

DEPREM KUVVETLERİ ETKİSİ ALTINDAKİ ŞEVLERİN STABİLİTESİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN İNCELENMESİ

Murat OLGUN¹, M. Hilmi ACAR²

¹Selçuk Üniversitesi, Mühendislik – Mimarlık Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, KONYA

²Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, ANTALYA

ÖZET: Statik olarak dengede olan şevler dinamik kuvvetlerin etkisi altında stabilitelerini kaybedebilmektedirler. Bu çalışmada farklı magnitüd değerlerine sahip, olması muhtemel depremlerin şev stabilitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Depremler esnasında şevin güvenlik sayısını belirleyebilmek amacıyla Basitleştirilmiş Bishop Dilim yöntemi temel alınarak Fortran dilinde bir bilgisayar yazılımı hazırlanmıştır. Bu yazılımda deprem etkisi; şev üzerinde meydana gelen ek yatay deprem kuvvetleri, boşluk suyu basıncında meydana gelen artışlar ve zeminin kayma mukavemeti açısından meydana gelen azalmalar dikkate alınarak stabilize analizine ilave edilmiştir.

Depremler esnasında şev geometrisi ve zemin özelliklerinin de stabilizeye etkisinin belirlenebilmesi amacıyla, hazırlanan bilgisayar yazılımı kullanılarak 2 farklı şev kesiti ve 2 farklı zemin türü için örnek analizler yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Analizlerin sonucunda; özellikle şevin fay hattına yakın olduğu, yüksek magnitüdü depremlerde düşük güvenlik sayıları bulunmuştur. Aynı dinamik şartlar altında kohezyonlu zeminde tekrarlı kayma gerilmelerine bağlı olarak meydana gelen ilave boşluk suyu basıncı artışları diğer zeminden çok fazla olmuş ve daha küçük güvenlik sayıları bulunmuştur. Deprem etkilerinin yanı sıra şev yüksekliğinin artması ve zemin içerisinde yer altı suyunun varlığı da şevin stabilitesini çok önemli oranda azaltmıştır.

Anahtar Kelimeler: Şev Stabilitesi, Deprem Kuvveti, Boşluk Suyu Basıncı, Güvenlik Sayısı.

Investigation of Factors Affecting The Stability of Slopes Subjected to Earthquake Forces

ABSTRACT: The slopes can lose their stabilities under the effects of dynamic forces although they were known to be in equilibrium statically. In this study, the effects of possible earthquakes of various magnitudes on the slope stability were investigated. A computer program based on Simplified Bishop Method was prepared using Fortran programming language in order to determine the safety factor of the slope during earthquakes. This program also provided the inclusion of earthquake effect into the stability analysis by considering the additional horizontal earthquake forces acting on the slope, the increases in pore water pressure and the decreases in the angle of shearing resistance of the soil.

Moreover, to determine the effects of slope geometry and soil properties on the slope stability during earthquakes, model analyses were performed for two different slope cross-sections and two different soil types by using the prepared computer program, and their results were evaluated. As a result of the analyses, low safety factors were obtained for the earthquakes with high magnitudes when the slope was closer to the fault line. Under the same dynamic conditions, the increases in pore water pressure due to cyclic shear stresses were observed higher and lower safety factors were calculated for the cohesive soil when compared to the other soil type. Besides the earthquake effects, the increase in slope height and the existence of ground water also decreased the slope stability by considerable amount.

Keywords: Slope Stability, Earthquake Force, Pore Water Pressure, Factor of Safety.

GİRİŞ

Şev stabilitesi inşaat mühendisliğinin çeşitli uygulamaları sırasında karşılaşılan önemli problemlerden birisidir. Gerek statik yükler ve gerekse deprem gibi dinamik yüklere maruz kalan şevlerin stabilitesi zemin ve deprem özelliklerinin birlikte değerlendirilmesiyle açıklanabilir. Depremler sırasında deprem dalgalarının ürettiği tekrarlı kayma gerilmeleri, bu gerilmeler sonucunda oluşan deformasyonlar ve zeminin mühendislik özelliklerinin değişmesi statik durumda stabil olan bir şevin göçmesine neden olabilmektedir.

Zeminler, depremler sırasında oluşan tekrarlı kayma gerilmeleri etkisi altında cinslerine, sıklıklarına, statik kayma gerilmelerine, gerilme geçmişlerine ve tekrarlı yükleme özelliklerine yani çevrim sayısı ve etkiye süresine göre farklı davranışlar gösterirler (Gökmirza ve Ansal, 1994). Zeminlerin tekrarlı kayma gerilmeleri altındaki davranışı ile ilgili ilk çalışmalar Seed ve Chan (1966) tarafından yapılmış olup, araştırmacılar tekrarlı kayma gerilmesi değerinin drenajsız kayma mukavemetine ulaştığı durumda büyük kalıcı deformasyonların oluşacağını belirtmişlerdir. Daha sonraları Thiers ve Seed (1969), Ogawa ve diğ. (1977), Andersen ve diğ. (1980), Ansal (1981), Ansal ve Erken (1986, 1989), Hack ve diğ. (2007) zeminin tekrarlı yükler altındaki davranışı ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Matsui ve Bahr (1992), Özay ve Erken (2002), Özay (2002) örselenmemiş killi zeminler üzerinde üç eksenli dinamik deney aletinde önce tekrarlı yük uygulayıp daha sonra statik deformasyon kontrollu deneyler yapmışlardır. Ansal ve Erken (1982), farklı şekilde hazırlanmış numunelerde aynı frekans ve değişik tekrarlı kayma gerilmesi oranları için çevrim sayısına bağlı olarak değişen bir kayma mukavemetinin bulunduğunu ve bu değerlerin de statik kayma mukavemeti değerinin %50'si olduğunu söylemişlerdir. Ansal ve Yıldırım (1985), dinamik etkiler altında oluşan boşluk suyu basınçları sönmülmeyen yapılan statik deneylerden, mukavemet azalmasının tekrarlı gerilme oranına ve çevrim sayısına bağlı olarak önemli mertebelere çıkabileceğini söylemişlerdir. Gökmirza (1994), zeminlerde tekrarlı kayma

gerilmeleri etkisi altında meydana gelen mukavemet kaybının nedenlerinden birisinin dinamik yükleme sırasında doymuş zeminlerde boşluk suyu basıncının aşırı artması olduğunu belirtmiştir. Aynı araştırmacı kayma mukavemeti açısı $\phi=10^\circ$ olan bir zeminde deprem magnitudünün $M=5$ 'ten $M=9$ 'a yükselmesi halinde boşluk suyu basıncının %400 arttığını ifade etmiştir. Özay ve Erken (2003), düşük plastisiteli killerde tekrarlı gerilmelerin etkisi ile boşluk suyu basınçları artışına ilave olarak deformasyonların arttığını, rijitliğin azaldığını ve iç yapının bozularak zeminde yumuşama meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Depremler esnasında şevlerin davranışını inceleyen Ishihara (1986), şevlerin göçme potansiyelinin, şev kayma bölgesinin dış merkeze uzaklığına ve depremin magnitudüne bağlı olduğunu söylemiştir. Sitar ve Clough (1983), dik şevlerde gerilmeleri ve ivmeleri kontrol eden en önemli parametrelerin şev açısı, maximum yer ivmesi ve zemin hakim periyodunun zeminin doğal periyoduna oranı olduğunu söylemişlerdir. Deprem etkisi altındaki şevlerde stabilite analizi için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Wu ve Leland (1970), şevlerde deprem etkisini yarı-statik analizle ele almışlar ve stabilite analizi için Fellenius yöntemini kullanmışlardır. Grivas (1982), doğal ve yapay şevler için sismik yükü bir şeve etki etmesi beklenen maximum yatay deprem ivmesi olarak hesaba katmıştır. Campbell (1981) ve Ambraseys (1996) zeminlerde oluşan pik deprem ivmelerini incelemek için şevin fay hattına uzaklığı ve deprem magnitudüne bağlı yarı ampirik formüller vermişlerdir. Son zamanlarda ise deprem etkisindeki şevlerde stabilite analizinde kullanılacak dizayn parametrelerini belirlemek için laboratuvar ölçekli çalışmalar yoğunluk kazanmıştır (Nova-Roessig ve Sitar, 1998; Rathje ve Bray, 2001).

Bu çalışmada deprem etkisi altındaki şevlerde stabiliteyi etkileyen faktörler üzerinde durulmuş ve hesaplamalarda bu faktörleri kapsayacak şekilde bir bilgisayar yazılımı hazırlanmıştır. Hazırlanan yazılımla farklı yükseklikte 2 şev kesiti üzerinde örnek analizler yapılarak bu faktörlerin güvenlik sayısı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

DEPREM ETKİSİ ALTINDA KAYMA MUKAVEMETİ DEĞİŞİMİ

Deprem etkisinin şevlerde hesaba katılması genellikle, tekrarlı kayma gerilmeleri sebebiyle zeminin kayma mukavemetindeki azalmanın stabilite analizinde dikkate alınmasıyla olmaktadır. Kayma mukavemeti kaybının iki nedeni olabilir: birincisi tekrarlı gerilmeler nedeniyle boşluk suyu basıncının artması ve efektif gerilmelerin azalması, ikincisi ise tekrarlı kayma gerilmelerinin yol açtığı tekrarlı şekil değiştirmelerin dane yapısında bir yoğrulmaya neden olmasıdır.

Normal konsolide zeminlerde kayma mukavemeti efektif gerilmeler cinsinden,

$$\tau' = (\sigma - u) \cdot \tan\phi' + c' \quad (1)$$

bağıntısı ile verilir. Burada, τ' efektif kayma mukavemetini, σ toplam normal gerilmeyi, u boşluk suyu basıncını, ϕ' efektif kayma mukavemeti açısını ve c' kohezyonu göstermektedir. Kayma mukavemetindeki azalma matematiksel olarak kayma mukavemeti açısında bir azalma olarak da tanımlanabilir. İnce daneli zeminlerde boşluk suyu basıncı hemen sönmülmeyebilir ve toplam gerilme aynı kalacağından, efektif gerilmeler azalır. Gene tekrarlı kayma gerilmeleri etkisi ile oluşan birim deformasyonlar, zeminlerde bir yumuşamaya yol açacağından, bu faktöründe kayma mukavemetinde nasıl bir azalmaya yol açacağı belirlenmesi gerekmektedir. Kaba daneli zeminlerde, tekrarlı kayma gerilmeleri sırasında artan boşluk suyu basıncı, tekrarlı yüklemenin bitmesi ile kısa bir süre içinde sönmülmeyebilir. Bu yüzden boşluk suyu basıncı değişiminin kayma mukavemeti üzerindeki etkisi, sıvılaşma olmaz ise sınırlı kalabilir (Olgun, 2002).

Deprem Etkisi Altında Boşluk Suyu Basıncı Artışı

Şevlerde depremin neden olduğu tekrarlı kayma gerilmeleri, suya doygun zeminlerde boşluklardaki suyun yüklenme sonuna kadar drene olamamasından dolayı boşluk suyu basınçlarının artmasına neden olur. Boşluk suyu

basıncında meydana gelen artışın büyüklüğü, deprem özelliklerine, şev geometrisine ve şevdeki zemin tabakalarının mukavemet özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

Gökmirza (1994), mevcut boşluk suyu basıncına ilave olarak dinamik etkiler altında oluşan ilave boşluk suyu basıncının değişimini (u) incelemiştir. Bu değer, tekrarlı kayma gerilmelerinin statik kayma gerilmesine oranına (τ_c/τ_{fs}) göre depremin eşdeğer çevrim sayısına (N) bağlı olarak lineer bir şekilde arttığını söylemiştir.

$$u = (0,915 \cdot \log N + 0,108) (\tau_c / \tau_{fs}) \quad (2)$$

Deprem sırasında bir zemin kesitinde oluşacak kayma gerilmeleri pik deprem ivmesi (a_p) ile doğru orantılı olup, yüksekliği H olan bir şevde tekrarlı kayma gerilmesinin statik kayma mukavemetine oranı (τ_c/τ_{fs});

$$(\tau_c / \tau_{fs}) = 0,65 a_p (1 - 0,0075H) \cot \phi \quad (3)$$

şeklinde dir. Eşitlik 2 ve Eşitlik 3 birlikte değerlendirildiğinde;

$$u = (0,915 \log N + 0,108) x (0,65 a_p (1 - 0,0075H) \cot \phi) \quad (4)$$

bağıntısı elde edilir.

Bu eşitlik incelendiğinde deprem dolayısıyla oluşan ilave boşluk suyu basıncının; tekrarlı yüklemenin çevrim sayısına (N), pik deprem ivmesine (a_p), şev yüksekliğine (H) ve kayma mukavemeti açısına (ϕ) bağlı olarak hesaplanabileceği görülmektedir.

Eşitlik 4'e göre boşluk suyu basıncı artışına şev yüksekliğinin etkisi oldukça az olup ihmal edilmesi daha gerçekçi bir yaklaşım olduğundan eşitlik;

$$u = 0,6 \cdot a_p \cdot \cot \phi \cdot \log N \quad (5)$$

şeklinde sadeleştirilebilir.

Depremler sırasında bir bölgede oluşacak pik deprem ivmesi (a_p) değeri bölgenin faya uzaklığına, deprem magnitudüne, yerel geoteknik koşullara bağlı olarak literatürde çeşitli azalm ilişkileri cinsinden verilmiştir.

Campbell (1981), yerel koşulların etkisini ihmal ederek, pik deprem ivmesini faya uzaklık (R) ve deprem magnitüdü (M) cinsinden;

$$a_p = 0,0159 \cdot e^{0,868M} (R + 0,0606 \cdot e^{0,7M})^{-1,09} \quad (6)$$

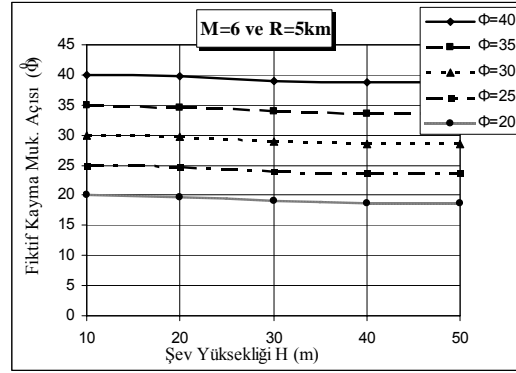
şeklinde ifade etmiştir. Eşitlik (5)'teki tekrarlı yüklemenin çevrim sayısı (N) ise depremin magnitüdüne bağlı olarak elde edilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Deprem magnitüdü (M) ve çevrim sayısı (N) ilişkisi (Seed ve Idriss, 1971).

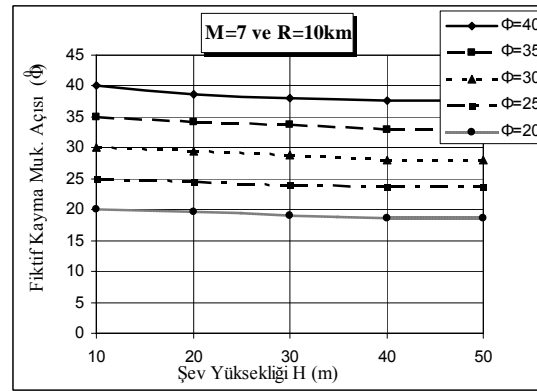
Deprem Magnitüdü (M)	Çevrim Sayısı (N)
7.0	10
7.5	20
8.0	30

Deprem Etkisi Altında Kayma Mukavemeti Açısının Azalması

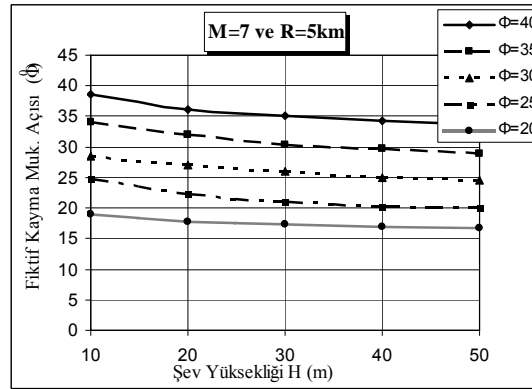
Deprem nedeniyle oluşan tekrarlı şekil değiştirmelerin genliğine bağlı olarak zeminin rijitliğinde bir azalma olmaktadır. Tekrarlı yükleme sonrası zeminlerin kayma mukavemetlerindeki azalmanın modellenebilmesi için zeminin deprem sonrası sahip olduğu bir fiktif kayma mukavemeti açısı (ϕ^0) tanımlanmalıdır. Eğer zeminin tekrarlı gerilme uygulanmadan önceki kayma mukavemeti açısı biliniyorsa deprem sonrası sahip olduğu fiktif kayma mukavemeti açıları deprem magnitüdü ve şevin faya uzaklığına bağlı olarak hesaplanabilir. Gökmirza (1994), zeminin deprem sonrası sahip olduğu fiktif kayma mukavemeti açılarını bir bilgisayar tablo programı yardımıyla çeşitli deprem ve şev özellikleri için araştırmıştır (Şekil 1). Şekil 1'den de görüldüğü gibi depremin magnitüdünün küçük olması durumunda (M=6) fiktif kayma mukavemeti açıları çok fazla bir azalma olmamaktadır. Artan deprem magnitüdü ve şevin fay hattına olan uzaklığı yaklaştıkça fiktif kayma mukavemeti açıları önemli azalmalar olmaktadır.



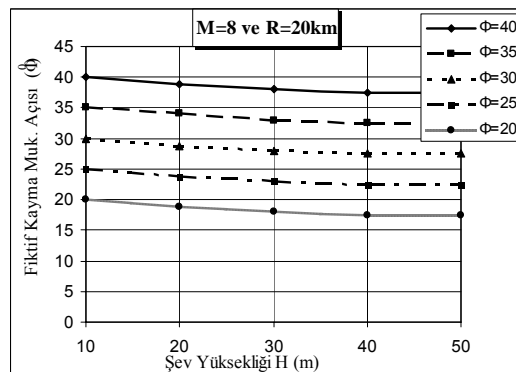
a) M=6 ve R=5km



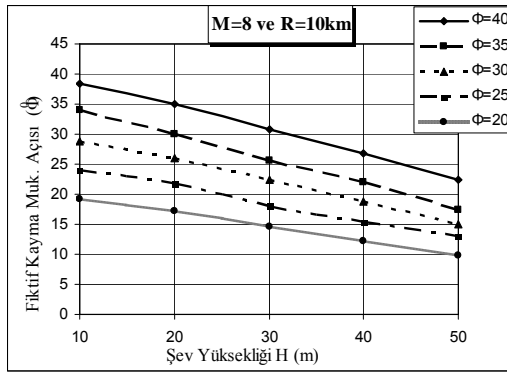
b) M=7 ve R=10km



c) M=7 ve R=5km



d) M=8 ve R=20km



e) M=8 ve R=10km

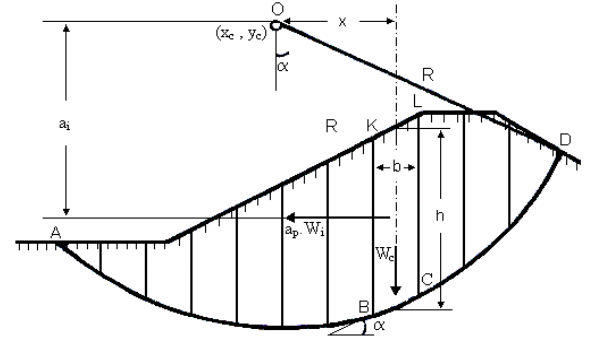
Şekil 1. Şev yüksekliğine bağlı fiktif kayma mukavemeti açıları(φ) (Gökmirza, 1994).

BASİTLEŞTİRİLMİŞ BİSHOP DİLİM YÖNTEMİ VE STABİLİTENİN BİLGİSAYAR YAZILIMI İLE BELİRLENMESİ

Basitleştirilmiş Bishop Dilim Yöntemi, suya doygun killerde toplam gerilmeler kullanılarak yapılan incelemeler için olduğu kadar her türlü zeminde efektif gerilmeler kullanılarak yapılan incelemeler için de elverişlidir. Bu yöntemle göre bir şevin stabilize analizi yapılırken şeve gelen dinamik kuvvetlerin etkisini dikkate alan ve pik deprem ivmesini kullanan eş değer bir yatay kuvvet ele alınmıştır (Şekil 2). Bishop yönteminde dilimler esas olduğuna göre, her dilimin ağırlığı ile orantılı bir yatay kuvvet hesaba katılmıştır. Her dilime etki eden yatay kuvvetler sonunda toplanarak, kaymaya neden olan momentler kısmında yer almaktadır. Tekrarlı kayma gerilmeleri nedeniyle zeminlerde oluşan boşluk suyu basıncı artışları ve kayma mukavemeti açısından azalmalar da hazırlanan bilgisayar programında analize katılmıştır. Buna göre güvenlik katsayısı (F_s) şu şekildedir:

$$F_s = \frac{\sum (c' b + (W - u_{son} b) \cdot \tan \phi') / M(\alpha)}{\sum W \cdot \sin \alpha + \sum a_p \cdot W} \quad (7)$$

c' : zeminin kohezyonu, b : dilim genişliği, W : dilim ağırlığı, ϕ' : zeminin kayma mukavemeti açısı, a_p : yerçekimi ivmesi cinsinden pik deprem ivmesi, α : şev açısıdır. u_{son} : Deprem etkisi altındaki nihai boşluk suyu basıncı değeri olup, $u_{son} = u_{baş} + u$ (8) şeklindedir. Burada $u_{baş}$; depremden önceki boşluk suyu basıncı değeri, u ise, Eşitlik 5 ile hesaplanan ilave boşluk suyu basıncı değeridir.

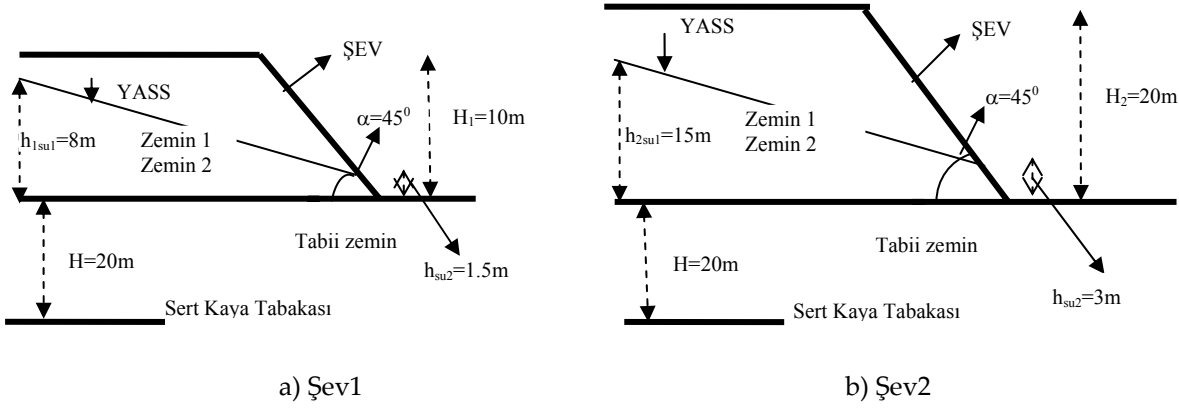


Şekil 2. Şev stabilize analizi için Basitleştirilmiş Bishop Dilim Yöntemi.

Şev stabilize analizinin yapılabilmesi amacıyla dinamik etkilerin de hesaplamalara dahil edildiği ve Eşitlik 7'ye göre güvenlik sayısını hesaplayan bir bilgisayar yazılımı hazırlanmıştır.

Yazılımın başlıca özellikleri ve avantajları şöyledir;

- Bu yazılımda şev stabilize analizinde bilgisayarla programlamaya en uygun olan ve moment denge denklemine dayanan Basitleştirilmiş Bishop Dilim Yöntemi kullanılmıştır.
- Yazılım Fortran77 programlama dilinde hazırlanmıştır.
- Program ile çok farklı tabakalara sahip şevler ele alınabilir.
- Şev stabilize analizinde farklı daire merkezleri için değişik yarıçaptaki kayma yüzeylerine göre en kritik güvenlik sayıları hesaplanabilmektedir.
- Deprem magnitüdü ve şevin fay hattına uzaklığına bağlı olarak pik deprem ivmesi ve sismik güvenlik sayısı hesaplanmaktadır.
- Program bir ana program ve dokuz alt programdan oluşmaktadır. Ana program giriş ve çıkış bilgileri için, alt programlar şevin geometrisinin oluşturulması, daire merkezlerinin yerleştirilmesi, yarıçapların hesaplanması, hidrolik verilerin ve dinamik verilerin stabilizeye etkisinin katılması, güvenlik sayılarının Bishop yöntemi ile hesaplanması amacıyla kullanılmaktadır.
- Şev için tanımlanan mekanik ve geometrik veriler SI (System International) birim sistemiyle tanımlanmaktadır.



Şekil 3. Deprem etkisinde kalan şev kesitleri.

Tablo 2. Örnek analiz için kullanılan zemin tabakalarının özellikleri.

Özellikler	Zemin1 (ZEM1)	Zemin2 (ZEM2)	Doğal Zemin
Doğal Birim Hacim Ağırlık (γ_n) (kN/m ³)	19.0	20.0	19.5
Kohezyon (c) (kN/m ²)	35.0	70.0	30.0
İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) (°)	30.0	5.0	25.0

ÖRNEK ANALİZ VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Şevlerde deprem kuvvetlerinin ve zemin özelliklerinin stabiliteye etkisinin gözlenebilmesi için kesitleri şekilde verilen 2 adet şev hem statik hem de dinamik analize tabi tutulmuştur (Şekil 3). Şevlerde şev açısı her iki şev için de aynı alınırken şev yükseklikleri değiştirilmiştir. Her iki şevde de farklı 2 zemin türü için analiz yapılmıştır (Tablo 2). Bu zeminlerden Zemin1 (ZEM1) hem kohezyonlu hem kohezyonsuz özellik gösterirken, Zemin2 (ZEM2) kohezyonlu özellik göstermektedir. Analizlerde şev kesitlerinde yer altı suyunun (YASS) olması durumu göz önünde bulundurulmuştur. Her iki şevin tabanında 20m yüksekliğinde aynı özelliğe sahip tabii zemin tabakası ve bunun altında da sert kaya tabakası bulunmaktadır.

Dinamik analiz hesaplarında deprem magnitüdüleri $M=6$, $M=7$ ve $M=8$ alınmış, şevin fay hattına uzaklığı ise $R=5$, 10, 20, 50 ve 100 km şeklinde seçilmiştir.

Statik Analiz Sonuçları

Şev için yapılan statik stabilite analizinde 2 farklı durum dikkate alınmıştır;

a. Deprem etkisi yok + YASS yok: Bu şartlar altında yapılan statik analizde 1 Nolu şevde (Şev1) Zemin1 için güvenlik katsayısı $F_s=3.25$ olurken, Zemin2 için $F_s=3.17$ bulunmuştur.

2 Nolu şevde (Şev2) ise Zemin1 için $F_s=1.57$ olurken, Zemin2 için $F_s=1.06$ bulunmuştur.

Elde edilen sonuçlar hem kohezyonlu hem kohezyonsuz özellik gösteren zeminlerin (ZEM1) stabilitesinin kohezyonlu zeminlere (ZEM2) göre daha büyük olduğunu göstermektedir. Bu durum özellikle yüksek şevlerde daha açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Şev2'de iki farklı zemin arasındaki güvenlik katsayısı oranı yaklaşık 1.5'tir.

Aynı zeminler için şev yüksekliği 10m'den 20m'ye değiştiği zaman güvenlik sayısı Zemin1 için $F_s=3.25$ 'ten $F_s=1.57$ 'ye inerken, Zemin2 için bu durum daha belirgin olmuş güvenlik katsayısındaki değişim yaklaşık 1/3 oranında

olmuştur. Bu durum aynı zemin tabakaları olsa dahi şev yüksekliği değişiminin şev stabilitesi üzerinde ne kadar önemli bir parametre olduğunu göstermesi açısından önemlidir.

b. Deprem etkisi yok + YASS var: Şevde yer altı suyunun olduğu durumda 1 Nolu şevde (Şev1) Zemin1 için güvenlik katsayısı $F_s=2.12$ olurken, Zemin2 için $F_s=2.09$ bulunmuştur.

2 Nolu şevde (Şev2) Zemin1 için güvenlik katsayısı $F_s=1.39$ olurken, Zemin2 için $F_s=0.98$ bulunmuştur.

Sonuçlara göre her iki şev ve her iki zemin durumu için deprem etkisi olmaksızın bile yer altı suyu varlığında güvenlik katsayısı önemli oranda azalmaktadır. Bu durum şevlerde oluşan boşluk suyu basıncına bağlı olarak efektif gerilme değerleri ve dolayısıyla efektif kayma mukavemetinin azalmasına bağlı olarak açıklanabilir (Eşitlik 1).

Dinamik Analiz Sonuçları

Deprem etkisi altında yapılan analizlerde deprem magnitudünün farklı değerleri ve şevin fay hattına uzaklığının $R=5, 10, 20, 50$ ve 100 km olması durumları için pik deprem ivmesi değerleri Eşitlik 6'ya göre hesaplanmış ve Tablo3'de verilmiştir.

Pik deprem ivmesi değişimini etkileyen birinci faktör şevin fay hattına uzaklığıdır. Örneğin; deprem magnitudünün $M=7$ ve uzaklığın $R=50$ km olması için pik deprem ivmesi $a_p=0.0826$ iken aynı magnitudde uzaklık 5 km'ye indiği zaman pik deprem ivmesi $a_p=0.4178$ değerine yükselmektedir. Benzer değişimler $M=6$ ve $M=8$ magnitudleri için de geçerlidir (Tablo 3). Pik deprem ivmesini etkileyen 2. faktör depremin magnitudüdür. Örneğin; $R=5$ km ve $M=6$ için $a_p=0.2636$ iken $R=5$ km ve $M=8$ için $a_p=0.585$ değerine yükselmektedir.

Benzer şekilde deprem magnitudünün farklı değerleri ve şevin fay hattına uzaklığının $R=5, 10, 20, 50$ ve 100 km olması durumları için Şev1 ve Şev2 için boşluk suyu basıncı oranları $(\Delta u/\sigma_c)$ şev yüksekliğinden bağımsız olarak

hesaplanmıştır. Burada $\Delta u=u$ şeklinde dikkate alınarak Eşitlik 5'e göre elde edilmiştir (Şekil 4).

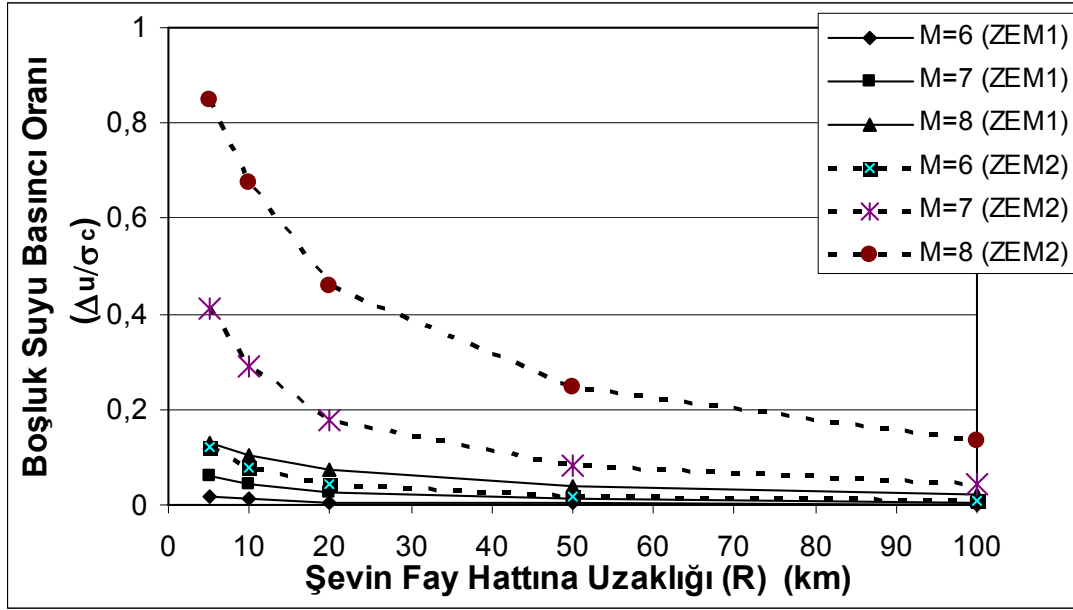
Tablo 3. Pik deprem ivmesi değerleri (a_p).

Şevin fay hattına olan uzaklığı (km)	Deprem Magnitudü		
	M=6	M=7	M=8
R=100	0.0184	0.0420	0.0923
R=50	0.0375	0.0826	0.1702
R=20	0.0908	0.1822	0.3279
R=10	0.1631	0.2940	0.4654
R=5	0.2636	0.4178	0.5851

Şevin fay hattına olan uzaklığı azaldıkça boşluk suyu basıncı oranları çok önemli miktarda artmaktadır. Özellikle $R<20$ km olduğu durumlarda bu durum çok belirgindir.

Boşluk suyu basıncı oranını etkileyen bir diğer önemli faktör depremin magnitudü olup, deprem magnitudü arttıkça tekrarlı yükleme etkisi ile meydana gelen boşluk suyu basınçları artmaktadır. Diğer yandan deprem magnitudünün büyük ve faya uzaklığın az olması durumunda boşluk suyu basıncı artışları çok büyük olmakta ve şev kayması kaçınılmaz olmaktadır. Örneğin; Zemin2 için $R=5$ km mesafede $M=6$ iken $(\Delta u/\sigma_c)=0.123$ değerini alırken, $M=8$ iken $(\Delta u/\sigma_c)=0.847$ değerini almaktadır ki bu değer şevin stabilitesinin bozulması açısından çok önemlidir. Boşluk suyu basıncı oranının bu derece büyük çıkması Zemin2'nin içsel sürtünme açısı değerinin hemen hemen sıfıra yakın olmasından kaynaklanmaktadır.

Zemin2 kohezyonlu bir zemin olup özellikle bu tip zeminlerde deprem etkisi altında meydana boşluk suyu basınçları hemen sönmelenememektedir. Halbuki kohezyonsuz zeminlerde depremler esnasında oluşan boşluk suyu basınçları kısa zamanda sönmülenebilmektedir (Olgun, 2002). Bu yüzden de hem kohezyonlu hem de kohezyonsuz özellik gösteren Zemin1'de meydana gelen ilave boşluk suyu basıncı oranları Zemin2 için elde edilen değerlerden çok küçük olmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Şev1 ve Şev2'de boşluk suyu basıncı oranı değişimleri.

Tablo 4. Tekrarlı yükleme sonrası fiktif kayma mukavemeti açıları (ϕ^0).

Şevin fay hattına olan uzaklığı (km)	Şev1						Şev2					
	Deprem magnitüdü (Zemin1)			Deprem magnitüdü (Zemin2)			Deprem magnitüdü (Zemin1)			Deprem magnitüdü (Zemin2)		
	M=6	M=7	M=8	M=6	M=7	M=8	M=6	M=7	M=8	M=6	M=7	M=8
R=200	30.0	30.0	30.0	5.0	5.0	5.0	30.0	30.0	30.0	5.0	5.0	5.0
R=100	30.0	30.0	30.0	5.0	5.0	5.0	30.0	30.0	29.9	5.0	5.0	5.0
R=50	30.0	30.0	30.0	5.0	5.0	5.0	30.0	29.9	29.4	5.0	5.0	5.0
R=20	30.0	30.0	30.0	5.0	5.0	5.0	30.0	29.6	28.5	5.0	5.0	4.8
R=10	30.0	30.0	29.0	5.0	5.0	4.5	29.9	29.2	25.0	4.9	4.8	4.0
R=5	30.0	29.0	27.0	5.0	4.5	4.0	29.8	27.5	20.0	4.8	4.0	3.0

Depremler esnasında zeminlerin kayma mukavemetinde meydana gelen azalmayı yansıtan bir diğer parametre zeminin kayma mukavemeti açısından meydana gelen değişimdir. Tekrarlı yükleme sonrası zeminin kayma mukavemeti açısından şev yüksekliğine, deprem magnitüdüne ve şevin fay hattına uzaklığına bağlı değişimler meydana gelmektedir (Tablo 4).

Deprem magnitüdünün küçük değerleri (M=6) için zeminlerin kayma mukavemeti açılarında çok fazla değişiklik meydana gelmezken, artan deprem magnitüdü değerleri ile zeminlerin kayma mukavemeti açısı değerleri önemli oranda azalmaktadır. Bu durum özellikle şevin fay hattına yakın olduğu durumlarda çok belirgin olmaktadır. Örneğin; 2 Nolu şevde Zemin1 için M=8 ve R=5 km olması durumunda

kayma mukavemeti açısı değeri $\phi=30.0'$ den $\phi=20.0'$ ye kadar azalmaktadır. Kayma mukavemeti açısındaki bu değişim şev güvenliği açısından oldukça önemlidir. Şev yüksekliği daha az olan 1 Nolu şevde ise aynı şartlarda $\phi=27.0'$ elde edilmiş olup, bu durum şev yüksekliğinin kayma mukavemeti açısı değişiminde önemli bir etken olduğunu göstermektedir.

Şev stabilize analizinde deprem etkileri altında elde edilen güvenlik sayısı değerleri 4 farklı durum için değerlendirilmiştir. Analizlerde ayrıca yer altı suyunun olup olmaması durumu için de değerlendirmeler yapılmıştır. Statik analizlerde $F_s \geq 1.5$ ve dinamik analizlerde $F_s \geq 1.1$ olması koşulu dikkate alınmıştır.

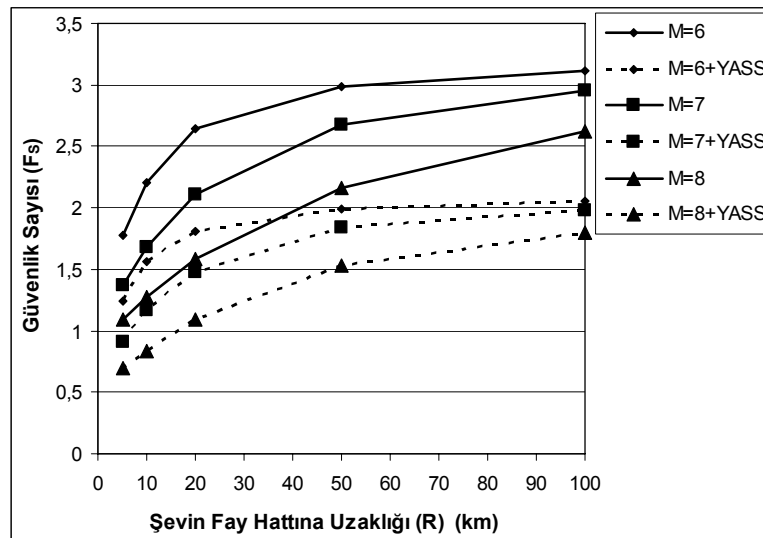
a. Şev1 + Zemin1: Statik olarak güvenli olan bu şevde deprem magnitüdünün $M=7$ veya $M=8$ olması ve yer altı suyunun mevcut olması durumunda göçme olasılığı vardır. Fakat aynı şevde $M=8$, $R=5$ km olması ve yer altı suyunun olmaması durumunda şev güvenli olmaktadır. Bu da göstermektedir ki deprem etkisi altındaki şevlerde yer altı suyunun varlığı stabilizeyi çok önemli oranda etkilemektedir. Şevin fay hattına uzaklığı $R>20$ km olduğu durumlarda yer altı suyu olsa dahi göçme olmayacaktır (Şekil 5).

b. Şev1 + Zemin2: 2 Nolu zemin olması durumunda elde edilen güvenlik sayıları 1 Nolu

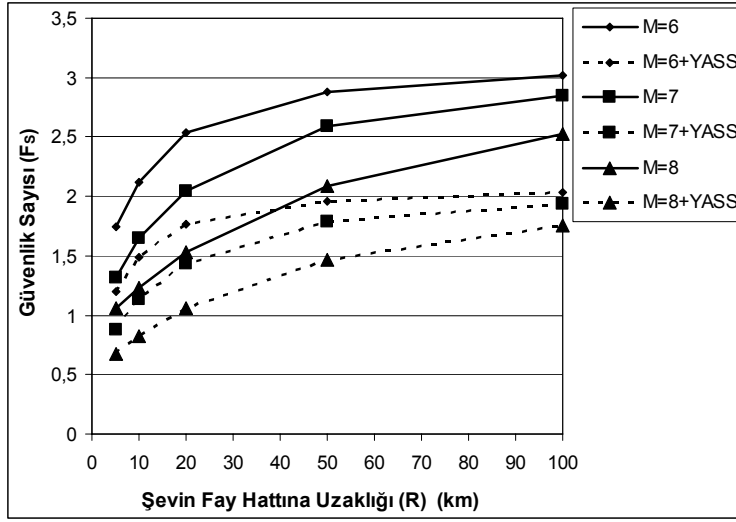
zemindekine yakın değerler almıştır (Şekil 6). Bu durum zemin özellikleri farklı olsa bile şev yüksekliğinin az olduğu durumlarda şevlerin benzer göçme potansiyeline sahip olacağını göstermektedir. Zemin1 durumundan farklı olarak $M=8$ ve $R=20$ km durumunda yer altı suyu varsa şevde göçme meydana gelecektir.

c. Şev2 + Zemin1: Genel olarak $R=10$ km mesafesine kadar bulunan güvenlik sayıları kritik sınırın altındadır (Şekil 7). $M=8$, $R=5$ km ve yer altı suyu olması durumunda güvenlik sayısı 0.54 değerine kadar düşmektedir. Elde edilen güvenlik sayıları aynı şartlar altında 1 Nolu şev için elde edilen değerlerin $2/3'$ ü olmaktadır. Bu durum deprem etkisi altında şevin stabilesi üzerinde şev yüksekliğinin ne derece önemli olduğunu göstermektedir.

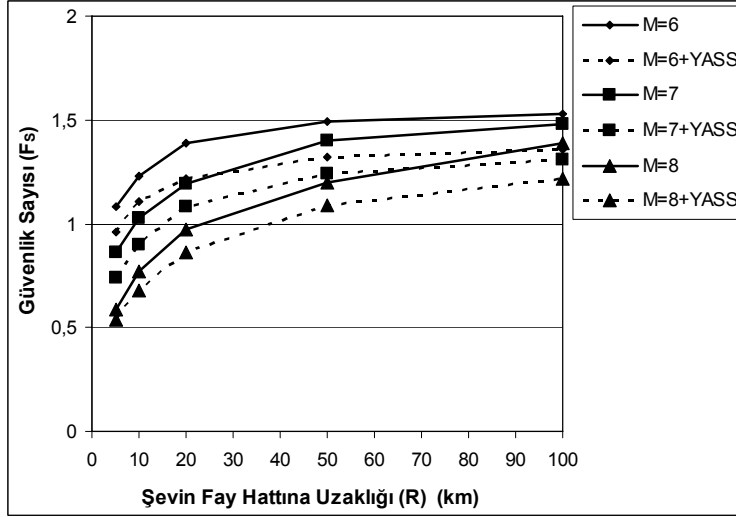
d. Şev2 + Zemin2: Zeminin kohezyonlu olması durumunda deprem etkisi altında elde edilen güvenlik sayılarının tamamı kritik sınırın altında olmaktadır ($F_s < 1.1$) (Şekil 8). Bu durum şev stabilesi üzerinde şev yüksekliğinin yanı sıra şevi oluşturan zemin tabakalarının özelliklerinin çok önemli rol oynadığını göstermektedir. Özellikle kohezyonlu zeminlerde yüksek şevlerde tekrarlı kayma gerilmeleri etkisi altında yer altı suyu olmasa dahi ortaya çıkan ilave boşluk suyu basınçları şevin göçmesi için yeterli olabilmektedir.



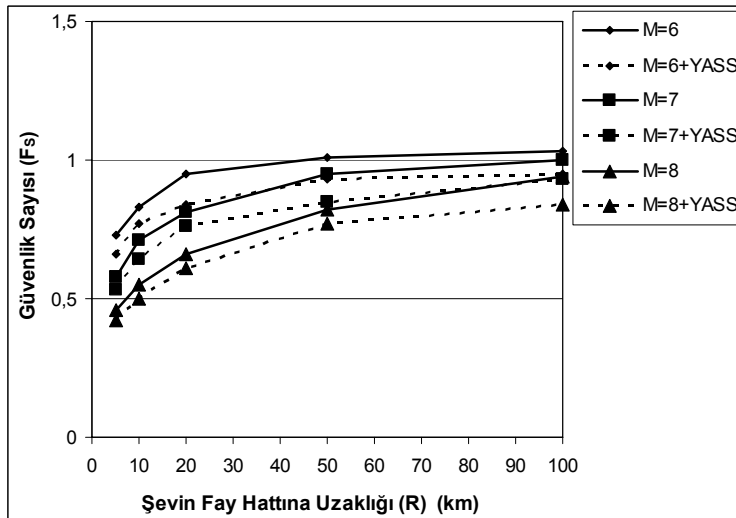
Şekil 5. 1 Nolu şevde Zemin1 durumu için Güvenlik Sayısı değişimi.



Şekil 6. 1 Nolu şevde Zemin2 durumu için Güvenlik Sayısı değişimi.



Şekil 7. 2 Nolu şevde Zemin1 durumu için Güvenlik Sayısı değişimi.



Şekil 8. 2 Nolu şevde Zemin2 durumu için Güvenlik Sayısı değişimi.

SONUÇLAR

- Statik durumda güvenli olan şevlerin deprem kuvvetlerinin etkisi altındaki davranışları çok farklı olmaktadır. Örneğin 2 Nolu şevde Zemin1 için depremsiz durumda güvenlik sayısı $F_s=1.57$ olurken, aynı şevde yer altı suyu yokken $M=8$, $R=10$ km için $F_s=0.77$ olabilmekte ve şev göçebilmektedir. Aynı durumda yer altı suyu varsa $F_s=0.68$ olmaktadır.
- Deprem kuvvetlerinin neden olduğu tekrarlı kayma gerilmelerine bağlı olarak şev stabilesi üzerinde etkili olan ilk faktör deprem esnasında oluşan ilave boşluk suyu basıncı artışıdır. Boşluk suyu basıncının artması ile efektif gerilmeler ve dolayısıyla kayma mukavemeti değerleri azalmaktadır. Tekrarlı yükleme nedeniyle oluşan ilave boşluk suyu basıncı; depremin magnitudüne, depremin çevrim sayısına, şevin fay hattına uzaklığına bağlı olarak değişen pik deprem ivmesini kullanarak stabilite hesaplarına katılabilmektedir. Özellikle şevin fay hattına yakın olduğu durumlarda pik deprem ivmesi artışı çok belirgin olmaktadır.
- Deprem kuvvetlerinden kaynaklanan ve stabilite üzerinde etkili olan ikinci faktör ise zeminin rijitliğinde, dolayısıyla kayma mukavemeti açısından meydana gelen azalmalardır. Deprem magnitudünün büyük ve şevin fay hattına yakın olması kayma mukavemeti açısından önemli azalmalara neden olmaktadır.
- Deprem kuvvetlerinin şev stabilesi üzerindeki etkisi özellikle kohezyonlu zeminlerde daha belirgin olmaktadır. Kohezyonlu zeminlerde deprem etkisi altında oluşan ilave boşluk suyu basıncı artışları hemen sönmelenemediği için kayma mukavemetinde çok önemli azalmalar meydana gelmektedir. Kohezyonsuz zeminler de ise boşluk suyu basıncı artışları kısa sürede sönmelenebilmektedirler.
- Şevde yer altı suyunun varlığı hem statik hem de dinamik durumda etkilidir. Yer altı suyu olmadığı durumda sadece deprem etkisi altında stabil kalabilen bir şev, yer altı suyu mevcutken deprem etkisinde meydana gelen ilave boşluk suyu basıncı artışları dolayısıyla göçebilmektedir.
- Deprem özellikleri ve zemin tabakası özelliklerinin yanı sıra şevin yüksekliği de stabilite analizi üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir.
- Deprem etkisi altında kalabilecek şevlerde stabilite analizi yapılırken deprem özellikleri, şevin fay hattına uzaklığı, zemin tabakası özellikleri ve şev geometrisi gibi faktörlerin tamamının birlikte değerlendirilmesi en gerçekçi sonuca ulaşılmasını sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu yayının ilk yazarın Yüksek Lisans Tez çalışmasından (Olgun, 2002) olup Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Ambraseys, N.N., 1996, The Prediction of earthquake peak ground acceleration in Europe; Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, Volume 33, Number 3, 107A-107A(1).
- Andersen, K. H., Pool, J.H., Brown, S.F. ve Rosenbrand, W. F., 1980, Cyclic and static laboratory tests on drammen clay; J. of Geotech. Eng. Division, ASCE, 106, 499-529.
- Ansal, A.M., 1981, Zeminlerin dinamik kayma gerilmeleri altında davranışları; Doçentlik Tezi, İTÜ İnşaat Fak., İstanbul.

- Ansal, A. M. ve Erken, A., 1982, Rate dependent dynamic behavior of normally consolidated clay; 7th European Conference on Earthquake Eng., Athens, Greece, 329-336.
- Ansal, A. M. ve Yıldırım, H., 1985, Killerin tekrarlı yükler altında kayma mukavemeti; II. Ulusal Kil Sempozyumu, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 329-341.
- Ansal, A. M. ve Erken, A., 1986, Kohezyonlu zeminlerin tekrarlı gerilmeler altında davranışı; Deprem Araştırma Bülteni, 50, 10-53.
- Ansal, A. M. ve Erken, A., 1989, Undrained behavior of clay under cyclic shear stresses; J. of the Geotech. Eng., ASCE, 115, 968-983.
- Campbell, K.W., 1981, Near source attenuation of peak horizontal acceleration; Bull. Seis. Soc., Volume 71, 2039-2070.
- Grivas, D.A. ve Asaoka, A.A., 1982, Slope stability prediction under static and seismic loads; J. of the Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol. 108, No. GT5, 713-729.
- Hack, R., Alkema, D., Kruse, G. A. M., Leenders, N. ve Lizi L., 2007, Influences of earthquakes on the stability of slopes; Eng. Geology, 91, 4-15.
- Ishihara, K., 1986, Stability of natural deposits during earthquakes; Collected Papers, Dept. Civil Eng., Vol. 24, Tokyo, 1-56.
- Matsui, T., Abe, N. ve Bahr, M.A., 1991, Degradation of saturated clays after cyclic loading; Prof. 2th Int. Conf. On Recent Advances in Geotech. Earthquake Eng. and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, USA, Vol. 1, 1.18, 41-46.
- Nova-Roessig, L. ve Sitar, N., 1998, Centrifuge studies of the seismic response of reinforced soil slopes; Proceedings of the Third Geotech. Eng. and Soil Dynamics Conf., Geotech. Special Publication, Vol. 75. ASCE, Seattle, Washington, 458-468.
- Ogawa, S., Shibayama, T. ve Yamaguchi, H., 1977, Dynamic strength of saturated cohesive soil; Proc. 7th Int. Soil Mech. & Found. Eng., Vol. 2, 103-107.
- Olgun, M., 2002, Sıkıştırılmış kil dolgularda dinamik etkilerin incelenmesi; Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Özay, R., 2002, Örselenmemiş killi zeminlerin statik mukavemetine deprem yüklerinin etkisi; Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özay, R., ve Erken, A., 2003, Tekrarlı yük etkisinde kalmış düşük plastisiteli killi zeminlerin davranışı; Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, 1-5.
- Özay, R. ve Erken, A., 2002, Killerde dinamik yüklemenin hacim değişimine etkisi; Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Eskişehir, 342-348.
- Rathje, E.M. ve Bray, J.D., 2001, One- and two-dimensional seismic analysis of solid-waste landfills; Can. Geotech. J. 38 (4), 850-862.
- Seed, H.B. ve Chan, C.K., 1966, Clay strength under earthquake loading condition; J. of the Soil Mech. and Found. Eng. Div., ASCE, Vol. 92, 53-78.
- Siyahi, B. G., ve Ansal, A., M., 1994, Depremlerde kayma mukavemetindeki azalmanın çevre stabilitesine etkisi; Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Beşinci Ulusal Kongresi, ODTÜ, Ankara, 194-207.
- Siyahi, B. G., 1994, Deprem etkisindeki çevre stabilitesinin incelenmesi; Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Seed, H.B. ve Idriss, I.M., 1971, Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential; J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol. 97(9), 1249-1273.
- Sitar, N., ve Clough, G.W., 1983, Seismic response of steep slopes in cemented soils; J. of Geotech. Eng., Vol. 109, No. 2, 210-227.
- Thiers, G.R. ve Seed, H.B., 1969, Strength and stress-strain characteristics of clays subjected to seismic loading conditions; American Society of Testing and Materials, ASTM, 450, 3-56.
- Wu, T.H. ve Leland, M.K., 1970, Safety analysis of slopes; J. of the Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol. 96, No. 2, 609-630.