli değildir. İşte tam bu nokta da bütün DAS değerleri boyunca modellenen değerler ile model değerleri arasındaki farkın bilinmesinin önemi ortaya çıkar. Yani KS mesafesi gibi sadece bir artık değerinin hesaplanması yerine,

bütün DAS aralıkları için artık değerlerin bilinmesi, üretilecek yapay depremler kullanılarak oluşturulacak deprem-zaman serisinin ne kadar uyumlu olduğu hakkında çok daha fazla bilgi sunabilir.

Bu artık verileri ve MK yöntemi uygulandığında, bu verilerin değerlerin gerçekleşme olasılığı kullanılarak bir fark ölçeği geliştirilebilir. Bu fark ölçeği geçmiş deprem verileri kullanılarak türetilen deprem-zaman serisi ile yapay deprem serilerinin arasındaki uyumu ölçer. Denklem 1 ile ifade edilen bu ölçekte

$$f_{ölçek} = \int_t a(t) dt \quad (1)$$

t, yığılımlı olasılık değerleri olmak üzere, a(t) her bir t için artık değer olarak ifade edilir. Kısaca belirtmek gerekirse  $f_{ölçek}$ , verilerden elde edilen DAS değerleri ile dağılım modelleri kullanılarak geliştirilen DAS değerleri arasındaki farklar kullanılarak geliştirilen fark eğrisinin altında kalan alan olarak ifade edilebilir. Elde edilen  $f_{ölçek}$  değerleri KS değerleri ile karşılaştırılarak artıkların nasıl bir seyir izlediği ve sadece KS mesafesi ile modellerin uyumunun değerlendirilip değerlendirilemeyeceği de ayrıca irdelenebilir.

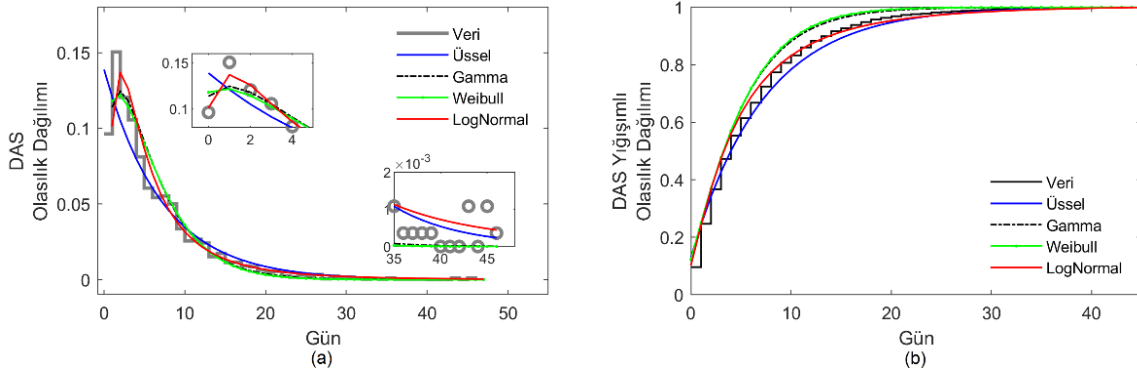


Şekil 3: Çalışma Kapsamında Gerçekleştirilen Analizleri Özetler Şema

Kullanılan dağılım modellerinin sadece gerçek verilerle uyum derecesini belirlemek dağılım modellerinin performanslarını değerlendirmek açısından çok da etkili bir yöntem olmayabilir. Daha detaylı değerlendirmek için, kullanılan dağılım modelleri ve parametrelerinin uygulama performanslarının da ölçülmesi gerekir. Bu bağlamda MK yöntemi kullanılmış, DAS değerlerinin olasılık dağılımları kullanılarak üretilen yapay depremin bir önceki depreme göre ne kadar süre sonra olacağı tahmin edilmiştir. Böylelikle yapay depremler türetilmiş ve bu depremlerin olması muhtemel zamanları kullanılarak deprem-zaman serileri türetilmiştir. Üretilen deprem-zaman serilerinin hâlihazırdaki deprem-zaman serisi ile olan benzerliği değerlendirilerek hangi dağılım modelinin daha başarılı olduğu belirlenmiştir (Şekil. 3).

#### 4. BULGULAR

Çözümleme için MATLAB (2018) programı kullanılmış olup Tablo 1’de verilen modellerin modellenmesi, ki-kare katsayıları ve KS mesafesi ile  $\alpha$  katsayıları da belirlenmiştir. Çözümleme sonucu elde edilen olasılık dağılım modelleri hem normal hem de artımsal biçimiyle Şekil 4’te verilmiş, ayrıca Tablo 2’de de DAS değerleri ve dağılım modelleri kullanılarak elde edilen değerler arasındaki uyumun derecesini gösterir katsayılar sunulmuştur.



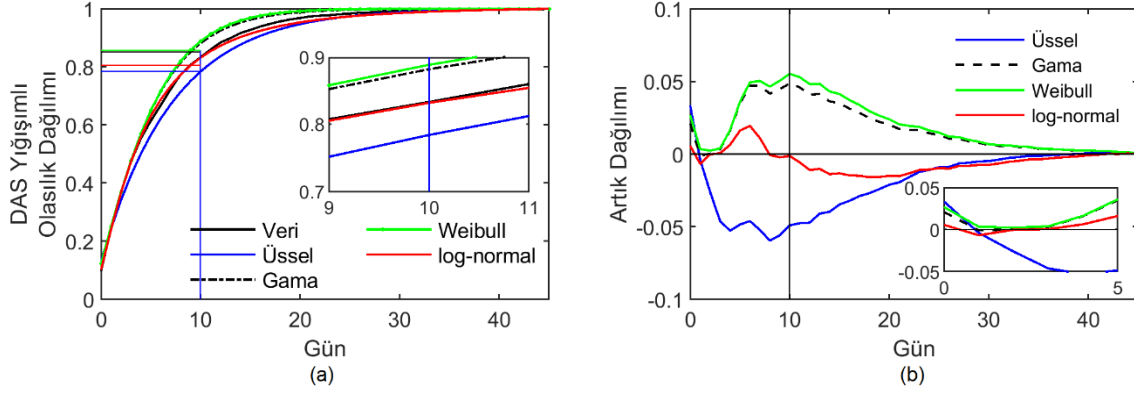
Şekil 4: a) DAS Olasılık Dağılımı, b) Yığılımlı Olasılık Dağılımı ile Uygulanan Dağılım Modelleri

Elde edilen olasılık dağılımları incelendiğinde ise, özellikle Şekil 4a’da eğriler incelendiğinde; katalog verileri kullanılarak elde edilen DAS olasılık dağılımı ile dağılım modelleri kullanılarak türetilen eğriler arasındaki uyumun düşük DAS değerleri için değişkenlik gösterdiği anlaşılabilir. Özellikle üssel dağılımın tek eğrilikli olmasının küçük DAS değerlerinin bu dağılımla modellenebilmesini zorlaştırmakta, verilerle model değerleri arasında önemli sapmalar görülmektedir. Böylesi bir DAS dağılımının, log-normal dağılım modeli ile modellenebilmesi şaşırtıcı olmamakla birlikte, özellikle yüksek DAS değerlerindeki dağılımının da log-normal dağılım modeli ile daha başarılı modellenebileceği (Nishenko ve Buland 1987, Davies vd. 1989, Sornette ve Knopoff 1997) ifade edilmelidir. Tablo 2’de çözümleme sonucunda elde edilen  $R^2$ , LL, KS ve ki-kare test değerleri listelenmiştir. Tablodaki performans ölçütlerinden anlaşılacağı üzere, özellikle başlangıç DAS değerinin bir sonraki değere göre daha küçük olması, log-normal dağılım modelini öne çıkartırken, üssel dağılım modelinin performansını da büyük ölçüde etkilemiştir. Üssel dağılım modeli bütün uyum değerlerine göre en zayıf model olmuş, log-normal model ise en başarılı model olarak ön plana çıkmıştır.

Tablo 2: Çözümleme Sonucu Elde Edilen Uyum Katsayıları ve Değerleri

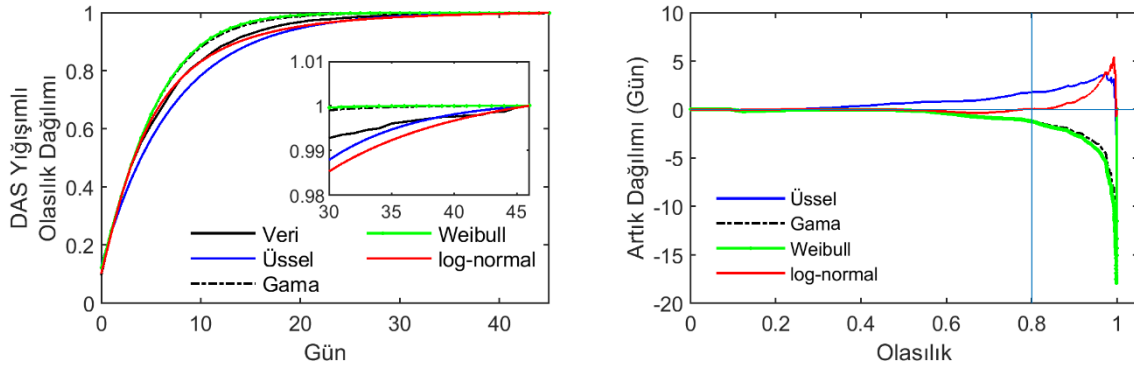
Dağılım Modeli	$R^2$	LL	KS	ki-kare
Üssel	0.94	157.26	0.07	0.127
Gama	0.97	174.50	0.03	0.023
Weibull	0.96	170.19	0.04	0.039
Log-normal	0.99	195.59	0.02	0.010

Böylelikle, doğal olarak log-normal dağılım modeli kullanılarak elde edilen DAS değerleri ile gözlemlenen DAS değerleri arasındaki farkın da (artık değer) en az olması beklenir. Bu bağlamda Şekil 5b incelendiğinde, özellikle küçük değerlerde log-normal dağılımı kullanılarak geliştirilen model değerleri ile DAS değerleri arasındaki artıkların diğer dağılım modellerinden elde edilen artıklara göre çok daha az olduğu görülmüştür.



Şekil 5: a) DAS'ın Yiğışimli Olasılık Dağılımı ve Dağılım Modelleri Uygulaması, b) Uygulanan Dağılım Modellerinin Artık Dağılımları

Şekil 5a'da sunulan yiğışimli olasılık dağılımı eğrilerinden de anlaşılacağı üzere, MK yöntemi ile yapay deprem aralıkları için düşük DAS değerleri atanmasının daha olası olduğu anlaşılır. Yapay depremlerin zaman alanındaki dağılımını şekillendirmede düşük DAS değerlerinin artıkları çok daha fazla önemlidir. Böylesi bir durumda ise, Şekil 5b'de gösterildiği üzere, log-normal dağılımın daha gerçeğe yakın sonuçlar üretebileceği beklenmelidir. Ancak şunu belirtmek gerekir ki KS mesafesi verileri, MK yöntemi kullanılarak üretilen yapay depremler arası sürelerin nasıl seyredeceği hakkında herhangi bir bilgi sağlayamaz. Ancak  $f_{ölçek}$  verilerine ve artık DAS dağılımına bakarak bu hususta çıkarımlarda bulunulabilir. Dolayısıyla KS mesafesi yerine önerilen  $f_{ölçek}$  değerinin kullanılması uygulama açısından daha uygun olabilir.



Şekil 6: a) Yiğışimli Olasılık Değerlerine Göre DAS Dağılımının Değişimi, b) Yiğışimli Olasılık Değerlerine Göre Artık Dağılımı

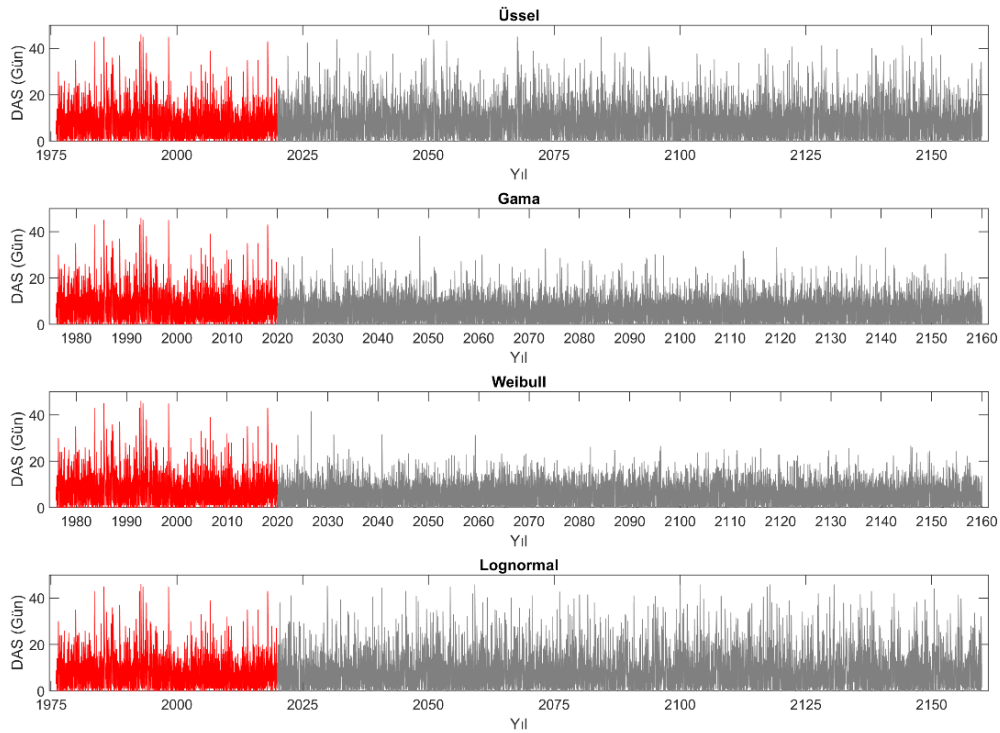
Şekil 6b'de gösterildiği üzere artık değerleri DAS ekseninde değerlendirilmiş, herhangi bir olasılık değerinde; dağılım modelleri kullanılarak üretilen eğrilerin veriler kullanılarak oluşturulan eğri ile olan farkı artık değeri olarak kabul edilmiştir. Böyle bir yaklaşım, olasılık değerlerine karşılık gelen dağılım değerlerinin gözlemlenen değerlerden ne kadar uzak olduğunu ve dolayısıyla yapay olarak üretilecek depremlerin de DAS değerlerinin ne kadar sapma göstereceği hakkında ipucu verir. Şekilden de anlaşılacağı üzere üssel ve log-normal dağılım kullanılarak geliştirilen dağılım modellerinin artık değerleri pozitif seyrederken, Weibull ve gama dağılımı artık değerleri negatif seyretmektedir. Bu durum üretilen yapay depremlerin DAS değerlerinin üssel dağılım için uzayacağı Weibull ve gama dağılımı modelleri için ise kısalmaya gelmektedir. Özellikle Weibull ve gama dağılımları artık eğrilerinin yüksek olasılıklardaki değişimi izlendiğinde, yapay DAS değerlerinin asla çok daha düşük

olmayacağı ve Şekil 5a'da küçük pencerede sunulan eğrilerden de anlaşılacağı üzere 30 gün ve üzeri DAS atanmasının neredeyse olası olmadığı anlaşılmaktadır. Bu durumun da, üretilecek yapay depremlerin DAS değerlerinin daha kısa tutulmasına neden olacağı ve birim zaman için üretilen deprem sayısının daha fazla olmasına neden olacağı da belirtilmelidir. Log-normal dağılımın DAS artık değerleri incelendiğinde ise hem pozitif hem de negatif artık değerlerinin gözlemlendiği belirtilmeli, özellikle 0.8 olasılık değerine kadar göreceli olarak küçük artık değerlerinin bu değerden sonra pozitif olduğunu ve daha yüksek seyrettiğini belirtmek gerekir. Böyle bir durumda 0.8 olasılık değerine kadar yapay deprem DAS değerlerinde kısalma ve daha büyük olasılık değerleri için ise uzama beklenmelidir.

Tablo 3: Dağılım Modelleri için Hesaplanan  $f_{ölçek}$  Değerleri

Model	KS Mesafesi	$f_{ölçek}$
Üssel	0.070	0.88
Gama	0.030	-0.73
Weibull	0.042	-0.82
Log-normal	0.020	0.21

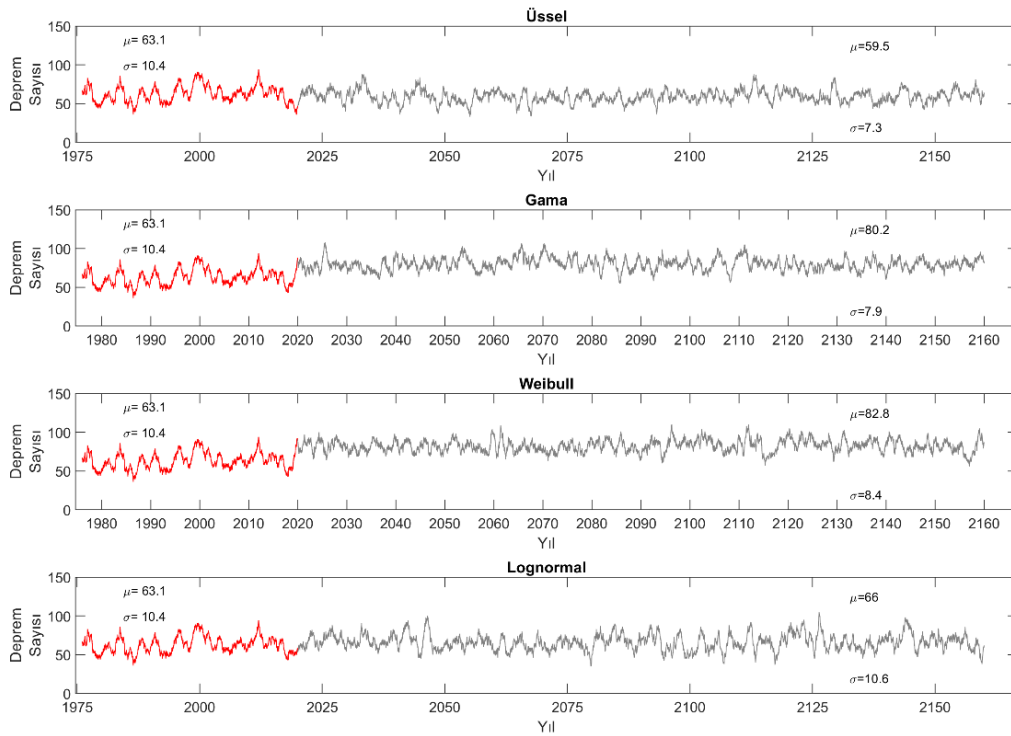
Şekil 6b'de yer alan artık eğrileri, Tablo 3'te sunulan ve sapma miktarının ölçeklendirilmesinde kullanılabilecek  $f_{ölçek}$  değerlerinin hesaplanması için kullanılmıştır.  $f_{ölçek}$  değeri, denklem 1'de  $a(t)$  olarak ifade edilen artık dağılımı ile olasılık ekseninde kalan alan olarak ifade edilebilir. Tablo 3'ten de anlaşılacağı üzere, her bir dağılım modeli için hesaplanan  $f_{ölçek}$  değerleri, KS mesafesi ile bir açıdan benzeşmektedir. Her ne kadar KS mesafesi DAS-Yığılımlı olasılık dağılımı eğrilerinin olasılık değerleri arasındaki farkı ölçmekte iken,  $f_{ölçek}$  değerleri bütün olasılık değerlerine denk gelen süreler arasındaki farkı belirtiyorsa da, bu iki ölçek arasındaki benzerlik de çok şaşırtıcı değildir.



Şekil 7: 1971-2020 arası Meydana Gelen Depremlerin DAS Dağılımı ile MK Yöntemi Kullanılarak Elde Edilen Yapay Depremlerin DAS Değerleri Dağılımı



MK yöntemi uygulanarak üretilen yapay depremlerin DAS değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi Şekil 7'de sunulmuştur. Bu DAS değerleri, deprem serilerinin üretilmesinde kullanılmış ve Şekil 8'de gösterilen yıllık deprem sayılarını gösterir deprem zaman eğrileri elde edilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde, beklenildiği gibi Weibull ve gama dağılımı kullanılarak elde edilen DAS değerleri için 30 gün ve üzeri değerleri neredeyse hiç atanmadığı ve değerlerin asıl değerlere göre çok daha düşük seyrettiği anlaşılabilir. Bu değerlerin üssel ve log-normal dağılımlarda asıl DAS dağılımları ile daha uyumlu ve benzeş dağılım gösterdiği de belirtilmelidir. Tabi sadece DAS dağılımının incelenmesi dağılım modellerinin performansları ile ilgili olarak yeterli bilgi vermez. DAS değerleri kullanılarak üretilen deprem zaman serilerinin de asıl deprem zaman serisi ile olan uyumu da incelenmelidir.



Şekil 8: Gözlemlenen ve MK Yöntemi ile Üretilen Deprem Zaman Serileri (Hâlihazırdaki Verilerin Ortalama ( $\mu$ ) ve Standart Sapma ( $\sigma$ ) değerleri ile Yapay Serilerin Ortalama ( $\mu$ ) ve Standart Sapma ( $\sigma$ ) değerleri de verilmiştir)

Hem asıl hem de yapay depremler kullanılarak türetilen deprem zaman serileri Şekil 8'de sunulmuştur. Bu seriler incelendiğinde; Weibull ve gama dağılımları ile oluşturulan modellerin artık değerlerinin özellikle yüksek olasılıklarda yüksek olmasının etkisi hemen görülebilir. Bu iki dağılım kullanılarak üretilen yapay depremlerin DAS değerleri için, 30 gün ve üzeri değerlerin neredeyse hiç atanmaması bu değerlerde kısalmaya neden olmuş ve birim zamanda çok daha fazla yapay deprem üretilmesine yol açarak yıllık ortalama deprem sayılarında artışa neden olmuştur. Bu durum üssel ve log-normal dağılım kullanılarak üretilen deprem zaman serilerinde gözlemlenmemiş ancak bu iki dağılım kullanılarak elde edilen zaman serilerinin de asıl deprem zaman serisinin verilerine göre bir miktar uzakta olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 8'den de izlenebileceği üzere, 1971–2020 arası yıllık ortalama deprem sayısı ( $\mu$ ) 63.1 iken, bu değer, üssel dağılımla elde edilen yapay deprem zaman serisi için 59.5 ve log-normal dağılım için ise 66.0 olarak hesaplanmıştır. Üssel dağılımla elde edilen deprem zaman serisinin ortalama değerinin, gözlemlenen depremlerin yıllık ortalama sayısına daha yakın olduğu görülmüştür. Ancak standart sapma değerleri ( $\sigma$ ) incelendiğinde ise bütün

dağılım modellerinin gözlemlenen değerden daha düşük olduğu ve en yakın değer ise log-normal dağılım kullanılarak üretilen deprem zaman serisi ile gözlemlendiğini de belirtmek gerekir. Böyle bir durumda log-normal dağılımın gerçeğe daha yakın veri ürettiğini söylemek yanlış olmaz. Standard sapma değerinin, daha yakın ortalama değeri elde edilen üssel dağılımda daha düşük seyretmesinin nedeni olarak ise, üretilen yapay depremlerin tek yönde yanlı olarak üretilmesi, başka bir deyişle artık değerlerinin sürekli artı yönde olması nedeniyle gerçeğinden daha büyük DAS üretilmesi olduğu anlaşılmıştır. Artık değerlerin dağılımı, üretilen yapay depremlerin sürekli olarak daha büyük sürelerle sahip olmasına ve DAS spektrumunun kısıtlanmasına neden olmuştur. Hâlbuki log-normal dağılım kullanılarak elde edilen hem artı yönlü hem de eksi yönlü artık değerleri, DAS verilerinin çeşitliliğini korumuş ve böylelikle standart sapma değerlerinin de asıl deprem zaman serisi standart sapma değerine daha yakın olması sağlanmıştır.

## 5. SONUÇLAR

Poisson modeli istatistiksel sismik çalışmaların hemen bütününde kullanılan tek model olarak öne çıkmıştır. Sismik tehlike analizlerinde, deprem tahminlerinde ve benzer veri üretiminde geçerli olan bu modelin geçerliliği de uzun zamandır sorgulanmaktadır. Bu bağlamda, çalışmada zaman tanım alanındaki DAS verileri incelenerek dağılım modellerinin performansları karşılaştırılmaktadır. Ayrıca sadece dağılım modellerinin DAS verileri ile uyumu değil, uygulamadaki uyum yetenekleri de değerlendirilmiştir.

Depremlerin zaman tanım alanındaki dağılımı da depremlerin hangi dağılım model ile daha gerçekçi ifade edilebildiği hakkında veri sunar. Sadece ortalama deprem sayısı ve standart sapma değerleri ile de zaman tanım alanındaki dağılım hakkında önemli bilgiler verir. Bu bağlamda Türkiye ve yakın çevresinde meydana gelen depremlerin zaman tanım alanındaki dağılımı değerlendirilmiş, DAS dağılımını en iyi modelleyecek dağılım modelleri ile uyumu incelenmiş ve elde edilen dağılım model katsayıları kullanılarak yapay depremler üretilmiştir. Sonuç olarak:

- 1) Log-normal dağılım modellerinin depremler arası sürenin dağılımını daha başarılı şekilde modellediği görülmüştür. Özellikle depremlerin zaman tanım alanında Poisson dağılımını izlediği ve dolayısıyla DAS değerlerinin üssel dağılım izlemesi gerektiği varsayımının irdelenmesi gerektiği anlaşılmıştır (Pasari 2018). Böyle bir durumda, çalışmaların daha fazla detaylandırılması ve bu durumun çalışılan alana özgü olup olmadığının ve jeolojik ve jeofiziksel arka planının olup olmadığının belirlenmesinin sismik tehlike çalışmaları açısından önemi görülmüştür. Bu ve benzeri çalışmalarda elde edilen istatistiksel bulguların jeolojik ve jeofiziksel olarak anlamlandırılması durumunda da, sismik tehlike ve deprem tahmini uygulamalarının buna göre şekilleneceği de öngörülmektedir.
- 2) Deprem verilerinin simülasyonu kapsamında zaman tanım alanında DAS verilerinin değerlendirilebilmesi için geliştirilen  $f_{ölçek}$  göstergesinin, dağılım modellerinin yapay deprem zaman aralığı eğilimlerini açıklayıcı olduğu görülmüş ve dağılım modellerinin gözlemlenen verilerle uyumunu önceden anlayabilmek için iyi bir gösterge olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca bu değerlerin belirtme katsayısı, olabilirlik değerleri, KS mesafesi ve ki-kare değerlendirme yöntemlerinin sonuçları ile tutarlı olduğu görülmüştür.
- 3) Dağılım modelleri kullanılarak geliştirilen DAS dağılımının özellikle büyük depremler arası süre verilerini modellemedeki başarısının, yapay deprem üretilmesi işleminde çok etkili olduğu görülmüştür. Buna ek olarak büyük süreleri modellemedeki farkları yapay depremler arası sürelerde büyük farklılıklara neden olduğu görülmüştür. Dolayısıyla herhangi bir dağılım modelinin, DAS verilerini modellemedeki başarısını ölçmek için yüksek DAS verileri ile uyumunun daha öncelikli olması gerektiği ortaya çıkmıştır.

## TEŞEKKÜR

Çalışma kapsamında Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi'nin deprem verileri kullanılmıştır.

## KAYNAKLAR

Akkar S., Cagnan Z., Yenier E., Erdogan O., Sandikkaya M.A., Gulkan P., 2010. The recently compiled Turkish strong motion database: preliminary investigation for seismological parameters, *J. Seismol.* 14, 457-479.

Anagnos T., Kiremidjian A.S., 1988. A review of earthquake occurrence models for seismic hazard analysis, *Probabilist Eng. Mech.* 3(1), 3-11.

Bak P., Christensen K., Danon L., Scanlon T., 2002. Unified scaling law for earthquakes, *Phys Rev Lett.* 88(17), 178501,1–178501,4

Bayrak E., Yılmaz S., Bayrak Y., 2017. Temporal and spatial variations of Gutenberg-Richter parameter and fractal dimension in Western Anatolia, Turkey, *J. Asian Earth Sci.* 138, 1-11.

Bayrak E., Yılmaz S., Softa M., Türker T., Bayrak Y. 2015. Earthquake hazard analysis for East Anatolian Fault Zone, Turkey, *Natural Hazards*, 76(2) 1063-1077.

Bountzis P., Papadimitriou E., Tsaklidis G., 2018. Estimating the earthquake occurrence rates in Corinth Gulf (Greece) through Markovian arrival process modeling, *J. Appl. Stat.* 46(6), 995-1020.

Chen C., Wang J.P., Wu Y.M., Chan C.H., 2013. A study of earthquake interoccurrence distribution models in Taiwan, *Natural Hazards* 69(3),1335-1350.

Coban K.H., Sayıl N., 2019. Evaluation of earthquake recurrences with different distribution models in western Anatolia, *J. Seismol.* 23(5), 1405-1422.

Coban K.H., Sayıl N.L., 2020a. Different probabilistic models for earthquake occurrences along the North and East Anatolian fault zones, *Arab. J. Geosci.* 13, 971.

Çoban K.H., Sayıl N.L., 2020b. 24 Ocak 2020 Sivrice (Elazığ) Depreminin Şartlı Olasılığının Değerlendirilmesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 35(4), 1009-1019.

Cornell A., 1968. Engineering Seismic Risk Analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.* 58(5), 1583-1606.

Corral A., 2003. Local distributions and rate fluctuations in a unified scaling law for earthquakes, *Phys. Rev. E* 68, 035102(R).

Davies P.M., Jackson D.D., Kagan Y.Y., 1989. The longer it has been since the last earthquake, the longer the expected time till the next?, *Bull. Seism. Soc. Am.* 79,1439-1456.

Emre Ö., Duman T.Y., Özalp S., Elmacı H., Olgun Ş., Şaroğlu F., 2013. Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası, Ölçek 1:1.250.000. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30, Ankara. ISBN: 978-605-5310-56-1.

Gardner J.K., Knopoff L., 1974. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian?, *Bull. Seism. Soc. Am.* 64(5),1363-1367.

Hasumi T., Chen C.C., Akimoto T., Aizawa Y., 2010. The Weibull-log Weibull transition of interoccurrence time for synthetic and natural earthquakes, *Tectonophysics* 485(1-4), 9-16.

KRDAE-BDTİM, 2020. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi Deprem Kataloğu, Erişim adresi: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb>

Musson R.M.W., 2002. A Power-Law Function for Earthquake Interarrival Time and Magnitude, *Bull. Seism. Soc. Am.* 92(5), 1783-1794.

Naylor M., Touati S., Main I.G., Bell, A.F., 2010. Earthquake inter-event time distributions reflect the proportion of dependent and independent events pairs and are therefore not universal, EGU General Assembly, May 2010, Austria.

Nishenko S.P., Buland R., 1987. A generic recurrence interval distribution for earthquake forecasting, *Bull. Seism. Soc. Am.* 77(4), 1382-1399.

Ozturk S., 2011. Characteristics of seismic activity in the Western, Central and Eastern parts of the North Anatolian Fault Zone, Turkey: Temporal and spatial analysis, *Acta Geophys.* 59, 209-238.

Ozturk S., 2014. Türkiye'nin Batı Anadolu Bölgesi için Deprem İstatistiği ve Olası Güçlü Depremlerin Orta Vadede Bölgesel Olarak Tahmini Üzerine Bir Çalışma, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 4(1) , 75-93.

Pasari S., Dikshit O., 2015. Earthquake interevent time distribution in Kachchh, Northwestern India, *Earth Planets Space* 67, article no. 129.

Pasari S., 2018. Stochastic modelling of earthquake interoccurrence times in Northwest Himalaya and adjoining regions, *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 9(1), 568-588.

Parvez I.A., Ram A., 1997. Probabilistic Assessment of earthquake hazards in the north-east Indian Peninsula and Hindukush regions, *Pure Appl. Geophys.* 149, 731-746.

Polat O., Gok E., Yilmaz D., 2008. Earthquake hazard of Aegean Extension Region, Turkey, *Turk, J, Earth Sci,* 17, 593-614.

Sayil N.L., 2013. Long-term earthquake prediction in the Marmara region based on the regional time- and magnitude-predictable model, *Acta Geophys.* 61(2), 338-356.

Saichev A., Sornette D., 2007. Theory of earthquake recurrence times, *J. Geophys. Res.* 112, B04.

Sornette D., Knopoff L., 1997. The paradox of the expected time until the next earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.* 87, 789-798.

Stallone F., Marzocchi W., 2019. Features of Seismic Sequences Are Similar in Different Crustal Tectonic Regions, *Bull. Seism. Soc. Am.* 109(5), 1594-1604.

Touati S., Naylor M., Main I.G., 2009. Origin and Nonuniversality of the Earthquake Inter-event Time Distribution, *Phys. Rev. Lett.* 102(16), 168501.

Ulusay R., Tuncay, E., Sonmez H., Gokceoglu C., 2004. An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey, *Eng. Geol.* 74(3-4), 265-291.

Utsu T., 1984. Estimation of parameters for recurrence models of earthquakes, *Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo* 59, 3-66.

Yazdani A., Kowsari M., 2011. Statistical prediction of the sequence of large earthquakes in Iran, *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications* 24(4), 325-336.

Yılmaz V., Erişoğlu M., Çelik H.E., 2011. Probabilistic prediction of the next earthquake in the NAFZ (North Anatolian fault zone), Turkey. *Doğuş Üniversitesi Dergisi* 5 (2), 243-250.

Zare M., Amini H., Yazdi P., Sesetyan K., Demircioglu M.B., Kalafat, D. vd., 2014. Recent developments of the Middle East catalog, *J. Seismol.* 18, 749-772.

## ARAŞTIRMA VERİSİ

Çalışma kapsamında kullanılan Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi'nin deprem verileri kullanılmıştır. Erişim adresi: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/>

## ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ

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

## YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI

Katkı Türü	Yazarlar
Çalışmanın tasarlanması	H.K.
Literatür araştırma	H.K.
Saha çalışması, veri temini/derleme	H.K.
Verilerin işlenmesi/analiz edilmesi	H.K.
Şekil/Tablo/Yazılım hazırlanması	H.K.
Bulguların yorumlanması	H.K.
Makale yazımı, düzenleme, kontrol	H.K.



T.C. İÇİŞLERİ BAKANLIĞI  
AFET VE ACİL DURUM  
YÖNETİMİ BAŞKANLIĞI

AFAD®

# TÜRK DEPREM ARAŞTIRMA DERGİSİ

TURKISH  
JOURNAL OF  
EARTHQUAKE  
RESEARCH



TUSAK  
Türkiye Ulusal  
Sismoloji ve Deprem  
Fiziki Kurumu  
Ankara / TÜRKİYE

e-ISSN: 2687-301X