

Dolgu Barajların Şev Stabilite Analizi: Temel Yaklaşımlar Ve Parametre Seçimi

Hasan TOSUN¹

Yazışma yazarı:
Hasan TOSUN
hasantosun26@gmail.com

¹ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, ORCID: 0000-0002-9481-7956

Referans:
Tosun, H., (2020), Dolgu Barajların Şev Stabilite Analizi: Temel Yaklaşımlar ve Parametre Seçimi, Su Kaynakları, 5, (1) 13-22

Makale Gönderimi : 12 Mart 2020
Online Kabul : 20 Mart 2020
Online Basım : 25 Mart 2020

*Bu çalışma Uluslararası V. Baraj Güvenliği Sempozyumu'nda (27-31 Ekim, 2018) bildiri olarak sunulmuştur.

Özet Dolgu barajlarda genellikle sınır denge koşulları için yapılan stabilite yöntemleri arasında; “şev stabilite analizi” yaklaşımı, yaygın olarak kullanılmakta ve basitçe uygulanabilmektedir. Ancak son yıllarda bu analiz yöntemi ile ilgili olarak farklı değerlendirmeler ortaya çıkmakta ve özellikle depremler için yapılan analizlerde sismik katsayının seçimi ile ilgili olarak temel bazı tereddütler oluşmaktadır. Kritik bir kayma yüzeyi boyunca kaymaya neden olan kuvvetler ile bu yüzey boyunca kaymaya direnç gösteren kuvvetlerin dengesi dikkate alınarak değerlendirme yapılır. İnşaat sonu, işletme aşaması ve ani boşalma ve deprem halini temsilen farklı yüklemeye koşulları için memba ve mansap şevlerinin stabilitesi değerlendirilir ve güvenlik sayıları hesaplanır. Bu bildiride dolgu barajlarda şev stabilite analizlerinin esasına değinilecek, yüklemeye koşulları ve güvenlik sayısı ile ilgili temel esaslar özetlenecek, temel zemini ve dolgu malzemesi ile ilgili kritik hususlar tanımlanacak, girdi parametreleri değerlendirilecek ve sismik katsayının seçimi ile genel yaklaşımlara değinilecektir.

Anahtar Kelimeler: Dolgu baraj, Güvenlik sayısı, Statik stabilite analizi

Input Parameters and Main Principles of Slope Stability Analysis for Embankment Dams

Abstract Slope stability analysis, which is generally performed by considering the limit equilibrium condition is evaluated as one of the simplest approaches and widely used method for embankment dam. However, recently it is questioned on some issues, especially on selection of seismic coefficient for pseudo-static analysis. Along a critical slip surface through the embankment or through the embankment and its foundation, the total driving and total resisting forces are determined and the factor of safety against stability failure is calculated. The calculated value should provide the minimum value given in the specification and standard manuals. The upstream and downstream abutments are evaluated for end-of construction, rapid drawdown and operation stages. For end-of construction, operation stages, the static slope stability analysis is realized for downstream and upstream slopes separately. The seismic stability of both slopes are also evaluated as based on the peak ground acceleration for end-of construction and operation stages. This paper introduces the main principles of static stability analysis for embankment dams, gives the guidelines on loading conditions and safety factors, defines the properties of fill materials and foundation soils, mentions the selection of seismic coefficient for pseudo-static analysis.

Keywords: Embankment dam, Factor of safety, Static stability analysis

1. Giriş

Dolgu barajlarda statik stabilite analizi, genellikle sınır denge koşulları için yapılır. Kritik bir kayma yüzeyi boyunca kaymaya neden olan kuvvetler ile bu yüzey boyunca kaymaya direnç gösteren kuvvetlerin dengesi dikkate alınarak değerlendirme yapılır. İnşaat sonu, işletme aşaması ve ani boşalma halini temsilen farklı yüklemeye koşulları için memba ve mansap şevlerinin stabilitesi değerlendirilir ve güvenlik sayıları hesaplanır. Hesaplanan bu değerlerin şartnamelerde ve standartlarda yer alan güvenlik sayısı değerleri sağlaması yeterli görülür. İnşaat sonu ve işletme halini temsilen yapılan analizler, memba ve mansap şevleri için ayrı ayrı gerçekleştirilir. İşletme halinde mansap şevi analizi, en büyük rezervuar yükü altında yapılırken, memba şevi için ise, kısmi dolu rezervuar koşulları dikkate alınır. Ayrıca bu yöntemde inşaat sonu ve işletme hali için baraj yerine etkiyen etkin yer ivmesi dikkate alınarak, deprem halinde oluşacak memba ve mansap şevlerine ait güvenlik sayıları belirlenir.

Geoteknik Mühendisliğinde kayma göçmesi; bir dolgu veya dolgu ile birlikte temel zemini içinde oluşan bir yüzey boyunca ilgili malzemelerin hareket etmesi olarak değerlendirilir. Analizlerde göçmenin gerçekte belli bir kalınlığa sahip zon boyunca oluştuğu bilinmesine rağmen, yalnızca belli bir çizgisel hat boyunca oluştuğu varsayılır. Homojen dolgular ile ince taneli malzemelerden oluşan kalın zemin depozitlerinde, göçme düzlemi bir dairesel yay parçası ile temsil edilir. Halbuki zonlu dolgularda veya ana kaya üzerinde ince temel zemininin yer aldığı lokasyonlarda düzlemsel bir kayma yüzeyi oluşur. Bu tür bir kayma düzlemi üzerinde oluşacak göçmenin analizi, sınır denge koşulları için dilim yöntemi ve kayan blok yöntemi kullanılarak dilim yüzeyine etkiyen yükleri farklı kombinasyonu ile yapılır (Bishop,1955; Spencer, 1967;Morgensten ve Price, 1965; Janbu, 1973; Sharma, 1993). Bilişim teknolojisindeki hızlı gelişme, karmaşık denklemsel büyüklük kolayca çözülebilmeye ve sonuçların mukayeseli olarak analiz edilebilme fırsatını verir.

Bir dolgu barajın stabilitesi, temel ve dolgu malzemesinin arazideki mühendislik özellikleri ile baraj yerindeki temel birimine ait geoteknik özellikler dikkate alınarak değerlendirilir. Önerilen dolgu malzemesinin mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde ve yeterli malzemenin seçilmesinde, malzeme ocağındaki değişimler ile malzemenin doğal su muhtevası önemli kriterlerdir. Ayrıca bölgedeki iklim koşulları ile yerleştirme su muhtevasındaki ve sıkıştırma yoğunluğundaki kaçınılmaz değişimlerde, stabilite üzerinde etkili hususlar olarak değerlendirilmektedir. Yüksek yanıl basınçlar altında taneli dolgu malzemesi ve temel zeminin kayma dayanımında oluşan azalma, özellikle yüksek dolgu barajlar yönünden önemle dikkate alınması gerekli bir husus olarak ifade edilmektedir (USBR, 1987).

2. Tasarım Parametreleri ve Malzeme Özellikleri

Sıkışabilir temeller üzerine veya dar ve derin vadilerde inşa edilen dolgulardaki farklı oturma etkisi ile dolgunun ve temel zemininin birim deformasyonu, yapının uzun dönemli stabilitesi için önemli etkiler olarak ortaya çıkar. Statik stabilite analizinde, bu durumlar bir kayma yüzeyi boyunca oluşan dayanım değişikliklerini dikkate almak suretiyle değerlendirilmektedir. Bu kapsamında yapılacak analizler için sondaj çalışmalarına dayalı zemin profili, litoloji ve jeolojik detaylar, yeraltısuyu konumu ve sızma koşulları, temel biriminin gerilme tarihçesi, yapısal süreksizlikler veya zayıflık zonlarının konumu ve eklemler sistemi ile ilgili detay bilgilere ulaşılmaması gerekir. Ayrıca temel biriminin ayrışma derecesi ile heyelan ve deprem aktivitesi hakkında da bilgi edinilmesi önemli bir etki olarak ortaya çıkar.

Statik stabilite yönteminde dolgu şevleri, dolgu malzemesi ve temel zeminin özellikleri ile yerel zemin koşulları dikkate alınarak analiz edilir. Analiz yöntemlerinde toplam gerilme ve efektif gerilme esasına göre değerlendirme yapılmaktadır. Efektif gerilmeler, genelde kısmi dolu ve kararlı akım koşullarının olduğu dolgularda, piezometre ile gözlemlerin yapılabildiği inşaat sonrası stabilite koşullarının incelenmesinde ve temel ile dolgu malzemesinin bütünüyle konsolide olup aşırı boşluk suyu basınçlarının oluşmadığı mevcut barajların stabilite analizinde kullanılır. Toplam gerilme ise, inşa sonu hali analizi için uygundur. Ancak ön inceleme aşamasındaki büyük barajlarda baraj tipi belli olduktan sonra, Tablo 1’de verilen değerler kullanılarak çalışmalar yürütülebilir. Tosun ve Batmaz (2007), konuyla ilgili detaylı değerlendirmeler yapmışlardır. Yazar ve çalışma arkadaşları tarafından bu esasta yapılan çok sayıda uygulama mevcuttur (Tosun, 2011; Tosun, 2012, Tosun ve Oguz, 2017; Tosun ve Tosun, 2017a; Tosun and Tosun, 2017b, Tosun vd., 2019).

Tablo 1. Farklı zeminler için malzeme özellikleri (USBR, 1987)

GRUP SEMBOLÜ	ZEMİN SINIFI	KOMPAKSİYON ÖZELLİKLERİ		KAYMA DAYANIMI		
		En büyük kuru yoğunluk (Mg/m ³)	Optimum su muhtevası (%)	Sıkıştırılmış kohezyon (kN/m ²)	Doğgun kohezyon (kN/m ²)	Kayma Dayanım Açısı
GW	İyi derecelenmiş temiz çakıllı çakıl-kum karışımı	1.906	<13,3	*	*	>38
GP	Kötü derecelendirilmiş temiz çakıllı çakıl-kum karışımı	1.762	<13,4	*	*	>37
GM	Siltli çakıl kötü derecelenmiş çakıl-kum-silt	1.826	<14,5	*	*	>34
GC	Killi çakıl kötü derecelenmiş çakıl-kum-silt	1.842	<14,7	*	*	>31
SW	İyi derecelenmiş temiz kumlu çakıl-kum karışımı	1.906±0,08	13,3±2,5	39,3±4,13	*	38±1
SP	Kötü derecelenmiş temiz kumlu çakıl-kum karışımı	1.762±0,03	12,4±1,0	22,8±6,2	*	37±1

Tablo 1 (Devam)

SM	Siltli kum,köttü derecelenmiş kum-silt karışımı	1.826±0,016	14,5±0,4	51,0±6,2	20,0±6,9	34±1
SM-SC	Çok az plastik ince ihtiva eden kum-silt-kil	1.906±0,016	12,8±0,5	50,3±21,4	14,5±5,5	33±4
SC	Killi kum köttü derecelenmiş kum-kil karışımı	1,842±0,016	14,7±0,4	75,2±15,2	11,0±6,2	31±4
ML	Organik olmayan silt ve killi silt	1,650±0,016	17,2±0,7	66,9±10,3	8,9±*	32±2
ML-CL	Organik olmayan kil-silt karışımı	1,746±0,03	16,8±0,7	63,4±16,5	22,0±*	32±3
CL	Düşük plastisiteli organik olmayan kil	1,730±0,016	17,3±0,3	86,8±10,3	13,1±2,0	28±2
OL	Düşük plastisiteli organik silt ve siltli kil	*	*	*	*	*
MH	Organik olmayan killi silt,elastik silt	1,314±0,064	36,3±3,2	72,4±29,6	20,0±8,9	25±3
CH	Yüksek plastisiteli organik olmayan kil	1,506±0,03	25,5±1,2	102,7±33,8	11,0±5,9	19±5
OH	Organik kil ve siltli kil	*	*	*	*	*

Dolgu malzemesinin optimumun çok fazla kuru yönünde sıkıştırılmış olması halinde de, su tutulmasına bağlı olarak oluşacak doygunluk koşulu ile, aşırı oturmaların oluşabileceği belirtilmelidir. Aşırı oturmalar, aynı zamanda temel zemininde konsolidasyonuna bağlı olarak gelişebilir. Özellikle büyük farklı oturmaların meydana gelebileceği yerlerde bu etki, önemle ortaya çıkmaktadır. Yüzey deplasman plakaları ve piezometreler kullanılarak aşırı deformasyonları ve aşırı boşluk suyu basınçları kontrol edilir. Bu veriler ışığında dolgu yerleştirme hızına karar verilir.

Gevşek ve doygun kumlarda, hassas silt ve kil zeminlerde, bu malzemelerin kayma deformasyonlarına veya deprem şoklarına maruz kalması halinde, sıvılaşma gerçekleşebilir. Nispi sıklığı % 70 veya daha fazla olan kumlarda, sıvılaşma oluşma ihtimali oldukça küçüktür. Ancak barajlarda dolgu malzemesi olarak kullanılacak kohezyonsuz zeminlerde, ortalama nispi sıklığın % 85 olması gereklidir. Bu esasın sağlanması ile dolgu oturması en düşük seviyeye indirilecek, borulanma tehlikesi ortadan kaldırılacak ve daha uygun kayma dayanımları sağlanacaktır. Stabilite analizlerinde daha özenle dikkate alınması gereken bazı zemin tipleri ve potansiyel göçme koşulları vardır. Bunlara arasında ilerleyen göçmenin yarattığı problemler önem arz etmektedir.

Potansiyel kayma zonlarında üniform olmayan gerilme dağılımından dolayı, bazı bölümlerde nispi olarak daha büyük birim deformasyonlar gelişebilir ve pik dayanımlar aşılabilecektir. Bir zemin için gerilme-birim deformasyon eğrilerinde pik değerden sonra kayma dayanımında bir önemli düşüş meydana geliyorsa, ilerleyen göçme ihtimali artmaktadır. Bu durumda stabilite analizleri için pik kayma dayanım değerini kullanmak uygun olmayacaktır. Bunun yerine gereken güvenlik sayısını artırabilecek veya pik dayanımının değerinden daha küçük bir değerle çalışılması muhtemel çözüm yolları olarak değerlendirilebilir. Bazı özel zemin tiplerinde ise, son kayma dayanımı ile çözüm üretilmesinin uygun olacağı belirtilmektedir.

Temel zemininin ayrışma derecesi ve süreksizlik durumu, parameter seöiminde öok önemli bir aşamayı oluşturmaktadır. Homojen ve izotropik olmayan temel birimlerinde dolgu malzemesi için tablo 2'de verilen kayma dayım verileri kullanılabilir. Kaya dolgu malzemenin kayma dayanımı açısı için kaya cinsine göre, tablo 3'de verilen değerler dikkate alınabilir. Ancak kaya malzeme üzerinde yapılan farklı fiziksel ve mekanik deneylere göre ilgili parametrelerin revize edilebileceği belirtilmelidir.

Tablo 2. Süreksizlik dolguların kayma dayanımı (Hoek ve Bray,1979)

Kaya Cinsi	Dolgu ve/veya deney koşulları	Pik Dayanım		Kalıntı Dayanım	
		c (kN/m ²)	Ø (°)	c' (kN/m ²)	Ø' (°)
Bazalt	Killi bazaltik breş (içerik kilden bazalta kadar değişebiliyor)	240	42	-	-
Bentonitik Kıltaşı	Bentonit tabakası	15	7.5	-	-
	İnce tabakalar	90-120	12-17	-	-
	Üçekslenli basınç deneyi	60-100	9-13	-	-
Bentonitik Şeyl	Üçekslenli basınç deneyi Direkt kesme	0-270 -	85-29 -	30	8.5
Killi Şeyl	Üçekslenli basınç değeri	60	32	-	-
Killi şeyl	Tabakalama düzlemleri	-	-	0	19-25
Kömürlü kayaçlar	Kil maylonit tabakaları (1.0-2.5 cm kalınlıkta)	11-13	16	0	11.0 -11.5
Dolomit	Şeyl ara tabakalı (15 cm kalınlıkta)	41	14.5	22	17

Tablo 2 (Devam)

Diorit,granadiorit	Kil dolgulu (kil=%2 ve PI=17)	0	26.5	-	-
Granit	Kil dolgulu fay	0-100	24-45	-	-
	Kum-silt dolgulu fay	50	40	-	-
	Teknotik kayma zonu, şistozite, parçalı,ayrışmış Kaya ve dolgu	242	42	-	-
Grovak	Tabaka düzlemlerinde 1-2 mm kil	-	-	0	21
Kireçtaşı	6 mm Kil tabakalı	-	-	0	13
	1-2 cm kil dolgulu	100	13-14	-	-
	<1 mm kil dolgulu	50-200	17-21	-	-
Kireçtaşı,marn ve lignit	Lignit ara tabakalı	80	38	-	-
	Lignit-marn birleşimi	100	10	-	-
Kireçtaşı	Marnlı eklemeler (2 cm kalınlıkta)	0	25	0	15-24
Lignit	Lignit ve kil arasındaki tabaka	14-30	15.0-17.5	-	-
Montmorillonitik kil	Tebeşir içinde 8 cm kalınlıkta kil tabakalı	16-20	7.5-11.5	-	-
Şist,kuvarsit ve silisli şist	10-15 cm kalınlıkta kil dolgulu	30-80	32	-	-
	İnce kil tabakalı	610-740	41	-	-
	Kalın kil tabakalı	380	31	-	-
Sleyt	İnce laminalar ve ayrışmış kaya	50	33	-	-
Kuvars /Kaolin	Üçekslenli deneyi (sıkıştırılmış numune)	42-90	36-38		

Tablo 3. Farklı kaya birimlerinin kayma dayanımı açısı değerleri (Hoek ve Bray,1981)

Kaya Tipi	ϕ (°)
Amfibolit	32
Bazalt	31-38
Konglamera	35
Tebeşir	30
Dolomit	27-31
Şistozite gnays	23-29
Granit (ince taneli)	29-35
Granit (iri taneli)	31-35
Kireçtaşı	33-40
Kumtaşı	25-35
Şeyl	27
Silttaşı	27-31
Sleyt	25-30

Bazı özel temel zeminlerinin kazı ve yükleme koşullarındaki davranışı uzun vadeli stabilite yönünden önem arz etmektedir. Bunlardan biri, yarı kayalaşmış konumdaki şeyl tipi malzemedir ki; stabilite yönünden sonradan problem yaratabilmektedir. Şeyl; killi şeyl ve çimentolu şeyl olmak üzere iki temel gruba ayrılır. Killi şeyl; üstünde istiflenmiş malzemelerin ağırlığı ile konsolide olmuştur ve taneler arasında çimentolanma yoktur. Çimentolu şeyl ise kalkerli, silisli veya başka esaslı matris malzeme ile çimentolanmaya maruz kaldığından ilave bir kayma dayanımına sahiptir. Bu tip bir malzemede, ısı ve basınç etkisi altında taneler arası bağ oluşmuştur. Killi şeyl; birkaç ıslanma-kuruma devresi etkisine maruz kaldığında hızla dağılırken, çimentolu şeylde bu işlem etkili değildir veya çok az etkilidir. Bu nedenle, baraj temelinde yer alan killi şeyllerde, önemli temel problemleri yaşanmaktadır.

Killi şeyller, yüksek şişme potansiyeline sahiptir ve boşaltmadan veya ayrışma etkisinden dolayı dayanım kaybına uğrar. Bu tip şeyllerin kayma dayanımı ve deformasyon modülü oldukça düşüktür ve yüklemeye bağlı olarak yüksek boşluk suyu basınçları oluşur (EM 110-2, 1970). Killi şeyller içindeki cilalı yüzeyler, düşük kayma dayanımının bir göstergesidir. Bu problem, arazideki gözlemlerden ve laboratuvarında yapılan makro incelemelerden tahmin edilebilir. Ancak nicel mineral tipi tayini ile suya dayanıklılık deneyi sonuçlarına bağlı olarak killi şeyl problemi daha gerçekçi şekilde tanımlanmaktadır. Killi şeyl; arazideki üç eksenli gerilme koşullarındaki değişimden sonra, ayrışmakta ve tipik yüksek plastisiteli kil özelliği taşımaktadır. Bu nedenle, ilgili birimin önceden tanımlanması önem arz etmektedir.

Silt, kil ve killi şeyl üzerine inşa edilen dolgular, aşırı boşluk suyu basınçlarının oluşması ve önemli deformasyonların meydana gelmesine neden olur. İnşaat esnasında düşey ve yatay yönde oluşacak hareketler ile boşluk suyu basınçlarının ölçülmesi gerekebilir. Bu ölçümlere bağlı olarak dolgu yükleme

hızına karar verilir. Aşırı boşluk suyu basınçları ve deformasyonlar, aynı zamanda dolgunun optimum su muhtevasından daha fazla bir değerde sıkıştırılması halinde de oluşur. Bu koşullarda sıkıştırılan dolgularda yapılacak ölçümler, yine dolgu hızı hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.

Zayıf ve plâstik malzeme üzerine inşa edilmeyen dolgularda, çekirdek malzeme optimum değer çok az ıslak yönünde yerleştirilmekte iken, dolgunun dış kabuğunu oluşturan yarı geçirimli malzemenin optimum su muhtevası değerinin kuru yönünde sıkıştırılmasının uygun olacağı ifade edilmiştir (EM 110-2, 1970).

Malzeme kayma dayanımları arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilebilir veya analizin tasarım aşamasına bağlı olarak deney verilerinden tahmin edilir. Ön tasarım amaçlı olarak yapılacak çalışmalarda kayma dayanımları yerel jeolojik verilere, benzer malzemelere ait laboratuvar deney sonuçlarına bağlı olarak belirlenebilir. Kum ve çakıl gibi iri taneli zeminler için kayma dayanımı parametreleri, tablo 1'den alınabilir veya benzer malzemeler üzerinde yapılmış laboratuvar deney sonuçlarına bağlı olarak seçilebilir. Silt ve kil gibi ince taneli zeminler için planlama amaçlı kullanılacak kayma dayanım parametreleri için, tablo 4'de sunulan veriler kullanılabilir, ancak proje aşamasında mutlaka laboratuvar deneyleri yapılmış olmalıdır.

3. Yükleme Koşulları ve Analiz Tipleri

Toprak ve kaya dolgu barajların stabilite analiz yöntemlerinde genellikle dairesel ve düzlemsel göçme düzlemlerine göre hesaplamalar yapılır. ABD Su İşleri Teşkilatı; stabilite analizlerinde dikkate alınacak yükleme koşulların, dolgu inşa edilme aşamasına, rezervuar işletme planına, tehlike ve bakım süreçlerine, taşkın kapasitelerine, dolgu ve temel zemin özelliklerine göre belirlendiğini ifade ederek, ABD Ordu Mühendisleri kurumundan (EM 1100-2,2003) farklı olarak yükleme koşullarını dört ayrı durum halinde değerlendirmiştir. Farklı tasarım koşulları için kayma dayanım parametrelerinin seçiminde tablo 2'de tanımlanan esaslar dikkate alınır.

Tablo 4: Farklı yükleme koşulları için kayma dayanım parametrelerinin seçimi

Durum	Tasarım Koşulu	Kayma dayanımı
I	İnşaat anı ve inşaat sonrası	Serbest drenajlı zeminler için efektif gerilme esasında bulunan drenajlı kayma dayanımı kullanılır. Geçirimsiz zeminler: toplam gerilme esasında bulunan drenajsız dayanımlar kullanılır.
II	Ani düşme	Serbest drenajlı zeminler: efektif gerilme esasında bulunan drenajlı kayma dayanımı kullanılır. Geçirimsiz zeminler için Kompozit zarf kullanılır (şekil 1a)
III	İşletme hali-kararlı akım	Efektif koşullarda bulunan drenajlı kayma dayanımları kullanılır (ortalama zarf-şekil 1b)
IV	Deprem hali	İlgili tasarım koşullarında kullanılan değerler aynen alınır.

Bir dolgu içinde ve temel zemininde oluşan kayma gerilmeleri; dolgunun kendi ağırlığı, rezervuardaki salınımlar, sızma veya deprem kuvvetleri ile oluşur. Stabilite analizinde farklı koşulların temsil edilmesi amacıyla yukarıda da ifade edildiği gibi dört ayrı durum tanımlanabilir:

- Durum I: İnşaat sonu
- Durum II: Ani boşalma hali
- Durum III: İşletme hali
- Durum IV: Deprem

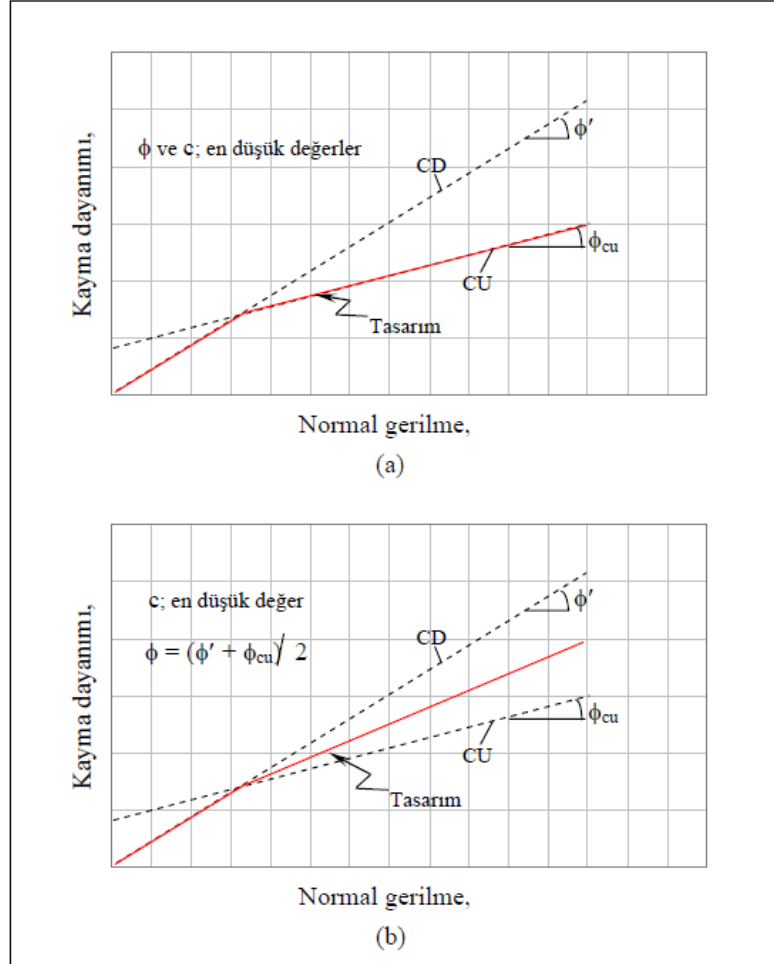
Durum I, III ve IV; barajın hem memba ve hem de mansap şevi için uygulanırken, Durum II yalnızca memba şevi için dikkate alınır. Durum IV için ani düşme hali hariç tüm analizler deprem durumu dikkate alınarak Durum IV'de tekrarlanır. Bu bildiriye tanımlanan her durum için verilen sınırlamalar aşağıda özetlenmektedir. Tanımlamalarda kullanılan UU konsolidasyonsuz- drenajsız koşulu, CU konsolidasyonlu-drenajsız koşulu ve CD konsolidasyonlu-drenajlı yükleme koşullarını ifade etmektedir.

3.1. Durum I: İnşaat sonu

Optimum su muhtevasından daha yüksek değerlerde sıkıştırılan geçirimsiz veya yarı geçirimli zeminlerde, inşaat aşamasında zeminin bütünüyle konsolide olmamasından dolayı boşluk suyu basıncı oluşacaktır. Bu durumu temsilen yapılacak stabilite analizlerinde, dolgunun arazideki sıkıştırılmış su muhtevası ve yoğunluğu dikkate alınarak hazırlanmış zemin örnekleri üzerinde yapılmış drenajsız çabuk deney sonuçları kullanılır. Bu deney sonuçları; dolgu altında yer alan ve inşaat esnasında önemli ölçüde konsolide olacak geçirimsiz kalın temel tabakaları için de kullanılabilir. UU deneyleri esnasında örnekler içinde oluşan boşluk suyu basıncı, arazi boşluk suyu basınçları ile benzerlik taşımaktadır.

3.2. Durum II - Ani Düşme

Dolgular; su tutma aşaması ve işletme aşamasında doymun hale gelir. Eğer dolgu doymun halde iken, rezervuar su seviyesinde boşluk suyu kaçışından daha hızlı bir düşme söz konusu olursa, dolgu içinde aşırı boşluk suyu basınçları ve buna bağlı olarak dengesiz sızma kuvvetleri oluşur. Rezervuar seviyesindeki suyun iki ayrı konumdan (işletme ve maksimum su seviyesi) ani düşümü için analiz yapılır. Durum II için kullanılan kayma dayanımları CU ve CD deney zarflarının en düşük kombinasyonuna göre seçilir. Şekil 1a; bu kombinasyonu sunmaktadır. Bu durum için yapılan analizde, düşüm esnasında boşluk suyu sönümlenmesinin oluşmayacağı ve su seviyesinin ani olarak düştüğü varsayılır. Ani düşme halinde memba su yüzü profilinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir (EM 1100-2 2003)).



Şekil 1: Kayma dayanımı ile ilgili tasarım zarfları: (a) ani düşme hali ve (b) işletme hali.

3.3. Durum III: İşletme Aşaması

Kısmi dolu rezervuar koşullarında memba şevinin analizinde kararlı sızma koşullarının oluştuğu düşünülür. Dolgudaki geçirimsiz zeminlerin tasarım kayma dayanımı için şekil 5'de verildiği gibi CU ve CD değerlerinin orta değerleri kullanılır. Ancak CD dayanımının CU dayanımından küçük olduğu halde ise CD zarfı dikkate alınır. Dolgu doymunluk derecelerinin tanımlanması ve buna bağlı olarak birim ağırlıklarının seçilmesi için bir akım ağı çözümü ile üst akım çizgisi oluşturulur. Stabilité analizleri değişik rezervuar seviyeleri için yapılır ve en düşük güvenlik sayısını elde etmek için rezervuar seviyesi-güvenlik sayısı ilişkisi çizilir.

Kararlı akım koşullarının oluştuğu ve bir sürşarj hazne ile ilave yatay kuvvetlerin ortaya çıktığı bir dolgu içinde mansap şev stabilitesi analiz edilmektedir. Bu durum özellikle merkezi ve dar çekirdekli kaya dolgu barajlar için kritiktir. Analizlerde kullanılan kayma dayanımları için yukarıdaki paragrafta belirtilen sınırlamalar geçerlidir. Analiz, dairesel veya düzlemsel kayma düzlemleri ile yapılabilir. Sürşarj haznenin, kararlı akım doymunluk çizgisi üzerindeki geçirimsiz malzemenin doymunluğunun neden olduğu geçici bir koşul gibi görülmesi uygun olur.

3.4. Durum IV: Deprem

Bu analizde, yukarıda bahsedilen farklı koşullardaki dolgunun deprem durumundaki davranışı araştırılır. Deprem şoku esnasında toprak dolgu barajların davranışını inceleyen yeni analitik yöntemler olmasına rağmen, "yarı-statik yöntem" olarak değerlendirilen bu analizde, potansiyel

göçme yönünde etkiyen ilave bir yatay kuvvetin yaratıldığı varsayılır. Ani düşme koşullarını temsil eden analizde deprem yükleri ile çalışması gerekli değildir. Yatay sismik kuvvet, kayan kütle ağırlığı ile yatay ivmenin çarpımına sahip bir büyüklük olarak tanımlanır. Kayan zemin kütlelerinin toplam ağırlığı, doyunluk çizgisi altında doyun birim ağırlık, bu çizginin üstünde ise ıslak birim ağırlığa bağlı olarak tanımlanır. Yatay yer ivmesi, bir sismik katsayı ile tanımlanır ki, barajın inşa edileceği bölgedeki sismik aktivite derecesine bağlı bir büyüklüktür. Ülkemiz için farklı dönüş periyotları için yatay yer ivmesini veren kataloglar oluşturulmuştur. Gerçek sismik katsayı ise, o bölge için gerçekleştirilecek deprem tehlike analizi ile elde edilebilir. Ancak bu değerler, yarı-statik stabilite analizleri için dönüştürülerek kullanılmalıdır.

Özetle Durum I, III ve IV; barajın hem memba ve hem de mansap şevi ve Durum II yalnızca memba şevi için dikkate alınır. Ani düşme hali hariç tüm analizler deprem durumu dikkate alınarak Durum IV'de tekrarlanır. İnşaat sonu durumun analizi, toplam gerilme esasına göre yapılır. Rezervuar seviyesindeki suyun iki ayrı konumdan (işletme ve maksimum su seviyesi) ani düşümü için yapılacak analizde şekil 1a'daki göçme zarfı tanımı esas alınır (EM 1100-2 2003). Kısmi dolu rezervuar koşullarında memba şevinin analizinde kararlı sızma koşullarının olduğu düşünülür ve dolgudaki geçirimsiz zeminlerin tasarım kayma dayanımı için şekil 1b'de verildiği gibi CU ve CD değerlerinin orta değerleri kullanılır. Deprem şoku esnasında toprak dolgu barajların davranışı, "yarı-statik yöntem" olarak değerlendirilen yöntemle analiz edilir.

4. Güvenlik Sayısı Kriteri

USBR (1987) hesaplanan güvenlik sayılarının yaklaşık değerinin; analiz edilen tasarım koşuluna, kayma dayanımı tasarım değerlerinin tahmin edilme hassasiyetine, dolgu yüksekliğine, dolgu içindeki yapıların varlığına, araştırmaların kapsamına, gerilme-birim deformasyon karakteristiklerine ve dolgu ile temel malzemesinin uyumuna, sıkışma kontrolünün güvenilirliğine ve toprak ve kaya dolgu barajlardan elde edilen deneyime bağlı olduğunu ifade etmektedir. Son analizde proje karakteristiklerine göre göçme riski dikkate alınarak belirtilen sınır güvenlik sayısı değerleri kontrol edilir. Tablo 5, değişik tasarım koşulları için gereken en düşük güvenlik sayısı değerlerini sunmaktadır.

Tablo 5: Tasarım koşullarına göre gereken güvenlik sayıları

Durum	Tasarım Koşulu	Analiz yeri	Gereken en düşük güvenlik sayısı
I	İnşaat anı ve inşaat sonrası	Memba ve mansap şevleri	1.3
II	Ani düşme	Memba	1.1-1.3*
III	İşletme hali-kararlı akım	Mansap	1.4-1.5**
IV	Deprem hali	Memba ve mansap şevleri	1.0***

* En büyük sürsaj seviyesinden ani düşme için G.S=1.1

En büyük depolama seviyesinden ani düşme için G.S=1.3

**En büyük sürsaj seviyesinde G.S=1.4

En büyük depolama seviyesinde G.S=1.5

***Deprem koşullarında (Durum I ve III'de) yenilen çözümler için geçerlidir

EM 110-2 (2003); her analiz için kullanılan verilerin ve elde edilen sonuçların belirtilen sunum sırası ve muhtevası içinde rapor edilmesi gerektiği ifade etmiştir. Bu raporlar en az aşağıdaki bilgileri ihtiva etmelidir.

- Dolgu geometrisi ve kritik göçme dairelerinin konumu açık olarak belirtilmelidir. Ayrıca göçme düzleminin geçeceği temel malzemeleri açık olarak gösterilmelidir.
- Dolgu ve temel zeminine ait her malzeme için kayma dayanımı değerleri, bir tablo halinde sunulmalıdır. Ayrıca birim ağırlıklarda tabloda belirtilmelidir. Kayma dayanımı verilerine ulaşmak için kullanılan ampirik ilişkilere ve ilgili kaynaklara değinilmeli ve bunlar rapor ekinde verilmelidir.
- Kritik göçme düzlemi için tüm hesaplamalar, detaylı olarak sunulmalıdır.
- Rezervuardaki yükselme hızı, dolu rezervuara ulaşım zamanı, ani düşme hesaplamaları için su seviyesindeki düşme hızı, diğer boşaltma ve yükleme koşullarına raporda değinilmelidir.
- Kompozit ve ortalama zarflara bağlı olarak oluşturulan tasarım kayma dayanımı verileri belirtilmelidir.
- Planlanan ölçüm tesisleri ve yerleri rapora eklenmelidir.

Dolgu barajdaki stabilite analizi farklı durumlar için bilgisayar programları ile yapılabilmektedir. Bu programların standart bir çıktısı bulunmamaktadır. Her durum için kritik göçme dairesine ait çözümler sunulurken, tanımlama yapıldıktan sonra belli sıra ile sonuçların sunulması uygun olur, analizlerde kullanılan ve elde edilen veriler renkli kalem ile işaretlenmelidir. Sonuç olarak her durum için kullanılan kayma dayanım parametreleri sunulmalı, nihai güvenlik sayısı değerlerini veren bir tablo oluşturulmalı ve bu çalışmalar sonucunda elde edilen veriler yorumlanmalıdır. Raporda, analiz esas (Basitleştirilmiş Bishop, Spencer, Janbu gibi) mutlaka belirtilmelidir.

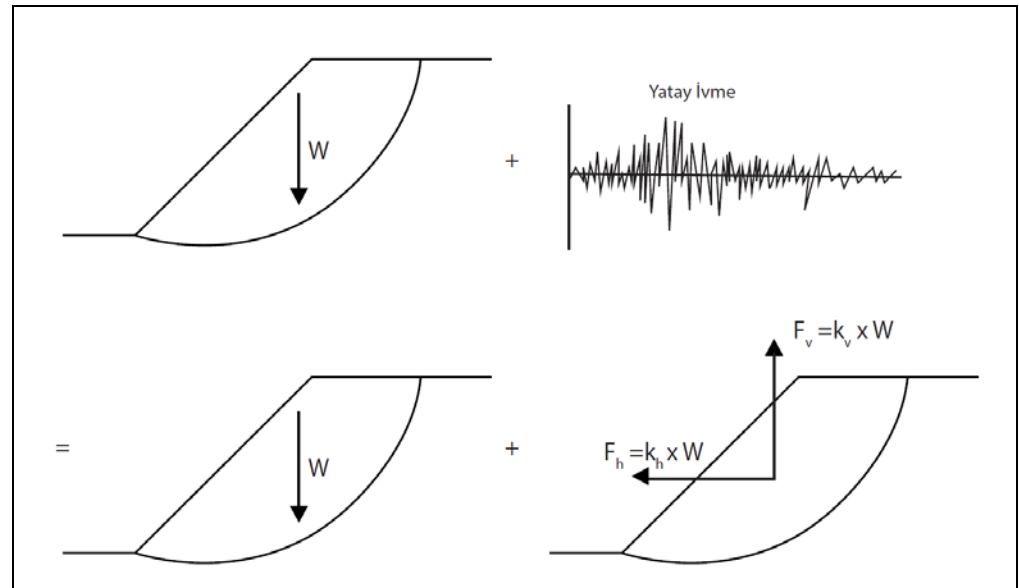
ABD Su İşleri Teşkilatı (USB, 1987); bir stabilite analizi için güvenlik sayısının, kayma düzlemi boyunca zeminin sahip olduğu toplam kayma dayanımının, oluşan kayma gerilmesine oranı olarak tanımlanmasını ve güvenlik sayısının değişik koşullar için nispi stabilite güvenliğini gösterdiğini belirterek, yüksek güvenlik sayısının, dolgu ve temel içindeki düşük kayma gerilmelerini temsil ettiğini ve nispi olarak düşük deformasyonların oluşacağını ifade etmiştir. İlgili kurumun teknik şartnamesinde (USB, 2011) konuyla ilgili yapılan yorum aşağıda özetlenmektedir: "İnşaat sonu yükleme koşulu için dolgu ve temel zemininin geçirimsiz zonlarında, bu zeminler inşaat periyodu sırasında bütünüyle konsolide olmayacağından, boşluk suyu basıncı oluşabilir. Eğer analizde efektif gerilme esnasındaki kayma dayanımı parametreleri kullanılırsa, aşırı boşluk suyu basınçları güvenlik sayısı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Eğer inşaat aşamasında boşluk suyu basınçları oluşuyorsa, güvenlik sayısının 1.3 olarak seçilmesi uygun olur. Arazideki boşluk basınçları ölçülmeden efektif kayma dayanımı zarfı kullanılırsa, en düşük güvenlik sayısı 1.4 olarak seçilmelidir."

Eğer analiz drenajsız kayma dayanımı esasında gerçekleştiriliyorsa, en düşük güvenlik sayısının 1.3 alınması uygun olur. Ancak göçme zarfını belirlemek için yapılan laboratuvar deneylerinin arazideki yükleme koşullarındaki boşluk basıncı davranışını en iyi şekilde modellemesi gerekmektedir. Aktif rezervuar koşullarında üniform sızma koşulu için malzeme dayanımlarındaki belirsizlikleri, geçirimsiz malzeme içindeki boşluk basınçlarını ve uzun dönemdeki stabiliteyi dikkate alarak en düşük güvenlik sayısının 1.5 olmasının uygun olacağı belirtilmektedir. Kararlı akım koşulları altında mansap şevinin göçmesi, inşaat sonu hali ve ani düşme koşullarındaki göçmeden daha fazla hasar yaratacağından yüksek güvenlik sayısı ile çalışmanın bir nedeni olarak yorumlanmalıdır."

Aynı şartnamede, ani düşme koşullarında dengesiz sızma kuvvetlerinin yarattığı yüklemenin, memba şevinde stabilite sorununa neden olacağı ifade edilmektedir. Ancak yükleme kısa bir zaman diliminde olacağından ve bu işlem esnasında su seviyesinde bir düşme meydana geleceğinden, memba şevinin rezervuar boşaltılması mümkün gözükmemektedir. Bu nedenden ki; 1.3 gibi bir güvenlik sayısı yeterli görülmektedir. Hatta bazı hallerde limit denge koşullarına çok yakın güvenlik sayılarının kullanılabilmesi ve özel yükleme koşulları için 1.2 gibi bir en düşük güvenlik sayısının yeterli olacağı belirtilmektedir.

5. Yarı-Statik Analiz ve Sismik Katsayının Seçimi

Şevlerin stabilite analizi için kullanılan konvansiyonel yöntemlerde kritik bir kayma yüzeyi boyunca kaymaya neden olan kuvvetler ile bu yüzey boyunca kaymaya direnç gösteren kuvvetlerin dengesi dikkate alınarak değerlendirme yapılır. Deprem durumunu temsilen yapılan analizlerde, potansiyel göçme yönünde etkiyen ilave bir yatay kuvvetin yaratıldığı varsayılır (Şekil 2). Ani düşme koşullarını temsil eden analizde deprem yükleri ile çalışması gerekli değildir. Yatay sismik kuvvet, kayan kütle ağırlığı ile yatay ivmenin çarpımına sahip bir büyüklük olarak tanımlanır. Kayan zemin kütlelerinin toplam ağırlığı, doygunluk çizgisi altında doygun birim ağırlık, bu çizginin üstünde ise ıslak birim ağırlığa bağlı olarak tanımlanır. Yatay yer ivmesi, bir sismik katsayı ile tanımlanır ki, barajın inşa edileceği bölgedeki sismik aktivite derecesine bağlı bir büyüklüktür.



Şekil 2: Pseudo-statik analizde temel yaklaşım (Melo and Sharma, 2004).

Tablo 6'dan görülebileceği gibi tasarım için uygun sismik katsayının seçimi için özgün bir kural mevcut değildir ve önerilen aralıklar nispi olarak çok geniştir. Kramer (1996) bu durumu görerek sismik katsayının seçimi için belli hasar ve göçme seviyelerini tanımlayan depremlerin üreteceği ivme seviyelerine göre tanımlanması gerektiğini ifade etmiştir.

Tablo 6: Önerilen yatay sismik katsayı değerleri (Melo and Sharma, 2004).

Yatay Sismik Katsayı, k	Tanımlama	
0.05-0.10	ABD’de	
0.12-0.25	Japonya’da	
0.10	Ciddi depremler	Terzaghi (1950)
0.20	Tahrip edici depremler	
0.50	Katastrofik depremler	
0.10-0.20	$F_s > 1.15$	Seed (1979)
0.10	Belirgin Depremler	EM-1110-2 1902 (1970)
0.15	Büyük depremler	
PHA’nın ½ ile 1/3’ü arasında*	$F_s > 1.0^{**}$	Marcuson ve Franklin (1983)
PHA’nın ½ ‘si	$F_s > 1.0$	Hynes-Griffin ve Franklin (1984)

PHA= En büyük yatay ivme (g) F_s = güvenlik sayısı

DSİ kılavuzunda (DSİ, 2012); Pseudo-statik analizlerde kullanılacak sismik katsayısının belirlenmesi için iki ayrı yöntemle göre yer hareketi tahmini yapılır: (1) Tanımlanan deprem seviyesine bağlı olarak oluşan en büyük yer ivmesi (PGA) büyüklüğünün % 40-60 aralığındaki bir değerinin alınması. (2) Eğer PGA değeri 0.20’den küçük ise ilgili değer aynen kullanılması, büyük ise bir formüle $[k=(PGA0.333)/3]$ bağlı olarak sismik katsayısının (k) belirlenmesi. Analizlerde kullanılacak PGA-değeri, farklı deprem seviyeleri (OBE, MDE ve SEE gibi) için farklı değerler alabilmektedir. Baraj mühendisliğinde inşaat anı ve sonu durumun analizinde OBE seviyesinin ve işletme aşaması durumunun analizinde de MDE seviyesinin alınması genel bir kabul görmektedir. Ancak bu parametrelerin seçiminde deprem tekrerrü yılları ile bazı temel eksikler yer almaktadır.

6. Sonuç

Dolgu barajların yarı-statik analizlerinde temel bazı esaslar geliştirilmiştir. Büyük dolgu barajların tasarımında, dolgu malzemesi ve temel birimi ile ilgili yapılmış özgün çalışmalara dayalı geoteknik parametreler kullanılmalıdır. Depremler için yapılan analizlerde yerel zemin koşulları ve sismik tarihçe önem arz etmektedir. Ülkemizde farklı dönüş periyotları için yatay yer ivmesini veren kataloglar oluşturulmuştur. Gerçek sismik katsayı ise, o bölge için gerçekleştirilecek sismik tehlike analizi ile elde edilmekte ve yarı-statik stabilite analizlerinde yukarıda ifade edildiği gibi dönüştürülerek kullanılmaktadır. Aktif sismik alanda yer alan bazı büyük barajlarımız için detaylı sismik tehlike analizlerine göre elde sismik katsayı değerlerine göre yapılan analizlerde stabilite sağlanamamaktadır. Bu barajlarımız halen işlevsel olup ülkede meydana gelen genel ve yerel ölçekli depremlerde herhangi bir sorun yaşanmamışlardır. Konuyla ilgili bir çalışma grubu kurularak sismik katsayısının seçimi ile yeni bir değerlendirilmenin yapılması ve gerekiyorsa ilgili parametrenin kullanımı ile ilgili bir üst limit getirilmesi uygun olur.

7. Kaynaklar

- Bishop, A.W. (1955) "The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes" Geotechnique, V.5, No.1, 7-17.
- EM 1110-2-1902, (1970) "Engineering and Design- Stability of Earth and Rockfill Dams" Engineering and Design Manual, US Army Corps of Engineers.
- EM 1110-2-1902, (2003) "Slope Stability" , Engineering and Design Manual, US Army Corps of Engineers.
- DSİ (2012). "Selection of Seismic Parameters for Dam Design". State Hydraulic Works, Ankara, 29 p (in Turkish).
- Hoek, E and Bray, J.W. (1981) "Rock Slope Engineering" Third Edition.
- Hynes-Griffin ME, Franklin AG. (1984) "Rationalizing the seismic coefficient method." U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, Miscellaneous Paper, GL-84-13, 21 pp.
- Janbu, N., (1973) "Slope Stability Computation" Embankment Dam Engineering, Casagrande Memorial Volume, Wiley, New York, 47-86.
- Kramer S.L.(1996) "Geotechnical Earthquake Engineering." Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey 07458, pp. 434-437.
- Melo, C and Sharma, S. (2004) "Seismic Coefficients for Pseudostatic Slope Analysis" World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004, Paper No.369.
- Morgenstren, N.R. and Price, V.E., (1965) "The Analysis of Stability of General Slip Surfaces" Geotechnique, Vol.15.No.1
- Seed H.B. (1979) "Considerations in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dams." Géotechnique, Vol. 29, No. 3, pp. 215-263.
- Sharma, S., (1996) "Slope Stability and Stability Methods" England, 620p.
- Spencer, E., (1967) "A method of Analysis Assuming parallel Interslices Technique" Geotechnique, 17 (1), 11-26.

- Terzaghi K. (1950) "Mechanisms of Landslides." Engineering Geology (Berkeley) Volume, Geological Society of America.
- Tosun, H and Batmaz, S (2007). "Static stability analyses for embankment dams and critical issues" 1st National Symposium and Exposition on Dam Safety, May 28-30, Ankara, 35-44 (in Turkish).
- Tosun, H. (2011) "Re-analysis of Ataturk Dam under Ground Shaking By Finite Element Models", in Proceeding of CDA Annual Conference, September 22-27. Saskatoon, Canada.
- Tosun, H. (2012) "Earthquake Safety of Keban Dam, Turkey", in Proceeding of CDA Annual Conference, October 15-20. Fredericton, NB, Canada.
- Tosun, H. and Oguz, S. (2017) "Stability Analysis of Atatürk dam, Turkey as Based on the Updated Seismic Data and Design Code", in Proceeding of 85th Annual Meeting of International Commission on Large Dams, Prague, 66-66.
- Tosun, T.V and Tosun, H. (2017a) "Total Risk and seismic hazard analyses of large dams in Northwest Anatolia, Turkey" in Proceeding of 85th Annual Meeting of International Commission on Large Dams, Prague, 165-165.
- Tosun, H and Tosun, T.V (2017b) "Dynamic Analysis of Embankment Dams Under Strong Seismic Excitation and a Case Study", in Proceeding of Long-Term Behaviour and Environmentally Friendly Rehabilitation Technologies of Dams (LTBD 2017), Tehran, 2017, DOI:10.3217/978-3-85125-564-5-102.
- Tosun, H., Tosun, T.V and Kilinc, H. (2019) "Dynamic Stability Analyses For Embankment Dams and a Case Study From Southwest Turkey" in Proceeding of 11th Icold European Club Symposium, 2-4 October, Chania, Crete.
- USBR, (1987) "Design of Small Dams" US. Bureau of Reclamation, Denver, 860p.
- USBR, (2011) "Static Stability Analysis" Design Standards No.13-Embankment Dams. US. Bureau of Reclamation, Denver.