Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Suleyman Demirel University
Journal of Natural and Applied Science

19(2), 24-38, 2015

Deprem Ağır Hasar Alanlarının Önceden Belirlenmesi ve Şehir Planlaması için Makro ve Mikro Bölgelendirmelerin Önemi

Osman UYANIK*[1]
[1]Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği, 32200, Isparta

(Alınış Tarihi: 13.02.2015, Kabul Tarihi: 11.06.2015)

Anahtar Kelimeler
Deprem
Yerleşim yeri
Makro-mikro bölgeleme
Dinamik parametreler.

Özet: Depremde belirli alanlarda çok fazla ağır hasarlar oluşurken diğer alanlarda daha az veya hiç hasar olmamaktadır. Bu durum yerleşim yeri ve civarının derin yeraltı yapısıyla birlikte yüzeydeki zemin özelliklerinin detaylı olarak araştırılmasını gerektirir. Geçmiş depremler ve bu depremlerin ağır hasarlı alanları incelendiğinde, bu durumun, yer içinin yapısal özelliklerinden kaynaklandığı görülmektedir. Bu nedenle, ülkemizde yapılan yakın-yüzey zemin etütlerinin ağır hasar alanlarının belirlenmesinde tek başına bir anlam ifade etmeyeceği açıktır. Bu yüzden yerleşim yerlerinin makro ve mikro bölgelendirme çalışmaları yapılmalıdır. Daha sonra yakın-yüzey zemin etüt çalışmalarının yapılması doğru olacaktır. Bu çalışmada, dünya üzerinde ağır hasar görülen alanlarda yapılan makro bölgelendirme çalışmalarından faydalanılarak, Burdur bölgesinde yapılan makro ve mikro bölgelendirme çalışmalarına değinilecek ve bu çalışmalar ile deprem olmasını beklemeden ağır hasarlı alanların önceden belirlenmesinin hayati önemi ortaya konulacaktır. Bu çalışmalar, bir şehrin planlanması, planlanmış şehirlerin revizyonu ve var olan yapıların güçlendirme maliyetlerini azaltacağı için, şehirler açısından önem taşımaktadır.

Predetermination of Earthquake Heavy Damage Areas and Importance of Macro and Micro Zoning for Urban Planning

Keywords
Earthquake
Settlement
Macro-micro zoning
Dynamic parameters.

Abstract: Some specific areas are affected too much during the earthquakes while some other areas are influenced much less or not. Characteristics of this situation require soil properties of surfaces with deep underground structure of settlements and investigation of its surrounding in detail. When the ancient earthquakes and heavily damaged areas of these earthquakes were examined, it was observed that this situation is related to the structural features of interior ground. Therefore, it is quite clear that application of a near-surface ground survey will not express a meaning alone for the determination of the heavily damaged areas in our country. Therefore macro-zoning (the seismic focus depend on bed rock topography, sequential reflections in seismic energy trap) and micro-zoning (Shear wave velocities, predominant periods, soil amplification, acceleration, liquefaction, areas of forming surface waves etc. geotechnical parameters) studies of settlement areas should be performed. After these, making near-surface ground surveys will be more accurate. In this study, by make use of sample macro zoning studies performed in heavily damaged areas on the world will be presented on the macro- and micro-zoning studies performed in Burdur region and the vital importance of previously determined heavily damaged areas out of occurrence of earthquake will be presented by interpreting these studies. Such studies have vital importance for development plans of a city, so revision of the planned cities and strengthening costs of the existing structure will be reduced.

*İlgili yazar: osman.uyanik@gmail.com

1. Giriş

Dünyanın birçok bölgesinde oluşan depremlerle etkilenen sahalarda farklı hasarlar gözlenmektedir. Yapılarda hasar oluşturan depremlerdeki en önemli etkenler; depremin büyüklüğü, mekanizması, yeri ve süresi gibi faktörlerin yanı sıra deprem dalgalarının yayıldığı ortamın fiziksel ve yapısal özellikleri ile o ortamın bölgesel davranış özellikleridir. Bu ortamların, oluşan deprem dalgalarını iletme karakteri, dinamik elastik özellikleri, deprem salınımlarını soğurma ve genleştirme gibi etkileri, taban topografyasından kaynaklı deprem dalgalarının odaklama etkisi, düşük hız tabakalarında deprem dalgalarının ardışık yansımaların bir bölgeye kanalize olması gibi bazı durumlar ortamın bölgesel özelliklerini oluşturur. Mühendislik yapıları üzerine etkiyi büyük ölçüde bu özellikler yansıtır.

Belirli bir yerdeki elastik dalga titreşimin süresi ve şiddeti, deprem kaynağına olan uzaklığa, depremin büyüklüğüne ve o yerin zemin özellikleri gibi birçok faktöre bağlıdır (Bullen ve Bolt, 1985). Kaynaktan yayılan sismik dalgalar zemin tabakalarına erişinceye kadar, kabuğu oluşturan ana kaya içinde kilometrelerce yol almalarına karşın, zemin tabakaları içinde aldıkları yol genellikle 100m'den daha azdır. Fakat zemin tabakaları, yeryüzünde gözlenen hareketin özelliklerini belirlemekte önemli role sahiptir. Zemin tabakaları sismik dalgalar için bir süzgeç gibidir. Bazı frekanslardaki sismik dalgalar sönümlendirilirken bazıları da büyütülür.

Yumuşak zeminlerde deprem hareketinin genliğinin artmasının başlıca nedeni zemin ile onun altındaki ana kaya arasındaki sismik empedans farkıdır. Sismik empedans, tanecik hareketine karşı ortam direncinin bir ölçüsü olarak düşünülebilir (Aki ve Richards, 1980). Buradan hareketle, zemin büyütmelerinde ana kaya ile üstteki tabakaların sismik hız değerlerinin ve hakim periyotlarının önemi ortaya çıkmaktadır.

Gevşek, bol gözenekli jeolojik koşullar sismik dalga genliğini büyütmektedir. Bu nedenle gevşek ve bol gözenekli birimler sıkı ve sert kayalara göre daha çok sarsılmaktadır. Zeminin sıkılık veya gevşekliğini belirlemek için jeoteknik deneylerin dışında kayma dalga ölçümleri de etkin olarak kullanılmaktadır. Küçük kayma dalga hızına sahip zeminler deprem sarsıntısını büyüterek daha büyük hasara neden olmaktadır.

Bilindiği üzere mühendislik yapısı, kurulduğu ortama statik olarak etki yapmaktadır ve ortamın dengesini bozmaya çalışmaktadır. Aynı zamanda bu ortamın da bir parçasıdır. Dolayısıyla yapının yapılacağı ortamın bilinmesi ve mühendislik yapısı ile ortamın dengelerinin kurulması gerekmektedir. Bu dengeyi oluşturabilmek için deprem dalgalarının zemindeki yayılımı ve salınımı, yeraltı yapısının deprem dalgalarına göstereceği direnç ve dinamik özellikleri bilinmelidir (Uyanık vd., 2006).

Yapılaşma alanı olan bir bölgede meydana gelebilecek bir depremin yaratacağı etkiler belirlenmeye çalışıldığında, bu bölgenin zemin özelliklerinin yapılara nasıl etki edeceği ve bu etkilerin değişiminin bilinmesi çok önem kazanmaktadır. Dolayısıyla deprem sonucunda hasarların azaltılabilmesi için dinamik kuvvetler altında farklı davranış gösterecek bölgelerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda yapılan jeoteknik çalışmalar ile daha az hasar görebilecek zeminler belirlenebilmektedir. Bu çalışmada dünyada gerçekleşen depremler sonucunda ağır hasarlı alanların nedenleri örnekler ile açıklanmaya çalışılacaktır. Ayrıca Burdur ve Isparta bölgeleri için yapılan bazı mikro bölgelendirme çalışmaları ve buna bağlı ağır hasar alanları mikro bölgelendirme haritaları ile ortaya konularak tartışılacaktır.

2. Ağır Hasar Alanlarının Önceden Belirlenmesi

Depremde ağır hasarlı alanların önceden belirlenmesi için deprem parametreleri ve yerel zemin koşullarının bilinmesi hayati önem taşımaktadır. Deprem parametreleri olarak depremin uzaklığı, odak derinliği, büyüklüğü, süresi, ivmesi ve fayın geometrisi gibi parametrelerin bilinmesi deprem senaryoları açısından önemlidir. Deprem hasarında yerel zemin koşullarının etkisi düşünüldüğünde; zemin sıvılaşması, zemin büyütmesi, zemin hakim titreşim periyodu ve yapı periyodu, zeminin ivme değeri, alüvyon kalınlığının etkisi, zeminin taşıma gücü, zeminin Vs(30) değeri, zeminin türü ve bunun gibi parametrelerin belirlenmesi gereklidir.

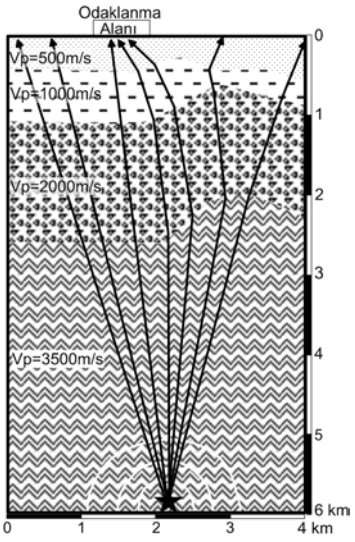
Günümüzde önceden deprem tahmini mümkün değildir, ancak deprem ağır hasar mevkilerinin tahmini mümkündür. *Bunun için büyük bir **deprem** beklemeye gerek yoktur.* Depremde ağır hasar alanların önceden belirlenmesi için üç aşamalı çalışmalar yapılması gereklidir. Bu aşamalar makro bölgelendirme, mikro bölgelendirme ve parsel bazında çalışmalar olarak sıralanabilir.

2.1. Makro Bölgelendirme

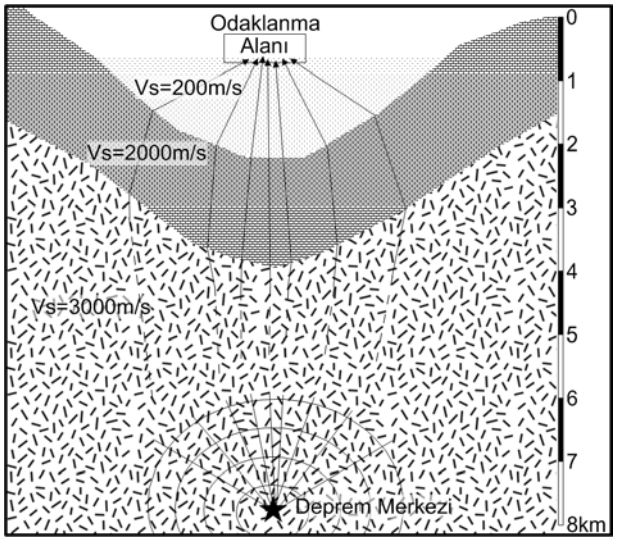
Makro bölgeleme için derin yeraltı yapısının çözümlenmesi gereklidir. Eğer yerin içyapısının fiziksel ve yapısal özellikleri homojen olsaydı deprem dalgalarının yeryüzünde dairesel bir şiddet dağılımı göstermesi gerekirdi. Birçok araştırmacı dünyadaki birçok depremde kaya veya zemin olan sahalarda ağır hasarlar oluşabilirken gevşek zeminlerde çok daha az hasar olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar bu hasarın yeraltının heterojen yapısal özelliklerinin deprem hasar şiddetini artırmasından kaynaklandığı sonucunu elde etmişlerdir. Motosaka ve Nagana (1997) 1995 Kobe depreminde deprem dalgalarının odaklama yaparak ağır hasarlı alanlar oluşturduğunu belirtmiştir. Ayrıca, Alverez (1990), 1985 Mexico City depreminde depremin merkezinden 400km uzakta olan şehirde 2m eninde 1.5km uzunluğunda bir

alanın çökmesiyle ağır hasarlı alan oluştuğunu belirtmiştir. Bu durum, kireçtaşı içerisindeki düşük hızlı bir seviyede ardışık yansımaların oluşması ve şehrin altında derin bir kanyonun varlığının jeofizik yöntemler ile belirlenmesiyle açıklanmıştır (Keçeli, 2009).

Yer içi yapısının durumuna bağlı olarak deprem dalgaları yönlenmektedir. Özellikle derindeki anakaya topografyasının ondülasyonlu yapısı deprem dalgalarını odaklar ya da dağıtır. Bu yüzden deprem dalgalarının hangi alanlara odaklandığı yer içyapısının çözümlenmesi ile ortaya konulabilir. USGS (2000) de deprem dalgalarının, derindeki ondülasyonlu arayüzeyden geçerken dalga hızlarının ve yöneliminin değiştiğini ve yüzeye yakın ondülasyonlu arayüzeyde tekrar değiştiğini belirtmiştir. Dolayısıyla, derin ve yakın-yüzey yeraltı yapısı ve tabakaların yanal yöndeki yayılım şekli deprem dalgalarını yönlendirerek odaklama ya da saçılma yapmaktadır. Odaklama bölgeleri ağır hasarlı alanları oluştururken, saçılma bölgeleri sarsıntı şiddetini %75 civarında azaltmaktadır. Bunun dışında gevşek ve suya doygun kalın zeminler, sismik dalga genliğini büyülterek, daha fazla sarsılmaktadırlar. Zeminlerin sıkılığı ya da gevşekliğini belirlemek için kayma dalga hızının belirlenmesi gerekmektedir. Böylece gevşek suya doygun zeminlerin alanı çok rahat belirlenebilir. Havza altındaki taban kayanın içbükey olması durumunda deprem dalgaları odaklama yaparak ağır hasarlı alanları oluştururken dışbükey topografya deprem dalgalarını saçarak hasarsız ya da az hasarlı bölgeleri meydana getirmektedir (Şekil 1 ve 2). Buna ek olarak, sismik dalgaların düşey ve yanal yöndeki sismik hız farklılıklarından kaynaklı yansıyan ve kırılan dalgalar belirli alanlarda toplanarak ağır hasarlı alanları oluşturabilmektedir. Ayrıca yakın yüzeyde yüzey dalgalarını oluşturan alanlarda da ağır hasarlar oluşmaktadır.



Şekil 1. Odaklanma ve saçılma etkilerinin bilgisayar simulasyonu (USGS,2000' den düzenlenmiştir.)



Şekil 2. Deprem dalgalarının odaklanması.

2.2. Mikro Bölgelendirme

Mikro bölgeleme, büyük ve geniş çalışma alanlarını daha küçük bölgelere ayırma olarak tanımlanır. Ancak günümüzde mikro-bölgeleme yalnızca çok büyük alanları zemin cinslerine ve dinamik davranışlarına göre daha küçük bölgelere ayırmak olarak algılanmamalıdır. Mikro bölgeleme, çalışma alanındaki zemin türleri, bu zeminlerin dinamik özellikleri, uzak ya da yakın depremler sırasındaki bu zeminlerin davranışları ve bu zeminler üzerine inşa edilecek olan yapıların maruz kalacağı kuvvetlerin önceden hesaplanması olarak algılanmalıdır.

Türkiye bir deprem ülkesidir. 1914 Burdur, 1999 İzmit ve 2011 Van depremleri buna en iyi örneklerdir. Günümüz teknolojisinde depreme uygun yapılaşma yapmak mümkündür. Bunun için öncelikle yeraltı yapısının çözümlenmesi gerekir. Bilindiği üzere mühendislik yapısı, kurulduğu ortama statik olarak etki yapmaktadır ve ortamın dengesini bozmaya çalışmaktadır. Aynı zamanda bu ortamın da bir parçasıdır. Bu nedenle yapının yapılacağı ortamın bilinmesi ve mühendislik yapısı ile ortamın dengelerinin kurulması gerekmektedir. Bu dengeyi oluşturabilmek için deprem dalgalarının zemindeki yayılımı ve salınımı, yeraltı yapısının deprem dalgalarına göstereceği direnç ve dinamik özellikleri bilinmelidir.

Jeofizik yöntemlerden sismik yöntemler ile mühendislik problemlerinin çözümünde; Katman kalınlıkları ve derinlikleri, katmanların sismik hızları, katmanların dinamik elastik özellikleri, yeraltı yapısı ve sağlam zemin derinliği, tektonik oluşumların ve örtülü fayların konumları, zeminin hakim titreşim periyodu, zeminin hasar büyütmesi ve sıvılaşır ya da sıvılaşmaz zeminler saptanmaktadır. Bunun yanında sismik yöntemlerden elde edilen zeminin dinamik parametreleri ile zeminlerin gözenekli yapısı, kayaçların ise kırıklı, çatlaklı ve altere (bozuşmuş) zonları ortaya çıkarılabilmektedir. Bu amaçla Burdur

ve Isparta yerleşim alanındaki zeminlerin dinamik özellikleri sismik çalışmalarla belirlenmiştir. Bu çalışmada yeraltı yapısının derinlere doğru sağlam ya da zayıf zonlarının belirlenmesi amacıyla mikro-bölgeleme haritalarından sığ derinlikler için sismik enine dalga hız haritaları Burdur bölgesi için yapılmıştır. Buna ek olarak, zeminin hasar büyütme, zemin hakim titreşim periyodu ve potansiyel sıvılaşma haritaları hazırlanmıştır. Ayrıca Isparta bölgesi için sismik hızlardan hakim titreşim periyot haritası ve ivme haritaları oluşturulmuştur. Bu haritalar oluşturulurken yerel zemin koşullarını ortaya koyan parametrelerin haritalanması ile çalışılan alanlar bölgelendirilebilinir. Aşağıda bu parametreler irdelenecektir.

2.2.1. Kayma Dalga Hızı, Vs(30), Sınıflama ve Haritalar

Deprem dalgalarından yeryüzüne ikinci olarak ulaşan kayma (enine) dalgalarıdır. Kayma dalgaları parçacık hareketine dik yönde ve sadece katı ortamlarda yayılırlar. Yani sıvılarda ve gazlarda yayılamazlar. Bu dalgaların katılardaki hızı 50-4000m/s arasında değişir. Kayma dalga hızları zeminin mukavemetini yansıtan bir parametredir. Bu yüzden kayma dalga hızına bağlı zemin sınıflamaları verilmektedir. Tablo 1, 2 ve 3 de verilen Eurocode 8, NEHRP ve Türk deprem yönetmeliği sınıflamalarına göre Vs(30) değeri 180m/s'den küçük ise zayıf zeminleri, 760 ya da 800m/s den büyükse kaya ortamları yansıtmaktadır. Bu hızlar ve diğer hız aralıkları Tablo 1, 2 ve 3 de sunulmuştur. Tablo 1, 2 ve 3 de sunulan Vs(30), yerinde yapılan sismik çalışmalar sonucunda elde edilen kayma dalga hızlarının 30m derinliğe kadar ortalama değeri olarak tanımlanır. Bu parametre zemin sınıflamalarında ve bina kodlarının belirlenmesinde önemli bir parametredir. Ayrıca kayma dalga hız modellerinden tahmin edilen alan sınıflamaları güçlü sarsıntılarının etkilerinin önceden tahmin eşitliklerinin türetilmesinde, deprem hasarı, azaltma haritalarının yapımında ve bina kodlarının belirlenmesinde de önemlidir. Vs(30) matematiksel olarak aşağıdaki ifade ile hesaplanır.

$$Vs_{30} = \frac{30}{t_d + \frac{30-d}{Vs_{son}}} \qquad (1)$$

Burada Vs_{son}: d derinliği ile 30m arasındaki tabakanın hızıdır. En basit şekliyle Vs_{son} yeraltı modelinin en altındaki hıza eşittir. t_d: d derinliğine kadar olan tabakalarda dalganın yayılma zamanıdır. Yukarıdaki eşitliği daha açık yazmak için 3 tabakalı bir ortam düşünülürse;

$$Vs_{30} = \frac{30}{\frac{h_1}{Vs_1} + \frac{h_2}{Vs_2} + \frac{30-(h_1+h_2)}{Vs_{son}}} \qquad (2)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Bu eşitlik nereden gelmiş sorusu cevaplanmak istenirse;

$$T_0 = 4h/Vs \quad \text{dir.} \qquad (3)$$

Tabakalı ortam için ise aşağıdaki gibi yazılabilir

$$T_0 = 4\left(\frac{h_1}{Vs_1} + \frac{h_2}{Vs_2} + \frac{30-(h_1+h_2)}{Vs_3}\right) \qquad (4)$$

Buradaki T_0 yerine $4h/Vs_{30}$ yazılırsa

$$\frac{4h}{Vs_{30}} = 4\left(\frac{h_1}{Vs_1} + \frac{h_2}{Vs_2} + \frac{30-(h_1+h_2)}{Vs_3}\right) \qquad (5)$$

Burada eşitliğin her iki yanındaki 4 rakamı birbirini sadeleştirir ve h yerine 30m derinlik için ortalama istendiğinden 30 yazılır ve Vs_{30}, eşitliğin bir tarafında yalnız bırakılırsa,

$$Vs_{30} = \frac{30}{\frac{h_1}{Vs_1} + \frac{h_2}{Vs_2} + \frac{30-(h_1+h_2)}{Vs_3}} \qquad (6)$$

elde edilir. Sismik çalışmalar sonucunda elde edilen Vs(30) değerine göre Tablo 1, 2, 3 kullanılarak zemin durumu hakkında hızlı bir şekilde bilgi elde edilir.

Tablo 1. Eurocode8'de Vs(30)'a göre Zemin Sınıflaması (CEN, 2004).

Zemin Sınıfı	Tanım	Özellikler
A	Kaya ya da diğer kaya benzeri formasyonlar	Vs>800
B	Çok sıkı kum, çakıl ya da çok sert killer	360<Vs<=800
C	Sıkı yada orta sıkı kum, çakıl veya sert kil	180<Vs<=360
D	Gevşek'den orta sıkı'ya kadar kohezyonsuz zemin veya yumuşak-sert arası Kohezyonlu Zemin	180<Vs

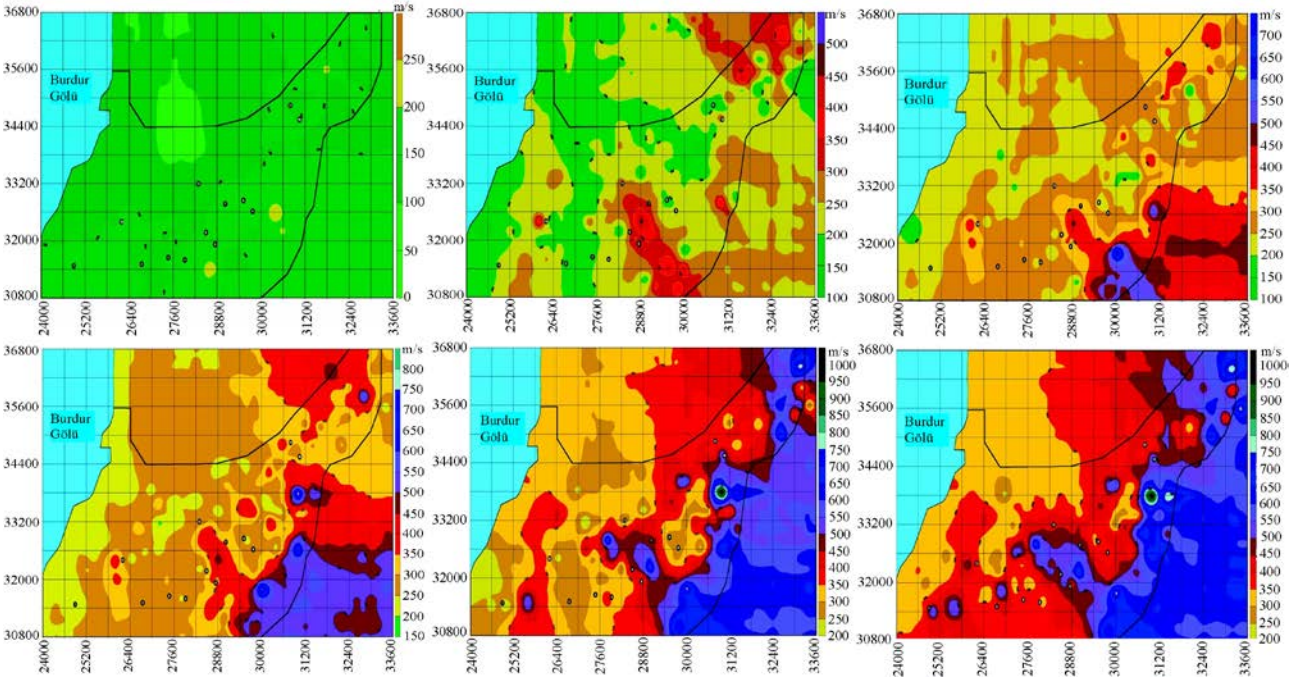
Tablo 2. NEHRP Hükümlerinde ve Uniform Building Code'da Vs(30)'a göre Zemin Sınıflaması (BSSC, 1997)

Zemin Sınıfı	Tanım	Özellikler
A	Sağlam Kaya	Vs>1500
B	Kaya	760<Vs<=1500
C	Çok Sıkı-Sert Zemin yada Yumuşak Kaya	360<Vs<=760
D	Sert-Sıkı Zemin	180<Vs<=360
E	Zayıf Zemin	Vs<180

Tablo 3. Kayma Dalga Hızına göre Zemin Sınıflaması (TDY, 2007).

Zemin Grubu	Zemin Grubu Tanımı	Standart Penet. (N30)	Relatif Sıkılık (%)	Basınç Direnci (kPa)	Kayma Dalgası Hızı (m/s)
(A)	1.Masif volkanik kayaçlar, ayrışmamış sağlam metamorfik kayaçlar, sert çimentolu tortul kayaçlar 2. Çok sıkı kum, çakıl 3. Sert kil ve siltli kil ..	 >50 >32	 85 – 100 ----	> 1000 > 400	> 1000 > 700 > 700
(B)	1. Tüf ve aglomera gibi gevşek volkanik kayaçlar, süreksizlik düzlemleri bulunan ayrışmış çimentolu tortul kayaçlar 2. Sıkı kum, çakıl 3. Çok katı kil ve siltli kil	 30–50 16–32	 65 – 85 ----	500-1000 200-400	700-1000 400–700 300-700
(C)	1.Yumuşak süreksizlik düzlemleri bulunan çok ayrışmış metamorfik, kayaçlar ve çimentolu tortul kayaçlar . 2. Orta sıkı kum, çakıl 3. Katı kil ve siltli kil ...	---- 10–30 8–16	---- 35 – 65 ----	< 500 100-200	400-700 200-400 200-300
(D)	1. Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak, kalın alüvyon tabakaları 2. Gevşek kum 3. Yumuşak kil, siltli kil	 <10 <8	---- < 35 ----	 < 100	< 200 < 200 < 200

Burdur yerleşim alanı ve civarında alınan sismik kayma dalga hızlarından yararlanılarak değişik derinliklerdeki seviyeler için sismik dalga hızı haritaları yapılmıştır. 0-2m, 2-4m, 4-8m, 8-12m, 12-16m ve 16-20m derinlikler için sismik kayma dalga hız haritaları Şekil 3 de verilmektedir. Kayma dalga hızlarının 200m/s den küçük olması bu zeminlerin kayma mukavemetinin zayıf olduğunu belirtir. Bu seviyeye yerleştirilen temellerde oturma kaçınılmazdır. 300-500m/s arasındaki kayma dalga hızları orta dayanımlı zeminleri tanımlar. 4-8m derinlik için haritada koyu renkli alanlarda sismik enine dalga hızlarının 450m/s ye yükselmesi orta dayanımlı zeminleri, diğer bölgelerde 300m/s nin altında olması gevşek yapıdaki zeminleri tanımlar. Yeraltı suyu seviyesi yüksek ve zemin kumlu siltli ise sıvılaşma potansiyeli söz konusudur. 8-12m derinlik için sismik kayma dalga hız haritasında, önceki haritalara nazaran, Vs=700m/s civarındaki hızlar gözlenmektedir. Bu hızlar haritanın güney doğusunda yoğunlaşmaktadır. Bu durum, Burdur formasyonunun yüzeye en yakın kesimlerini göstermektedir. Daha derinler için kayma dalga hız haritalarında 500m/s'nin üzerine çıkan sismik kayma dalga hızları dayanımlı katmanları tanımlarken 700m/s civarında enine dalga hızları da ana kayaya ulaşıldığını göstermektedir.



Şekil 3. Burdur bölgesinin farklı derinlikleri için kayma dalga hız haritaları (soldan sağa doğru sırayla 0-2m, 2-4m, 4-8m, 8-12m, 12-16m ve16-20m derinlikler) (Uyanık vd., 2006'dan düzenlenmiştir).

2.2.2. Zemin Hakim Titreşim Periyodu ve Haritası

Depremler esnasında zeminin hakim titreşim periyotlarının mikrotremor ve mikro-sismik titreşimlerden elde edilen hakim titreşim periyotları ile çok benzer olduğu belirtilmiştir (Kanai vd.,1966). Bu durumda mikro sismik çalışmalarla elde edilen zemin hakim titreşim periyotları ile depremin zeminde oluşturacağı hakim periyotlar hakkında önceden bilgi edinilebilir. Yukarıda açıklanan sonuçlardan hareketle depremin zeminde oluşturacağı hakim titreşim periyodu (T_0) genel olarak,

$$T_0 = 4h/Vs \tag{7}$$

bağıntısından elde edilebilir. Bu matematiksel ifade kaya zeminin yüzeye yakın ya da derin olması durumuna bağlı olarak değişir. Kayanın yüzeye yakın olması durumunda araştırma derinliği Z=30m ve kayanın derinde olması durumunda Z=50m kabul edilir. Bu kabuller dikkate alındığında kayanın yüzeye yakın ya da derinde olmasına bağlı olarak hakim titreşim periyodu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$T_0 = 4[\sum_{i=1}^{n}(h_i/Vs_i) + (Z-H)/Vs_n] \tag{8}$$

Burada h: tabak kalınlığı, Vs: tabakanın kayma dalga hızı ve H araştırma derinliğine kadar olan tabakaların toplam kalınlığıdır.

Ayrıca Vs_{30} değeri ve H=30m alınarak hakim titreşim periyodu aşağıdaki ifade ile de belirlenebilir.

$$T_0 = 4H/Vs_{30} \tag{9}$$

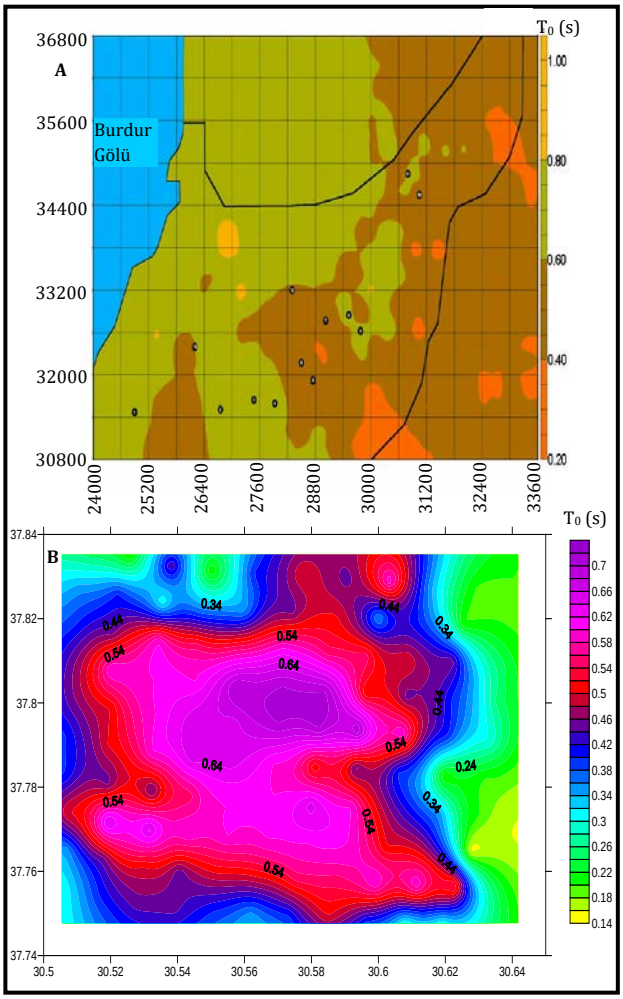
Ancak Kanai kayma dalga hızından hakim titreşim periyodunun belirlenmesini önerirken kayma dalga hızının derinlerde en az 500m/s değerine ulaşılmasının zorunluluğunu belirtmiştir.

Hakim titreşim periyodunun büyük değerleri, suya doygun ve yumuşak topraklarda, küçük değerleri ise kayalarda elde edilir. Zeminlerin hakim titreşim periyodu genelde 0-1.2s arasında değişebilir. 0.4s kaya ile zemini ayıran sınır değerdir. Bilindiği üzere, deprem dalgalarının hakim periyodu ile zeminin hakim periyodu birbirine yakın olduğunda rezonans olayı gerçekleşir. Aynı durum zeminin hakim periyodu ile bina periyodunun çakışması durumunda da gerçekleşir. Bu yüzden zeminin hakim titreşim periyodunun ne olacağının önceden belirlenmesi bina periyodunun belirlenmesi açısından önemlidir. Zeminin hakim titreşim periyodunun belirlenmesi durumunda zeminin alt ve üst hakim periyotlarının yani spektrum karakteristik periyotlarını aşağıdaki ilişkiler ile belirlemek mümkündür.

$$T_A = T_0/1.5$$
$$T_B = T_0\ 1.5 \tag{10}$$

Bu T_A, T_B katsayıları yerel zemin sınıfı belirlemede ve yapılacak bina periyodunun seçiminde kullanılmaktadır. Bina periyodu, T_A ve T_B periyotları arasında seçilmemelidir.

Burdur bölgesi için hazırlanan zemin hakim titreşim periyodu haritası Şekil 4'de verilmektedir. Burdur bölgesinde zemin hakim titreşim periyodu genel olarak 0.4-0.8s arasında değişmektedir. Ancak harita incelendiğinde, Burdur formasyonunun yüzeye yakın kesimlerinde zemin hakim titreşim periyodu çoğunlukla 0.4-0.6s arasında değişirken daha açık renkli kesimlerde 0.6-0.8s arasındadır. Dolayısıyla bu bölgelere yapılacak yapıların periyotları zemin hakim periyodundan farklı seçilerek dizayn edilmelidir. Aksi takdirde, binalara deprem esnasında oluşabilecek rezonans nedeniyle büyük kuvvetler etki edecek ve deprem hasarını arttıracaktır.



Şekil 4. Burdur (A) (Uyanık vd., 2006) ve Isparta (B) Bölgelerinin Hakim Titreşim Periyot Haritaları

2.2.3. Zeminin Deprem Hasarını Büyütme Haritası

Deprem bölgelerinde yapılan çok sayıda araştırmalar neticesinde, yüzeydeki bazı zemin cinslerinin deprem

şiddetini ve dolayısıyla yapılardaki hasarı artırdığı tespit edilmiş ve zeminler relatif şiddet artışlarına göre ayıklanmıştır (Medvedev, 1965). Zemin cinslerine göre depremin şiddet artışı Tablo 4'de verilmiştir.

Bu tablo dışında dolgunun kalınlığı ve ana kaya topografyasının dik meyilli oluşu da deprem şiddetini artırmaktadır. Medvedev (1965) de zeminlerin sismik empedansı ile şiddet artış değerleri arasında logaritmik bir bağıntı geliştirmiştir.

$$n = 1.67 Log \frac{\gamma_{kaya} V_{kaya}}{\gamma_{ölç} V_{ölç}} + e^{-0.04h^2} \qquad (11)$$

Tablo 4. Zemin Cinsleri ve Gözlemsel Sonuçlara Göre Verdikleri Şiddet Artış Değerleri (Medvedev,1965).

Zemin Cinsi	Şiddet Artış Değerleri
Granit	0
Kalker ve Kumtaşı	0-1
Orta sağlamlıktaki zeminler	1
Yamaç molozu-Birikinti konisi gibi iri parçalı zeminler	1-2
İri çakıl ve çakıllı zeminler	1-2
Kumlu zeminler	1-2
Killi zeminler	1-2
Gevşek toprak dolgu zeminler	2-3

Bu ifadede 1,67 sabit katsayısı zemin cinsleri içerisinde en çok rastlanan zemin cinsindeki şiddet artışı değerlerinin ortalamasıdır.

γ_{kaya} V_{kaya}=ana kayanın sismik empedansı

$\gamma_{ölç}$ $V_{ölç}$ =birinci tabakanın sismik empedansı

Bu yöntem uygulanırken aşağıdaki önerilere dikkat edilmesi gerekir. Bu öneriler;

1) γ_{kaya} V_{kaya} empedansı mümkün olduğu kadar granit bazına göre sabit alınmamalı, zemini oluşturan tabakanın altındaki ana kayanın yoğunluk ve hızı belirlenmeli ve şiddet artışı buna göre hesaplanmalı

2) $e^{-0.04h2}$ ifadesi yeraltı suyu derinliğinin etkisini verir ve bu terim kum, kumlu-kil, silt, kalın toprak dolgu vb. gibi çok küçük daneli zemin cinsleri için kullanılmalıdır.

3) Eğer zeminlerin S dalga hızları ölçülür ve bu hızlar bağıntıda kullanılırsa aşağıdaki ifade kullanılmalıdır.

$$n = 1.67 Log \frac{\gamma_{kaya} Vs_{kaya}}{\gamma_{ölç} Vs_{ölç}} \qquad (12)$$

γ_{kaya} Vs_{kaya}=ana kayanın sismik empedansı (γ_{kaya} =2.7gr/cm^3, Vs_{kaya} =2500m/s)

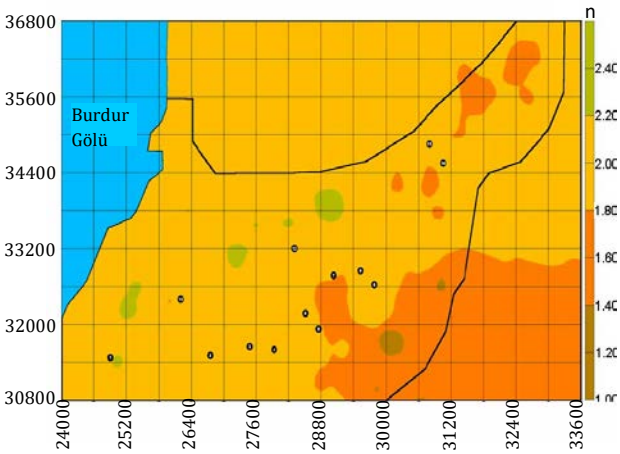
4) Ölçü noktalarında hesaplanan şiddet artış değerleri

n<0.5	için	n=0
0.6<n<1.5	için	n=1
1.6<n<2.5	için	n=2
2.6<n<3.5	için	n=3

olarak alınmalıdır.

Saha çalışmaları sonucunda zeminin şiddet artış değeri 0-3 arasında değişebilir. Şiddet artış değerinin sıfıra yakın değerleri sağlam zeminlerde, 3'e yakın değerleri ise yumuşak ve dolgu zeminlerde elde edilir. Bu metodun pratikliği ve hesap kolaylığı vardır. Ancak, metodun matematiksel esası ortamı tam elastik kabul eder. Fakat tam elastik bir ortam bulmak mümkün değildir. Ayrıca yöntem, şiddet artışına neden olarak zeminlerin fiziksel özelliklerini dikkate almaktadır. Pratikte bu metodun hesapladığı deprem şiddet değeri, mühendisler tarafından, yapıların depreme karşı hesabında doğrudan kullanılmamaktadır. Ancak bütün eksikliklerine rağmen düşük katlı ve rijit yapıların projelendirilmesinde emniyetle uygulanmaktadır.

Burdur bölgesi için hazırlanan zemin deprem büyütmesi haritası Şekil 5'de verilmektedir. Zeminin deprem büyütmesi Medvedev bağıntısı ile sismik empedanstan yararlanılarak hesaplanmıştır. Sismik şiddet artışı Burdur zemininin genelinde yaklaşık olarak 2 civarındadır. Örneğin 6 büyüklüğündeki bir deprem Burdur yerleşim alanında yaklaşık 8 hasar şiddetinde, 7 büyüklüğündeki bir deprem ise Burdur yerleşim alanında 9 hasar şiddetinde hissedilecektir.



Şekil 5. Burdur bölgesi Zemininin Şiddet Artım Haritası (Uyanık vd. 2006)

2.2.4. Zemin Sıvılaşması

Suya doygun kumlu zemin tabakaları depremin tekrarlı yükleri altında daha sıkı duruma geçmeye zorlanır. Bu anda boşluk suyu basıncı artar ve zemin daneleri arasında bulunduğu düşünülen efektif çevre gerilmesinin azalmasına, hatta sıfır olmasına neden olur. Kumlu seviyelerde efektif çevre gerilmesinin

sıfır olması kayma mukavemetini yok eder. Bu durumda zemin bir sıvı gibi davranır ve büyük şekil değiştirmeleri gösterir.

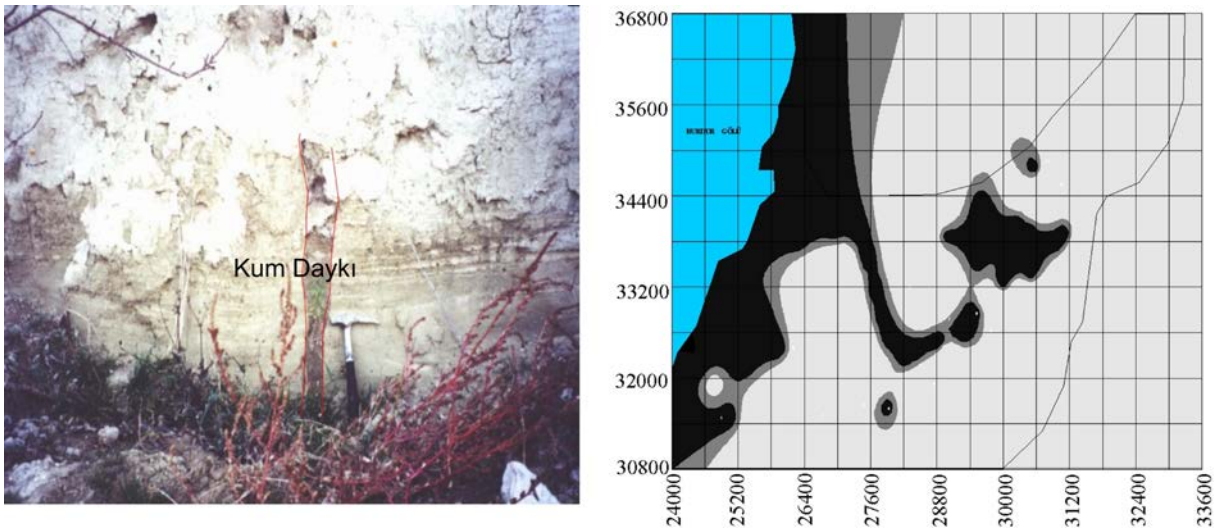
Doğada arazinin topografyasına ve tabakalaşmaya bağlı olarak bir deprem sırasında kum tabakalarında oluşan sıvılaşmaların genellikle iki tip olaya yol açtığı söylenebilir. Bunlardan ilki eğimli bölgelerde sıvılaşma nedeniyle bir şev kaymasının oluşması, ikincisi ise arazinin düz olduğu yerlerde sıvılaşmadan dolayı yapılarda temellerin göçme ve oturma olayıdır.

Eğimli Alanlarda Sıvılaşma: 1920 Kansu depremi, oluşan sıvılaşmaların yol açtığı şev kaymalarının meydana getirdiği hasarın büyüklüğü açısından ders alınması gereken bir örnek oluşturur. Kansu depreminde şev kaymaları 480 km ile 160 km olan bir alanı etkilemiş ve bu alan içinde kalan 10 şehir ve yüzlerce köyün tamamen ortadan kalkmasına neden olmuştur. Genellikle lös tabakaları ile kaplı olan bu bölgede hiç kaymayacak zannedilen şevler kaymış, bölgenin topografik durumunda büyük değişiklikler meydana gelmiştir. Deprem öncesi havaların yağışlı gitmesi lös tabakalarının suya doygun hale gelmesiyle kaymanın asıl nedeninin sıvılaşma olduğu anlaşılmıştır.

1964 Alaska depremi sırasında orta sıkılıkta kum ve çakıl tabakalarından oluşan çökellerin üzerinde bulunan Seward kentinde eğim 15-20 derece civarındadır. Kayma bu bölgede kademeli biçimde oluşmuş ve her kademede zeminin bir miktar daha kaydığı görülmüştür. Burada kaymanın sürekli ve kademeli durumu olayın mekaniğini açıklayabilmek açısından yararlı bir örnek oluşturur. Sıvılaşmaya yol açan kayma gerilmesi efektif çevre gerilmesi artımı ile artar ve belli derinliğin kaymasına neden olur. Kaymadan dolayı çevre gerilmesinde bir azalma olacağından daha derindeki tabakalarda sıvılaşmanın meydana gelmesine imkan yaratır, böylece ikinci bir kısmın kaymasına neden olur.

Düz Bölgelerde Sıvılaşma: Düz bir alanda kurulu Adapazarı ve Gölcük kentinde Standart Penetrasyon Test (SPT) değerleri yüzeye yakın yerlerde (5), kayma dalga hız değerleri 200m/s altındadır, orta derinlikte SPT değeri (10), Vs değeri 250m/s civarındadır. 20m ve daha derinlerde SPT değeri (20-30) arasında Vs değeri ise 300-400m/s arasındadır. 7.4 büyüklüğündeki 1999 İzmit depreminde en büyük yer ivmesi 480gal'dir. Sıvılaşma büyük hasara ve birçok binada göçmelere, oturmalara yol açmıştır. Sığ temellere oturan binalarda temel altında kayma dalga hızlarının 250m/s den az olduğu yerlerde hasarın fazla, kayma dalga hızının 300m/s den büyük olduğu yerlerde hasarın az olduğu gözlenmiştir (Türker, vd.,1999).

Burdur bölgesi hem eğimli hem de düz alanlar üzerine kurulmuştur. Bu alanlarda genel olarak yeraltı suyu 4-15m arasında değişmektedir. Bu yeraltı su seviyesinin altındaki suya doygun kumlu ve siltli seviyelerdeki Vs değeri 300m/s'nin altındadır. Bu seviyelerin Vs'leri efektif gerilmeyle düzeltilerek elde edilen düzeltilmiş Vs'lerden sıvılaşma analizi Uyanık (2002), Uyanık (2006), Uyanık ve Taktak (2009) ve Uyanık vd. (2013) (kayma dalga hızından sıvılaşma analiz yöntemi) kullanılarak sıvılaşma potansiyeli taşıyan bölgenin sınırları çizilmiştir (Şekil 6). Sıvılaşma sınırları içerisinde kalan bölgelerdeki binalarda sıvılaşma etkisiyle deprem hasarı daha da artacaktır. Şekil.6'da belirtilen siyah alanlar sıvılaşabilecek ortamları belirtmektedir. Bu alanlarda kayma dalga hızı 250m/s nin altındadır. Bu harita, sıvılaşma analizindeki güvenlik faktörüne(GF) bağlı olarak elde edilmiştir. GF<1 siyah alanları, 1<=GF<=1.2 arası gri ve GF>1.2 açık gri renklerle ifade edilmiştir.



Şekil 6. Zemin sıvılaşması sonucu oluşan kum daykı ve Burdur Bölgesinin Kayma Dalga Hızına Bağlı Sıvılaşma Haritası (Uyanık vd., 2006)

2.2.5. En Büyük Yatay Yer İvmesi

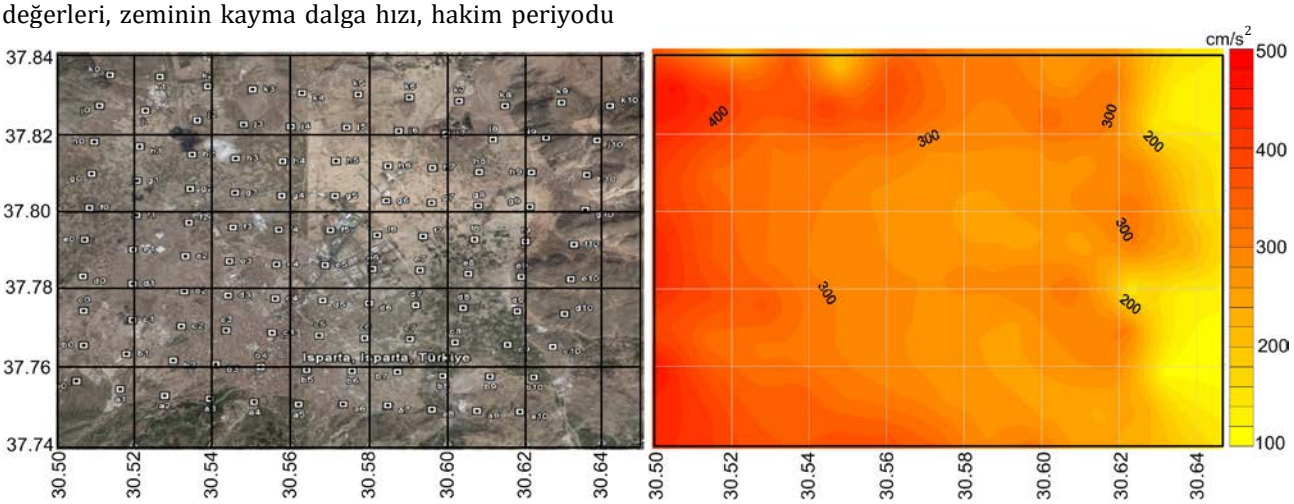
Bir deprem sırasında oluşan zemin titreşimleri, deprem odağından çevreye küresel olarak yayılır ve

etkinlikleri zemin koşullarına bağlı olarak odaktan uzaklaştıkça azalacaktır. Azalım ilişkileri, zemin parametrelerinin odak noktasından uzaklaştıkça nasıl değişeceğini gösteren ve gözlemsel yollarla çıkarılan işlevlerdir. Magnitüd, depremin büyüklüğü için en geçerli ölçü olmakla birlikte, depreme dayanıklı yapıların projelendirilmesinde doğrudan doğruya kullanılamaz. Ancak sıvılaşma analizleri için deprem büyüklüğü ve ivme gibi parametreler kullanılmaktadır. Bundan dolayı, M büyüklüğündeki bir depremin, R odak uzaklığındaki yeryüzünün bir noktasında yapacağı en büyük ivme değerini veren azalım ilişkilerine gerek duyulmaktadır. Depremle ilgili mühendislik hesaplarında yer ivmesinin öneminden dolayı birçok araştırmacı yeryüzünün çeşitli bölgeleri için azalım ilişkileri geliştirmişlerdir. Çünkü deprem sırasında yapıyı etkileyen yanal yükler bu ivmenin sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Gözlemsel azalım ilişkilerinin çıkarılması için gerekli veriler, Türkiye'de yeterli miktarda ivme kayıtlarının olmaması nedeniyle yeterli değildir. Bu nedenle, ülkemiz için ve çalışılan değişik bölgeler için azalım ilişkisi formu kurmak olanaksızlaşmaktadır. Bu nedenle, yeryüzünün çeşitli bölgeleri için elde edilmiş olan azalım ilişkilerinin ülkemizde kullanılması zorunlu olmaktadır. Tablo 5'de bazı araştırmacılar tarafından geliştirilmiş olan azalım ilişkilerinin bağıntıları gösterilmiştir.

Tablo 5. Çeşitli Azalım İlişkisi Bağıntılıları (Uyanık, 2002)

İvme Azalım İlişkileri	Kaynak	Açıklama
$a=2000e^{0,8M}(R+20)^{-2}$	Esteva ve Rosenblueth,1963	Kaya
$A=1230e^{0,8M}(R+25)^{-2}$	Esteva(Tabban ve Gençoğlu,1975)	Orta sıkı zemin
$a=2000e^{0,8M}(R+25)^{-2}$	Esteva(Taban ve Gençoğlu,1975)	Sert zemin
$a=1080e^{0,5M}(R+25)^{-1,32}$	Esteva(Taban ve Gençoğlu,1975)	Dolgu zemin
$A=\frac{5}{\sqrt{T_0}}10^{0,61M-P\log R+Q}$ $P=1,66+\frac{3,6}{R};Q=0,167-\frac{1,83}{R}$	Kanai,1965	Zemin
$A=10^{(-2,1+0,81M-0,027M^2)}$	Gutenberg ve Richter,1956	Kaya
T_0 : Dalga Hakim Periyodu (s) R : Odak Uzaklığı (km)	a :Yatay Yer İvmesi (cm/s²) M : Magnitüd	

Kanai (1965) ilişkisi kullanılarak Burdur fayında oluşabilecek 7 büyüklüğündeki bir depremin Isparta bölgesi için meydana getireceği yatay yer ivme değerleri, zeminin kayma dalga hızı, hakim periyodu ve deprem parametreleri kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanmış ve Şekil 7 de sunulmuştur.

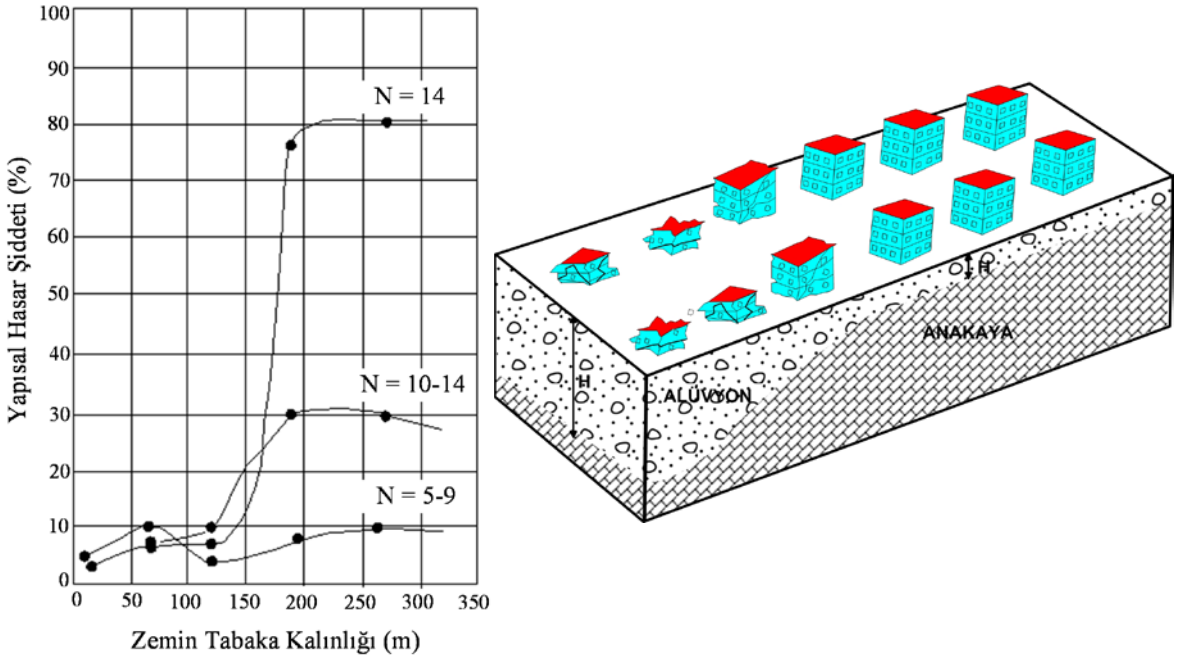


Şekil 7 Isparta şehir merkezinin uydu görüntüsü (GoogleEarth'den değiştirilmiştir) ve bazı kabuller ile ivme azalım ilişkisinden yaklaşık ivme haritası

2.2.6. Zemin Kalınlığının Deprem Hasarına Etkisi

Deprem dalgalarının yumuşak ve kalın zeminlerde genlikleri büyür ve dalga hızı bu tür zeminlerde yavaşlayarak daha büyük hasarlar oluşturur. Buna karşın kaya zeminlerde deprem dalgalarının genlikleri küçüktür ve dalgalar daha hızlı hareket ederler. Buna benzer birçok problemlerden dolayı kaya zeminlerde yüksek katlı, yumuşak zeminlerde kısa katlı yapıların yapılması genel bir kaidedir. Japonya'da yapılan bir araştırma sonucunda zemin tabaka kalınlığı 300m derinliğe kadar olan bölgelerde yapılan 5-9 katlı binalarda %10 civarında hasar meydana gelmiştir. Zemin tabakalarının kalınlığı 200-300m arasında olan bir ortamda yapılan 10-14 katlı binalarda %30, 14 ve üzeri katlı binalarda %80 varan hasarlar oluşmuştur. Bu durumda imara açılacak bölgelerin detaylı yer içi araştırmaları yapılarak bina

boylarına karar vermek, depremden daha az hasarla kurtulan bir şehir oluşturmanın ilk adımı olacaktır.



Şekil 8. Tabaka kalınlığına bağlı binalarda meydana gelen hasar oranı.

2.3. Parsel Bazında Çalışmalar

Parsel bazında çalışma, deprem, zemin ve yapı arasındaki ilişkiyi kuran ve karşılaşılması muhtemel sorunlar ve çözüm önerilerini de kapsayan etüttür. Bu tür çalışmalarda zeminin özelliklerine göre jeofizik ve jeoloji mühendisleri tarafından inşaat mühendislerine bilgi üretilir. Bu bilgiler birçok arazi ve laboratuarda yapılan statik ve dinamik yöntemlerden elde edilirler. Dinamik yöntemlerden üretilen parametreler; basınç ve kayma dalga hızları, tabaka kalınlıkları ve derinlikleri, zeminlerin yoğunlukları, dinamik elastik parametreler (Elastisite, Kayma ve Bulk Modülleri), Poisson oranı, zemin hakim titreşim periyodu, zemin büyütme değeri, zemin taşıma miktarı ve emniyetli zemin taşıma gücü, oturma değeri, yatak katsayısı, SPT N değeri ve bunun gibi parametrelerdir. Statik yöntemlerden ise zemin birimlerinin türü, yerinde vane ve proktor penetrometre deneylerinden basınç ve kesme dirençleri ve bu deneylerden içsel sürtünme ve kohezyon değerleri, elek analiz sonuçları, kıvam limitleri gibi birçok parametreler üretilir.

Deprem bölgeleri için hazırlanan Avrupa standardı olan **Eurocode-8** konusu deprem bölgelerinde deprem mühendisliği kriterleri ve gereksinimlerini inşaat mühendisliği çalışmalarına, bina yapım ve tasarımına uygulamaktır. Bunun için zeminin 30 metre derinliklerine kadar olacak şekilde sismik hızlar, SPT N vuruş sayısı ve drenajsız kayma mukavemeti değerlerine göre 6 çeşide ayrılan zemin türleri tablosunu verilmiştir. Ve şu hususları işaret etmektedir: *zeminin sınıflanmasının ortalama kayma dalgası hızı, Vs30, değerine göre yapılması gerektiği, bu elde edilemez ise SPT N değeri kullanılması gerektiğini belirtmektedir***.** Ek olarak sismik davranış üzerine derin yeraltı yapılarından kaynaklı etkilerin dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

2.3.1. Dinamik Parametreler ve Sismik Hızlar ile İlişkileri

Birim Hacim Ağırlığı: Birim alandaki zeminin ağırlığının hacmine oranıdır. Ampirik olarak aşağıdaki ilişkiler boyuna dalga hızına bağlı olarak belirlenebilir

$\gamma = 0.31V_p^{\,0.25}$ (Gardner vd. 1974)

$\gamma = 0.2V_p + 1.6$ (Telford vd., 1976)

Tezcan vd., (2006)'da verdikleri birim hacim ağırlıkları

$\gamma = 0.0002V_p + 1.6$ (Zayıf Kumlu, Killi, zeminler)

$\gamma = 0.0002V_p + 1.7$ (Sıkı Kum ve çakıl için)

$\gamma = 0.0002V_p + 1.8$ (Çamurtaşı, kireçtaşı, vb.)

$\gamma = 0.0002V_p + 2.0$ (Kumtaşı, tüf şhist vb.)

Uyanık ve Çatlıoğlu, (2010)'da zemin ve kaya ortamlar için yoğunluk ile sismik hızlar arasında çok parametreli ilişki oluşturmuş ve aşağıdaki ilişkiyi vermişlerdir.

$$\gamma = 0.76(V_p V_s)^{0.074} \quad (13)$$

Vp, Vs (m/s) yoğunluk gr/cm^3 elde edilir.

Kayma Modülü: Bu modül enine dalga hızı ve zeminin birim hacim ağırlığına bağlı olarak aşağıdaki matematiksel bağıntı ile hesaplanabilir.

$$G = \gamma V_s^{\,2} / g \qquad (14)$$

Fiziksel olarak zeminin kaymaya ya da kesmeye karşı gösterdiği dirençtir. Eğer kayma modülü büyük bir değer ise depremde oluşan S dalgası genliğine karşı yer büyük bir esneme direnci gösterir. Kayma modülünün küçük olması durumunda ise zemin üzerinde kurulan yapılarda çapraz birbirini kesen kırılmalar ve kolon-kiriş bağlantılarında kopmalar olabilir. Bilindiği üzere depremler yer altı tabakalarında tekrarlı kayma gerilmeleri oluştururlar. Bu gerilmelerin ilki tekrarlı kayma gerilmeleri altındaki zeminde kayma dayanımı, diğer gerilme ise zeminin şekil değiştirme özellikleridir. Yer, tekrarlı gerilmeler altında aşağıdaki durumlardan etkilenir.

1-Depremin süresi, büyüklüğü ve dalgaların frekans içeriğinden
2- Zeminin sıkı-gevşek ve yer altı su durumundan
3- Zeminin dane çaplarının aynı ya da farklı olması durumundan
4- Zeminin çevre basıncı durumundan
5- Zeminin aşırı sıkışma durumundan
Bu durumlar zeminin elastik ve plastik davranışları arasındaki sınırları oluşturur. Ayrıca kayma direncindeki azalma yapı temellerinde aşırı oturmalar oluşturabilir.

Sismik Hız Oranı (Vp/Vs): Özellikle sismik parametrelerin hesabının daha kolay ve kontrolünün yapılabilmesi için bu oran kullanılır. Vp/Vs oranı, zeminlerde yaklaşık olarak 1.5 ile 10 arasında değişebilir. Vp/Vs oranının 1.5 civarındaki değerleri ortamın bol gözenekli ve hava dolgulu olduğu ve 4 den büyük değerlerinde ise zeminin suya doygun olduğu şeklinde yorumlanabilir. Dolayısıyla Vp/Vs oranı, zeminin gözeneklerinin ne ile dolu olduğu hakkında bize bilgi verir. Bu oranının teorik olarak 1.41 den küçük elde edilmemesi gerekir. Eğer 1.41 den küçük değerler elde edilir ise P ve S kayıtları ve elde edilen sismik hızlar kontrol edilmelidir. Bu durumda özellikle S dalgası üretiminde ve ilk kırılmaların belirlenmesinde hatalar olabilir.

Elastisite Modülü: Elastik modül, kayma modülü ve sismik hız oranına bağlı olarak aşağıdaki matematiksel ifade ile hesaplanır.

$$E = \frac{3G[(\frac{Vp}{Vs})^2 - \frac{4}{3}]}{(\frac{Vp}{Vs})^2 - 1} \qquad (15)$$

Bu modül zeminin esneme direncini verir. Başka bir ifadeyle zeminin sağlamlığı hakkında bilgi verir. Bilindiği üzere deprem olduğunda önce P sonra S ve en son olarak da yüzey dalgaları (R ve L) ard arda yüzeye gelir. P dalgaları yapıları yorar ve yapıyı temelinden yukarı doğru kaldırır ve sonra aşağı doğru çeker. Bu sırada yapı düşey yönde yamulur. Zemin ve yapı bu güce karşı elastisite direnci ile karşı koyar.

Bulk Modülü: Bulk modülü, kayma modülü ve sismik hız oranına bağlı olarak aşağıdaki matematiksel ifade ile hesaplanır.

$$K = G.[(\frac{Vp}{Vs})^2 - (\frac{4}{3})] \qquad (16)$$

Bu modül sıkışmazlık modülü olarak da bilinir. Zeminin sıkışmaya karşı gösterdiği dirençtir.

Poisson Oranı: Bu değer sismik hız oranına bağlı olarak aşağıdaki ifade ile hesaplanır.

$$\mu = \frac{(\frac{Vp}{Vs})^2 - 2}{2(\frac{Vp}{Vs})^2 - 2} \qquad (17)$$

Poisson oranı 0-0.5 arasında değişir. Poisson oranı zeminin gözeneklerini yorumlamada kullanılabilir. Zeminlerde Poisson oranının 0-0.1 arasında değişen değerleri elde edildiğinde o zeminin gözenekleri hava dolguludur (Uyanık, 2010). Poisson oranının 0.45-0.5 arasında değişen değerlerinde ise zeminin gözenekleri suya doygun olarak yorumlanır (Uyanık, 2011).

Zemin Taşıma Gücü: Türkiye'de sismik hızlardan taşıma gücü çalışmaları Prof Dr. Ali Keçeli yönetiminde Prof. Dr. Ergün Türker'in doktora çalışması ile başlamıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda Türker, (1988; 2004), Keçeli (1990; 2000; 2009; 2010)'de ve Tezcan vd., 2006; 2006; 2008; 2011) de sismik hızlardan taşıma gücü bağıntıları geliştirmişler (Tablo 6) ve bu bağıntılar araştırmacı ve mühendisler tarafından kullanılmaktadır.

Yatak Katsayısı: Yatak katsayısı Hook kanununa göre elastik modül gerilme deformasyon oranı olarak bilinir. Buradaki deformasyon, zeminin düşey yönündeki değişimdir. Bu da zeminin oturması olarak düşünülebilir. Bu durumda;

$\varepsilon = q / E$ ve $\varepsilon = \Delta h / h$ ise $\Delta h = (q / E)\, h$ $\Delta h = S$ ve bu durumda yatak katsayısı

$$k_s = q / S \qquad (18)$$

Burada q zeminin taşıma gücü ve S oturma miktarıdır.

Radye temel için yatak katsayısı;

$$C = E(a + 2h)/(a * h) \qquad (19)$$

verilebilir. Burada; a: Temel kenar uzunluğu, h: Sıkışabilir tabaka kalınlığı, E: Sıkışabilir tabakanın deformasyon (Elastisite) modülü dür. Bunlara ek olarak yatak katsayısını Bowles, (1988) de ampirik olarak

$$k = q * 40 \quad (20)$$

q taşıma gücü ve kPa birimi olursa yatak katsayısı k kN/m³ elde edilir.

Tablo 6. Sismik Hızlardan Taşıma Gücü (q_f) ve Güvenli Taşıma Gücü (q_a) Eşitlikleri (*Suya doygun zeminler için)

Kaynak	Eşitlikler			
	Yoğunluk (γ) ya da (ρ)	**Taşıma Gücü (q_f)**	**Güvenli Taşıma Gücü (q_a)**	**Güvenlik Faktörü (GF)**
Türker (1988)	$\rho = 0,31(Vp^{0,25}(m/s))$ (gr/cm³) $\rho = 0,2Vp + 1,6$ (gr/cm³)	$q_f = \gamma VpT_0/4$ *%50 azaltılır	$q_a = \gamma VsT_0/4$ *%50 azaltılır	Vp/Vs
Keçeli (1990)		$q_f = \rho Vp/100$ (kg/cm²) $^*q_f = \rho Vp/200$ (kg/cm²)	$q_a = \rho Vs/100$ (kg/cm²) $^*q_a = \rho Vs/200$ (kg/cm²)	Vp/Vs
Keçeli (2000)	$\rho = 0,31(Vp^{0,25}(m/s))$ (gr/cm³)	$q_f = \frac{\rho Vs}{100}$ (kg/cm²)	$q_a = \frac{(\rho Vs^2/Vp)}{100}$ (kg/cm²)	Vp/Vs
Kurtuluş (2000)	$\rho = 0,31(Vp^{0,25}(m/s))$ (gr/cm³)	$P = 1 + 0,33D/B$ $q_f = PVs/200$ (kg/cm²)	$q_a = q_f/GF$	Vp/Vs
Türker (2004)		$q_f = Vs\gamma 0,33(s)/40 + \gamma Df/10$ (kg/cm²)	$q_a = q_f/3$ (kg/cm²)	3
Tezcan vd. (2006)	$\gamma_p = \gamma_0 + 0,002Vp$ (kN/m³)		$q_a = 0,024\gamma VsSv$ Sv≤30,6γ $Sv = 1 - 3\times10^{-6}(Vs - 500)^{1,6}$	
Tezcan ve Özdemir (2006)	$\gamma_p = \gamma_0 + 0,002Vp$ (kN/m³)		$q_a = 0,024\gamma Vs\alpha$ kPa	
Tezcan vd. (2007)	$\gamma_p = \gamma_0 + 0,002Vp$ (kN/m³)	$^{(1)}q_f = 0,1\gamma Vs\alpha$ (kN/m²)	Vs ≤ 700	$^{(1)}q_a = 0,025\gamma Vs\alpha$ — n=4
			700 ≤ Vs ≤ 3500	$^{(1)}q_a = 0,1\gamma Vs\alpha/n$ — $n = 4,62 - 8,90(10^{-4})Vs$
			3500 ≤ Vs	$^{(1)}q_a = 0,067\gamma Vs\alpha$ — n=1,5
Tezcan vd. (2008)	$\gamma_p = \gamma_0 + 0,002Vp$ (kN/m³)	$^{(1)}q_f = 0,1\gamma Vs\alpha$ (kN/m²)	Vs ≤ 750	$^{(1)}q_a = 0,025\gamma Vs\alpha$ — n=4
			750 ≤ Vs ≤ 4000	$^{(1)}q_a = 0,1\gamma Vs\alpha/n$ — $n = 4,6 - 0,0008Vs$
			4000 ≤ Vs	$^{(1)}q_a = 0,071\gamma Vs\alpha$ — n=1,4
Keçeli (2010)	$\rho = 0,44Vs^{0,25}$ (gr/cm³)	$q_f = \frac{\rho Vs}{100}$ (kg/cm²)	$q_a = \frac{(\rho Vs^2/Vp)}{100}$ (kg/cm²)	Vp/Vs
Tezcan ve Özdemir (2011, 2012)	$\gamma_p = \gamma_0 + 0,002Vp$ (kN/m³) $^{(2)}\gamma = 4,3Vs^{0,25}$ (kN/m³)	$^{(1)}q_f = 0,1\gamma Vs\alpha$ (kN/m²)	Vs ≤ 750	$^{(1)}q_a = 0,025\gamma Vs\alpha$ — n=4
			750 ≤ Vs ≤ 4000	$^{(1)}q_a = 0,1\gamma Vs\alpha/n$ — $n = 4,6 - 0,0008Vs$
			4000 ≤ Vs	$^{(1)}q_a = 0,071\gamma Vs\alpha$ — n=1,4
Keçeli (2012)	$\rho = 0,44Vs^{0,25}$ (gr/cm³)	$q_f = \rho Vs/100$ (kg/cm²)	$q_a = (\rho Vs^2/Vp)/100$ (kg/cm²) $^{(3)}q_a = q_{as}K$ B≤1,22m $q_a = q_{as}\left(\frac{B+0,305}{B}\right)^2 K$ B>1,22m	Vp/Vs

(1)α;temele bağlı katsayı α =1; 0,0 ≤ B ≤ 1,20m, α=1,13-0,11B; 1,20 ≤ B ≤ 3,00m, α=0,83-0,01B; 3,00 ≤ B ≤12,0m.
(2) Keçeli (2010) yoğunluk bağıntısı Tezcan ve Özdemir (2011, 2012) tarafından kN/m³ olarak kullanılmıştır.
(3)q_{as}; temel ebatlarına bağlı müsaade edilebilir taşıma gücü, K=1+0,33(Df/B) ≤ 1,33.

3. Sonuçlar

Bir şehir planlaması ya da imara açılacak alanlar belirlenirken büyük bir deprem beklemeye gerek olmadan ağır hasarlı alanlar makro, mikro bölgelemeler ve parsel bazında çalışmalar yapılarak belirlenebilinir. Dünyanın birçok deprem bölgesinde bilimsel araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmaların sonucunda ağır hasarlı alanlar, dolgu alanların içerisinde olan gömülü vadilerin ortalarında veya gömülü sırtların kenarlarında sismik odaklanma sonucunda meydana gelir. Ayrıca vadi kenarlarındaki dik yamaçlarda ve düşük hız tabakalarında sismik dalgaların tekrarlı yansımaları (sismik enerji kapanları) oluşarak zemin büyütmesini artırır ve deprem süresini uzatması nedeniyle ağır hasarlı alanlar oluştuğu gösterilmiştir.

Sonuç olarak daha sağlıklı yerleşim planlarının gerçekleşebilmesi için yöneticiler, jeoteknik çalışmalar yapan mühendislerden asgari olarak aşağıdaki parametrelerin belirlenmesini istemelidir.

Makro bölgelendirmeler için;
1- En az 100m derinliğe kadar yeraltının aydınlatılması
2- Taban kaya topografyası ve yeraltı yapılarının yanal değişimlerin saptanması
3- Yeraltında gömülü vadi ve tepelerin konumlarının belirlenmesi
4- Sismik dalgaların odaklanma alanlarının belirlenmesi
5- Olası fayların yüzey ve yeraltı konumlarının belirlenmesi
6- Üç boyutlu yeraltı sismik basınç ve kayma dalga hız modellerinin belirlenmesi
7- Dinamik parametrelerin saptanması

Mikro bölgelendirmeler için;
1- En az 30m derinliğe kadar araştırma yapılması
2- Zemindeki birimlerin yanal ve düşey yöndeki yayılımının belirlenmesi
3- Zemindeki birimlerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerinin belirlenmesi
4- 30 m derinlik için yeraltı sismik basınç ve kayma dalga hız dağılımının belirlenmesi
5- Sıvılaşabilecek alanların saptanması
6- Zeminin hakim periyodu, büyütmesi, ivmesi gibi parametrelerin haritalarının belirlenmesi

Parsel bazında çalışmalar için;
1- Ağır hasar alanları belirlenmemiş yerleşim yerlerindeki binada olası bir depremde ağır hasar meydana gelirse sorumlusu kim olacaktır? Bu nedenle, bilinmelidir ki parsel bazında çalışan mühendislerin hazırladıkları raporlar olası ağır hasar alanlarını belirleyecek derinlikler için hazırlanmamaktadır. Bu yüzden makro ve mikro bölgelendirme çalışmaları yerel yönetimler tarafından yaptırılıp parsel bazında çalışan mühendislere yönlendirilmelidir. Aksi durumda sorumluluk kime ait olacaktır?
2- Olası bir depremde ağır hasar olabilecek alanların önceden belirlenmesinin yararı; önceden belirlenen ağır hasar alanlarındaki mühendislik yapılarının güçlendirilmesine öncelik verilerek deprem tehlikesi zararlarını azaltma çalışmalarında ekonomik yarar sağlamaktadır.
3- Parsel bazında zemin birimlerine ait sismik basınç ve kayma dalga hızları, Vs(30), dinamik elastik parametreler, Poisson oranı, zemin taşıma miktarları, oturma, yatak katsayısı, zeminin diğer statik ve dinamik parametreleri belirlenmelidir.

Çalışma içerisinde sunulan haritalar ile ilgili değerlendirmelere göre Burdur bölgesinde derinlere doğru Vs değeri artmaktadır. İlk 20m içerisinde Vs=500m/s değerini geçen yani sıkı zemin ya da altere kaya diyebileceğimiz alanlar belirlenmiştir. Aynı zamanda suya doygun alanlarda yapılan sıvılaşma analiz sonucunda sıvılaşan alanlar tespit edilmiştir. Özellikle bu alanlarda hakim titreşim periyot değerleri 0.6-0.8s arasında ve zemin büyütmesi 2 civarında değiştiği görülmüştür.

Isparta bölgesi için hazırlanan hakim titreşim periyot haritası ova kesimlerinde 0.5-0.7s arasında, ova kenarlarında 0.3-0.5s arasında ve kayalık kesimlerde ise 0.3s den küçük değerler elde edilmiştir. Ayrıca Isparta bölgesi için hazırlanan ivme haritasında ova içerisinde 200-400cm/s^2 arasında değiştiği ve kireçtaşı gibi kayalık alanlarda 200cm/s^2 altında ivme değerleri elde edilmiştir. Bu ivme değerleri fayın uzaklığına, depremin büyüklüğüne ve zeminin mukavemet özelliklerine bağlı değişmektedir.

Teşekkür

Eleştirileriyle katkıda bulunan değerli editör ve hakemlere teşekkür ederim.

Kaynaklar

Aki, K., Richards, P.G., 1980. Quantitative Seismology, W.H. Freeman and Co., San Francisco, California, 1: 137, 700 pp.

Alverez, R., 1990. Structure of the Basin of Mexico City and Its Relation to Destruction in the earthquake of 1985: Geotechnical and Environmental Geophysics 3, 263-279.

Bowles, J.E., 1988. Foundation Analysis and Design. Mc.Graw-Hill Book Co. 4th Edition, 346 pp.

Bullen, K.E., Bolt, B.A., 1985. An Introduction to the Theory of Seismology, 4th Edition, Cambridge, London, 499 pp.

BSSC (Building Seismic Safety Council), 1997. NEHRP recommended provisions for Seismic Regulations for

New Buildings and Other Structures. Part I, Provisions (FEMA 302), 334 pp.

Esteva L., Rosenblueth, E. 1963. "Espectros de Temblores a Distancias Moderadas y Grandes" Proceedings, Chilean Conference on Seismology and Earthquake Engineering, 1, University of Chile.

CEN, 2004. Eurocode 8-Design of Structure for Earthquake Resistance. Part I: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. European Standard EN 1998-1, December 2004, European Committee for Standardization, Brussels.

Gutenberg B., Richter, C.F. 1956. Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. Bull. Seismol. Soc. Am. 46,105.

Gardner, G.H.F., Gardner, L.W., Gregory, A.R. 1974. Formation Velocity and Density-the Diagnostic Basics for Stratigraphic Traps. Geophysics, 39:770-780

Kanai, K. 1965. Semi Empirical Formula for the Seismic Characteristic of the Ground, Bull. Earthq. Res. Ins. 35(2).

Kanai, K., Tanaka, T., Yoshizawa, S. 1966. On Microtremors 9. Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 43:577-588.

Keçeli, A. 1990. Sismik Yöntemlerle Müsaade Edilebilir Dinamik Zemin Taşıma Kapasitesi ve Oturmasının Saptanması. Jeofizik 4(2):83-92.

Keçeli, A. 2000. Sismik Yöntemle Kabul edilebilir veya Güvenli Taşıma Kapasitesi Saptanması. Jeofizik14(1-2):61-72.

Keçeli, A. 2009. Uygulamalı Jeofizik, TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Eğitim Yayınları, Ekim Ajans Matbaacılık Hizmetleri. No:9, 479. Ankara.

Keçeli, A. 2010. Sismik Yöntem ile Zemin Taşıma Kapasitesi ve Oturmasının Saptanması, Jeofizik Bülteni 22(63):65-76.

Keçeli, A. 2012. Soil Parameters Which Can Be Determined with Seismic Velocities. Jeofizik 16(1):17-29.

Kurtuluş, C. 2000. Sismik Yöntemle Belirlenen Ampirik Taşıma Gücü Bağıntısı ve Uygulaması. Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi, 6, 51-59.

Medvedev, S.V. 1965. Engineering Seismology, Israel Program for Scientific Translations. IPST Catalogue No:13 Jerusalem.

Motosaka, M., Nagana M. 1997. Analysis of Amplification Characteristics of Ground Motions in the Heavily Damaged Belt Zone During the 1995 Hyogo-Ken Nanbu (Kobe) Earthquake. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 26:377-393.

Tabban, A., Gencoglu, S. 1975. Deprem ve Parametreleri. Deprem Araştırma Enstitü Bülteni, 11.

TDY (Türk Deprem Yönetmeliği), 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Esaslar. AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı, p.159 Ankara.

Telford, WM., Geldart, LP., Sheriff, RE, Keys DA. 1976. Applied Geophysics, Cambridge University Pres.

Tezcan S.S., Keceli A., Ozdemir Z. 2006. Allowable bearing capacity of shallow foundations based on shear wave velocity, J. of Geotech. and Geological Eng. 24:203-218.

Tezcan, S., Keçeli, A., Özdemir, Z. 2007. Zemin ve Kayaçlarda Emniyet Gerilmesinin Sismik Yöntem ile Tayini. Dünya İnşaat, Sayı:2007/01:90-95.

Tezcan, S., Keçeli, A., Özdemir, Z. 2008. Zemin ve Kayaçlarda Emniyet Gerilmesinin Sismik Yöntem ile Belirlenmesi. Şantiye (İnşaat, Makine ve Mimarlık Dergisi), Sayı:244: 122-125.

Tezcan, S., Özdemir, Z. 2006. Sismik Yöntem ile Zemin Emniyet Gerilmesi Tayininde Temel Boyutları. Şantiye (İnşaat, Makine ve Mimarlık Dergisi), Sayı:217:106-108.

Tezcan, S., Özdemir, Z. 2011. A Refined Formula for the Allowable Soil Pressure Using Shear Wave Velocities, The Open Civil Engineering Journal 5:1-8.

Tezcan, S., Özdemir, Z. 2012. A Refined Formula for the Allowable Soil Pressure Using Shear Wave Velocities, Journal of Civil Engineering and Architecture 6(4):470-478.

Türker, E. 1988. Zemin Taşıma Gücünün Sismik Yöntemlerle Saptanması. Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 205. Isparta.

Türker, E. 2004. Computation of Ground Bearing Capacity from Shear Wave Velocity. Continuum Models and Discrete Systems, 173-180. Kluwer Academic Publisher. Netherland.

Türker, E., Uyanık, O., Işık, H., Özalpaydın, C. 1999. Gölcük Donanma Üssü Yerleşim Alanının Jeolojik ve Jeoteknik Etüdü Projesi, MTA-SDÜ. (Yayınlanmamış).

USGS, 2000. The Local Effects of Strong Ground Motion Shaking: USGS Responds Report to an Earthquake.

Uyanık, O. 2002. Kayma Dalga Hızına Bağlı Potansiyel Sıvılaşma Analiz Yöntemi, Doktora Tezi, DEU. Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, p.200.

Uyanık, O. 2006. Sıvılaşır yada Sıvılaşmaz Zeminlerin Yinelemeli Gerilme Oranına Bir Seçenek, DEU Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi 8(2):79-91.

Uyanık, O. 2009. Yerinde Sismik Hızları Belirleme Teknikleri Dinamik Parametreler ve Mikro-Bölgeleme Kurs Notları. SDÜ MMF Jeofizik Müh. Bl. Isparta s.82.

Uyanık, O. 2010. Compressional and shear-wave velocity measurements in unconsolidated the top-soil and comparison of the results. International Journal of the Physical Sciences, 5(7), 1034-1039.

Uyanık, O. 2011. The Porosity of Saturated Shallow Sediments from Seismic Compressional and Shear Wave Velocities, Journal of Applied Geophysics 73(1), 16-24.

Uyanık O., Çatlıoğlu B. 2010. Determination of Density from Seismic Velocities, the 19th International Geophysical Congress and Exhibition of Turkey, 23-26 November Ankara/Turkey.

Uyanık O., Ekinci B, Uyanık N.A. 2013. Liquefaction Analysis from Seismic Velocities and Determination of Lagoon Limits Kumluca /Antalya Example. Journal of Applied Geophysics 95:90-103.

Uyanık O, Taktak A.G. 2009. Kayma Dalga Hızı ve Etkin Titreşim Periyodundan Sıvılaşma Çözümlemesi için Yeni Bir Yöntem, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,13-1.

Uyanık, O., Türker, E., İsmailov, T. 2006. Sığ Sismik Mikro-Bölgeleme ve Burdur/Türkiye Örneği, Ekologiya və Su Təsərrüfatı Elmi-Texniki və istehsalat Jurnalı, No:1, s:9-15 Memarlıq və İnşaat Universitesi Su Təsərrüfatı və Mühəndis Kommunikasiya Sistemləri, Azərbaycan.