

ANKARA ÇAYI HAVZASI ÇERÇİME YER ALAN BÖLGELERİN SİSMİK RİSK DÜZEYİNİN YÜZEY DALGALARI İLE ANALİZİ

G. Felek

Jeofizik Müh. Gazi Üniversitesi, Deprem Mühendisliği Uygulama ve Araştırma Merkezi,

Ankara; Email: gulcinfelek@gazi.edu.tr

ÖZET

Ankara ve yakın çevresinde, özellikle Ankara havzası içerisinde yer alan Plio-Kuvaterner zeminlerin sismik karakterizasyonunun ve buna bağlı olarak sismik tehlike de erlendirmelerinin jeofiziksel yöntemlerle belirlenerek, sismik karakterizasyonu ile bu zeminlerin kayma dalga (S) hızları, yer salınım periyotları, zemin büyütme oranlarının belirlenmesi bu çalışmanın temel amaçlarından biridir. Ayrıca kırılma ve yüzey dalgası yöntemleriyle bulunan kayma dalgası hızlarını korele etmek ve yerin 2 boyutlu yatay ve dikey olarak tomografisi çekilerek tabakaların nasıl istiflendiğinin görüntülenmesi ve kayma dalga hızları, zemin titreşim periyotları ve zemin büyütme de erleri sismik, dinamik modelleme çalışmaları için uygun şekilde belirlemek çalışmanın bir diğer hedefidir. Yapılan bu çalışmaların sismik tehlike de erlendirmelerinde (zemin sınıfları, zemin periyotları, zemin büyütmesi, kayma dalgası korelasyonu) kullanılabilmesi ve faydalı olacağı düşünülmektedir. Bu de erlendirme sonuçları zeminde hangi önlemlerin alınabileceği hakkında temel teklif edecek öneriler verilmiştir.

Anahtar kelime: Kayma Dalga Hızı, Sismik Karakterizasyon,

1.GİRİŞ

Yeraltı tabakalarının fiziksel özellikleri (makaslama modülü, elastisite modülü, sıkı mazlık modülü, do al salınım periyodu, sismik büyütmesi, poisson oranı v.b.) makaslama (S) hızı ile do rudan ilgilidir. Bu nedenle, yeraltı tabakalarının Vs hızı de erimlerinin belirlenmesi jeoteknik mühendisliği açısından oldukça önemlidir. Son yıllarda yüzey dalgalarının çok-kanallı analizi (MASW) yöntemi Vs hızı de erimlerinin belirlenmesinde sismik kırılma yöntemi yanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle sismik kırılma yönteminin uygulanamadığı durumlarda MASW yöntemi tek alternatif yöntem olarak görülmektedir. Sismik kırılma yöntemi ile ölçü alınırken kullanılan dizilim geometrisi korunarak MASW kayıtları toplanabilmekte ve daha büyük ara tırma derinliği elde edilebilmektedir. Yöntemin diğer üstünlükleri arasında hızlı veri toplama, kolay veri-ileme ve düşük hız problemini çözmesi gösterilebilir.

Yüzey dalgası analiz yöntemlerinden MASW tekniği ile Vs30 de erimsel bir şekilde hesaplanabilmektedir. Vs30, UBC ve Eurocode-8 uluslararası standartlarında kullanılan temel parametrelerin başında gelmektedir. Yüzey dalgası analiz yöntemlerinde, yer altındaki tabakalı yapıların kasma dalgası hızının (Vs) derinlikle de eriminin hesaplanması amacıyla Rayleigh dalgasının dispersif özelliğinden faydalanılır. Yüzey dalgası yöntemleri aktif kaynaklı ve pasif kaynaklı yöntemler olmak üzere iki ana grup altında toplanabilir. Pasif kaynaklı yöntemler daha derin nüfus etme gücüne sahiptir. Özellikle ana kaya derinliğine ulaşılması gereken sahalarda etkin olarak kullanılabilir. Arazide ilk bakıldığında kolay uygulanabilir olması yöntemin avantajları olarak görülmesinin yanında, veri elde edilmesi sırasında geometriden kaynaklanan problemler ve yüzeye yakın tabakaların tespitinde yanlış payının olması dezavantajları olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ankara ve çevresinin jeolojik ve geoteknik yapısının, jeofizik yöntemlerle, sismik cihazlar ile dinamik zemin parametrelerinin ve deprem tepkilerinin belirlenmesi için cisim dalgaları (Sismik Kırılma, Tomografi yöntemi) ve yüzey dalgalarının çok kanallı analiz yöntemi (Multi spectral Analysis of Surface Waves, MASW), ReMi (Refraksiyon Mikrotremör) gibi ölçümlere dayanan arazi test metodları ile belirlenmesi bu projede uygulanmıştır.

2.ÇALIŞILAN MADA KULLANILAN SİSMİK BELİRLEME YÖNTEMLERİ

Bu çalışmada kullanılan jeofizik yöntemler Yüzey Dalgalarının Çok-kanallı Analizi (MASW) ve Remi (refraksiyon mikrotremör) yöntemleri kullanılmış olup aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.

2.1.Yüzey Dalgası Yöntemi

Yüzey dalgalarının yayılım hızı (faz hızı) frekansa (veya dalga boyuna) bağlıdır. Bu özelliğe dispersiyon (dispersion) denir. Bu özelliğe sahip karakteristیک her yayılan frekans için farklı bir dalga boyu olması sonucunu doğurur (Park, ve diğeri, 1999). Yeraltı tabakalarının kesme dalgası hızları, ölçülürken dispersiyon kullanılarak geri hesaplama işlemi ile elde edilebilir. Geleneksel yöntemlerin aksine yüzey dalgaları yöntemleri bu özellikten dolayı elastik dalga denkleminde dayanır ve bu analizler tamamen frekans alanında gerçekleştirilir (Hayashi, 2008).

DeneySEL verinin edinilmesindeki ilgilenilen frekans aralığı ve mekansal örnekleme farklılıkları yöntemler arasındaki ana ayrılık olsa da yüzey dalgası yöntemlerinin analizinin prosedürünün tamamı, Rayleigh dalgalarının tabakalı ortamdaki dispersiyonuna bağlı oldukları için aynı ana üç adıma dayanmaktadır (Foti, 2005). Bu adımlar:

- 1) DeneySEL verinin alınması, yani sismik dalgaların mekanik sensörlerle saptanması ve kaydedilmesi,
- 2) DeneySEL dispersiyonunu ölçmek için sinyal işlemesi, ve
- 3) Kesme dalgası hız profiline elde edilmesi için hesaplanmış olan dispersiyonun ters çevrimi (inversion) (Foti, 2005, Jin ve diğeri, 2006). Dispersiyonun kaldırılması doğrudan kesme dalgası hız profiline hesaplamak için çok kritik bir adımdır. Dispersiyonun kaldırılması, spesifikliği ve doğruluğu ters çevrilmemiş kesme dalgası hız profiline doğrudan etkileyen önemli özelliklerdir (Jin, ve diğeri, 2006).

Yüzey dalgaları, aktif ve pasif kaynaklar olmak üzere iki şekilde üretilir. Aktif kaynaklar sismik enerjinin belirli bir konumda jeofon serimine göreceli olarak özellikle üretilmiş ve kaynak enerji yere uygulandığında kaydın başladığı anlamına gelmektedir. Yüzey Dalgasının Çok-kanallı Analizi (MASW) (Park, 1999) ve Yüzey Dalgasının Spektral Analizi (SASW) (Nazarian, 1984; Stokoe ve diğeri, 1994) yöntemleri, aktif kaynaklı yüzey dalgası yöntemleri olarak sınıflandırılır. Bu durum, Titre İmci Dizi Yöntemi (MAM) (Okada, 2003; Hayashi, 2008) veya Kırılma Titre İmci (ReMi; Louie, 2001) yöntemleri olarak da bilinen pasif yüzey dalgası yöntemlerinde tam tersidir. Bu yöntemlerde herhangi bir zaman kırılması mevcut değildir ve jeofon serimine göre çeşitli ve genellikle konumları bilinmeyen doğal olaylarla (rüzgar, dalga hareketi) ve/veya yapay kaynaklardan (toplumsal gürültü, yani trafik, makine ve benzeri) üretilen ortam enerjisinin hareketi kaydedilir (SeisImagerSW Kullanım Kılavuzu 2.2, 2006).

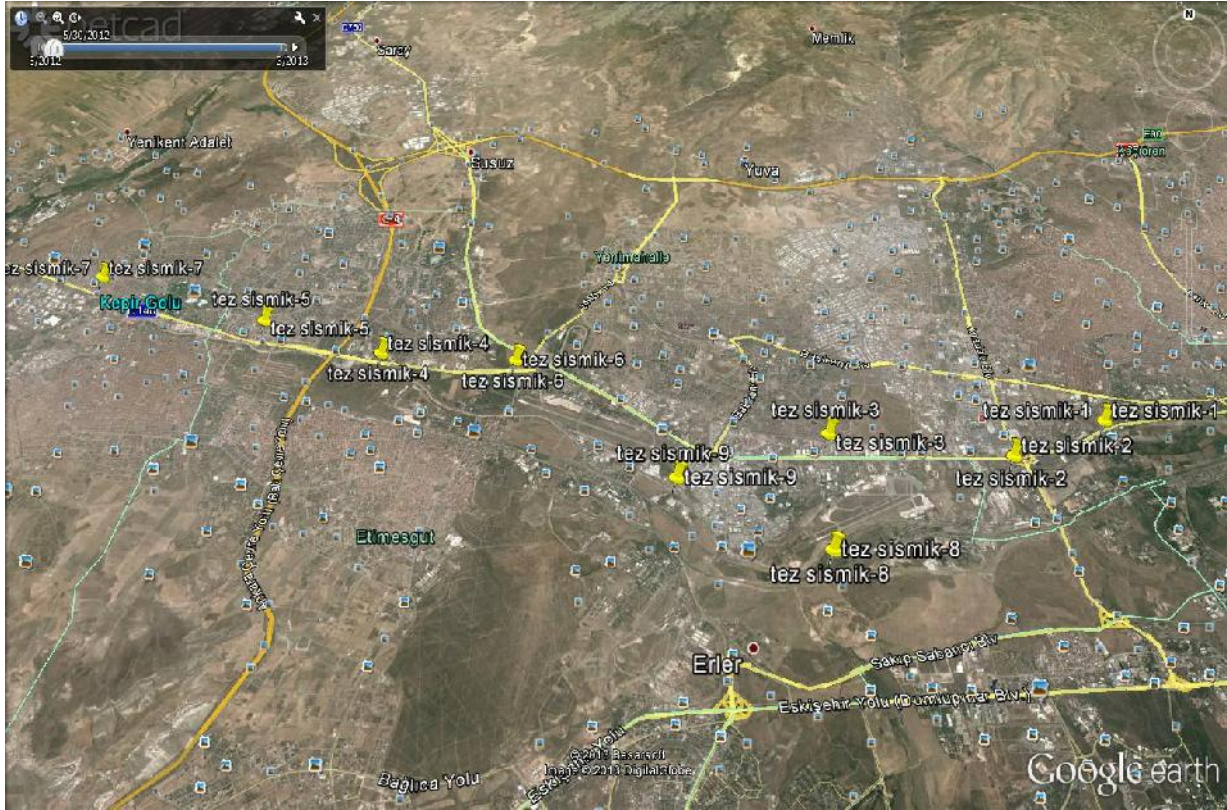
Özetle, her iki yöntemde optimum veri alma parametreleri kullanılarak, pasif yüzey dalgası yöntemi (MAM) 1-B kesme dalgası hız profiline ölçmek için derin tabakaların bilgilerinin doğrudan alınmasını sağlar. Diğer yandan, yüzey dalgalarının doğası ve jeofon aralığına yakınlıkları yüzünden aktif yüzey dalgası yöntemi (MASW) bu amaçlar için daha sığ tabakaları çözme konusunda daha yüksek kapasitesi vardır. Bu yüzden, aktif yöntem ile birlikte pasif yüzey dalgası yöntemi inceleme derinliğini maksimuma ulaştırmasını ve her derinlikte (bu çalışmada 30 m ve olabildiğince daha derin) yüzeyden tahribatsız olarak bile yüksek çözünürlüklü sonuç elde edilmesini sağlar. Bu çalışmada aktif kaynaklı Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi yöntemi (Multi spectral Analysis of Surface

Waves, MASW), ve pasif kaynaklı MAM (Microtremor Array Method) yöntemleri kullanılmı olup bu yöntemlerde elde edilen bile ik dispersiyon e rileri kullanılarak daha yüksek çözünürlüklü ve daha güvenilir 1 B Vs profilleri olu turulmu tur.

Ölçümler, “GEODE” marka sinyal biriktirmeli sismograf (ekil 1) ve 12 adet do al frekansı 4.5 Hz olan jeofonlar yardımı ile alınmı tur. nceleme alanında (ekil 2), arazinin uygunlu una ba lı olarak toplam 10 adet sismik (aynı noktalarda 15 adet MAM ve 4 adet MASW) serim yapılarak yüzey dalgası ölçümlerini alınması sa lanmı tur. MAM yönteminde; hedef derinlik olan 30 m ve daha da derin zemin profillerinin elde edilmesini sa lamak için 10 m’lik jeofon aralıklarıyla 110 m’lik profil boyunca, 2 sn örnekleme aralı ı ile 32 sn kayıtlar alınmı tur. MASW yönteminde ise jeofon aralı ı 3 metre olarak belirlenmi olup, ölçümler 33 metrelik profil boyunca, 1 sn örnekleme aralı ı ile 2 sn kayıt alınmı tur. Bu e kilde, daha sı tabakaların hızları hakkında yüksek çözünürlüklü ve daha hassas kayıtlar alınmı tur. Ölçümler 6 ve 15 metre olmak 2 farklı vuru uzaklı ına göre biriktirmeli alınmı tur. Biriktirme sayısı ortam gürültüsüne ba lı olarak 3 ile 5 arasında seçilmı tur. Üç farklı vuru uzaklı ına ek olarak hem veri i leme de kullanılmak üzere, hem de MASW yönteminin ana varsayımlarından biri olan yanal homojenli i test etmek için 6 ve 15 metre mesafeden ters atı ölçümleri de alınmı ve veri i lemlerine dahil edilmi tir.



ekil 1 : Sismograf Aletin Görünümü



ekil 2 nceleme Alanı Google Earth Görünümü

Bu çalışmalarda aktif (MASW) ve pasif (MAM) yüzey dalgası yöntemlerle elde edilen sonuçlar birlikte verilere tabi tutularak yorumlanmıştır, bu sayede daha yüksek çözünürlüklü ve daha derin sismik profillerin elde edilmesine olanak sağlanmıştır (maksimum 50 m). Aynı zamanda bu yöntem ile elde edilen verilerin birlikte yorumlanması ve birbirleri ile uyumunun kararlaştırılması açısından daha güvenilir sonuçların elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

3.SAHA ÇALIŞMALARININ SONUCU ELDE EDİLEN SİSMİK PARAMETRELER

Yürütülen saha çalışması sonucunda sismik yüzey dalgası yöntemleri kullanılmış olup aşağıda bahsi geçen parametreler bulunarak zeminin dinamik yüklere karşı davranışını belirlemiştir.

3.1. Dinamik Elastik Parametreler

Kayaç ve zeminlerin gerilmeler altındayken elastik özelliklerinin bilinmesi, zemin mekaniğinde temel problemlerinin çözümü için büyük önem taşımaktadır. Elastik parametreler, cisimlerin gerilmeler altında hacim ve biçim değişimlerini kontrol eden parametrelerdir. Kayaç ve zeminlerin deformasyonları da birinci derecede bu parametrelere bağlıdır.

3.1.1 Yoğunluk (ρ); P dalgası hızı kullanılarak aşağıdaki bağıntıdan hesaplanabilir.

$$\rho = 0,2 \cdot V_p + 1,6 \text{ gr/cm}^3 \quad (1)$$

Burada V_p ; p dalgası hızı (km/sn), ρ ; yoğunluk (gr/cm³)
Cisimlerin elastik özelliklerini kontrol eden bu parametreler;
Poisson Oranı

Dinamik Kayma (Rijitide) Modülü,
Dinamik Elastisite (Young) Modülü,
Dinamik Bulk Modülü,
Zemin Büyütmesi'dir.

3.1.2 Zemin Büyütmesi

$$\text{Amp} = 68 \cdot (V_s)^{-0.6} \quad (V_s < 1100 \text{ m/sn}) \quad (2)$$

$$\text{Amp} = 1 \cdot (V_s > 1100 \text{ m/sn}) \quad (\text{Midorikawa 1987}) \quad (3)$$

3.1.3 Poisson oranı; gerilmeler altındaki yapıların, boyuna de i iminin enine de i imine oranıdır. Birimsiz olup, sismik V_p ve V_s hızları ile bulunur.

$$\mu = (V_p / V_s)^2 - 2 / 2 (V_p / V_s)^2 - 2 \quad (4)$$

formülü ile hesaplanır.

3.1.4 Gözeneklilik; kayaların tane büyüklü üne, ekline, tanelerin benzer boyutlarda olu una ve sıralanmasında, ayrıca ara maddeyi olu turan malzemenin çimentolama derecesine ba lı olarak de i im gösteren bir özelliktir. rili ufaklı tanelerin olu turdu u ortamlarda ufak taneler iri tanelerin arasını doldurdu u için gözeneklilik azalır. Tanelerin dik dizili lerinde gözeneklilik artarken, e ik dizili lerinde gözeneklilik azalır. Birincil gözeneklilik, kayacın ilk olu umu sırasında kazandı ı düzenli gözeneklilik olarak tanımlanmaktadır. kincil gözeneklilik ise, kayacın ilk olu umundan sonra geçirdi i olaylar (kayacın sıkı ması, erimesi ve çatlaması sonucu olu an çatlaklar, erime bo lukları gibi) sonucu olu an gözeneklili i tanımlanmaktadır. Gözeneklilik daha çok metamorfizma geçirmi kayalarda gözlenir.(Tablo 1)

Tablo 1: Poisson oranına göre zemin durumu

Poisson oranı	0.00-0.25	0.25-0.35	0.35-0.50
Gözeneklilik	Gözeneksiz	Orta derecede	Gözenekli

$$\emptyset = -0.175 \cdot \ln(V_p) + 1.56 \quad (5)$$

ba ntısından hesaplanabilmektedir. (Watkins ve di ., 1972)

Birimler sahip oldukları gözeneklilik oranına % \emptyset göre genel olarak,

% $\emptyset > 25$ ise Yumu ak

25 > % $\emptyset > 15$ ise Orta Sert

% $\emptyset < 15$ ise Sert ekinde sınıflandırılmaktadır.

3.1.5 Dinamik Kayma (Rijitide) Modülü;

V_s dalga hızının ve γ unlu un bilinmesi ile bulunur. Zemin ve depremle ilgili hasarların tespiti açısından önemli bir parametredir. Ayrıca yanal kuvvetler altındaki kayacın mukavemet kabiliyetinin göstergesidir.

$$G = \gamma \cdot V_s^2 \cdot 10^5 / 9,81 \text{ kg/cm}^2 \quad (6)$$

formülü ile hesaplanır. (Tablo 2)

3.1.6 Dinamik Elastisite (Young) Modülü ;

Sismik V_p ve V_s hızları ve γ unlu un bilinmesiyle bulunur. Yük altındaki bir cismin elastislik kabiliyetinin, jeolojik birimlerinde sertli inin ve sa lamlı ının göstergesidir.(Tablo-2)

$$E = 2 (1 + \mu) \cdot G \text{ kg/cm}^2 \quad (7)$$

formülü ile hesaplanır.

Tablo 2: Maksimum kayma modülü ve dinamik elastisite modülüne göre zemin özelliği tanımlamaları

G_{max} (kg/cm ²)	Zemin Özelliği	E_d (kg/cm ²)	Zemin Özelliği
0-600	Gevrek Zeminler	0-2000	Gevrek Zeminler
600-3000	Orta Sağlam Zem.	2000 – 10000	Orta Sağlam Zem.
3000 – 10000	Sağlam Zeminler	10000 – 30000	Sağlam Zeminler
> 10000	Çok Sağlam Zem.	> 30000	Çok Sağlam Zem.

3.1.7 Dinamik Bulk Modülü ;

Kayacın sıkı mazlılığı kontrol eden modüldür.

$$K = E / 3 (1 - 2 \mu) \text{ kg/cm}^2 \quad (8)$$

formülü ile hesaplanır.

3.2 Yerel Zemin Sınıflandırması:

Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY) yaklaşımı esas alınarak gerekli olan sınır koşulları ile ilgili bilgiler, yerel zemin koşulları ve özellikle üst 30 metredeki kayma dalgası hızı değerlendirilmiştir.(Tablo 3)

Tablo 3: ABYYHY 'ye göre yerel zemin sınıflaması

Zemin Grubu	Zemin Grubu Tanımı	Kayma Dalga Hızı (Vs)
A	1. Masif volkanik kayalar ve ayrı mamı sağlam metamorfik kayalar , sert çimentolu tortul kayalar.... 2. Çok sıkı kum , çakıl... 3. Sert kil ve siltli kil...	>1000 >700 >700
B	1.Tüf ve aglomera gibi gevrek volkanik kayalar, süreksizlik düzlemleri bulunan ayrı mamı çimentolu tortul kayalar... 2.Sıkı kum, çakıl... 3.Çok katı kil ve siltli kil...	700-1000 400-700 300-700
C	1.Yumuşak süreksizlik düzlemleri bulunan çok ayrı mamı metamorfik kayalar ve çimentolu tortul kayalar... 2.Orta sıkı kum, çakıl... 3.Katı kil ve siltli kil...	400-700 200-400 200-300
D	1.Yassı'nın yüksek olduğu yumuşak, kalın alüvyon tabakaları... 2.Gevrek kum... 3.Yumuşak kil, siltli kil...	<200 <200 <200

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Grubu ve En Üst Zemin Tabakası Kalınlığı (h1)
Z1	A grubu zeminler, h1≤15 m olan B grubu zeminler
Z2	h1>15 m olan B grubu zeminler, h1≤15 m olan C grubu zeminler
Z3	15 m<h1≤50 m olan C grubu zeminler, h1≤10 m olan D grubu zeminler
Z4	h1>50 m olan C grubu zeminler, h1>10 m olan D grubu zeminler

3.3 Zemin Hakim Titre İm Periyodu

Deprem zararlarından açıkça görülmüştür ki; zemin sınıfları ile deprem hasarları arasında yakın bir ilişki vardır. Çeşitli tecrübelerden elde edilen bilgiler küçük bir yerleşim alanı içinde bile, deprem etkilerinin farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Zeminlerin deprem anındaki davranışlarında en üstteki 0-25 m'lik seviyenin sismik davranışta büyük rol oynamaktadır. Bundan ötürü zeminin titreşimimi ile genlik ve periyotlar üst seviyedeki toprağın titreşimine çok daha bağlıdır. Çok tabakalı formasyonların deprem anındaki davranışları tek tabakalı yapılarınkinden daha karmaşıktır.

$$T_{pp} = 4 H_1 / V_{s1} + 4 H_2 / V_{s2} + \dots + 4 H_{n-1} / V_{s_{n-1}} \text{ (Sakai, Y., 1968)} \quad (9)$$

T_{pp} = Zemin hakim titreşim periyodu'dur.

4.SONUÇLAR

Bu çalışmada; farklı yöntemlerle alınan ölçümler sonucunda aynı noktanın hız değerleri, yönlülük, poisson, dinamik zemin parametreleri birbiriyle uyumlu çıkmış olup, deprem anındaki salınım periyotları hesaplanmıştır.

Yüzey dalgası çalışması elde edilmiş olan dispersiyon eğrisine uygulanan ters çözüm yöntemi ile S dalga hızı ve ortalama V_{s30} hızı elde edilmiştir. En yaygın kullanılan ters çözüm yöntemi iterasyona başlamadan önce bir başlangıç modeli kullanılır. Başlangıç modelinin temel parametreleri, zemin modelinin S-hızı (V_s), P-hızı (V_p), yönlülük ve kalınlığıdır.

P dalgası, malzemenin sıkılığı ve genleşme zorlamasına karşı bir direnci varsa bu direncin yüksekliğine göre hızlanır.

S dalgası, malzemenin eğilim bozukluğuna veya burulmaya karşı bir direnci varsa olur. Sismik hız oranı (V_p/V_s), zeminin sıkılığı ve sıvılaşmasını gösterir.

S dalga hızı (kayma dalgası) zemin gruplarının sınıflandırılmasında göz önünde bulundurulacak önemli parametrelerden (SPT, rölatif sıkılık, serbest basınç direnci, kayma dalgası hızı) biridir.

Kayma veya makaslama modülü zeminin katılık ve makaslama karşı direncinin bir göstergesidir.

Kayma modülü zemin birimlerinin deprem kuvveti gibi yanal kuvvetlerden dolayı makaslanma dolayısıyla depreme karşı dayanıklılığını gösterir. V_p/V_s hız oranı arttıkça deprem şiddetinin ve buna bağlı olarak deprem hasarının artmakta olduğunu birçok araştırmacı tarafından örneklerle gösterilmiştir.

Yüzey dalgası verilerinin değerlendirilmesi sonucu, yer kesitleri ve tabakalara ait P, S hızları ve kalınlıkları bulunmuştur. Bulunan bu değerler yardımıyla da tabakalara ait parametreler ile zemin hakim titreşim periyodu (T_{pp}) hesaplanmıştır.

Katman ayrımları derinliğe karşı çizdirilmiş olan S dalgası modelleri üzerinden yapılan yorumlamayla şu şekilde yapılmıştır;

Seviyelerdeki S dalga hızlarının 400 m/sn'den küçük olan yerler alüvyon birimini temsil etmektedir. Bu değerden büyük olan hızlar ana kaya olduğunu düşünülmektedir.

Çalışma alanlarındaki zemin grubu D sınıfı Z3'tür.

KAYNAKLAR

- Miller, R.D., Xia, J., Park, C.B., Ivanov, J.M., 1999. Multichannel analysis of surface waves to map bedrock, Kansas Geological Survey, the Leading Edge, December, 1392-1396.
- SeisImager/SWTM V. 2.2 Manual., 2006. Geometrics Inc San Jose, California, USA., 281 p.
- Park, C.B., Miller R.D. Xia J., 1999. Multi-channel analysis of surface waves, Geophysics, 64(3), 800-808.
- Hayashi, K., 2008. Development of surface-wave methods and its application to site investigations, PhD Thesis, Kyoto University, 278 p.
- Foti, S., 2005. Surface wave testing for geotechnical characterization, surface waves in geomechanics – direct and inverse modeling for soil and rocks, Lai and Wilmanski (Ed.), CISM Lecture Notes, Springer-Verlag, Wien-Newyork, 47-71.
- Jin, X., Luke, B., Louie, J., 2006. Comparison of Rayleigh wave dispersion relations from three surface wave measurements in a complex-layered system, Proc., ASCE Geotcongress (Atlanta), ASCE Press, New York.
- Nazarian, S., 1984. In situ determination of elastic moduli of soil deposits and pavement systems by spectral-analysis-of-surface-waves method. Ph.D. dissertation, Univ. of Texas, Austin.
- Stokoe, II., K.H., Wright, S.G., Bay, J.A., Roesset, J.M., 1994. Characterization of geotechnical sites by SASW method, in geophysical characterization of sites, ISSMFE Technical Committee #10, edited by R.D. Woods, Oxford Publishers, New Delhi.
- Okada, H., 2003. The microtremor survey method, Geophysical Monograph Series no. 12, Published by Society of Exploration Geophysicists (SEG), Tulsa.
- Louie, J.N., 2001. Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays, Bull. Seism. Soc. Am., v. 91, n. 2, p. 347-364.
- Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., Hunter, J.A., Harris, J.B., Ivanov, J., 2002. Comparing shear-wave velocity profiles inverted from multichannel surface wave with borehole measurements, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22 (3), 181-190.