

Sismik Şev Stabilite Analizlerine Genel Bir Bakış

Seyfettin Umut Umu¹

Özet

Şevler, altyapı projelerinde eğimli yüzeylerin güvenliğini ve stabilitesini sağlamak amacıyla tasarlanır. Şev stabilitesini etkileyen faktörler arasında eğim, yükseklik, malzeme özellikleri, drenaj sistemleri ve çevresel koşullar yer alır. Şev stabilitesini sağlamak için istinat duvarları, beton ve kaya dolgular, ankraj sistemleri gibi çeşitli teknikler kullanılır. Bunun yanında, sismik etkilerden kaynaklanan dinamik gerilmelerin şev stabilitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi, özellikle deprem bölgelerinde büyük önem taşır. Sismik şev stabilitesi analizlerinde, dinamik gerilmelerin şev üzerindeki etkileri kütsel mukavemet kaybı ve zemin mukavemeti kaybı olmak üzere iki ana başlık altında ele alınır. Kütsel mukavemet kaybında, deprem sırasında meydana gelen dinamik gerilmeler zeminin mukavemetini geçici olarak aşarak kalıcı deformasyonlara yol açar. Zemin mukavemeti kaybında ise, dinamik yükler zeminin kayma mukavemetini ciddi ölçüde azaltır ve sıvılaşma gibi daha ciddi stabilite sorunlarına neden olabilir. Bu bağlamda, sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi ve kritik kayma yüzeyinin tespiti, stabilite analizi için öncelikli adımlardır. Bu çalışmada sismik şev stabilite analizlerinde kullanılan teknikler ele alınmıştır. Psödo-statik analiz, Newmark analizi, kütsel ve zemin mukavemeti kaybına odaklanan yöntemler detaylı şekilde incelenmiştir.

1. Giriş

Sismik şev stabilitesi, özellikle deprem bölgelerinde, altyapı projelerinde güvenlik ve dayanıklılık açısından kritik bir konudur. Şevler, eğimli yüzeylerin stabilitesini sağlamak ve çevresel koşullara karşı dayanıklılık göstermek üzere tasarlanır. Ancak, eğim, yükseklik, malzeme özellikleri, drenaj sistemleri gibi statik faktörlerin yanı sıra, dinamik yüklerin etkileri de şev stabilitesi üzerinde önemli bir rol oynar. Dinamik etkilerin, özellikle deprem sırasında, zemin

1 Doktor Öğretim Üyesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, suumu@eskisehir.edu.tr, 0000-0002-5901-2626

mukavemetini ve şev güvenliğini nasıl etkilediğini anlamak, etkin tasarım ve mühendislik çözümleri geliştirmek açısından hayati önemdedir.

Sismik şev stabilite analizleri, deprem sırasında meydana gelen kütleli mukavemet kaybı ve zemin mukavemeti kaybı olmak üzere iki temel başlık altında ele alınır. Dinamik gerilmeler, zeminde geçici veya kalıcı deformasyonlara yol açabilir ve sıvılaşma gibi ciddi stabilite sorunlarını tetikleyebilir. Bu bağlamda, sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi, kritik kayma yüzeylerinin belirlenmesi ve şev deformasyonlarının öngörülmesi, analiz süreçlerinin temel adımlarıdır. Analizlerde, psödo-statik yaklaşımlar, Newmark kayan blok analizi ve deformasyon yumuşaması gibi yöntemler sıklıkla kullanılır.

Bu çalışmada, sismik şev stabilitesi analizlerinde kullanılan tekniklere genel bir bakış sunulmuştur. Psödo-statik analizlerin basit ve etkili yönlerinden başlayarak, Newmark analizi ile şev deformasyonlarının tahmini ve zemin özelliklerinin dinamik etkiler altındaki davranışı detaylı olarak ele alınmıştır. Çalışma, mühendislik uygulamaları için temel bilgiler sağlamayı ve şev stabilitesinin sismik etkiler altında nasıl değerlendirileceğine dair kapsamlı bir anlayış geliştirmeyi amaçlamaktadır.

2. Sismik Şev Stabilite Analizi

Sismik şev stabilite analizi, gerek deprem hareketinden kaynaklanan dinamik gerilmelerin, gerekse bu dinamik gerilmelerin şevi teşkil eden zeminlerin mukavemeti ve gerilme – deformasyon davranışı üzerindeki etkilerinin dikkate alınmasını gerektirmektedir. Şevlerde sismik orijinli stabilite kaybı, söz konusu bir şev için hangi faktörün daha etkili olacağı göz önüne alınarak aşağıdaki iki sınıf altında değerlendirilebilir (Kramer, 1996)

- Kütleli mukavemet kaybı (Ataletsel şev stabilite analizi)
- Zemin mukavemeti kaybı (Zayıflayan şev stabilite analizi)

Kütleli mukavemet kaybı durumunda zemin kayma mukavemetinde dinamik yüklemelere bağlı düşüşler ihmal edilebilir düzeylerde kalırken, kritik bir kayma yüzeyi üzerinde deprem hareketinden kaynaklanan yatay ve düşey ivmeler sebebiyle oluşan dinamik gerilmelerin geçici süreler için zemin mukavemetini aşması sonucunda şevde kalıcı deformasyonlar meydana gelir. Şevin ağırlığına ek olarak, ivmelerle bağlantılı atalet kuvvetleri zemini kayma yüzeyine doğru iter.

Zemin mukavemeti kaybına bağlı stabilite bozulması ise, şevi oluşturan zeminlerin kayma mukavemetinin dinamik yüklemeler altında büyük ölçüde azalması sonucunda meydana gelir. Dinamik yükler, kayma yüzeyindeki

zemin partikülleri arasında sürtünme kuvvetini zayıflatır. Bu durum, zemin malzemesinin içsel sürtünme açısını (ϕ) ve kohezyonunu (c) etkiler. Doygun zeminlerde deprem sırasında kayma yüzeyi boyunca boşluk suyu basıncı hızla artar. Bu artış, zeminin efektif gerilmesini ($\sigma' = \sigma - u$) azaltır. Bu durumda, kayma mukavemetindeki kayıp miktarına bağlı olarak zeminin sıvılaşarak şev üzerinde akması söz konusu olabileceği gibi, deprem hareketi sırasındaki dinamik yüklemelere bağlı olarak geçici süreler için akma da söz konusu olabilir. İlgili göçme mekanizmalarına bağlı olarak öncelikle düşünülmesi gereken kritik durum şevi oluşturan zeminde sıvılaşma meydana gelip gelmediğinin kontrol edilmesi gerektiğidir.

2.1. Ataletsel Şev Stabilite Analizi

Atalet temelli şev stabilite analizi, deprem yüklerinin etkisini basitleştirilmiş bir şekilde modele dahil etmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yaklaşım, dinamik yükleri yatay ve dikey doğrultuda sabit atalet kuvvetleri olarak ele alır ve statik bir analiz çerçevesinde değerlendirme yapılmasını sağlar. Yöntemin uygulanabilirliği, zemin türü, şev geometrisi ve deprem koşulları gibi faktörlere bağlıdır. En yaygın kullanılan ataletsel şev stabilite analizleri “*Pseudo-Statik Analiz*” ve “*Newmark Analizi (Kayan Blok Analizi)*” yöntemleridir.

Atalet temelli analiz, zemin türüne bağlı olarak farklı doğruluk seviyelerinde sonuçlar verir.

a) Gevşek ve Doygun Zeminler:

- Yöntem, gevşek veya doymuş kumlu zeminlerde sıvılaşma etkilerini hesaba katmaz.
- Boşluk suyu basıncında hızlı bir artışa neden olan bu zeminler için atalet temelli analiz eksik kalabilir.

b) Kohezyonlu Zeminler (Kil):

- Kısmen drenajsız koşullara sahip kil zeminlerde daha güvenilir sonuçlar verir. Ancak, dinamik yükler altında kohezyonun zamanla azalabileceği dikkate alınmalıdır.

c) Kaya Zeminler:

- Atalet temelli analiz, dayanıklı kaya zeminlerde genellikle güvenilir sonuçlar sunar. Kayaların çatlaklı ya da zayıf olduğu durumlarda kayma yüzeyinin detaylı modellenmesi gerekebilir.

Ataletsel şev stabilite analizi, tekrarlı sismik yüklemeler sırasında kayma direncine sahip zeminler için daha uygun olan bir yöntemdir (Day, 2004).

- Sismik yükleme ile kayma direncinde belirgin bir düşüş göstermeyen zeminler. Bu tip sahalarda sismik yükleme kaynaklı şev hareketi genellikle zemin yığılmaları veya zemin bloğu kaymaları şeklinde meydana gelir.
- Yumuşama eğilimine girmeyen, şişme potansiyeli düşük, kararlı killer.
- Yeraltı su seviyesinin üstündeki zeminlerde, kılcal etki nedeniyle genellikle negatif boşluk suyu bulunur, bu sebeple ilgili yöntem ile analize uygundur.
- Kırılma yüzeyleri belirgin olan ve kırılma yüzeyi boyunca kayma direnci drenajlı rezidüel kayma direncine eşit olan heyelanlar.
- Ataletsel şev stabilite analizlerinin pek çok farklı tipi bulunmaktadır; bu analizler arasında en çok kullanılanlar: a) psödo – statik yaklaşım, b) Newmark (1965) yöntemleridir.

Ataletsel şev stabilite analizinde dikkat edilmesi gereken uygulama alanları ve ortam koşulları söz konusudur.

a) Yüksek Şevler:

- Yöntem, yüksek şevlerin stabilitesini değerlendirirken kullanılabilir. Ancak büyük deformasyon riskini değerlendirmek için daha karmaşık yöntemlere ihtiyaç duyulabilir.

b) Sığ Yeraltı Suyu Seviyesi:

- Yeraltı su seviyesi yüksek olan zeminlerde boşluk suyu basıncı artışını göz ardı ettiği için atalet temelli analiz eksik sonuçlar verebilir.

c) Homojen Zeminler:

- Farklı tabaka özelliklerine sahip heterojen zeminlerde kayma yüzeyi farklı davranışlar gösterebilir. Atalet temelli analiz, genellikle homojen zeminler için daha uygundur.

d) Düşük İvme Bölgeleri:

- Deprem ivmesinin düşük olduğu bölgelerde kullanılabilir. Yüksek ivmeli bölgelerde dinamik analizler tercih edilir.

2.1.1. Psödo – Statik Analiz

Psödo-statik analiz, şev stabilitesinin değerlendirilmesinde yaygın ve eskiden beri kullanılan basitleştirilmiş bir yöntemdir. Bu analiz, zemin üzerinde uygulanan dinamik yüklerin etkisini, statik bir kuvvet olarak ele alır

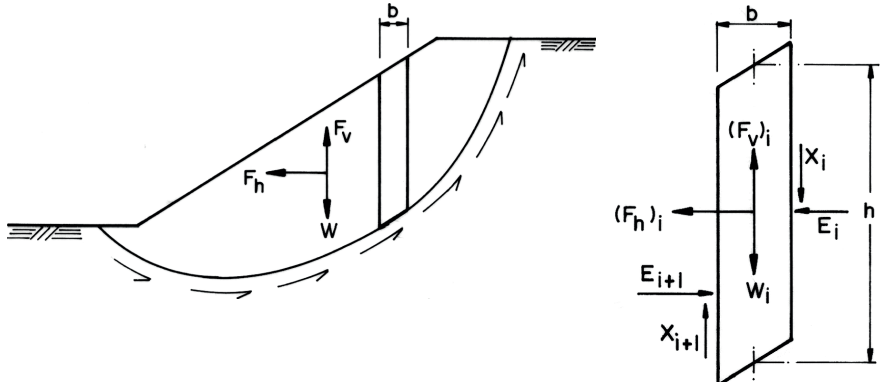
ve özellikle deprem gibi sismik yüklerin etkisini hesaplamak için kullanılır. Psödo-statik analiz, sınılaşma gibi zemin zayıflama mekanizmalarını dikkate alarak, şevde meydana gelebilecek deformasyonları ve potansiyel kaymaları tahmin eder. Bu yaklaşım, genellikle daha karmaşık dinamik analizlerin yerine, pratik ve hızlı çözüm elde etmek amacıyla tercih edilir. Kayan şevin ağırlık merkezine etkileyen ve şev ağırlığı ile doğrudan ilişkili olan psödo – statik kuvvetlerin büyüklükleri aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W \quad (1)$$

$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W \quad (2)$$

- Burada a_h ve a_v , yatay ve düşey yönlerdeki psödo – statik deprem ivmesi değerleri (m/sn^2).
- k_h ve k_v ise kayan şev kütlesine etkileyen ve deprem sebebiyle oluşan ivmelerin simüle edilmesini sağlayan boyutsuz sismik yük katsayılarıdır ve analizlere dahil edilirler. Yatay bileşen şevin kaymaya eğilimli hale gelmesinde daha baskın etkindir. Düşey bileşenin etkisi daha az olmakla birlikte, şev içindeki gerilme dağılımlarını etkileyerek kayma direncini artırabilir veya azaltabilir.
- W ise kayan zemin kütlesinin ağırlığıdır.
- Psödo – Statik ivmelerin büyüklükleri bölgede oluşabilecek sismik aktivitenin karakteristikleri ile ilişkili olmalıdır. Sismik hareket, kayan bir şeve hem düşey yönde hem de yatay yönde Psödo – Statik kuvvetler uygulamaktadır.
- Psödo – Statik analizde düşey yöndeki hareketin şev stabilitesi üstündeki etkisi yatay yöndeki kuvvetlere göre çok az olduğundan ihmal edilebilir düzeydedir.
- Sismik aktivitelerde genellikle yatay ivme değerleri düşey ivme değerlerinden de büyüktür dolayısıyla k_v , k_h 'dan daha küçüktür.

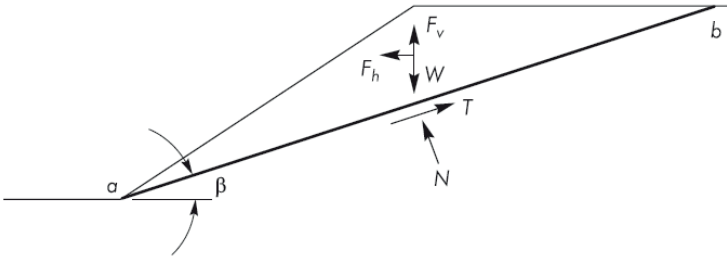
Psödo – Statik yaklaşımda boyutsuz sismik yük katsayılarının belirlenmesiyle şev stabilitesi için kullanılan bütün limit denge yöntemlerine kolaylıkla entegre edilebilmektedir ve bu da yöntemi oldukça esnek hale getirmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Psödo - Statik yaklaşımın limit denge yöntemlerine entegre edilmesi

Kayma ihtimali yüksek şevin kütlesine etkileyen kuvvetleri (Şekil 2) kayma yüzeyine paralel yönde bileşenlerine ayırılırsa aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$F = \frac{c \cdot l_{ab} [(W - F_v) \cos \beta - F_h \sin \beta] \tan \phi}{(W - F_v) \sin \beta + F_h \cos \beta} \quad (3)$$



Şekil 2. Psödo-statik şev stabilite analizinde düzlemsel yenilme yüzeyinin üzerindeki üçgen zemin kaması üzerine etkileyen kuvvetler (Kramer, 1996).

Yatay psödo - statik kuvvet formülünden de anlaşılacağı üzere emniyet katsayısını azaltmaktadır. $\phi > 0$ durumunda kaydırmaya direnen kuvvetleri azaltırken kaydıran kuvveti arttırmaktadır. Gerek kaydıran kuvvetleri gerekse kaydırmaya direnen kuvvetleri azalttığı için (duruma ve yöne bağlı olarak yükseltebildiği için) dikey psödo - statik kuvvetin kayma emniyet faktörüne etkisi azdır.

2.1.1.1. k_h Değerinin Seçilmesi

Yatay Sismik Katsayısı (k_h) seçimi, şev stabilite analizi sırasında önemli bir adımdır ve birçok faktöre bağlıdır. Şevi oluşturan zeminin rijit olması durumunda, kayma ihtimali yüksek şev kütleline etkiyen atalet kuvveti, deprem nedeniyle oluşan yatay ivmenin (a_{max}), stabilitesi düşük zeminin kütlesi ile çarpımına eşit olur. Deprem sırasında oluşan bu ivme en büyük değerine eriştiğinde ilgili atalet kuvveti de en büyük değerini alır. Buna karşın doğada karşılaşılan şevlerin rijit bir yapıya sahip olmadığı ve deprem nedeniyle oluşan en büyük ivmenin etkin olduğu sürenin çok kısa olduğu bilindiği için, hesaplamalarda kullanılan psödo – statik katsayılar genellikle a_{max} 'ın çok altında değerler olacaktır (Kramer, 1996). Katsayının doğru belirlenmesi için dikkate alınması gereken aşamalar ve etkileyen faktörler şunlardır:

a) Deprem Tehlikesi Değerlendirmesi:

- Bölgenin deprem riskine göre belirlenir.
- PGA (Peak Ground Acceleration), yani maksimum yer ivmesi, seçim için temel parametredir.
- Yüksek deprem riski taşıyan bölgelerde k_h değeri daha yüksek alınır.
- Maksimum k_h değeri a_{max}/g değerinden yüksek değildir.

b) Bölgesel Sismik Haritaların Kullanımı:

- Yerel ve uluslararası sismik tehlike haritaları incelenir. Haritalar, tasarım ivmeleri hakkında yol gösterir.

c) Deprem İvmesiyle İlişkilendirme:

- $k_h = 0.1 \times \text{PGA}$ veya $0.3 \times \text{PGA}$ bağıntısı yaygın olarak kullanılır.
- Depremin şiddetine ve yatay ivme etkisine göre k_h değeri hesaplanır.

d) Zemin Koşullarının Belirlenmesi:

- Zemin türü ve özellikleri k_h seçiminde etkilidir.
- Kaya zeminlerde daha düşük katsayılar tercih edilirken ($\approx 0.05 - 0.1$), depremin etkilerini büyüten yumuşak ve zayıf zeminlerde ($\approx 0.15 - 0.3$) daha yüksek katsayılar kullanılabilir.

e) Şevin Geometrisi ve Yüksekliği:

- Yüksek ve dik şevlerde k_h değeri artırılabilir.
- Düşük ve geniş şevlerde katsayılar daha küçük olabilir.

f) Kayan Kütlenin Boyutu:

Nispeten düşük bir sismik katsayı değeri şev kütlesi arttıkça tercih edilir. Sismik yükleme sırasında şevin yenilme kütlelerinin büyük olması durumunda bütün şev kütlesi şevin içinden dışa doğru stabiliteyi bozan kuvvete düşük olasılıkla maruz kalacaktır (Day, 2004).

- **Küçük kayma kütlesi:** Yüzeysel stabilite veya küçük kaya düşmeleri gibi analizlerde $k_h = a_{\max}/g$ formülünden elde edilen değer kullanılabilir.
- **Orta büyüklükte kayma kütlesi:** Orta boyutlu şevlerde $k_h = 0.65a_{\max}/g$ formülünden elde edilen değer kullanılabilir (Krinitzsky vd., 1993; Taniguchi ve Sasaki 1986).
- **Büyük kayma kütlesi:** Kayan kütlelerin nispeten büyük olduğu yenilme kütleleri için en düşük k_h değerleri kullanılır (baraj ve dolgu heyelanları vb.). Bu konuda Seed (1979)'nin çalışması:
 - ❖ *6.5 büyüklüğünde depremler üretebilen faylara yakın sahalar için $k_b = 0.10$. Kabul edilebilir psödo – statik emniyet faktörü 1.15 veya daha büyük.*
 - ❖ *8.5 büyüklüğünde depremler üretebilen faylara yakın sahalar için $k_b = 0.15$. Kabul edilebilir psödo – statik emniyet faktörü 1.15 veya daha büyük.*

g) Projenin Kritikliği:

- Barajlar, enerji altyapısı gibi kritik yapılar için daha muhafazakâr k_h değerleri seçilir.
- Daha düşük güvenlik gereksinimi olan projelerde k_h daha düşük alınabilir.

h) Analiz Türü ve Hedef Güvenlik Seviyesi:

- Psödo-statik analiz mi yoksa detaylı dinamik analiz mi yapılacağına bağlıdır.
- Dinamik analizlerde katsayılar daha detaylı ayarlanırken, psödo-statik analizde standart aralıklar tercih edilebilir.

i) Düşey Sismik Katsayının Etkisi (k_v):

- Düşey katsayı (k_v) dikkate alınarak k_h ayarlanabilir.
- Genellikle $k_v = 0.5 \times k_h$ veya $0.7 \times k_h$ alınabilğr.

j) Ulusal ve Uluslararası Standartlar:

- Seçim, Eurocode 8 veya yerel mühendislik standartlarına uygun olarak yapılmalıdır. Birçok standart k_h değerinin 0.15'ten küçük alınmaması gerektiğini ifade eder.

k) Tasarımcı ve Uzman Görüşü:

- Projenin özel durumları ve tasarım gereksinimleri doğrultusunda mühendislik kararıyla k_h değerinde revizyon yapılabilir.

Farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda sunulan k_h verileri aşağıdaki gibidir.

- Seed (1979), psödo – statik analizlerde k_h değerinin PGA'nın bir oranı olarak alınmasını önerir. Basit şevler için $k_h = 0.1 \times \text{PGA}$, kritik yapılar için $k_h = 0.3 \times \text{PGA}$ olarak sınırlandırılabilirliğini ifade eder. Ayrıca; Seed & Martin (1966); Dakoulas & Gazetas (1986) toprak barajlar için k_h değerinin baraj kayma kütesinin boyutuna bağlı olduğunu vurgulamıştır (Day, 2004).
- Kramer (1996), yatay sismik katsayının genellikle PGA'nın %10 ila %30'u arasında seçilmesini önerir. Bu oran, zeminin deformasyon kapasitesine ve yapının önemine göre değişir.
- Terzaghi vd. (1996) k_h seçiminin, PGA'nın bir kısmı olarak düşünülmesi gerektiğini ve genellikle $k_h = 0.1 \times \text{PGA}$ 'nın başlangıç noktası olduğunu belirtir. Terzaghi 1950'de büyük yer hareketleri için $k_h = 0.10$, yıkıcı sismik yer hareketleri için $k_h = 0.20$ ve felaket olarak tanımlanabilecek düzeydeki sismik yer hareketleri için $k_h = 0.50$ değerini önermiştir (Day, 2004).
- Marcuson (1981) barajlar için, $k_h = 0.33.a_{\max}/g$ ile $k_h = 0.50.a_{\max}/g$ değerlerini önermiştir. Buna ek olarak barajın şeklinin de sismik yer hareketini büyütüp küçültebileceğini vurgulamış ve önemsenmesi gerektiğini söylemiştir.
- Eurocode 8'de, k_h değerinin PGA'ya bağlı olarak seçilmesi gerektiği ve genelde $0.1 - 0.2 \times \text{PGA}$ aralığında olduğu belirtilmiştir (Eurocode 8, 2013)
- Hynes – Griffin ve Franklin (1984) 350'den daha fazla sismik yer hareketlerinin ivme kaydını inceledikleri araştırmalarında toprak barajlarda $k_h = 0.50.a_{\max}/g$ eşitliğini önermiştir. İlgili katsayının kullanıldığı ve psödo – statik güvenlik katsayısı 1'den büyük bu tip yapılarda sismik yer hareketleri sonucunda oluşabilecek aşırı yer

değiştirmelerin ortaya çıkmayacağını araştırmalarında göstermişlerdir (Day, 2004).

2.1.1.2. Psödo – Statik Yaklaşımın Değerlendirilmesi

Psödo-statik analiz, özellikle düşük sismik ivme bölgelerinde ve ilk değerlendirme çalışmaları için faydalı olsa da karmaşık deprem hareketlerini ve uzun süreli deformasyonları modellemek için yetersizdir. Bu nedenle, kritik yapıların tasarımında dinamik analizlerle desteklenmesi gereklidir. Analize yönelik olumlu ve olumsuz sonuçlar aşağıda sıralanmıştır (Kramer, 1996; Terzaghi vd., 1996; Chopra, 2001; Seed & Whitman, 1970).

Olumlu yanları:

- Psödo-statik analiz, limit denge yöntemlerine küçük bir modifikasyon ekleyerek gerçekleştirilir. Küçük ölçekli projelerde veya düşük sismik risk taşıyan bölgelerde tercih edilebilir.
- Karmaşık dinamik analizlere ihtiyaç duyulmadan, sismik etkiler bir katsayı (k_h) ile ifade edilebilir.
- Analiz, mevcut statik denge denklemlerine sismik kuvvetlerin eklenmesiyle yapılır ve zamandan tasarruf sağlar.
- Sismik etkilerin şev stabilitesine genel etkisi hakkında hızlı bir ilk değerlendirme sunar.
- Geleneksel limit denge yöntemleriyle uyumludur bu yöntemlere hızlıca entegre edilebilir.

Olumsuz yanları:

- Deprem hareketlerinin dinamik doğasını (frekans içeriği, süre ve dalga tipi) göz ardı eder. Uzun süreli yer hareketleri veya tekrarlı yüklemeler altında oluşabilecek kalıcı deformasyonları hesaba katmaz.
- Yatay (k_h) ve düşey (k_v) sismik katsayıların seçiminde standart bir yöntem bulunmaması, analiz sonuçlarını belirsiz hale getirebilir. Benzer projeler için farklı katsayıların kullanılması tutarsız sonuçlara neden olabilir.
- Şevde oluşacak kalıcı deformasyonlar psödo-statik analizle tahmin edilemez. Ürettiği ivme değeri yüksek olan depremler sonrasında şevlerin hareket miktarı tahmin edilemediği için yapısal güvenlik riske atılabilir.
- PGA değeri yüksek olduğu düşünülen bölgelerde psödo – statik analizler genellikle gerçekçi olmayan sonuçlar verir. Dinamik analizler

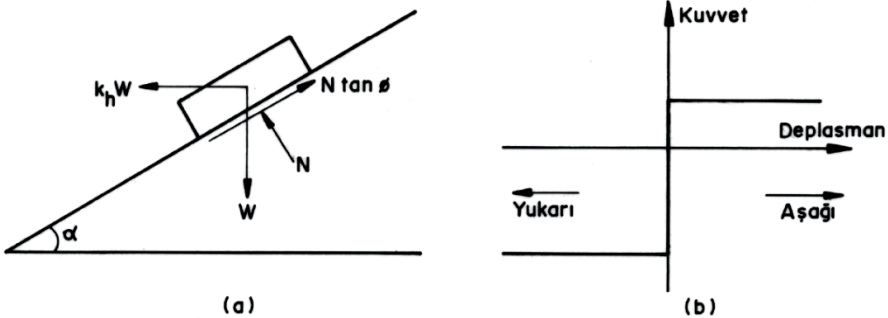
bu durumlarda tercih edilmelidir. $PGA > 0.3g$ olan bölgelerde, psödo – statik analizlerin emniyet katsayılarını fazla iyimser şekilde hesaplayabileceği bilinmektedir.

- Psödo – statik analiz, yatay ve düşey titreşimlerin yönleri arasındaki etkileşimleri hesaba katmaz. Dik yamacın üzerinde etkili olan düşey ivmenin (k_v) zemin mukavemetini artırıcı veya azaltıcı etkisi doğru şekilde modellenemez.

2.1.2. Newmark Kayan Blok Analizi

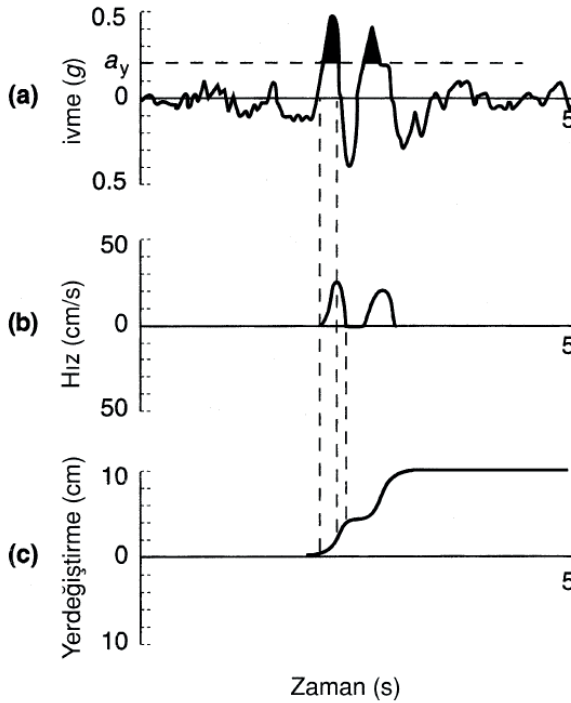
Newmark kayan blok analizi, şev stabilitesi değerlendirmelerinde kullanılan, deprem etkilerinin neden olduğu yamaç kayma potansiyelini tahmin etmeye yönelik bir yöntemdir. Bu analiz, psödo-statik analizden farklı olarak, deprem hareketlerinin dinamik doğasını dikkate alır ve zamanla biriken yer değiştirmeleri hesaplar. Psödo-statik analiz, deprem etkilerini sabit bir yatay sismik kuvvet olarak idealize ederken, Newmark analizi, bu kuvvetlerin zamana bağlı değişimini ve hareket süresince meydana gelen deformasyonları simüle eder. Bu nedenle, Newmark yöntemi, özellikle sismik yükleme altındaki şevlerin gerçekçi bir değerlendirilmesini sağlayarak, kalıcı deformasyonlar ve güvenlik açısından daha ayrıntılı bir öngörü sunar.

Newmark analizi, şevin kritik kayma yüzeyini bir rijit blok olarak modelleyerek (Şekil 3), bu bloğun yerçekimi ve deprem kaynaklı ivmeler altında hareket edip etmeyeceğini ve hareket ederse toplam yer değiştirme miktarını belirler. Newmark, şevlerde meydana gelen deplasmanların, yer hareketinin özelliklerine ve kaymanın başlaması için gereken minimum ivmenin bir fonksiyonu olarak hesaplanabilmesi için gerekli formülleri geliştirmiştir. Dinamik hareket sırasında, ivmenin toplam kayma direncini aşarak kütle üzerinde kayma yaratmasıyla şev kayması başlar ve ivmenin yön değiştirmesiyle durur. Bu süreçte, kaymayı tetikleyecek ivme seviyesinin belirlenmesi ve bu seviyeyi aşan ivmelerin (Şekil 4) iki kez entegrasyonu ile toplam kütle deformasyonu hesaplanabilir.



Şekil 3. Newmark analizinde kayan kütlelerin modellenmesi (Day, 2004)

Şekil 4'te sismik yer hareketi sırasında bir şevin yatay ivmesi görülmektedir. Sıfır çizgisinin altındaki ivmeler, şev içine doğru etki eden, üzerindeki ivmeler ise şev dışına doğru etki eden ivmeler olarak ele alınır. Şevin aşağı yönde hareketine yalnızca dışa doğru ivmeler neden olduğundan, analizde sadece sıfır çizgisinin üzerindeki ivmeler değerlendirilir. Şekilde a_y ile belirtilen yenilme ivmesi, psödo-statik yöntemle Γ 'e eşit bir emniyet faktörü yaratan yatay deprem ivmesini temsil eder. Bu ivme üzerine çıkan değerler gölgeli olarak gösterilmiştir. Newmark (1965) yöntemine göre, şevin kümülatif yer değiştirmesi, yenilme ivmesini aşan gölgeli ivme alanlarından hesaplanır ve bu artışlı deformasyon yalnızca bu durumlarda gerçekleşir.



Şekil 4. Newmark yöntemini gösteren diyagram. (a) İvme - zaman ilişkisi; (b) ivme palslarının silyah renkle taranmış kısımlarının hız - zaman ilişkisi; (c) hız palslarına karşılık gelen yamaç aşağı deformasyon - zaman ilişkisi (Day, 2004; Wilson ve Kiefer, 1985).

Newmark kayan blok analizinde şev deformasyonları çeşitli faktörlere bağlıdır. İlgili etkiler aşağıda sıralanmıştır.

- **Pik deprem ivmesi (a_{max}):** Deprem sırasında zemine uygulanan zamana bağlı en büyük ivme değeri ve profili yer değiştirme üzerinde doğrudan etkili olur. Pik yer ivmesi ve kritik ivme(yenilme ivmesi) arasındaki fark ne kadar büyük ise şev deformasyonları o kadar büyük olacaktır.
- **Kritik (yenilme) ivme (a_y):** Blok kaymasını başlatmak için gereken minimum ivme değeri. Daha düşük kritik ivme, daha büyük yer değiştirmelere yol açar.
- **Deprem büyüklüğü ve süresi:** Sismik hareketin süresi uzadıkça ve büyüklüğü arttıkça, toplam yer değiştirme miktarı artar. Şekil 4a'da verilen taralı alan ne kadar büyükse şevin deformasyonları da büyük olacaktır.
- **Sismik ivme profili:** İvmenin genlik, frekans ve dalga formu, yer değiştirme büyüklüğünü etkiler. Ayrıca kritik ivme değerini aşan ivme değerleri ne kadar fazlaysa deprem sırasında şevin deformasyonları yüksek olacaktır.
- **Blok ve zemin özellikleri:**
 - **Zemin kayma direnci:** Zemin sürtünme açısı ve kohezyonu gibi mekanik özellikler yer değiştirme miktarını belirler.
 - **Blok ağırlığı:** Blok kütesinin büyüklüğü, kaymanın başlaması için gereken kuvveti etkiler.
- **Yamaç eğimi:** Şevin geometrik eğimi (yamaç açısı), blok üzerinde etkili olan bileşen kuvvetleri değiştirir.
- **Başlangıç güvenlik faktörü (FS):** Şevin statik analizle belirlenen güvenlik faktörü, sismik yük altında davranışı etkiler. Düşük FS, daha büyük yer değiştirme potansiyeline işaret eder.

Newmark (1965) tarafından önerilen yöntemle bağlı kalınarak çok sayıda farklı eşitlik geliştirilmiştir. Şev deformasyonlarının bağlı olduğu ana etkilerden ikisinin dahil edildiği basit bir eşitlik aşağıdaki gibidir (Day, 2004; Ambraseys ve Menu, 1988):

$$\log d = 0.90 + \left[\left(1 - \frac{a_y}{a_{max}} \right)^{2.53} \left(\frac{a_y}{a_{max}} \right)^{-1.09} \right] \quad (4)$$

$d =$ Şev deformasyonu (cm)

a_y = Kritik ivme değeri (psödo – statik emniyet değerinin 1'e eşit olduğu ivme değeri)

a_{\max} = Pik yer ivmesi değeri

Yukarıda verilen deformasyon hesabı psödo – statik emniyet faktörünün 1'den küçük olduğu durumlarda geçerlidir. Dolayısıyla deprem pik ivmesinin kritik ivmeden büyük olduğu durumdur. Ayrıca verilen denklemin kullanılabilmesi ilk adım, psödo – statik emniyet faktörünün belirlenmesidir. Psödo – statik emniyet değerinin 1'den küçük olması koşuluyla, bir sonraki adım, emniyet faktörünün 1'e eşit olana kadar sismik katsayı k_h 'ı azaltmaktır. Newmark(1965) analizinin çeşitli kısıtlamaları aşağıda belirtilmiştir (Day, 2004).

➤ **Katmanlı ve Karmaşık Zeminler İçin Yetersizlik:**

- Analiz, şevdeki zemin katmanlarının farklı özelliklerini ve içsel karmaşıklıklarını dikkate almaz. Homojen bir kayma yüzeyi varsayar. Kuru ve gevşek dağılımlı kum ve çakıl zeminlerin yenilmesi blok şeklinde değildir. Bu tip zeminlerin psödo – statik emniyet değerleri Newmark(1965)'e göre 1'den büyük çıkmış olsa da hem şev kayması hem de oturmalar meydana gelebilir.

➤ **Dinamik Etkilerin İdealizasyonu:**

- Deprem hareketini sadece kaymaya yol açan ivme bileşeni (a_y) ile sınırlandırır. Diğer dinamik etkileri, özellikle titreşim frekansı ve süresini tam olarak dikkate almaz. Uzun süreli sarsıntılarla zemin özelliklerindeki değişim modelleme dışında kalır.

➤ **Yalnızca Rijit Kayma Blokları:**

- Model, rijit bir blok hareketine dayanır ve kayma sırasında zemin deformasyonlarını veya içsel gerilme dağılımlarını dikkate almaz. Yumuşak zeminlerde modelin uygulanması eksik sonuçlara yol açabilir.

➤ **Harekete Başlama Eşiği (a_y):**

- Harekete başlama eşiği (a_y) belirlenirken mühendislik yaklaşımına ve güvenlik katsayısına göre değişiklik gösterebilir. Bu belirsizlik, analiz sonucunu etkileyebilir.

➤ **Deprem Verilerine Bağımlılık:**

- Analiz, yerel deprem kayıtlarının kullanılmasını gerektirir. Uygun kayıtların olmaması durumunda simülasyonlar yapılması gerekir.

2.2. Zayıflayan Şev Stabilite Analizi

Zayıflayan şev stabilite analizi, şevin zamanla veya belirli koşullara bağlı olarak mukavemet kaybetmesini inceleyen bir analiz türüdür. Bu yaklaşım, özellikle zemin veya kaya malzemesinin mekanik dayanımının çevresel etkiler (örneğin, su basıncı, kimyasal ayrışma, sıcaklık değişimi) veya dış kuvvetler (deprem, yükleme, titreşim) nedeniyle azalmasını ele alır. Analiz, malzemenin başlangıç dayanımından son dayanımına kadar geçirdiği değişiklikleri modelleyerek, şevin güvenlik faktörünün nasıl etkileneceğini tahmin etmeyi amaçlar. Bu yöntem, zamana bağlı deformasyonların ve uzun vadeli stabilite sorunlarının anlaşılmasında kritik bir rol oynar (Day, 2004). Zayıflayan şev stabilite analizi akma kaymaları, yanal yayılma ve deformasyon yumuşamalı zeminlerin analizinde kullanılmaktadır.

2.2.1. Akma Kaymaları

Akma kaymaları, zemin kütlelerinin akışkan davranış sergileyerek kayması ile gerçekleşen bir şev duraysızlık türüdür. Bu tür kaymalar genellikle su içeriği yüksek, düşük mukavemetli ve kohezyonu zayıf zeminlerde meydana gelir. Akma kaymalarının genel üç çeşidi bulunmaktadır (Day, 2004). Akma kayma analizi yaklaşık bir yöntemdir. Buradaki en büyük belirsizlik, eğimli yer için sıvılaşmaya karşı emniyet faktörünün belirlenmesinde yatmaktadır.

- a) **Kütle sıvılaşması:** Şevi oluşturan zemin malzemesinin tüm kütlelerinin suya doymun hale gelmesiyle taşıma kapasitesini kaybettiği ve sıvı gibi davrandığı durumdur. Genellikle doymun, düşük geçirgenlikli, gevşek yerleşimli kum ve plastik olmayan siltlerde yüksek sismik yükler veya ani yüklemeler sonucu meydana gelir. Bu tip şevlerin duraysızlık analizindeki ilk adım sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörünün belirlenmesidir (Day, 2004).
- b) **Yerel sıvılaşma:** Sıvılaşma, zeminin belirli bir bölgesinde meydana gelir. Yüzeysel deformasyonları, yerel oturmalar veya küçük çaplı heyelanlarla kendini gösterebilir. Bu tip şevlerin incelenmesinde ilk adım, tasarım depremde sıvılaşması beklenen zemin alanının belirlenmesidir. Sonrasında bu bölgenin içinde yer alan çeşitli dairesel kayma yüzeyleri kullanarak bir şevin güvenlik analizinin yapılmasıdır. Şevin emniyet faktörünün 1'den küçük olduğu durumlarda sismik yer hareketi sırasında şevde akma kaymasının meydana gelme olasılığı yüksektir (Day, 2004).
- c) **Zemin Tabakaları veya İnce Katmanların Neden Olduğu Heyelan Hareketi:** Zemin içindeki zayıf katmanların, kaymaya karşı direncin azaldığı kayma yüzeyleri oluşturması sonucu oluşur. Bu tür

kaymalar genellikle şevlerin derinliklerinde bulunan gevşek yerleşimli ve suya doygun ince kum veya plastik olmayan silt tabakalarının drenajsız koşullar altında davranışından kaynaklanır ve şevin genel stabilitesini tehlikeye atar. Sıvılaşma kaynaklı heyelan hareketlerinin değerlendirilmesi, özellikle ince zemin tabakalarının tespit zorluğu nedeniyle tasarım koşullarında karmaşık bir süreçtir. Potansiyel sıvılaşabilir katmanlar genellikle çok incedir ve saha etütlerinde fark edilmesi güç olabilir. Şev stabilite analizleri, bu katmanların yer aldığı kayma yüzeylerini dikkate almalı ve genellikle dairesel kayma yerine blok tipi yenilme modelleri kullanılarak yapılır. Bu yaklaşım, sıvılaşan ince tabakaların etkilerini daha doğru bir şekilde değerlendirmek için tercih edilmektedir (Day, 2004).

Şevlerde sıvılaşmaya karşı emniyet faktörünün belirlenmesi gerekmektedir. Literatürde sıvılaşma analizleri düz yüzeyli sahalar için yapılmaktadır. Şevler gibi eğimli yüzeyler için düz yüzeyli sahalardan elde edilen sıvılaşma emniyet faktörü değerlerinin düzeltilmesi gerekmektedir. Şekil 5’de eğimli yer koşulları için emniyet faktörünü ayarlamak amacıyla kullanılan bir grafik verilmiştir (Kramer, 1996).

$$\alpha = \frac{\tau_{h,statik}}{\sigma'_{v0}} \quad (5)$$

$$\tau_{h,statik} =$$

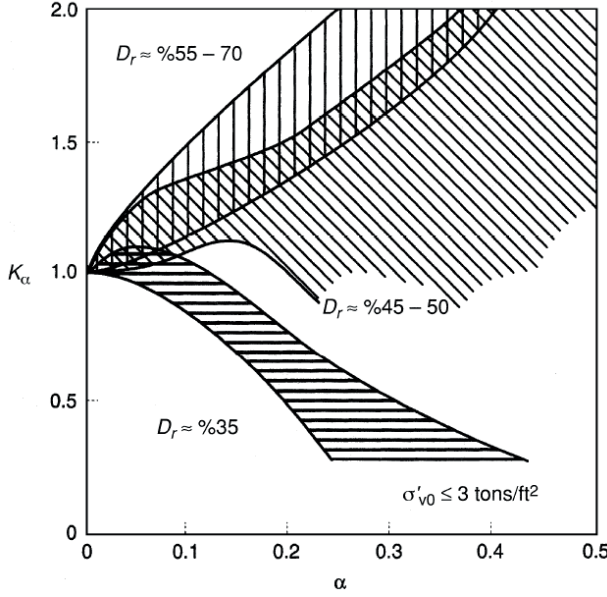
Yatav bir düzlem üzerinde etkiyen statik kayma gerilmesi

$$\sigma'_{v0} = \text{Düşey efektif gerilme}$$

10 yatay :1 düşey bir şevde $\alpha = 1/10 = 0.10$ olur

Düz arazilerde $\tau_{h,statik} = 0$ durumu söz konusudur. Üzerinde ağır bir yapı olan düz araziler ile eğimli arazilerde $\tau_{h,statik}$ değeri 0’dan farklıdır. Dolayısıyla statik kayma gerilmesi varlığı bu tip arazilerdeki gevşek ve doygun zeminleri sıvılaşmaya elverişli hale getirir. K_α değeri eğimli zemin sahaları için, zeminin sıvılaşma direncindeki artışı (1’den büyük değerler) veya azalmayı (1’den küçük değerler) temsil eder. Eğimli arazilerde sıvılaşmaya karşı emniyet faktörü belirlenirken CRR / CSR oranından bulunan güvenlik katsayısı diyagramdan elde edilen K_α değeri ile çarpılır. Sonuç olarak eğimli bir arazide akma kaymalarının sismik analizinde zemin sıvılaşma direnci(CRR) ve sismik hareketin varlığından dolayı oluşan çevrimli

yükleme(CSR) değerlerinin belirlenmesi ve oranlanması gerekmektedir. Bilindiği üzere $CSR \leq CRR$ durumunda sivilaşma riski oldukça düşüktür ya da olmayacaktır. Diyagramda sadece %35'lik bir rölatif yoğunluk için K_α değer aralıkları verildiğinden, farklı zemin yoğunlukları ve eğimli yer koşulları için K_α değerinin seçiminde tecrübe ve yargı gereklidir (Day, 2004).



Şekil 5. Eğimli zeminde sivilaşmaya karşı emniyet faktörünü ayarlama diyagramı (Day, 2004; Seed ve Hardez, 1990; Kramer, 1996).

2.2.1.1. CSR'nin Belirlenmesi

Zemin sivilaşması analizlerinde kritik bir parametredir ve zemine etki eden deprem kaynaklı devirsel kayma gerilmelerinin, zeminin dayanma kapasitesine oranını ifade eder. Farklı depremler için devir sayıları Şekil 6'da verilmiştir. CSR, genellikle aşağıdaki formülle hesaplanır (Day, 2004).

$$CSR = 0.65 r_d \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \quad (6)$$

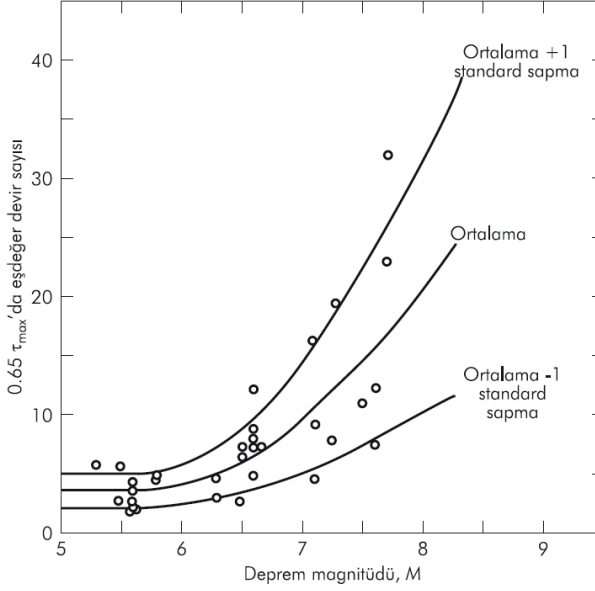
a_{max} = Deprem pik yer ivmesi

g = Yerçekimi ivmesi

σ_{v0} = Sıvılaştırma analizinin yapıldığı belirli bir derinlikteki toplam düşey gerilme

σ'_{v0} = Sıvılaştırma analizinin yapıldığı derinlikteki toplam düşey efektif gerilme

r_d = Deprem esnasında zemin kolonu rijit olarak davranmayıp da deforme olduğundan dolayı eklenen derinlik azaltma faktörü (Seed ve Idriss, 1971).

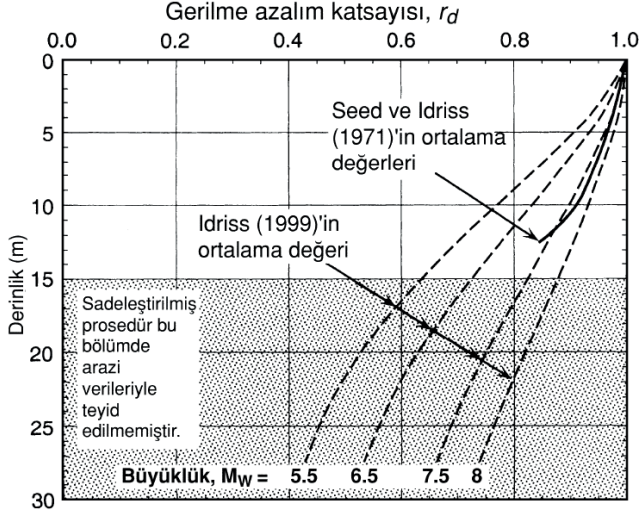


Şekil 6. Farklı büyüklüklerdeki depremler için eşdeğer üniform gerilme devir sayıları, Neq (Seed vd., 1975, Day, 2004).

Derinlik arttıkça, zemin tabakalarında deprem kaynaklı gerilme azalır (Şekil 7). Bu durum, gerilme azaltma faktörüyle (r_d) ifade edilir ve yaklaşık olarak yüzeyden derinliğe göre şu bağıntılarla hesaplanabilir (Seed ve Idriss, 1971; Idriss ve Boulanger, 2008)

$$r_d = 1 - 0.015z; \quad z < 9m \quad (7)$$

$$r_d = 1.54 - 0.123z; \quad z > 9m \quad (8)$$



şekil 7. Düz veya hafif eğimli zeminler için derinliğe bağlı gerilme azalım faktörü (Andrus ve Stokoe, 2000, Day, 2004)

2.2.1.2. CRR'nin Belirlenmesi

CRR, bir zemin tabakasının sıvılaşmayı önleyecek şekilde döngüsel kayma gerilmelerine zeminin dayanma kapasitesidir. Basitleştirilmiş sıvılaşma analizinde, CRR değeri zeminin kritik dayanım kapasitesini belirler ve CSR (Cyclic Stress Ratio) ile karşılaştırılarak sıvılaşma potansiyeli hesaplanır. CRR genellikle deneysel veya ampirik yöntemlerle belirlenir.

a) SPT (Standard Penetration Test) Tabanlı Yöntemler:

- o Youd ve Idriss (2001) çalışmasında, standart penetrasyon testinden elde edilen N_{60} değerine bağlı olarak CRR aşağıdaki şekilde ifade etmiştir.

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - \frac{N_{60}}{1.2}} \quad (9)$$

- o SPT(N_{60}) değerine bağlı olarak değerlendirme yapıldığında, 0 – 20 değerleri arasında yüksek hasarlar, 20 – 30 arasında orta ve 30 değeri üstündeki SPT değerlerinde önemsiz hasarlar ile karşılaşılma ihtimali söz konusudur.

b) CPT (Cone Penetration Test) Tabanlı Yöntemler:

- Idriss ve Boulanger (2008) tarafından önerilen yöntem, zemin sıvılaşma potansiyelini konik penetrasyon testinden (q_c) elde edilen uç direnç ile ilişkilendirir (a ve b deneysel katsayılar).

$$CRR_{7,5} = a \cdot \log_{10}(q_c) + b \quad (10)$$

c) Deneysel Yöntemler:

- Zemin örnekleri üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri doğrudan CRR değerini verir.

d) Ampirik Diyagramlar:

- CRR, genellikle SPT, CPT veya V_s (Shear Wave Velocity) gibi saha verilerine bağlı olarak literatürde sunulan ampirik diyagramlarla tahmin edilir.
 - Youd et al. (2001) diyagramları.
 - Seed ve Idriss (1971) tablosu.

CRR'nin belirlenmesinde arazi koşullarının ve şevi oluşturan zeminin etkisi büyüktür.

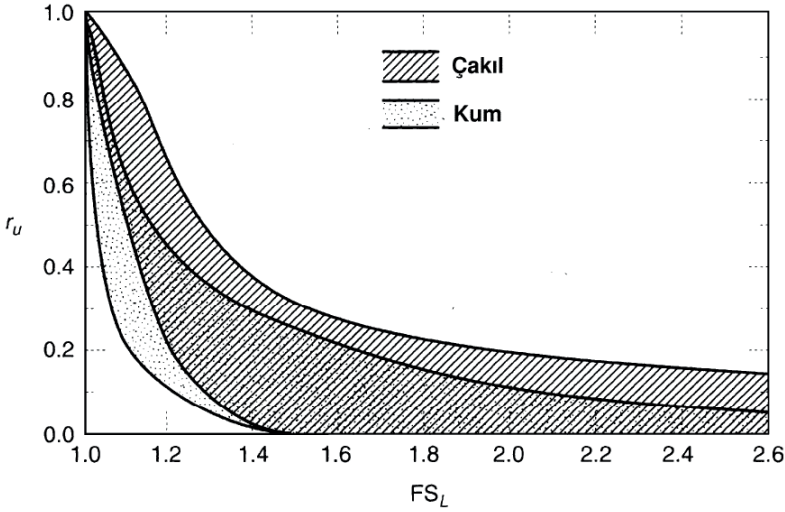
- Kumlu ve gevşek malzemelerde CRR genellikle düşüktür.
- Siltli ve kil içeriği yüksek zeminlerde sıvılaşma riski daha karmaşık olduğundan CRR'nin tespiti daha zordur.
- Yeraltı suyu seviyesi yüksek olan bölgelerde CRR düşer çünkü efektif gerilmeler azalır.
- Daha önce yüksek gerilmeye maruz kalmış (ön konsolide olmuş) zeminlerde CRR daha yüksektir.
- Drenajı kısıtlı veya siltli zeminlerde CRR düşebilir.

Bölgesel sıvılaşma durumları veya zemin tabakalarının ya da ince katmanların sıvılaşması için bir şev stabilite analizi gereklidir. Depremde sıvılaşması beklenen zemin için bir şev stabilite analizi yapmak için iki farklı yaklaşım vardır.

a) Boşluk suyu basınç oranı = 1.0'i kullanarak

- Sıvılaşan zeminin boşluk suyu basınç oranının 1.0'e eşit olduğunu varsaymaktır.

- Boşluk suyu basıncı oranı $r_u = u / (\gamma_t h)$ olarak tanımlanır. Burada u =boşluk suyu basıncı, γ_t = zeminin toplam birim hacim ağırlığı ve h = zemin yüzeyinden derinliktir.
- Sıvılaşabilir zeminde boşluk suyu basınç oranı $r_u = 1$, sadece kum ve çakıl gibi zeminlerin efektif kohezyonunun (c') sıfır olduğu zaman kullanılmalıdır (Şekil 8).



Şekil 8. Sıvılaşmaya karşı emniyet katsayısı (FS_L). r_u = çakıl ve kum için boşluk suyu basıncı oranı (Marcuson ve Hynes, 1990; Kramer, 1996; Day, 2004)

b) Sıvılaşabilir zemin için sıfır kayma direnci kullanarak

- Sıvılaşan zeminin kayma direncinin sıfır olduğunu kabul etmektir. Toplam gerilme analizi kullanıldığında, sıvılaşan zemin tabakalarının drenajlı kayma direncinin sıfır olduğu ($s_u = 0$) varsayılır.
- Efektif gerilme analizi kullanıldığında ise, efektif kayma direnci parametrelerinin sıfır olduğu varsayılır ($c' = 0$; $\varphi' = 0$).

2.2.2. Yanal Yayılma

Yanal yayılma, sıvılaşma nedeniyle zemin tabakalarının yatay düzlemde yer değiştirmesiyle oluşan bir deformasyon türüdür. Bu olay genellikle zemin sıvılaşmasının etkili olduğu deprem koşullarında, altta yer alan kumlu ve gevşek malzemelerin kayma dayanımını kaybetmesi sonucu meydana gelir. Yanal hareket, yüzeyde ciddi altyapı hasarlarına neden olabilir.

- Hafif eğimli sahalarda ($<6^\circ$) görülür.

- Akarsular, nehir kenarları ve deniz kıyısı gibi alanlar ve bu alanlara komşu olan düzlükler yanal yayılmaya yatkındır.
- Yeraltı su seviyesi yüksek olan bölgelerde, doymuş kumlu tabakaların sıvılaşmasıyla tetiklenir.
- Çoğunlukla gevşek kumlar, plastik olmayan silt içeren kumlar ve gevşek zemin tabakalarında oluşur.
- Köprü ayakları, yollar ve boru hatları gibi mühendislik yapılarının çevresinde hasara neden olabilir.
- Yanal yer değiştirme genellikle metreler düzeyindedir ve deformasyonun büyüklüğü sıvılaşmış tabakanın kalınlığına, zeminin eğimine ve deprem ivmesine bağlıdır.
- Sıvılaşan tabaka kayma dayanımını kaybederek üstteki zemin kütesinin yatay hareketine yol açar.
- Depremin ivmesi ve süresi, yanal yayılmanın büyüklüğünü ve hızını belirleyen kritik faktörlerdir.

2.2.2.1. Ampirik Yöntemler

Bartlett ve Youd (1992) Modeli, sıvılaşma sonrası serbest yüzeye doğru yanal yayılma ve hafif eğimli şevin yanal yayılımı tahmini için geliştirilmiş bir empirik modeldir. Model, yanal yer değiştirme miktarını (D) tahmin etmek için zemin özellikleri, serbest yüzeye uzaklık, sıvılaşma koşulları ve deprem parametreleri gibi faktörlere dayanır (Day, 2004).

a) Serbest yüzeye doğru yanal yayılma

$$\log D_H = -16.36 + 1.178M - 0.927 \log R - 0.013R + 0.657 \log W + 0.348 \log T + 4.527 \log(100 - F) - 0.922D_{50} \quad (11)$$

b) Hafif eğimli yanal yayılma

$\log_{DH} = -15.787 + 1.178M - 0.927 \log R - 0.013R + 0.429 \log S + 0.348 \log T + 4.527 \log(100 - F) - 0.922D_{50}$	(11)
--	------

D_H = Yatay deformasyon (yanal yayılma) (m)

M = Tasarımda kullanılan depremin büyüklüğü

R = Serbest yüzeye olan mesafe veya tasarım depremin fay yırtilmasına en yakın mesafe (km)

W = Serbest yüz oranı (%); $100H/L$ (H = serbest yüzün yüksekliği; L = serbest yüzün tabanından sahaya kadarki yatay mesafe)

$T = (N_v)_{60} < 15$ olan sıvılaştırılmış kum tabakalarının artan kalınlığı (m). Genellikle bu tabakanın deprem sırasında sıvılaşması beklenir. Verilen denklemler θ eğiminin ($< 6^\circ$) olduğu sahalarda (eşit veya küçük) geçerlidir ve dolayısıyla $K_a = 1$ alınır.

$F =$ Sıvılaştırılmış tabakayı oluşturan (T) ince dane içeriği (%).

$D_{50} =$ Sıvılaştırılmış tabakayı (T) oluşturan zeminin ortalama dane boyutu (mm)

$S =$ Eğim eğimi (%)

- Serbest yüzeye daha yakın olan bölgelerde R küçük olduğundan yanal yer değiştirme miktarı artar.
- Moment büyüklüğü M arttıkça sıvılaşma ve deformasyon potansiyeli de artar.
- Eğimli yüzeylerde (S) yanal hareket genellikle daha büyüktür.
- Sıvılaşma potansiyeli yüksek zeminlerde (T) ve yer altı suyunun yüzeye yakın olduğu sahalarda yanal yer değiştirme artar.

Bartlett ve Youd (1992) Modeli, belirli koşullarda geçerli olan ampirik bir model olduğu için çeşitli sınırlamaları ve kısıtlamaları bulunmaktadır. Bu sınırlamalar modelin geliştirilme aşamasındaki veri setine ve varsayımlarına dayanmaktadır.

- Deprem büyüklüğü $M = 6.4 - 8.5$ arasında olmalıdır. Model, 6.4'ten küçük depremler için yeterli veri içermediği için güvenilir değildir. Büyüklüğü ilgili değerden düşük depremler için farklı modeller kullanılmalıdır.
- Model, sıvılaşma tabakasının zemin yüzeyinden itibaren maksimum derinliğini 10 metre olarak kabul eder. Daha derin sıvılaşma tabakaları için modelin tahmin doğruluğu azalabilir.
- Yanal yayılmanın tahmin edilebilmesi için zemin eğiminin 0.1° ile 6° arasında olması gereklidir. Daha dik eğimler için model kullanılmaz; çünkü bu durumlarda kayma mekanizması farklı bir yapıya sahiptir.
- Serbest yüzeye olan uzaklık (R) parametresi için model, genellikle 0 ile 1000 metre arasında geçerlidir. Daha uzak mesafelerde yanal yayılmanın etkisi minimal olduğundan model güvenilirliğini kaybedebilir.
- Modelin güvenilirliği $PGA = 0.05g - 0.5g$ arasında olan yer hareketleri için test edilmiştir. Daha yüksek ivmeli depremler için tahmin doğruluğu azalabilir.

- Model, genellikle kumlu ve gevşek zeminler için geliştirilmiştir. Kil, silt veya yüksek plastisiteli zeminlerde sıvılaşma davranışı farklı olduğundan, model bu zeminlerde uygulanamaz. Ayrıca verilen eşitlikler, sıvılaşan çakılların yanal yayılım davranışı kumlardan farklı olduğundan dolayı deformasyonu gerçek değerlerden fazla vermektedir. İnce dane içeriği: $F \leq \%50$; Ortalama dane boyutu: $D_{50} \leq 1 \text{ mm}$; $(N1)_{60} < 15$ olan katmanın kalınlığı: $1 \text{ m} \leq T \leq 15 \text{ m}$

3. Sonuçlar ve Özet

Deprem sırasında zemin sıvılaşması, şev stabilitesini önemli ölçüde etkileyen kritik bir faktördür. Sıvılaşma, yalnızca akma yenilmelerine veya yanal yayılmaya neden olmakla kalmaz, aynı zamanda emniyet faktörünün (FS_L) 1'den büyük olduğu durumlarda bile zemin zayıflaması ve şev deformasyonlarına yol açabilir. Bu nedenle, sıvılaşma etkilerini anlamak ve zeminlerin davranışını doğru analiz etmek, şev stabilitesi değerlendirmelerinde hayati öneme sahiptir. Aşağıdaki özet, sıvılaşmaya bağlı emniyet faktörüne (FS_L) bağlı analiz yöntemlerini ve şev deformasyonu türlerini teknik bir çerçevede ele almaktadır.

- Zemin Sıvılaşmasının Sonuçları:
 - Sıvılaşma, akma yenilmelerine veya yanal yayılmaya neden olabilir.
 - Hatta sıvılaşmaya karşı emniyet faktörü (FS_L) 1'den büyük olsa bile, zemin zayıflaması ve şev deformasyonu gözlenebilir.
- Sıvılaşmaya Karşı Emniyet Faktörüne (FS_L) Dayalı Durumlar:
 - $FS_L \leq 1.0$:
 - Tasarım depreminde zeminin sıvılaşması beklenir.
 - Bu durumda, akma kayması ve/veya yanal yayılma analizleri gereklidir.
 - $FS_L > 2.0$:
 - Sıvılaşma riski ihmal edilebilir düzeydedir.
 - Zemin depremle zayıflamayacağı varsayılır ve ataletsel şev stabilite analizleri yapılabilir.
 - $1.0 < FS_L \leq 2.0$:
 - Sıvılaşma beklenmez, ancak boşluk suyu basıncı artışı zemin zayıflamasına yol açabilir.

- Boşluk suyu basıncı oranını belirlemek için grafikler kullanılabilir ve ardından efektif gerilme şev stabilite analizi yapılabilir.
 - Şev stabilite analizi sonuçlarına göre, 1'den küçük bir emniyet faktörü, şev yenilmesi olasılığını gösterir; 1'den büyük bir emniyet faktörü olsa bile önemli deformasyonlar meydana gelebilir.
- Şev Deformasyonu Türleri:
- Boşluk Suyu Basıncı Sönümlemesi ile Deformasyon:
 - Deprem sonrası boşluk suyu basıncının azalması ve zeminin sıkışması sırasında oluşur.
 - Ataletsel Kuvvetlerden Kaynaklanan Deformasyon:
 - Deprem sırasında kaydırıcı kuvvetlerin tutucu kuvvetleri aşması nedeniyle meydana gelir.
 - Her bir deprem çevriminde şev kademeli ve artışlı yanal harekete uğrar.
- Yanal Deformasyon Tahmini:
- Şev stabilitesi analizinde emniyet faktörü 1'in biraz üzerindeyse, şevin yanal deformasyonu yanal yayılma modelleriyle tahmin edilebilir.

Referanslar

- Ambraseys, N. N., Menu, J. M. (1988). "Earthquake-Induced Ground Displacements", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 16, pp. 985-1006.
- Andrus, R. D., Stokoe, K. H. (2000). "Liquefaction Resistance of Soils from Shear Wave Velocity", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 126, no. 11, pp. 1015-1025.
- Bartlett, S.F., Youd, T.L. (1992). "Empirical analysis of horizontal ground displacement caused by liquefaction-induced lateral spreading", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 8, pp. 1175-1194.
- Chopra, A.K. (2001). "Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632
- Dakoulas, P., Gazetas, G. (1986). "Seismic Shear Strains and Seismic Coefficients in Dams and Embankments", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 75-83.
- Day, R.W. (2004). "Geotechnical Earthquake Engineering Handbook", Springer, New York.
- Duncan, J. M., Chang, C. Y. (1970). "Nonlinear analysis of stress and strain in soils", *Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE*, Vol. 96, No. SM5, pp. 1629-1653.
- Eurocode 8 (2005). "Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 5 (EN 1998-5)", European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- Hynes-Griffin, M. E., Franklin, A.G. (1984). "Rationalizing the seismic coefficient method", *Miscellaneous Paper GL-84-13, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi*.
- Idriss, I. M., Boulanger, R.W. (2008). "Soil Liquefaction During Earthquakes", *Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Monograph MNO-12*.
- Kramer, S. L. (1996). "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, K. Kayabalı çevirisi(2003).
- Krinitzsky, E. L., Gould, J. P., Edinger, P. H. (1993). "Fundamentals of Earthquake-Resistant Construction". Wiley, New York.
- Marcuson, W. F. (1981). "Moderator's Report for Session on Earth Dams and Stability of Slopes under Dynamic Loads", *Proceedings, International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, Vol. 3*.
- Newmark, N. M. (1965) "Effects of earthquakes on dams and embankments", *Geotechnique*, Vol. 15, No. 2, pp. 139-160.

- Seed, H. B., Martin, G. R. (1966). "The Seismic Coefficient in Earth Dam Design", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, vol. 92, no. SM3, pp. 25-58.
- Seed H.B., Whitman R.V., (1970). "Design of earth retaining structures for dynamic loads", *Proceedings of the Specialty Conference on Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth Retaining Structures, 1970*, 103-147, Ithaca, New York.
- Seed, H. B., Idriss, I. M. (1971). "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 97, No. SM9, pp. 1249–1273.
- Seed, H. B., Mori, K., Chan, C. K. (1975). "Influence of Seismic History on the Liquefaction Characteristics of Sands", Report EERC 75-25. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Seed, H. B. (1979). "Considerations in the Earthquake-Resistant Design of Earth and Rockfill Dams", *Geotechnique*, Vol. 29(3), pp. 215-263.
- Seed, R. B., Harder, L. F. (1990). "SPT-based analysis of cyclic pore pressure generation and undrained residual strength", in J.M. Duncan ed., *Proceedings, H. Bolton Seed Memorial Symposium*, University of California, Berkeley, Vol. 2, pp. 351-376.
- Taniguchi, E., Sasaki, Y. (1986). "Back Analysis of Landslide due to Nagano-ken Seibu Earthquake of September 14, 1984", *Proceedings, XI ISSMFE Conference, Session 7B*, San Francisco, California. University of Missouri, Rolla.
- Terzaghi, K. (1950). "Mechanisms of landslides", *Engineering Geology, Geological Society of America, Volume 1*, pp. 83–123.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., Mesri, G. (1996). "Soil Mechanics in Engineering Practice", 3rd Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Wilson, R. C., Keefer, D. K. (1985). "Predicting Areal Limits of Earthquake-Induced Landsliding in Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region", J. I. Ziony, ed. Professional Paper 1360. U.S. Geological Survey, Reston, VA, pp. 317-345.
- Youd, T. L., Idriss, I. M. (2001). "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 2nd International Symposium on Liquefaction Engineering", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 127, No. 10, pp. 815-825.