

## Afyonkarahisar-UyduKent Bölgesinde Zemin Büyütme Etkisinin TBDY 2018'e Göre İncelenmesi<sup>1</sup>

Süleyman Gücek<sup>2</sup>

İsmail Zorluer<sup>3</sup>

### Özet

Dinamik yükler altındaki yapılarda hasara neden olan önemli faktörlerden bir tanesi yerel zemin özellikleridir. Taşıma gücü kaybı, zemin büyütme, sıvılaşma, oturma gibi zemin problemlerinin temel nedeni deprem sırasında bu özelliklerinin değişimidir. Özellikle zemin büyütmesi; ana kaya derinliği, zemin tabakalarının kalınlığı ve cinsi, zeminin dinamik özellikleri, tabakaların süreksizliği ve bölgenin topoğrafik yapısı gibi parametrelerden etkilenmektedir. Bu parametrelere bağlı olarak meydana gelen yapısal hasarların önlenmesi veya olumsuz etkilerinin azaltılabilmesi için zeminlerin, yerel zemin koşullarına bağlı olarak bu yükler altında nasıl bir davranış sergileyeceğinin araştırılması, sahaya özel dinamik analizler kapsamında zemin büyütme analizlerinin önceden yapılması ve değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışmada yerel zemin koşullarının zemin büyütmesine etkisini incelemek amacıyla, Ana kaya mostrasındaki yer hareketi olarak 2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine uygun olarak seçilmiş olan 11 farklı deprem verisi kullanılarak bir boyutlu dinamik analizler yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle bölgede yapılmış olan 124 farklı sondaj verisi değerlendirilerek yerel zemin özellikleri belirlenmiştir. Belirlenen yerel zemin özelliklerinin dinamik davranışa etkisini incelemek için bir boyutlu DeepSoil analiz programı kullanılmıştır. Bir boyutlu eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler

- 1 Bu bölüm, Doç. Dr. İsmail Zorluer'in danışmanlığında Süleyman GÜCEK tarafından Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde hazırlanan "Arazi DeneYlerine Dayalı Zemin Büyütmesi ve Sıvılaşma Analizleri: Afyonkarahisar-UyduKent Yerleşim Alanı Örneği" başlıklı doktora tezinden üretilmiştir.
- 2 Dr. Öğr. Üyesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, sgucek@aku.edu.tr, 0000-0002-4839-1851
- 3 Prof. Dr., Afyon Kocatepe Üniversitesi, izarluer@aku.edu.tr, 0000-0001-5017-084X

yapılarak her sondaj için farklı büyütme değerleri elde edilmiştir. Bir boyutlu analizlere göre elde edilmiş olan sonuçlar Coğrafi Bilgi Sistemleri kullanarak haritalandırılmıştır. Doğrusal olmayan analiz yönteminin kullanılması; deprem etkisi altında bina temellerinin tasarımı, yerel zemin sınıflarının tanımlanması ve istinat yapıları ile şevlerin tasarımında kullanılacak zemin parametrelerinin belirlenmesindeki maliyeti azaltacağı düşünülmektedir. Deprem hasarlarının azaltılmasına yönelik çalışmalar kapsamında, şehirleşmenin ve nüfusun çalışma bölgesinde yoğunlaştığı dikkate alınarak Afyonkarahisar UyduKent bölgesi için güvenli yerleşim alanlarının belirlenmesi planlanmıştır.

## 1. GİRİŞ

İnsan Depremler sırasında oluşan kuvvetli yer hareketinin mühendislik yapılarında meydana getirdiği hasarının büyüklüğünü etkileyen faktörler, deprem kaynak özellikleri, yerel zemin koşulları ve üstyapı özellikleridir. Yerel zemin koşulları ve deprem kaynak özellikleri, zemin yüzeyinde oluşan kuvvetli yer hareketinin özelliklerini, bu özelliklerin yerel değişimi ise yapısal hasar dağılımını etkilemektedir. Bu sebeplerden dolayı depreme dayanıklı yapıların tasarımında; deprem kaynak özellikleri, yerel zemin koşulları ve yapıların mühendislik özellikleri birlikte dikkate alınmalıdır (Saita vd. 2012).

Deprem yer hareketi süresince yapıların davranışlarını incelenmesi, depreme dayanıklı yapılar tasarlamak, deprem sırasında zeminlerin nasıl bir davranış sergileyeceğini tahmin edilmesi ve depremin ölümcül sonuçlarını engellemek için birçok mühendislik disiplini ortak çalışmalar yürütmektedir. Bu çalışmalarla oluşabilecek depremin parametrelerinin önceden kestirilmesi ve zeminin buna göre davranışının analizi öncelik kazanmaktadır. Deprem ve zemin hareketinin modellenmesi ve buna göre yapı tasarlanması durumunda can ve mal kayıplarının minimum düzeyde tutulması sağlanabilir. Depremler meydana gelmeden önce deprem sonrası yapılacak işlerin ve alınacak önlemlerin planlanması gerekir. Bu planlama çalışmalarının iyi bir şekilde yapılabilmesi için gelecekte ne kadar büyüklükte bir depremin oluşabileceği ve yerleşim merkezlerinin bu depremden nasıl etkilenebileceği sağlıklı bir şekilde analiz edilmelidir (Tunçel vd. 2019).

Deprem hareketi nedeniyle yüzeye yakın zemin tabakalarında meydana gelen kayma deformasyonlarının seviyesi, yapılarda oluşan hasar dağılımının sahadaki değişiminde etkili olmaktadır. Kuvvetli yer hareketi sırasında yüzeye yakın zemin tabakalarında oluşacak kayma birim şekil değiştirmesinin sismik anakayadaki tasarım hareketinin şiddetine bağlı olarak doğru biçimde öngörülebilmesi, zemin yapılarında ve üstyapılarda deprem sırasında oluşacak olumsuz etkileri en aza indirecek mühendislik çözümlerinin geliştirilmesinde önemli katkı sağlayacaktır (Saita vd. 2012).

Tasarım yer hareketi karşısında yüzeye yakın zemin tabakalarında meydana gelecek kayma deformasyonu değerlerinin yaklaşık olarak belirlenebilmesi amacıyla, farklı malzeme modellerinin ve hesap yöntemlerinin kullanıldığı bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu sayısal dinamik analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Bir boyutlu analiz yöntemlerinde, zemin kesitindeki tabakaların dinamik özellikleri, kalınlıkları, sismik anakaya derinliği yeterli olmakta, iki ve üç boyutlu analiz yöntemlerinde ise tabakaların iki veya üç boyutlu geometrisi ve sınır şartlarına da ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca analizlerde kullanılan sismik anakaya hareketinin karakteristiklerinin depremin kaynak özelliklerini doğru biçimde yansıtmaları gerekmektedir. Kuvvetli yer hareketi sırasında yüzeye yakın zemin tabakalarında meydana gelecek kayma şekil değiştirmesi değerlerinin; basit ve uygulama kolaylığına sahip yöntemlerle yaklaşık olarak elde edilmesi, deprem hareketinin yüzeyde oluşturacağı etkilerin belirlenmesinde önemli rol oynayacaktır (Subaşı vd. 2019).

Son yıllarda hızla artan nüfus ve göç artışı sebebiyle gelişmekte olan ülkelerde yeni yerleşim bölgelerine olan talebin hızla arttığını görmekteyiz. Fakat bu talebi karşılamak için gerekli önlemlerin alınmadığı yerleşim yerlerinin seçilmiş olması bugüne kadar büyük felakete yol açtığı görülmektedir. Özellikle de ülkemizde yaşanmış olan 1999 Marmara depremi, 2011 Van depremi, 2020 İzmir depremi ve son olarak 6 Şubat 2023 depremleri gibi büyük ölçekli depremler maddi zararlara ve kayıplara sebebiyet vermiştir. Deprem sonrası yapılan araştırmalara göre hasarın boyutları üst yapı özelliklerine, bölgedeki sismik aktiviteye ve zeminin mühendislik özelliklerine bağlıdır (Aydoner ve Maktav 2013). Dünyadaki birçok şehir taşıma gücü düşük olan zeminler üzerine inşa edildiğini görmekteyiz (Değerliyurt 2014). Ülkemiz sismik aktivitesi yüksek bir bölgede olup, depremlerin sebep olduğu dinamik yüklerin oluşturduğu ilave gerilimler, taşıma gücünün düşük olduğu zeminlerde büyük yıkıcı hasarlara neden olmaktadır (Ulusay 2000).

Üst yapıları inşaa ederken yapı yüklerini ve çevresel etkileri dikkate alarak en güvenli şekilde zemine aktaran temel tipinin seçimi için, inşa bölgesindeki zemin davranışlarının ve özelliklerinin çok iyi analiz edilmesi gerekmektedir (Kurnaz ve Ramazanoğlu 2014). Gelinek noktada depremlerin neden olduğu hasarlar ve yıkımlar zemin davranışlarının ve özelliklerinin yeterince dikkate alınmadığını göstermektedir. Güvenli yerleşim alanlarının seçilmesi ve bu bölgelerin doğal afetlerden korunması noktasında titiz bir çalışma isteyen zor ve karmaşık bir süreçtir. Zemin mühendis özelliklerinin yanı sıra yerleşim bölgesinin hidrojeolojik ve jeomorfolojik özellikleri de zemin

davranışını olumlu ya da olumsuz etkileyen önemli faktörlerdir (Kavurmacı 2017).

Ulaşım kolaylığından ve ekonomik sebeplerden dolayı Dünyanın birçok yerinde ve ülkemizde yerleşim alanı olarak alüvyon zeminler sıklıkla tercih edilmektedir. Bununla birlikte afetler açısından bakıldığında, Türkiye gibi sismik aktivitesi yüksek bir tektonik kuşakta bulunan ülkelerde, depremlerden en çok etkilenen bölgelerin zeminler üzerindeki yerleşim bölgelerinin olduğu açıkça görülmektedir. Örneğin, onbinlerce insanın yaşamını yitirdiği sırasıyla 1939 Erzincan (Mw: 7.9), 1942 Niksar-Erbaa (Mw: 7.0), 1976 Çaldıran (Mw: 7.2), 1999 Adapazarı (Mw: 7.4) ve Düzce (Mw: 7.1) depremleri gösterilebilir (Akın vd. 2013). Mikrobölgeleme çalışması için haritalar oluştururken, doğal afetlerin ve çevresel etkilerin dikkate alınarak değerlendirme yapılması bunun yanı sıra mikrobölgeleme çalışmalarının disiplinler arası koordinasyonu önem arz etmektedir. Bu etkenlerin de ötesinde, geoteknik ve jeolojik araştırmalara başvurularak bölgedeki zeminlerin sismik hareketine bağlı olarak davranışlarının mutlaka bilinmesi gerekmektedir. Kısacası, geoteknik ve jeolojik veriler dikkate alınarak doğal afetlerin tespit edilmesi, kontrolünün sağlanması veya oluşabilecek tehlikelerin önlenmesi de mikrobölgeleme çalışmaları açısından çok önemlidir (Akın vd. 2015).

Afyonkarahisar'ın Türkiye Deprem Tehlike Haritasına göre yüksek riskli bölgede olması, zemin dağılımının genel olarak siltli, killi ve kumlu zeminlerden oluşması, yer altı su seviyesinin genel olarak yüksek olması gibi nedenlerden dolayı, deprem anında meydana gelen sıvılaşma ve zemin büyütme, Afyon için önemli bir risk faktörü olarak görülmektedir (Bayrakçı vd. 2013). Deprem esnasında meydana gelen sismik tehlikelerin en önemli sonuçlarından biri zemin büyütmedir. Deprem esnasında ana kayadan yayılan dalgalar geçtikleri zemin tabakalarının mekanik özelliklerinden etkilenirler. Farklı zemin tabakaları deprem dalgalarını bir sonraki tabakaya aktarırken yatay ve düşey yöndeki deplasman genliklerini değiştirirler. Düşük değere sahip anakaya ivmeleri, yerel zemin koşullarının etkisi ile ivmenin bazı bölgelerde birkaç kat büyüyerek yüzeye çıkması sonucu ağır hasarlara neden olabilmektedir (Kramer 1996). Sismik tehlikeden kaynaklı bu olaya zemin büyütmesi adı verilmektedir (Özyağcıoğlu vd. 2019). Depremler sırasında oluşan ve her yöne hareket eden cisim dalgaları, tabaka sınırlarında gelme açısından daha küçük bir açıya kırılarak (dalga yayılma hızı yüzeye yaklaştıkça genel olarak küçüldüğü için) ilerlemekte ve zemin yüzeyine ulaştıklarında ise, yayılma doğrultuları hemen hemen yüzeye dik duruma gelmektedir. Bu nedenle incelenen bir bölgede yerel koşullara bağlı olarak deprem dalgalarının özelliklerinde meydana gelen değişimlerin belirlenmesinde en basit yaklaşım,

düşey yönde ilerleyen kayma dalgası yayılımına dayanan bir boyutlu dinamik analizdir. Bu yöntemde ana kaya ve ana kaya üzerindeki bütün zemin tabakalarının yatay yönde sonsuza uzandığı kabul edilmekte ve her tabakaya ait transfer fonksiyonu belirlenerek yüzeydeki hareketin genliği dolayısıyla zemin büyütmesi hesaplanmaktadır (Kramer 1996, Özkan 2017).

Anakayadan gelen depremin zemin tabakası tarafından ne kadar büyütüleceğini tahmin etmek için ise dinamik büyütme faktörü (DBF) gerekli bir parametredir. Dinamik büyütme faktörü değerleri ölçü alınan yere göre ve meydana gelebilecek deprem özelliklerine göre değişim gösterebilir, yani sabit değil değişken (dinamik) bir parametredir (Özdağ vd. 2015). Zemin büyütme parametresi, hesaplanan zemin yüzeyi PSA (g) değerlerinin, temel kaya mostrasındaki harekete ait PSA (g) değerlerine bölünmesi yoluyla elde edilmektedir (Özyağcıoğlu vd. 2019). Büyütme temel kaya üzerinde yer alan üst zemin katmanları içerisinde gerçekleşir, bu nedenle Afyonkarahisar gibi alüvyon birikintinin 100 metreyi bulduğu bir jeolojik profilde (DSİ sondajlarına göre), zemin yapısının makul bir derinliğe kadar bilinmesi, büyütme analizleri açısından önemlidir.

Bu çalışmada inceleme sahasında yapmış olduğumuz zemin sondaj verileri, daha önce yapılan zemin etüdü sondajı verileri, Afyon Kocatepe Üniversitesi Geoteknik laboratuvarında yapılmış olan deney sonuçları ve daha önceden yaptırılmış olan laboratuvar deneyi sonuçları birlikte değerlendirilerek; bu veriler çerçevesinde çalışma alanının zemin modelleri oluşturulmuştur. Bu zemin modelleri üzerinde de elde edilen tüm verilerle birlikte yönetmeliğe uygun olarak seçilen ve çalışma alanına göre ivmesi ölçeklendirilmiş olan 11 farklı anakaya mostrası ivme zaman geçmişi kullanılarak, bir boyutlu (1D) eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan sahaya özel dinamik analizleri yapılmıştır.

## 2. MATERYAL ve METOT

Bu çalışmada Afyonkarahisar Uydükent bölgesi çalışma alanının arazi deneylerine dayalı olarak zemin dinamik davranışı değerlendirilmiştir. Çalışma alanının zemin büyütme analizleri için bir boyutlu DeepSoil programı kullanılmıştır. Analizler; arazi deneylerinden elde edilen veriler ile laboratuvar çalışmaları birlikte kullanılarak yapılmıştır.

### 2.1. Saha Çalışmaları

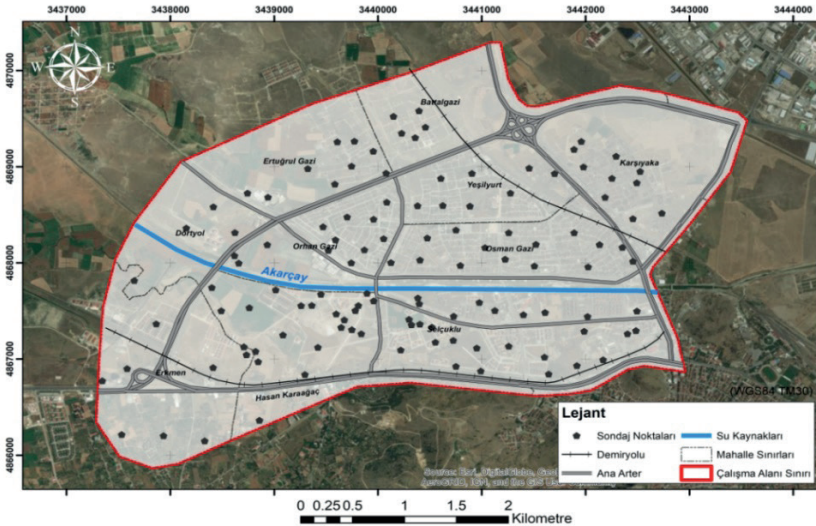
Çalışma alanında bugüne kadar yapılmış olan sismik tehlike ve zemin davranışı analizleri ile ilgili bir çalışma bulunmamaktadır. Arazi deneyleri kapsamında bölgede yaptırmış olduğumuz sondajlar ve özel firmalardan

alınmış uygun olan sondaj raporları dikkate alınarak çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda çalışma alanı için, derinliği 15-30 m arasında olan toplamda 124 adet sondaj kuyusu dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Sondajlar, Standart Penetrasyon Testlerinin (SPT), ASTM D 1586-99 standardına göre her 1,5 m'de bir yapılmış ve çalışma alanının ortalama yeraltı su seviyesi ise 3-6 m arası olarak tespit edilmiştir. Sondaj kuyuları tek tek kayda alınarak gerekli hesaplamalar sonucunda kayıtlar oluşturulmuştur. Çalışma alanının için kullanılan tüm sondaj kuyularının standart penetrasyon deneyine ait genel sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Çalışma alanına ait standart penetrasyon deneyi genel  $N_{30}$  değerleri.

| Zemin Tabakaları (m)        | $N_{30}$ |          |          | Standart Sapma |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------------|
|                             | Minimum  | Maksimum | Ortalama |                |
| Kil Tabakası (0-7.5m)       | 9        | 20       | 15       | 5.5            |
| Kum Tabakası (7.50-18.00m)  | 16       | 24       | 20       | 5.6            |
| Kil Tabakası (18.00-19.95m) | 11       | 19       | 15       | 5.6            |

Çalışma alanında analizler için kullanılmış olan toplam 124 adet sondaj kuyusu koordinatlarını gösteren bölgenin haritası Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanındaki sondaj kuyularının genel dağılımı.



## 2.2. Laboratuvar Çalışmaları

Afyonkarahisar merkezinde bulunan Uydukent bölgesinin geoteknik özellikleri, sahada yapılmış olan sondajlardan elde edilen örnekler üzerinde laboratuvar testleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar deney sonuçlarına göre çalışma alanının CH-CL zemin tabakaları için ince oranı %61,36-97,96 arasında, iri oranı %11,78-33,36 arasında, likit limit değeri %26,00-72,50 arasında, plastik limit değeri %12,00-34,60 arasında, su muhtevası değeri %6,58-34,20 arasında, birim ağırlık değeri ise 15,27-19,93 kN/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir. SM-SC zemin tabakası için ince oranı %4,95-31,15 arasında, iri oranı %58,42-95,81 arasında, likit limit değeri %0,00-36,47 arasında, plastik limit değeri %0,00-23,70 arasında, su muhtevası değeri %19,60-40,43 arasında, birim ağırlık değeri ise 16,89-18,56 kN/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir.

Çalışma alanında Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından yapılmış olan 5 adet derin su sondajları birlikte değerlendirilerek Şekil 3.2'de bir zemin profili verilmiştir. 100 m derinliğindeki sondajların zemin tabakaları görüldüğü üzere az çakıllı, kum, kumlu siltli kil ve killi birimlerden oluştuğu görülmektedir. Genel sondaj profilinde 100 m'den sonra 251 m'ye kadar Traki Andezit gibi sert birimlerin olduğu görülmüştür.

Laboratuvar test sonuçlarına dayalı olarak her bir tabakanın zemin sınıflandırması yapılarak derinliğe bağlı çalışma bölgesinin geoteknik verileri oluşturulmuştur. Çalışma alanı zemin profili 0-7,50 m arası yüksek plastisiteli kil (CH) ve düşük plastisiteli kil (CL), 7,50-18,00 m arası siltli kum (SM) ve killi kum (SC), 18,00-19,95 m arası da yüksek plastisiteli kil (CH) ve düşük plastisiteli kil (CL) formasyonlarından oluştuğu tespit edilmiştir. Devlet Su İşlerinin bölgede yapmış olduğu derin sondaj laboratuvar sonuçlarına göre 25 m'ye kadar tespit etmiş olduğu genel zemin profili ile çalışma alanında yapılmış olan arazi deneylerine dayalı laboratuvar sonuçlarına göre belirlemiş olduğumuz zemin profilinin birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

## 2.3. Kayma Dalgası Hızının Belirlenmesi ( $V_s$ )

Kayma dalgası hızının ( $V_s$ ) jeofizik yöntemlerle belirlenmesi esastır. Bununla birlikte, standart penetrasyon deneyi (SPT), koni penetrasyon deneyi (CPT) gibi arazi deney sonuçları ve genel kabul gören bağıntılar kullanılarak dolaylı yoldan da hesaplanabilir. Yerel zemin sınıflarının belirlenmesinde kayma dalgası hızı  $V_s$ , SPT darbe sayısı  $N$  ve kohezyonlu zeminler için  $c_u$  değeri kullanılabilir (TBDY 2018). Çalışma alanında yapılmış olan sondaj çalışmalarındaki SPT- $N_{30}$  değerlerine bağlı olarak her bir kuyu tabakasının kayma dalgası hızı ( $V_s$ ) değerleri belirlenmiştir. Yaygın olarak literatürde

SPT'ye bağlı  $V_s$  arasındaki ilişkiler kullanılmaktadır. Sondaj kuyuları için SPT-N değerlerine bağlı kayma dalgası hızı İyisan (1996) denklemi kullanılmıştır. Tüm bu veriler çerçevesinde standart penetrasyon deneyi sonuçları İyisan (1996) ampirik yöntemi ile birlikte değerlendirilmiştir.

#### 2.4. Deprem Kayıtlarının Seçimi

Olası bir depremin mevcut yapı ve bina stoğu üzerinde etkilerinin gerçeğe yakın bir biçimde belirlenmesinde zemin yüzeyindeki deprem özelliklerinin ve olası zemin davranışlarının hesaba katılması gerekmektedir. Bunun yapılabilmesi için zemin kesitinde yer alan zemin tabakaları kapsamlı bir şekilde belirlenmeli, incelenen bölgede sismik tehlike analizleri ile uyumlu ivme zaman kayıtları seçilmeli ve dinamik davranış analizleri yapılmalıdır. Anakaya mostrasındaki yer hareketi olarak TBDY 2018'in önerdiği şekilde 11 farklı gerçek deprem kaydı (1999 Chichi, 1995 Kobe, 1976 Denizli, 1992 Erzincan, 1995 Dinar, 1998 Ceyhan, 1999 Düzce, 1999 Kocaeli, 2003 Bingöl, 2011 Van ve 2019 Denizli) seçilmiştir. Deprem kayıtlarına ait karakteristikler Çizelge 2'de verilmiştir.

*Çizelge 2. Analizlerde kullanılan deprem kayıtları (www.deprem.afad.gov.tr).*

| Deprem Adı                | İstasyon   | Derinlik (km) | PGA (g) | Büyüklik ( $M_w$ ) |
|---------------------------|------------|---------------|---------|--------------------|
| 19/08/1976 Denizli        | 2001       | 20            | 0.35    | 5.0                |
| 13/03/1992 Erzincan       | 2402       | 23            | 0.41    | 6.6                |
| 17/01/1995 Kobe           | Takarazuka | 17.6          | 0.82    | 6.9                |
| 01/10/1995 Afyon/Dinar    | 0302       | 5             | 0.28    | 6.1                |
| 27/06/1998 Adana/Ceyhan   | 0105       | 23            | 0.22    | 6.2                |
| 17/08/1999 Kocaeli        | 4106       | 15.9          | 0.21    | 7.4                |
| 21/09/1999 Tayvan/Chi Chi | TCU        | 8             | 0.18    | 7.3                |
| 12/11/1999 Düzce          | 8101       | 11            | 0.41    | 7.2                |
| 01/05/2003 Bingöl         | 1201       | 6             | 0.55    | 6.1                |
| 23/10/2011 Van            | 6503       | 19.02         | 0.18    | 6.7                |
| 20/03/2019 Denizli        | 2017       | 10.76         | 0.36    | 5.5                |

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e göre deprem yer hareketi düzeyleri, Deprem Yer Hareketi Düzeyi-1 (DD-1), Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2), Deprem Yer Hareketi Düzeyi-3 (DD-3), Deprem Yer Hareketi Düzeyi-4 (DD-4) olarak tanımlanmıştır. Tanımlanan dört farklı yer hareketi düzeyi için deprem verileri, 22.01.2018 tarih ve 2018/11275 sayılı Bakanlar Kurulu kararı ile yürürlüğe konulan Türkiye Deprem Tehlike Haritaları ile tanımlanmıştır. Sahaya özel olarak hazırlanan bu ivme haritalarına T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı



resmi internet sitesinden erişilmiştir (<https://tdth.afad.gov.tr/>). Çalışma alanı analizlerinde kullanmak için her bir deprem yer hareketi düzeyine göre sistem üzerinden elde edilen noktasal ivme değerleri Çizelge 3'de verilmiştir. Bu ivme değerleri çalışma yapılan alandaki birçok noktanın ivme değerleri göz önüne alınarak çalışma alanını temsil edecek şekilde belirlenmiştir.

*Çizelge 3. Çalışma alanının deprem yer hareketi düzeyine göre belirlenen ivme değerleri (<https://deprem.afad.gov.tr/>).*

| Deprem Yer Hareketi Düzeyi           | PGA (g) |
|--------------------------------------|---------|
| DD-1 (Tekrarlanma periyodu 2475 Yıl) | 0.644   |
| DD-2 (Tekrarlanma periyodu 475 Yıl)  | 0.333   |
| DD-3 (Tekrarlanma periyodu 72 Yıl)   | 0.122   |
| DD-4 (Tekrarlanma periyodu 43 Yıl)   | 0.086   |

Gerçek deprem kayıtları, verilen bir tasarım ivme spektrumuna uyumlu olarak zaman tanım alanında veya frekans tanım alanında ölçeklenebilmektedir. Yönetmeliğe uygun olarak seçilmiş olan 11 farklı gerçek deprem kaydı, çalışma alanı için sistem üzerinden elde edilen en büyük ivme değerlerine göre (Çizelge 3) DD-1, DD-2, DD-3 ve DD-4 yer hareketi düzeyine göre DeepSoil analiz programına tanımlanarak bire bir ölçeklendirilmiş ve analizler için her bir kuyu tabanında tanımlanmıştır.

### **2.5. Zemin Davranış Analizlerinde Kullanılan Program ve Parametrelerin Tanıtımı**

Bu çalışmada, bir boyutlu kayma dalgası hızı modeline dayanan, eşdeğer doğrusal analiz ve doğrusal olmayan analiz yöntemleri tercih edilmiştir. İnceleme alanında sahaya özel yüzey deprem özellikleri, sondaj verileri kullanılarak zemin profilleri için bir boyutlu eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan zemin büyütme analizleri için DeepSoil v6.1 programı kullanılarak belirlenmiştir. DeepSoil programı frekans ve zaman alanında çözüm yapabilen bir programdır. Frekans alanında lineer ve eşdeğer doğrusal analizler, zaman alanında ise lineer ve doğrusal olmayan analizler yapabilmektedir. Çalışma alanına özel sönümlenme ve azalım eğrileri oluşturulurken, her derinlik laboratuvar deneylerinden elde edilen zemin parametre değerleri kullanılarak efektif gerilme değerleri tek tek hesaplanarak zemin büyütme analizleri yapılmıştır. Ancak, çalışma bölgesi taban kayasının alt sınıra oranla çok daha derinlerde olmasından dolayı tabakalı zemin modelinde TBDY 2018'e göre yerel zemin sınıfı ZD ve ZE olan zeminlerde, son tabakanın zemin parametreleri anakayaya tanımlanarak analizler yapılmıştır. Bu durumda

deprem etkisi, taban kayası yerine bu tabakanın üstünde tanımlanacak ve yönetmeliğe göre tasarım deprem yer hareketini tanımlayan spektral büyüklükler ZD ve ZE yerel sınıfı için verilen yerel zemin etki katsayıları gözönüne alınarak büyütülmüştür. Bu tabaka ve altındaki zemin ortamı, tek boyutlu zemin profili modelinde uygun geçirgen sınır koşulu kullanılarak idealleştirilmiştir. Analizin hassasiyeti bakımından zemin tabakaları her 1,5 m için alt tabakalara ayrılarak analizler yapılmıştır.

Çalışma bölgesinden elde edilen test sonuçlarına bağlı olarak hedef spektrumla ölçeklenmiş deprem kayıtları kullanılarak örnek bir sondajın doğrusal olmayan ve eşdeğer doğrusal analizleri yapılmıştır. Seçilen bu deprem kayıtları tüm sondaj kuyusunda doğrusal olmayan ve eşdeğer doğrusal analizleri yapılarak zemin profilleri üzerinde DD-1, DD-2, DD-3 ve DD-4 yer hareketlerinin anakaya ivme spektrumları ile birlikte analizler sonucunda belirlenmiş olan yüzey ivme spektrumları oranlanarak zemin büyütme oranları belirlenmiştir.

### 3. BULGULAR

Çalışma alanının gerek zemin özellikleri gerekse de Akşehir-Simav Fay Sistemine yakın bir mesafede bulunması sebebiyle bölgede mevcut halde bulunan yapılar ve sürekli artan yapılaşmadan dolayı detaylı analizlere ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla çalışma bölgesinde 124 sondaj noktasında SPT testlerine ait sonuçlar kullanılarak yapılan zemin davranış analizleri sonucunda çalışma alanının zemin büyütmesi ve pik yer ivmesi değerleri elde edilmiştir. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e göre de çalışma alanının değerlendirilmesi yapılmıştır. Zemin büyütme analizi için doğrusal olmayan ve eşdeğer doğrusal yöntemler kullanılarak her bir deprem yer hareketine göre analizleri yapılmıştır. Bu analiz yöntemlerine göre de çalışma alanının pik yer ivmesi değerleri hesaplanmıştır.

#### 3.1. Zemin Davranış Analizleri İle Belirlenen PGA Değerleri

Yerel zemin şartlarıyla uyumlu bir deprem ivme spektrumu yani belirlenen en büyük pik ivme değeri ve periyodu dinamik yapı analizi için en yaygın kullanılan giriş parametresidir. Pik ivme değeri (PGA) jeolojik veriler yetersiz olduğu zaman yalnız başına zemin tanımlaması için yararlıdır. Bu amaçla çalışma bölgesinin eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemleri ile elde edilmiş olan PGA değerleri verilmiştir.

Elde edilen analizlerin sonucuna göre, toplam gerilmeye bağlı olarak eşdeğer doğrusal analiz yöntemi kullanılan zemin yer tepki analizinde DD-1 ve DD-2 deprem yer hareketlerinde maksimum PGA değerleri sırasıyla 1.20

ve 0.86 g tespit edilirken, efektif gerilmeye bağlı olarak doğrusal olmayan analiz yöntemi kullanan zemin yer tepki analizinde ise PGA değerleri 0.76 ve 0.60 g olarak tespit edilmiştir.

Eşdeğer doğrusal analiz yöntemi kullanılan zemin yer tepki analizinde DD-3 ve DD-4 deprem yer hareketlerinde maksimum PGA değişimi sırasıyla 0.28 ve 0.15 g tespit edilirken, doğrusal olmayan analiz yöntemi kullanan zemin yer tepki analizinde ise 0.56 ve 0.50 g olarak tespit edilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlara göre, kayma modülü sonuçlarına ve sönümleme oranına göre hesap yapabilmek için efektif gerilmenin esas alındığı doğrusal olmayan analiz yönteminin; özellikle de sert kıvamda olmayan veya yumuşak zeminlerde kullanılmasının daha uygun olacağı düşünülmektedir.

### 3.2. Zemin Büyütme Analizi

Bir boyutlu analiz yöntemlerinden olan eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemi kullanılarak çalışma alanının zemin büyütme değerleri, deprem yer hareketlerine göre analizleri yapılmıştır.

#### 3.2.1. DD-1'e Göre Zemin Büyütme Analiz Sonuçları

DD-1 eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarına göre ise en küçük zemin büyütme oranı 1.22 ile Erkmn ve Yeşilyurt mahallelerinde belirlenirken, en büyük zemin büyütme oranı ise 2.63 ile Selçuklu mahallesinde belirlenmiştir. Doğrusal olmayan analiz sonucuna göre de en küçük büyütme oranı Erkmn mahallesinde 0.85 olarak belirlenirken, en büyük zemin büyütme oranı ise 1.45 ile Karşıyaka, Battal Gazi, Ertuğrul Gazi ve Dört Yol mahallelerinde belirlenmiştir.

*Çizelge 4. Deprem yer hareketi DD-1'e göre eşdeğer doğrusal analiz sonuçları.*

| Mahalle Adı    | Eşdeğer Doğrusal Analiz | Doğrusal Olmayan Analiz |
|----------------|-------------------------|-------------------------|
| Erkmn          | 1.22                    | 0.85                    |
| Hasan Karaağaç | 1.32                    | 1.30                    |
| Selçuklu       | 2.63                    | 1.30                    |
| Osman Gazi     | 1.57                    | 1.30                    |
| Karşıyaka      | 1.57                    | 1.45                    |
| Yeşilyurt      | 1.22                    | 1.15                    |
| Battal Gazi    | 1.57                    | 1.45                    |
| Ertuğrul Gazi  | 1.57                    | 1.45                    |
| Orhan Gazi     | 1.92                    | 1.30                    |
| Dört Yol       | 1.92                    | 1.45                    |

### 3.2.2. DD-2'ye Göre Zemin Büyütme Analiz Sonuçları

Eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarına göre en küçük zemin büyütme oranı 1.11 ile Yeşilyurt mahallesinde belirlenirken, en büyük zemin büyütme oranı ise 2.15 ile Orhan Gazi ve Ertuğrul Gazi mahallesinde belirlenmiştir. Doğrusal olmayan analiz sonucuna göre de en küçük büyütme oranı Erkmen, Hasan Karaağaç, Osman Gazi ve Yeşilyurt mahallelerinde 1.00 olarak belirlenirken, en büyük zemin büyütme oranı ise 2.00 ile Ertuğrul Gazi mahallesinde belirlenmiştir.

*Çizelge 5. Deprem yer hareketi DD-2'ye göre eşdeğer doğrusal analiz sonuçları.*

| Mahalle Adı    | Eşdeğer Doğrusal Analiz | Doğrusal Olmayan Analiz |
|----------------|-------------------------|-------------------------|
| Erkmen         | 1.34                    | 1.00                    |
| Hasan Karaağaç | 1.34                    | 1.00                    |
| Selçuklu       | 1.56                    | 1.50                    |
| Osman Gazi     | 1.34                    | 1.00                    |
| Karşıyaka      | 1.34                    | 1.75                    |
| Yeşilyurt      | 1.11                    | 1.00                    |
| Battal Gazi    | 1.34                    | 1.50                    |
| Ertuğrul Gazi  | 2.15                    | 2.00                    |
| Orhan Gazi     | 2.15                    | 1.50                    |
| Dört Yol       | 1.56                    | 1.50                    |

### 3.2.2. DD-3'e Göre Zemin Büyütme Analiz Sonuçları

Eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarına göre en küçük zemin büyütme oranı 0.89 ile Osman Gazi mahallesinde belirlenirken, en büyük zemin büyütme oranı ise 1.37 ile Orhan Gazi mahallesinde belirlenmiştir. Doğrusal olmayan analiz sonucuna göre de en küçük büyütme oranı 0.91 ile Osman Gazi ve Hasan Karaağaç mahallesinde belirlenirken, en büyük zemin büyütme oranı ise 1.33 ile Karşıyaka ve Orhan Gazi mahallelerinde belirlenmiştir.

*Çizelge 6. Deprem yer hareketi DD-3'e göre eşdeğer doğrusal analiz sonuçları.*

| Mahalle Adı    | Eşdeğer Doğrusal Analiz | Doğrusal Olmayan Analiz |
|----------------|-------------------------|-------------------------|
| Erkmen         | 1.10                    | 1.22                    |
| Hasan Karaağaç | 1.10                    | 0.91                    |
| Selçuklu       | 1.10                    | 1.12                    |
| Osman Gazi     | 0.89                    | 0.91                    |
| Karşıyaka      | 1.10                    | 1.33                    |
| Yeşilyurt      | 1.10                    | 1.12                    |
| Battal Gazi    | 0.99                    | 1.01                    |
| Ertuğrul Gazi  | 1.10                    | 1.12                    |
| Orhan Gazi     | 1.37                    | 1.33                    |
| Dört Yol       | 1.10                    | 1.12                    |

### 3.2.2. DD-4'e Göre Zemin Büyütme Analiz Sonuçları

Eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarına göre en küçük zemin büyütme oranı 0.88 ile Osman Gazi ve Hasan Karaağaç mahallelerinde belirlenirken, en büyük zemin büyütme oranı ise 1.29 ile Selçuklu ve Orhan Gazi mahallelerinde belirlenmiştir. Doğrusal olmayan analiz sonucuna göre de en küçük büyütme oranı 0.89 ile Osman Gazi ve Hasan Karaağaç mahallelerinde belirlenirken, en büyük zemin büyütme oranı ise 1.25 ile Karşıyaka ve Selçuklu mahallelerinde belirlenmiştir.

*Çizelge 7. Deprem yer hareketi DD-4'e göre eşdeğer doğrusal analiz sonuçları.*

| Mahalle Adı    | Eşdeğer Doğrusal Analiz | Doğrusal Olmayan Analiz |
|----------------|-------------------------|-------------------------|
| Erkmen         | 1.17                    | 1.16                    |
| Hasan Karaağaç | 0.88                    | 0.89                    |
| Selçuklu       | 1.29                    | 1.25                    |
| Osman Gazi     | 0.88                    | 0.89                    |
| Karşıyaka      | 1.07                    | 1.25                    |
| Yeşilyurt      | 1.07                    | 1.07                    |
| Battal Gazi    | 0.98                    | 0.98                    |
| Ertuğrul Gazi  | 1.07                    | 1.07                    |
| Orhan Gazi     | 1.29                    | 1.16                    |
| Dört Yol       | 1.07                    | 1.16                    |

### 3.3. Zemin Büyütme Analiz Sonuçlarının TBDY 2018'e Göre Değerlendirilmesi

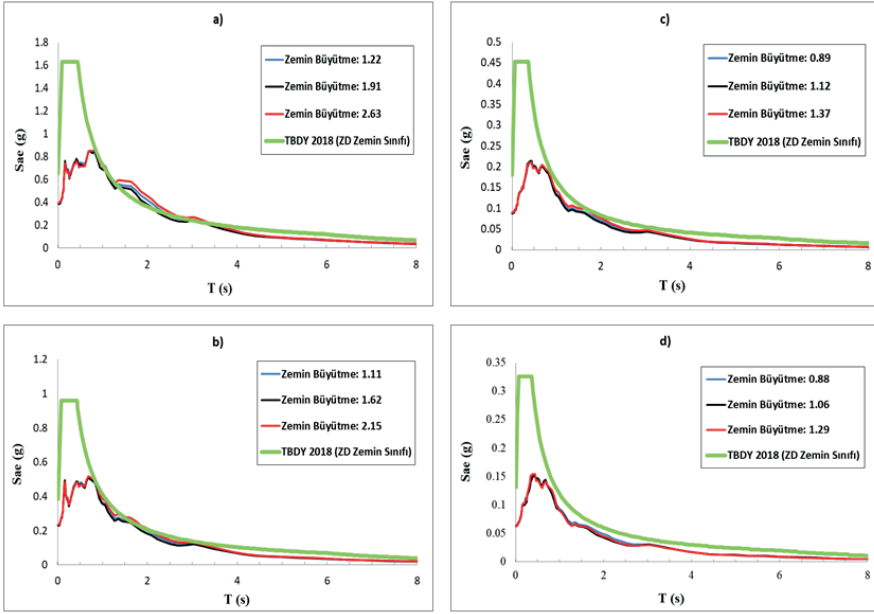
Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde çalışma alanı için tarif edilen zeminle ilgili değerlendirmeler dikkate alınarak elde edilen spektrum grafiği ile büyütme analizleri sonrası elde etmiş olduğumuz spektrum grafikleri karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışma alanının yerel zemin sınıfı  $V_s$ 'ye bağlı olarak ZD olarak tespit edilmiştir. ZD yerel zemin sınıfına göre Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması üzerinden DD-1, DD-2, DD-3 ve DD-4 deprem yer hareketlerine göre ayrı ayrı yatay elastik tasarım spektrumları alınmıştır. Sonuçlar DD-1, DD-2, DD-3 ve DD-4 deprem yer hareketleri düzeyine göre 11 ayrı deprem kaydının ortalaması şeklinde verilmiştir. Analizler sonucunda deprem yer hareketine göre elde edilmiş olan küçük, orta ve büyük zemin büyütmenin olduğu sondaj kuyularındaki spektrumlar seçilerek ilgili deprem yer hareketinin yatay elastik spektrumu ile ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Analizlerin, yönetmeliğe göre karşılaştırılması eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler kendi içerisinde deprem yer hareketleri değerlendirmeye alınmıştır.

#### 3.3.1. Eşdeğer Doğrusal Yöntemi Zemin Büyütme Analiz Sonuçlarının TBDY 2018'e Göre Değerlendirilmesi

Eşdeğer doğrusal analizler sonuçlarından Şekil 2-a grafiğine bakıldığında DD-1 yer hareketi için çalışma bölgesinde yapmış olduğumuz analizler; 1.2 sn'ye kadar olan spektral ivme değerleri öngörülen yönetmeliğin altında kaldığı, 1.2-2.7 sn arasındaki spektral ivme değerleri yönetmeliğin ön gördüğü değerlerden yüksek olduğu, 2.7 sn sonrasındaki spektral ivme değerleri ise yönetmeliğin altında kaldığı anlaşılmaktadır.

Şekil 2-b,c,d grafiğine bakıldığında sırasıyla DD-2, DD-3 ve DD-4 deprem yer hareketleri için yapmış olduğumuz analiz sonuçları ile yönetmeliğin ön görmüş olduğu spektral ivme değerlerinin uyduğu grafiklerden anlaşılmaktadır.





Şekil 2. Eşdeğer doğrusal yöntem zemin büyütme analiz sonuçlarının TBODY 2018'e göre değerlendirilmesi a)DD-1 deprem yer hareketine göre b)DD-2 deprem yer hareketine göre c)DD-3 deprem yer hareketine göre d)DD-4 deprem yer hareketine göre.

TBDY 2018'e göre binanın hakim doğal titreşim periyodu farklı denklemlerle belirlenmektedir. Çalışma alanı için yapının tahmini periyodu yönetmelikte belirtilen (Denklem 1) ampirik yöntemiyle hesaplanmaktadır.

$$T_{pA} = C_t \cdot H_N^{3/4} \quad (1)$$

$T_{pA}$ : Binaın hakim doğal titreşim periyodu(s)

$H_N$  = Binaın bodrum katlarının üstündeki üst bölümünün toplam yüksekliği(m)

Yönetmeliğe göre, taşıyıcı sistemi sadece betonarme çerçevelerden oluşan binalarda  $C_t$ :0.1 olarak, çelik çerçevelerden veya çaprazlı çelik çerçevelerden oluşan binalarda  $C_t$ :0.08 alınırken diğer tüm binalarda  $C_t$ :0.07 alınacaktır. Çalışma alanı içerisindeki yapılar betonarme çerçevelerden oluştuğu için  $C_t$  değeri 0.1 alınmıştır. Çalışma alanı için 2, 5, 10, 15, 20 ve 25 katlı yapılar için tahmini doğal titreşim periyodu hesaplarak deprem yer hareketlerine

göre, hem eşdeğer analiz sonucu için hem de yönetmelik için değerler hesaplanarak Çizelge 8'de verilmiştir.

Örneğin çalışma alanında bulunan 5 katlı bir bina için yapının hakim doğal titreşim periyodu yönetmelikteki denkleme göre 0.76 sn hesaplanmıştır. Bu yapı için; deprem yer hareketi DD-2 için yönetmeliğin ön gördüğü spektral ivme değeri 0.55 g, eşdeğer doğrusal analiz sonucunda spektral ivme değerinin 0.50 g olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 8).

*Çizelge 8. Kat adedine göre yapı titreşim periyodunun yönetmeliğe ve eşdeğer doğrusal analiz yöntemine göre karşılaştırılması.*

| Kat Sayısı | Tahmini Yapı Periyodu (T) | TBDY 2018 $S_a(g)$ |      |      |      | DeepSoil Eşdeğer Doğrusal Analiz $S_a(g)$ |      |      |      |
|------------|---------------------------|--------------------|------|------|------|---|------|------|------|
|            |                           | DD-1               | DD-2 | DD-3 | DD-4 | DD-1                                      | DD-2 | DD-3 | DD-4 |
| 2          | 0.38                      | 1.63               | 0.95 | 0.41 | 0.30 | 0.74                                      | 0.46 | 0.20 | 0.15 |
| 5          | 0.76                      | 0.96               | 0.55 | 0.22 | 0.16 | 0.84                                      | 0.50 | 0.19 | 0.13 |
| 10         | 1.28                      | 0.55               | 0.32 | 0.12 | 0.09 | 0.57                                      | 0.28 | 0.10 | 0.06 |
| 15         | 1.73                      | 0.41               | 0.23 | 0.09 | 0.06 | 0.54                                      | 0.25 | 0.09 | 0.05 |
| 20         | 2.15                      | 0.33               | 0.19 | 0.07 | 0.05 | 0.40                                      | 0.18 | 0.06 | 0.04 |
| 25         | 2.54                      | 0.28               | 0.16 | 0.06 | 0.04 | 0.30                                      | 0.14 | 0.05 | 0.03 |

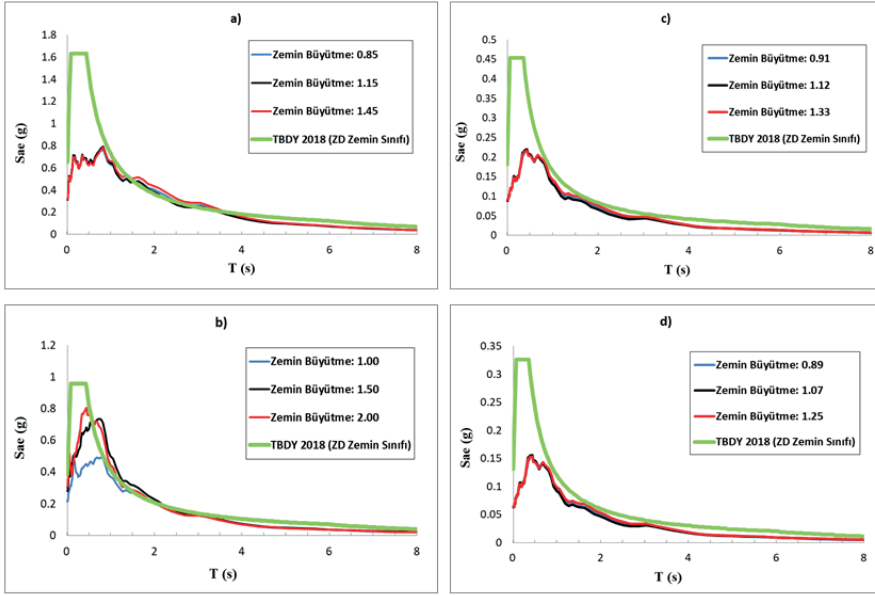
### 3.3.2. Doğrusal Olmayan Yöntemi Zemin Büyütme Analiz Sonuçlarının TBDY 2018'e Göre Değerlendirilmesi

Doğrusal olmayan analiz sonuçlarından Şekil 3-a grafiğine bakıldığında DD-1 yer hareketi için çalışma bölgesinde yapmış olduğumuz analiz sonuçları; 1.3 sn'ye kadar olan spektral ivme değerleri öngörülen yönetmeliğin altında kaldığı, 1.3-3.1 sn arasındaki spektral ivme değerleri yönetmeliğin ön gördüğü değerlerden yüksek olduğu, 3.1 sn sonrasındaki spektral ivme değerleri ise yönetmeliğin altında kaldığı anlaşılmaktadır.

Şekil 3-b grafiğine bakıldığında DD-2 yer hareketi için çalışma bölgesinde yapmış olduğumuz analiz sonuçları; 0.6 sn'ye kadar olan spektral ivme değerleri öngörülen yönetmeliğin altında kaldığı, 0.6-2.1 sn arasındaki spektral ivme değerleri yönetmeliğin ön gördüğü değerlerden yüksek olduğu, 2.1 sn sonrasındaki spektral ivme değerleri ise yönetmeliğin altında kaldığı anlaşılmaktadır.

Şekil 3-c,d grafiğine bakıldığında sırasıyla DD-3 ve DD-4 deprem yer hareketleri için yapmış olduğumuz analiz sonuçları ile yönetmeliğin ön

görmüş olduğu spektral ivme değerlerinin altında kaldığı, belirli zaman aralıklarında ise uyuştugu anlaşılmaktadır.



**Şekil 3. Doğrusal olmayan yöntem zemin büyütme analiz sonuçlarının TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi a) DD-1 deprem yer hareketine göre b) DD-2 deprem yer hareketine göre c) DD-3 deprem yer hareketine göre d) DD-4 deprem yer hareketine göre.**

TBDY 2018'e göre çalışma alanı için yapının hakim doğal titreşim periyodu denklem 1'e göre hesaplanmıştır. Çalışma alanının için 2, 5, 10, 15, 20 ve 25 katlı yapılar için tahmini doğal titreşim periyodu hesaplanarak deprem yer hareketlerine göre, hem eşdeğer analiz sonucu için hem de yönetmelik için değerler hesaplanarak Çizelge 9'da verilmiştir.

Örneğin çalışma alanında bulunan 5 katlı bir bina için yapının hakim doğal titreşim periyodu yönetmelikteki denkleme göre 0.76 sn hesaplanmıştır. Bu yapıda; deprem yer hareketi DD-2 için yönetmeliğin ön gördüğü spektral ivme değeri 0.55 g, doğrusal olmayan analiz sonucunda spektral ivme değerinin 0.67 g olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 9).

**Çizelge 9. Kat adedine göre yapı titreşim periyodunun yönetmeliğe ve doğrusal olmayan analiz yöntemine göre karşılaştırılması.**

| Kat Sayısı | Tahmini Yapı Periyodu (T) | TBDY 2018 $S_a(g)$ |      |      |      | DeepSoil Doğrusal Olmayan Analiz $S_a(g)$ |      |      |      |
|------------|---------------------------|--------------------|------|------|------|---|------|------|------|
|            |                           | DD-1               | DD-2 | DD-3 | DD-4 | DD-1                                      | DD-2 | DD-3 | DD-4 |
| 2          | 0.38                      | 1.63               | 0.95 | 0.41 | 0.30 | 0.67                                      | 0.77 | 0.21 | 0.15 |
| 5          | 0.76                      | 0.96               | 0.55 | 0.22 | 0.16 | 0.76                                      | 0.67 | 0.19 | 0.13 |
| 10         | 1.28                      | 0.55               | 0.32 | 0.12 | 0.09 | 0.55                                      | 0.34 | 0.10 | 0.07 |
| 15         | 1.73                      | 0.41               | 0.23 | 0.09 | 0.06 | 0.42                                      | 0.27 | 0.09 | 0.06 |
| 20         | 2.15                      | 0.33               | 0.19 | 0.07 | 0.05 | 0.38                                      | 0.19 | 0.06 | 0.04 |
| 25         | 2.54                      | 0.28               | 0.16 | 0.06 | 0.04 | 0.32                                      | 0.16 | 0.05 | 0.03 |

Elde edilen sonuçlar her bir sondaj kuyusu için olup genel bir yaklaşımı anlatmamaktadır. Farklı sondaj kuyuları incelendiğinde kat sayısı ve deprem yer hareketine göre farklılık gösterdiği, elde edilen analiz sonuçlarının yönetmeliğin önerdiği spektral ivmenin üstünde veya altında kaldığı durumlar tespit edilmiştir. Şekil 2 ve Şekil 3 incelendiğinde her iki analiz yönteminde de zemin büyütme oranı arttıkça spektral ivme değerleri, yönetmeliğin önermiş olduğu spektral ivme değerinin üzerine çıktığı görülmektedir. Çalışma alanında yapılacak olan yapıların tasarımı noktasında proje danışmanlarına veya mühendislere yol gösterecek rehber niteliğinde sonuçlar doğuracağı anlaşılmaktadır. Yapılan analizler ve elde edilen sonuçlar, çalışma alanının genel yapısını ortaya koyduğundan, bu konuda çalışan araştırmacılara bölgenin sismitesi hakkında bilginin yanında zaman ve maliyet kazandırmaktadır. Bu nedenle bu çalışma sonucu elde edilen büyütme değerleri ve karşılaştırmalı analizler, afet öncesi risk belirleme ve azaltma çalışmaları kapsamında, güvenli yapıların inşası için kullanılabilir veri sağlamaktadır.

#### 4. DEĞERLENDİRME ve SONUÇLAR

Bu çalışmada, Afyonkarahisar ilinin merkez UyduKent bölgesinin zemin özellikleri, jeofizik, geoteknik ve jeolojik verilerin birlikte değerlendirilmesi esasına göre detaylandırılmış ve inceleme alanı geoteknik açıdan değerlendirilmiştir. Çalışma alanı ve çevresinin deprem riski araştırılarak, olası depremlerde çalışma alanında meydana gelebilecek yer hareketlerine göre analizleri yapılmıştır. Çalışma alanında yer alan ve sondaj verileri üzerinde doğrusal olmayan ve eşdeğer doğrusal zemin büyütme analizleri gerçekleştirilmiştir.

Depremlerin meydana gelmesi beklenen yerlere yakın yerleşimlerde, zemin büyütmesinin yapılara zararlarının tahmin edilmesi can kayıplarını azaltması bakımından önemlidir. Bunun ekonomik yönü de göz ardı edilmemelidir. Zemin büyütmelerinin olduğu geldiği yerlerde çok ciddi alt ve üst yapı hasarlarının olduğu geçmişte meydana gelen depremlerde açıkça görülmüştür. Yeni yerleşim yerlerinin belirlenmesinde veya mevcut yerleşim yerlerinde önlem amaçlı yapılacak zemin dinamik davranışının belirlenmesi oldukça önemlidir.

Çalışma alanında eşdeğer doğrusal zemin davranış analizi için PGA değişimi deprem yer hareketlerine göre 0.45-1.20g (DD-1), 0.26-0.86g (DD-2), 0.10-0.28g (DD-3) ve 0.06-0.15g (DD-4) olarak belirlenmiştir. Doğrusal olmayan zemin davranış analizi için PGA değişimi deprem yer hareketlerine göre 0.33-0.76 (DD-1), 0.23-0.60 (DD-2), 0.09-0.56 (DD-3) ve 0.07-0.50 (DD-4) olarak belirlenmiştir. Elde edilen tüm sonuçlara göre, kayma modülü sonuçlarına ve sönümleme oranına göre hesap yapabilmek için efektif gerilmenin esas alındığı doğrusal olmayan analiz yönteminin; özellikle de sert kıvamda olmayan veya yumuşak zeminlerde kullanılmasının daha uygun olacağı düşünülmektedir.

Zemin büyütme analizi sonuçları incelendiğinde, bazı mikrobölgelerde doğrusal olmayan analizlerde iki kat, eşdeğer doğrusal analizlerde ise üç kata varan oranlarda zemin büyütmeleri olduğu tespit edilmiştir. Tespit edilen bu büyütme, yerel zemin koşullarının deprem yer hareketleri üzerindeki etkilerinin varlığını doğrulamaktadır. Sondaj kuyularına göre zemin büyütmesi değerlerinin hesaplanması için doğrusal olmayan analiz yönteminin uygun olduğunu göstermektedir. Doğrusal olmayan analiz yönteminin kullanılması, deprem etkisi altında yapı temelini tasarımı, yerel zemin sınıflarının tanımlanması, istinat yapıları ve yamaçların (şevlerin) tasarımında kullanılacak zemin parametrelerinin belirlenmesindeki maliyeti azaltacağı düşünülmektedir.

Çalışma alanının alüvyon yapısı ve yeraltı su seviyesinin yüksek olması, deprem etkisiyle birlikte yer hareketlerini önemli ölçüde etkileyebileceği gözlenmiştir. Bu nedenle önemli yapılar için sahaya özel bir tasarım yaklaşımının benimsenmesi gerekmektedir. Çalışma alanında yapılan zemin büyütme analizleri bina kat sayısı ve deprem yer hareketine göre farklılık gösterdiği, elde edilen analiz sonuçlarının yönetmeliğin önerdiği spektral ivme değerinin üstünde veya altında kaldığı durumlar tespit edilmiştir. Her iki analiz yönteminde de zemin büyütme oranı arttıkça spektral ivme değerleri, yönetmeliğin önermiş olduğu spektral ivme değerinin üzerine çıktığı görülmektedir. Özellikle zemin büyütmesi değerlerinin yüksek olduğu

Ertuğrul Gazi, Orhan Gazi ve Selçuklu mahallelerinde inşa edilecek 5, 10 ve 15 katlı yapılarda mevcut yönetmeliğin ön gördüğü yatay elastik spektrum yerine sahaya özel analizler neticesinde elde edilecek tasarım spektrumunun kullanılmasının önemli olduğu düşünülmektedir.

Zemin büyütmesi sonucu ortaya çıkan diğer bir önemli sonuç da tasarım sağ uç köşe periyodunun sahaya ait sonuçlara göre düşük kalması ve orta-yüksek hakim periyoda sahip binaların sismik tasarımlarının eksik hesaplanması sonucunu doğurmaktadır. Tasarımın spektrumunu oluşturan ana parametreler (SDS, TA ve TB) hesaplanırken parametrik/istatistiksel yaklaşımların yanında sahaya özel analizlerle doğrulanmalıdır. TBDY 2018'e göre sahaya özel zemin davranış analizleri sadece ZF sınıfı olarak tanımlanan zeminlerde değil diğer zemin sınıflarında da yapılması önem arz etmektedir. Yönetmelikte bahsedildiği gibi bu tür analizler, proje mühendisinin tercihine bırakılmamalıdır. Çalışma alanında yapılacak olan yeni yapıların tasarımı noktasında proje danışmanlarına veya mühendislere yol gösterecek rehber niteliğinde sonuçlar doğuracağı anlaşılmaktadır.



## Kaynaklar

- Akın, M., Ozvan, A., Akın, K. M., Topal, T., 2013, Evaluation of Liquefaction in Karasu River Floodplain After the October 23, 2011, Van (Turkey) Earthquake, *Natural Hazards*, 69, 1551-1575.
- Akın, M.K., Akın, M., Akkaya, İ., Özvan, A., Üner, S., Selçuk, L., vd., 2015, Mikrobölgeleme Çalışmasına Altlık Oluşturmak Üzere Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Kampüs Zemininin Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi* 39, 1-26.
- ASTM D1586-99, 1999, Standart Penetrasyon Testi, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Aydoner, C., Maktav, D., 2013, Settlement Suitability Analysis In Terms of Earthquake, *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 6, 53-62.
- Bayrakçı, E., Pekkan, E., Avdan, U., Güney, Y., 2013, Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Sondaj Derinliğinin Sıvılaşma Analizine Etkisinin Belirlenmesi (Eskişehir Örneği), *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2, 50-60.
- Değerliyurt, M., 2014, Settlement Suitability Analysis of Local Ground Characteristics In Iskenderun: A Case Study, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 120, 637-644.
- Hashash, Y. M. A., Musgrove, M. I., Harmon, J. A., Groholski, D. R., Phillips, C. A., 2016, DeepSoil v6.1, User Manual.
- Iswanto, E.R., Yee, E., 2016, Comparison of Equivalent Linear and Non Linear Methods on Ground Response Analysis: Case Study at West Bangka Site, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 18, 23-29.
- İyisan, R., 1996, Zeminlerde Kayma Dalgası Hızı ile Penetrasyon Deney Sonuçları Arasındaki Bağlıntılar, *İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi*, 1187-1199.
- Kavurmacı, M., 2017, Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) Kullanılarak Sıvılaşma Riskinin Değerlendirilmesi: Aksaray Örneği, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi*, 23, 303-311.
- Kramer, S.L., 1996, *Geotechnical Earthquake Engineering*, PrenticeHall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Kurnaz, T.F., Ramazanoglu, S., 2014, The Interrogation of Settlement Suitability by Using GIS, A Case Study In Esenler (Istanbul), *Sakarya University Journal of Science*, 18, 171-182.
- Özdağ C., Gönenç T., Akgün M., 2015, Dynamic Amplification Factor Concept of Soil Layers: A Case Study in İzmir (Western Anatolia), *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 10093-10104.
- Özkan M.Y., 2017, *Zemin Dinamiğine Giriş*, Nobel Yayın Dağıtım, 316, Ankara.

- Özyazıcıoğlu, M., Dönmezçelik, K., Orhan, S.N., Özkan, M.Y., 2019, Erzincan İli Zemin Büyütme Etkilerine Dayalı Mikrobölgeleme Çalışması, Artvin Çoruh Üniversitesi Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 5, 247-256.
- Saita, J., Nakamura, Y. and Sato, T., 2012, Liquefaction Caused by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and the Result of the Prior Microtremor Measurement, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal.
- Subaşı, O., Haşal, M., Özaslan, B., İyisan, R., Yamanaka, H., Chimoto, K., (2019), Bir Boyutlu Dinamik Analiz ve Mikrotremor Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması, Teknik Dergi, 552, 9459-9481.
- Tunçel, A., Özdağ, Ö.C., Pamuk, E., Akgün, M., 2019, Mikrotremor Verisi Kullanılarak Zeminlerin Dinamik Büyütme Faktörü Değerlerinin Hesaplanması: İzmir (Kuzey) Örneği, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34, 43-52.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY), 2018, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Resmi Gazete, Tarih: 18 Mart 2018, 30364.
- Ulusay, R., 2000, Zemin Sıvılaşması, Mavi Gezegen Popüler Yerbilim Dergisi, 2, 47-54.

### İnternet Kaynakları:

- 1) AFAD, 2018, <https://deprem.afad.gov.tr>