

ŞEV DURAYLILIĞI ANALİZLERİNDE LİMİT DENGE YÖNTEMLERİ, EUROCODE 7 VE BS8006 STANDARTLARIYLA HESAPLANAN BAŞARI ORANLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Can Ziver BÜYÜKKAĞNICI¹, Nihat Sinan IŞIK²

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Beşevler, Ankara

cziverbuyukkagnici@gmail.com

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Beşevler, Ankara

nihatsinan@gazi.edu.tr

Özet

Bu çalışma kapsamında ülkemizde şev duraylılığı analizlerinde yaygın olarak kullanılan limit denge yöntemlerini ve Avrupa tasarım standartları olan Eurocode 7 ve BS 8006 standartlarının literatürde iyi çalışılmış olan vakalar üzerinde analizleri yapılarak kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamaların yapılabilmesi için üç yöntem içinde şevin duraylı olduğu minimum güvenlik katsayıları ortak bir tabana indirgenmiştir. Geleneksel limit denge yöntemleri için TS 8853 standardında kabul edilen 1.5 güvenlik katsayısı sınır değeri kabul edilmiştir. Eurocode 7 ve BS 8006 standartları için ise bu değer 1 olarak kabul edilmiştir. Analizler sonucu hesaplanan güvenlik katsayıları her yöntem için belirlenen değere bölünerek başarı oranı elde edilip bu değerler kıyaslanmıştır. Limit denge yöntemlerine ilaveten güvenlik katsayıları sonlu elemanlar makaslama dayanımı azaltma yöntemi kullanılarak da analiz edilmiştir. Kıyaslamalar sonucunda şev duraylılığı analizlerinde geleneksel limit denge yöntemlerinin başarı oranları daha tutucu sonuçlar vermektedir. Güçlendirilmiş şevler ve toprakarme duvarlar için ise BS 8006 standardı daha güvenilir sonuçlar vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Şev duraylılığı, Eurocode 7, BS 8006, Kısmi faktörler

COMPARISON OF SUCCESS RATIO CALCULATED LIMIT EQUILIBRIUM METHODS FOR SLOPE STABILITY ANALYZES, EUROCODE 7 AND BS8006 STANDARDS

Within the scope of this study, the limit equilibrium methods and Eurocode 7 and BS 8006 standards, which are commonly used in slope stability analysis in our country, have been analysed on the cases which have been well studied in the literature. In order to carried out this comparison, the minimum factor of safety in which the slope is stable within three methods are reduced to a common base. The limit of 1.5 factor of safety accepted for TS 8853 standard is accepted as the limit value for traditional limit equilibrium methods. For Eurocode 7 and BS 8006 standards, this value is accepted as 1. The factor of safety calculated as the result of the analyses are divided by the value determined for each method, and the success rate is obtained, and these values are compared. In addition to limit equilibrium methods, the factor of safety was also analysed by using finite element of shear strength reduction method. As a result of the comparisons, the success rate of traditional limit equilibrium methods in slope stability analysis gives more conservative results. For reinforced slopes and earthing walls, the BS 8006 standard gave more reliable results.

Keywords: Slope stability, Eurcode 7, BS 8006, Partial factors

1.GİRİŞ

Şev duraylılığı analizlerinde kullanılan 4 temel yöntem vardır. Bunlar; limit denge yöntemi, kinematik analiz, deformasyon analizleri ve olasılığa dayalı yaklaşımlardır. Şev duraylılığı analizlerinde kullanım kolaylığı, güvenilir sonuç vermesi ve dünya çapında kullanım alanı bulmasından dolayı limit denge yöntemi öne çıkar. Ayrıca limit denge yöntemleri, karmaşık geometrileri ve değişken zemin ve su basıncı koşullarını barındırma kabiliyetleri nedeniyle en yaygın yöntem haline gelmiştir [1]. 20.yy 2. ve 3. çeyreğinde yaklaşık bir düzine dilim yöntemi geliştirilmiştir [2]. Güvenlik denklemi faktörünü türetmede kullanılan statik ve problemi belirlemek için kullanılan varsayımlarda farklılıklar gösterir [3].

Farklı araştırmacıların geliştirdiği birbirlerinden farklı ve birbirlerinin devamı olan çeşitli limit denge analiz yöntemleri bulunmaktadır. Limit denge analiz yöntemlerinde bilinmeyenler sayısı bilinenlerin sayısından fazladır ve bu yüzden bu yöntemler hiperstatik sistemlerdir. Araştırmacılar şev duraylılığı problemlerini çözebilmek için çeşitli varsayımlarda bulunmuşlardır. Limit denge analizlerinin çeşitliliğinin temeli bu varsayımlardır. Bu çalışma kapsamında ülkemizde yaygın kullanılan limit denge analiz yöntemleri tercih edilmiştir. İsveç, Bishop, Janbu, Morgenstern-Price ve Spencer yöntemleri bu çalışma kapsamında kullanılmışlardır.

Şev duraylılığı limit denge analizlerinde şevin minimum güvenlik katsayısı TS 8853'e göre 1.5 olmalıdır aksi takdirde şev duraylı değildir. Aslında kitaplar ve bu konu üzerindeki çalışmalar minimum güvenlik katsayısını 1 olarak göstermektedir. Ancak laboratuvar sonuçlarıyla sahadaki verilerin birbirlerini karşılamaması, yeraltı suyu seviyesinin gerçeği yansıtmaması ve en önemlisi şev geometrisinin tam olarak analize aktarılamamasından dolayı TS 8853 (Yamaç ve şevlerin dengesi ve hesap metotları) şevin duraylı olabileceği güvenlik katsayısını 1.5 olarak belirlemiştir.

Yukarıda bahsi geçen sebeplerden dolayı İngiliz standart enstitüsü (BSI)'de kısmi faktörler uygulanarak analiz yapılmasını sağlayan Eurocode 7 ve BS 8006 tasarım standartlarını yayınlamıştır. Yapısal Eurocode'lar, başlangıçta 1980'lerde başlayan ve Avrupa Birliği'ndeki (AB) bina ve inşaat mühendisliği çalışmalarının tasarımını uyumlu hale getiren, Avrupa'nın başlı başına bir projesiydi. O zamandan beri 10 standartlık bir cilt geliştirilmiştir ve Bahar 2010'dan itibaren, Avrupa Birliği genelinde, devlet tarafından finanse edilen veya sahip olunan projelerde bina ve inşaat mühendisliği tasarımlarında kullanılması zorunludur.

Jeoteknik yapıların tasarımı, genellikle Eurocode 7 olarak adlandırılan EN 1997 (2004) kapsamındadır. Eurocode 7, tasarımda kullanılacak üç tasarım yaklaşımı (kısmi faktör kümesi) sunmaktadır. Tasarım yaklaşımlarının her biri için ayrı kısmi faktörler vardır ve ulusal eklerde tanımlanmıştır. Bu kısmi faktörler eylemlere, eylemlerin etkilerine, malzeme özelliklerine ve/veya dirençlerine uygulanır. Kısmi faktörlerin belirlenmesinde Eurocode yazarları ülkeleri serbest bırakmışlardır. Ulusal ek için kısmi faktörlerin belirlenmesinde parametreler doğada ne kadar çok dağılım gösteriyor veya hesaplanmaları ne kadar zor ise (hatalı hesaplama olasılığı yüksek ise) o oranda yüksek güvenlik katsayısı uygulanmalıdır.

Eurocode 7, güçlendirilmiş şev ve toprakarme duvar yapıların tasarımını kapsamaz. Bunun yerine, BS 8006 güçlendirilmiş zemin yapıların (duvarlar, şevler ve temel güçlendirilmiş sistemler) tasarımında kullanılması gerektiğini belirtir. İngiltere Ulusal Ekleri ayrıca, BS 8006-1 (1995) 'da verilen kısmi faktörlerin analizde kullanılması gerektiğini ve EN 1997 (2004)' de kısmi faktörlerin ikame edilmemesi gerektiğini belirtmektedir [4].

Eurocode 7 ve BS 8006 standartları için şevin duraylı olabileceği minimum güvenlik katsayısı 1'dir. Geleneksel limit denge yöntemlerinde TS 8853'e göre ise minimum güvenlik katsayısı 1.5 olarak kabul edilmiştir. Bu üç yöntemi birbirleriyle kıyaslayabilmemiz için üç yöntemde aynı tabanda buluşması gerekmektedir. Her üç yöntemde kabul ettikleri minimum güvenlik katsayısına bölünerek başarı oranları hesaplanır. Hesaplanan bu başarı oranları birbirleriyle kıyaslanır ve hangi yöntemin daha güvenilir olduğu belirlenir. Örneğin; geleneksel limit denge yöntemiyle analiz edilen şevin güvenlik katsayısı 1.1, Eurocode ile hesaplanan güvenlik katsayısı ise 0.8 olsun. Bu şevin başarı oranları aşağıdaki gibidir.

Başarı oranı (Geleneksel limit denge yöntemi) = $(1.1/1.5) \times 100$, Başarı oranı %73

Başarı oranı (Eurocode 7) = $(0.8/1.0) \times 100$, Başarı oranı %80

Şev duraylılık analizlerinde, zemin kütlesi içerisindeki gerilmelerin analizinin yaklaşık olması, değişik yüklenme koşulları ve geometrilerde hesabı güçleştirmektedir. Bilgisayar kullanımı, tüm alanlarda olduğu

gibi jeoteknik mühendisliğinde de yaygın olarak kullanılmakta ve özellikle analitik çözümün karmaşık ve zaman alıcı olduğu şev duraylılık analizlerinde artan bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında limit denge analizleri için Slide (Rocscience) programı ile sonlu elemanlar yöntemi için Phase 2 (Rocscience) programları kullanılmıştır [5].

2. EUROCODE 7 ve BS 8006 STANDARTLARI

2.1 Eurocode 7

Zemin değişkenliğinin şevlerin duraylılık üzerinde önemli bir etkisi olduğu iyi bilinmektedir. Bununla birlikte, pratikte değişkenlik, rutin şev duraylılık analizinde uygun şekilde düşünülmemektedir. Bunun temel nedeni zemin değişkenliğinin etkilerinin karmaşık ve nicelendirilmesi zor olmasıdır. Dahası, pratikte kullanılan mevcut şev duraylılık analizi bilgisayar programlarının çoğu, faktörleri dikkate alamamaktadır.

Geleneksel olarak, jeoteknik mühendisliği topluluğu bir güvenlik faktörü uygulayarak ya da nispeten geniş müsaade edilebilir duraylılık oranı göz önünde bulundurarak belirsizliklerle uğraşır (örneğin, Terzaghi 1996). Bununla birlikte, küresel bir güvenlik faktörü kullanarak, farklı belirsizlik kaynaklarının değişkenliği sorumlu değildir. Jeoteknik topluluğu, genel bir güvenlik faktöründen kısmi faktörlerle limit durum tasarım yöntemini sınırlamaya geçişi ele almaktadır. Malzeme özelliklerinin tasarım değerleri, karakteristik değerlere faktörler uygulanarak elde edilir. Gerekli güvenilirlik seviyesine ulaşmak için uygun kısmi faktör değerlerinin seçimi Eurocode 7'de çeşitli tasarım yaklaşımları ile tanıtılmaktadır [6].

Eurocode 7 nin şev duraylılığı üzerinde ayrı bir bölümü yoktur. Şev ve dolguların tasarımı ile ilgili hükümler, Bölüm 11: Genel duraylılık ve Bölüm 12: Dolgular kısmında yer almaktadır. Bölüm 11'deki hükümler, doğal veya dolgu temel çevreleri, istinat yapıları, doğal şevler, dolgular veya kazılar gibi temeldeki tüm duraylılık ve hareketler için geçerlidir. Bölüm 12'deki hükümler, küçük barajlar ve altyapı için setlere uygulanır.

Eurocode 7, limit durumlarının değerlendirilmesinin açık bir prosedürü takip etmesini gerektirir. Eylemler, materyaller ve dirençler için gözlemlenen/ölçülen değerlerden, karakteristik değerlere ve daha sonra tasarım değerlerine doğru genel bir ilerleme vardır. Bir değerden diğerine ilerleyiş, sayısal olmayan bir değerlendirmeye dayanabilirken, diğer durumlarda ilerlemenin sayısal olması gerekir.

Şevlerin genel duraylılığı, kısmi faktörler için uygun GEO/STR değerleri kullanılarak elde edilen eylemlerin, dirençlerin ve kuvvetlerin tasarım değerleri kullanılarak kontrol edilmelidir. Genel duraylılığı analiz ederken, tüm ilgili yenilme türleri dikkate alınmalıdır. Eurocode 7, genel duraylılık tatmin edici herhangi bir spesifik eşitsizlik vermez, ya da verilen herhangi bir hesaplama modeli değildir. Bununla birlikte, şevlerin duraylılık analizleri ile ilgili olarak, yenilme yüzeyiyle sınırlı olan toprağın veya kaya kütlelerinin, normal olarak, aynı anda hareket eden sert (rijit) bir cisim veya birkaç rijit cisim gibi muamele görmesi gerektiğini belirtmektedir. Yenilme yüzeyleri, düzlemsel, dairesel veya daha karmaşık şekiller dâhil olmak üzere çeşitli şekillere sahip olabilir [7].

GEO: Zeminin bozulması veya aşırı deformasyon.

STR: Yapının veya yapısal elemanların iç hatası veya aşırı deformasyonu

Bromhead, limit denge yöntemlerinde kullanılan güvenlik faktörünü, harekete geçirilmiş (mobilize) kesme gücünün mevcut kayma dayanımına oranı olarak tanımlar. Bu, malzeme mukavemetine kısmi bir faktörün uygulanmasına benzer ve bu nedenle, malzeme özelliklerine kısmi faktörler uygulayan tasarım yaklaşımları, Şev duraylılık problemlerinin çözümü için çok uygundur (Bond). Eurocode 7'de uygulanan tasarım yaklaşımları aşağıdaki gibidir [8].

Tasarım yaklaşımı 1 kombinasyon 1 (DA1C1):

$$A1 + M1 + R1$$

Tasarım yaklaşımı 1 kombinasyon 2 (DA1C2):

$$A2 + M2 + R1$$

Kombinasyon 1'de kısmi faktörler eylemlere ve yer mukavemet parametrelerine uygulanır. Kombinasyon 2'de, eylemlere, zemin dayanımına ve bazen de zemin mukavemeti parametrelerine kısmi faktörler uygulanır.

Tasarım yaklaşımı 2 (DA2):

$$A1 + M1 + R2$$

Bu yaklaşımda, eylemlere veya eylemlerin etkilerine ve zemin direnişlerine kısmi faktörler uygulanır. Bu yaklaşım şev ve genel duraylılık analizleri için kullanılırsa, yenilme yüzeyindeki etkilerin ortaya çıkan etkisi γ_E ile çarpılır ve yenilme yüzeyi boyunca kayma direnci, $\gamma_{R,e}$ 'ye bölünür.

Not: DA2, faktörlerin taşıma kapasitesi ve pasif direnç gibi eylemlere ve dirençlere uygulandığı tek bir hesaplama gerektirir. Şev duraylılık problemlerine ve sonlu elemanlar analizi için bu yaklaşımı uygulamak zor olduğu tespit edilmiştir. Bu yüzden çoğu ülkelerde DA2 yerine bunlar için DA3'ü kullanır [9].

Tasarım yaklaşımı 3 (DA3):

$$(A1^* \text{ veya } A2^{\dagger}) + M2 + R3$$

*=Yapısal eylemler hakkında.

[†]=Jeoteknik faaliyetlerde.

Bu yaklaşımda, eylemlere veya eylemlerin etkilerine ve zemin direnişlerine kısmi faktörler uygulanır. Şev ve genel duraylılık analizleri için, zemine olan eylemler (örneğin yapısal eylemler, trafik yükü), yük faktörleri A2 seti kullanılarak jeoteknik eylemler olarak muamele edilir. Kısmi faktörler Tablo 1'de verilmiştir (Simpson, 2011).

Tablo 1. Eurocode 7'de şev duraylılık analizlerinde kullanılan kısmi faktörler [10]

Kısmi faktörler	Tasarım Yöntemleri			
	DA1C1	DA1C2	DA2	DA3
γ_G	1.35	1.0	1.35	1.0*
$\gamma_{G;fav}$	1.0	1.0	1.0	1.0
γ_Q	1.5	1.3	1.5	1.3*
$\gamma_{\varphi}=\gamma_c$	1.0	1.25	1.0	1.25
γ_{cu}	1.0	1.4	1.0	1.4
γ_{Re}	1.0	1.0	1.1	1.0
$\gamma_G \times \gamma_c \times \gamma_{Re}$	1.35	1.25	1.485	1.25
$\gamma_G \times \gamma_{cu} \times \gamma_{Re}$	1.35	1.4	1.485	1.4
$\gamma_G \times \gamma_c / \gamma_{\varphi}$	1.35	1.0	1.35	1.0
$\gamma_{G;fav} \times \gamma_c / \gamma_{\varphi}$	1.0	1.0	1.0	1.0
γ_Q / γ_G	1.11	1.3	1.11	1.3
* jeoteknik faaliyetlerde A2 setinden faktör				

2.2 BS 8006

BS 8006, güçlendirme tekniklerinin zeminlere uygulanması için kılavuzlar ve tavsiyeler içermektedir. Güçlendirilmiş toprakarme yapıların tasarımında limit durum ilkeleri uygulanır. Analizde dikkate alınan iki durum limiti, nihai limit durum ve hizmet verilebilirlik sınırı durumudur. Dış duraylılığın kontrolü için, yalnızca nihai limit durumu geçerlidir [11].

Güçlendirilmiş bir toprakarme yapı için limit durum tasarım felsefesi, uygun kısmi yük faktörleri ile zemin ağırlığının ve canlı yükün artırılmasını, uygun kısmi malzeme faktörleriyle zemin özelliklerinin ve güçlendirme temel kuvvetinin azaltılmasını içerir. Güçlendirilmiş zemin için limit durum tasarımı, tümü birliğin öngörülen sayısal değerlerini veya daha fazlasını üstlenecek dört temel kısmi faktörü kullanır. Bunlardan ikisi, ölü yüklere uygulanan f_r (ve f_{rs}) yükleri ve canlı yüklere uygulanan f_q değerleridir. Temel malzeme faktörü f_m 'dir (ve f_{ms}). Dördüncü faktör f_n , başarısızlığın ekonomik sonuçlarının hesaba katılması için kullanılır. Bu faktör, malzeme faktörüne ek olarak, azaltılmış bir tasarım mukavemeti üretmek için kullanılır.

Tasarımda düşünülen iki sınır durumu, nihai limit durumu ve hizmet verilebilirlik sınırı durumudur. Nihai sınır durumları, çökme veya diğer benzer yapısal yenilme biçimleriyle ilişkilidir. Bu durumlara, bozucu kuvvetler geri yükleme kuvvetlerine eşit veya ondan fazla çıktığında, belirli bir yenilme modu için ulaşılır. Kısmi malzeme faktörleri ve kısmi yük faktörlerinin kullanılmasıyla, güvenlik sınırları, sınırın yenilme durumuna ulaşılmasına karşı sağlanır. Bu kısmi faktörler, birleşik ya da daha büyük sayılan sayısal değerleri kabul eder. Tasarım yükleri üretmek için öngörülen yük faktörleri ile çarpılarak bozucu kuvvetler artırılır. Dayanma kuvvetleri, tasarım güçleri üretmek için öngörülen malzeme faktörleri ile bölünerek azalır. Tasarım mukavemeti, tasarım yüküne eşit veya bu yükü aşarsa, nihai çökme durumuna erişmeye karşı yeterli güvenlik payı olduğu kabul edilir [12]. BS 8006 tarafından önerilen kısmi faktörlerin özeti, Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Güçlendirilmiş şevlerin tasarımında kullanılacak olan kısmi faktörlerin özeti [12]

Kısmi faktörler		Nihai limit durumlar	Elverişli limit durumlar
Yük faktörleri	Zemin birimi kütlesi örn. Şev dolgusu	$f_{rs}=1.5$	$f_s=1.0$
	Dış ölü yükler örn. Doğrusal ve nokta yükler	$f_r=1.2$	$f_r=1.0$
	Dış canlı yükler örn. Trafik yükleri	$f_q=1.3$	$f_q=1.0$
Zemin malzeme faktörleri	Tan ϕ_q 'ye göre uygulanacak	$f_{ms}=1.0$	$f_{ms}=1.0$
	c' ye göre uygulanacak	$f_{ms}=1.6$	$f_{ms}=1.0$
Donatı malzemeleri faktörü	Donatı temel kuvvetine uygulanacak	F_m değeri, kullanılacak donatı tipi ve donatının gerekli olduğu tasarım ömrü ile tutarlı olmalıdır	
Zemin ve donatı etkileşim faktörleri	Donatı yüzeyi boyunca kayar	$f_s=1.3$	$f_s=1.0$
	Donatı çekme direnci	$f_q=1.3$	$f_q=1.0$
Kısmi güvenlik faktörleri	Topraktan toprağa temasın olduğu yapı tabanı boyunca kayar	$f_s=1.2$	NA

3. ÇALIŞMA VE BULGULAR

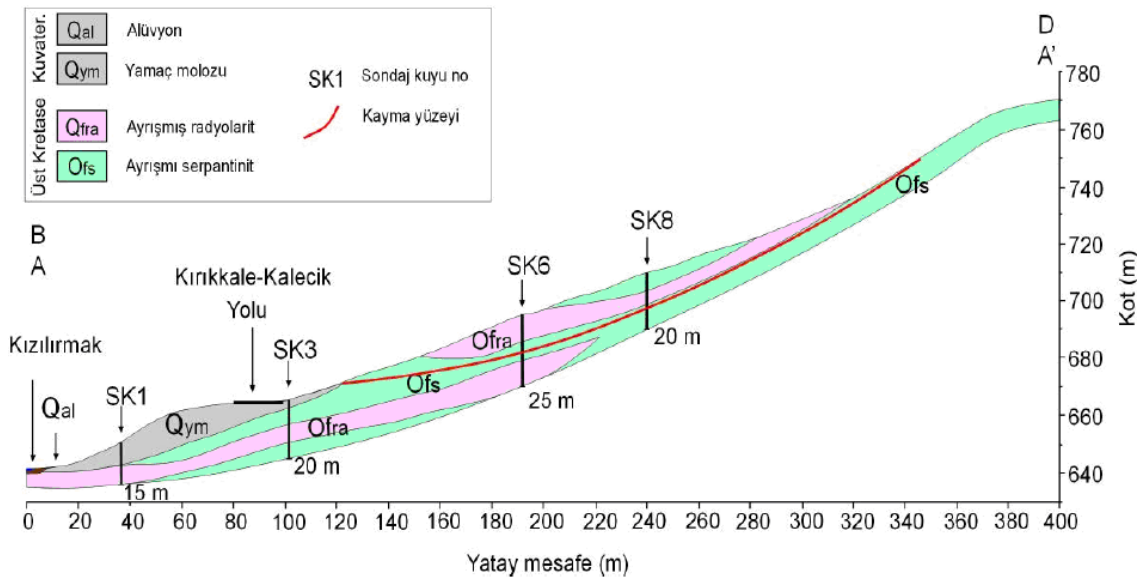
Bu makalede bahsi geçen üç yöntemi birbirleriyle karşılaştırabilmek için literatürde iyi çalışılmış olan üç şev duraylılığı vakası seçilmiş olup, bu vakalar üzerinde değerlendirmeler yapılmıştır. Limit denge analizlerinin yanı sıra bu vakalara sonlu elemanlar makaslama dayanımı azaltma analizleri yapılarak bir değerlendirme yapılmıştır.

3.1 Kalecik Heyelanı

Kırıkkale-Kalecik karayolunun Km:17+200-17+500 kesiminin inşaatında, şev kazısı sırasında meydana gelen heyelanlar incelenmiştir. Meydana gelen heyelanlarla ilgili olarak KGM tarafından öncelikle kayan kesimler temizlenerek geçici önlemler alınmıştır. Ancak zaman içerisinde söz konusu heyelan etkisini arttırarak yol gövdesini de içine alacak şekilde kaymalar devam etmiş ve trafiğin kesilmesine neden olmuştur [13].

Dört adet küçük heyelandan oluşan ve “Kalecik Heyelanı” olarak adlandırılan bu duraysızlığın nedenlerini araştırılarak, kayma yüzeyinin derinliğini, heyelanın boyutlarını, kayan malzemenin yenilme anındaki kohezyon ve içsel sürtünme açısını belirlemek ve heyelanı durdurmak için alınabilecek önlemler hakkında değerlendirmeler yapmak için bu çalışma Nurgül Parlak Şeker tarafından yapılmıştır.

Kalecik heyelanındaki esas heyelan H1 (Heyelan 1) simgesi ile gösterilmiş olup, kayma ayrılmış serpantinitle içerisinde meydana gelmiştir. İncelenen bölgedeki H1’in kesiti Şekil 1’de gösterilmiştir. Yapılan geriye dönük analizler sonucu rezidüel kohezyon 15.3 kPa, rezidüel içsel sürtünme açısı 14° olarak bulunmuştur. Tüm kesitlerde kayma ayrılmış serpantinitle içinde gelişmiş olup, birim hacim ağırlığı 21.43 kN/m³ olarak alınmıştır. Kalecik H1 heyelanının limit denge analizleri ve sonlu elemanlar sonucu Tablo 3’teki gibidir.



Şekil 1. Kalecik H1 heyelanı tip kesiti [14]

Tablo 3. Kalecik heyelanı için yöntemlerin güvenlik katsayısı karşılaştırması.

Yöntem	Fellenius	Bishop	Janbu	Geliştirilmiş Janbu	Spencer	GLE/Morgenstern&Price	Phase 2
-	0.605	0.653	0.593	0.636	0.650	0.650	0.650
Başarı Oranı	0.403	0.436	0.396	0.424	0.433	0.433	0.433
DA1C1	0.582	0.645	0.572	0.617	0.645	0.645	0.700
DA1C2	0.484	0.523	0.474	0.509	0.520	0.520	0.510
DA2	0.529	0.578	0.527	0.568	0.578	0.583	0.690
DA3	0.484	0.523	0.474	0.509	0.520	0.520	0.510

Şekil 1’de gösterilen Kalecik heyelanını (H1) Slide programındaki analizleri sonucu Tablo 3’te yer alan sonuçlar ortaya çıkmıştır. Sonuçları karşılaştırmadan önce yöntemler hakkında bilinmesi gereken bazı

bilgiler vardır. Fellenious yöntemi dilimler arası kuvvetleri eşit ve zıt yönlü varsayarak hesaba katmaz. Bunun sonucunda Fellenious yöntemiyle analiz yapılan şevlerin güvenlik sayıları düşük çıkmaktadır. Janbu yöntemi ise dairesel olmayan kayma analizleri için uygundur ve dairesel kayma analizlerinde hatalı sonuçlar vermektedir. Bu bilgiler ışığında Kalecik heyelanı için en tutucu sonuçları TS 8853'e göre hesaplanan Spencer ve Morgenstern&Price yöntemleri ile elde edilmiştir. Bu sonuçların doğruluğu yapılan Sonlu elemanlar analizi ile de desteklenmektedir.

3.2 Lanester Dolgusu

G.Pilot, B.Trak ve P. La Rochelle'nin 1982 yılındaki çalışmasında incelenen 4 vakaa vardır. Bunlar; Kanada, Que'bec City yakınlarındaki Saint-Alban bölgesi; Fransa, Akdeniz kıyısında, Narbonne dolgusu; Fransa'da Brittany'de bulunan Lanester dolgusu ve Bordeaux, Fransa yakınlarındaki Cubzac-les-Ponts dolgusudur.

Temel zemini, 8-10m kalınlığındaki yumuşak, organik kumlu kil ve silt katmanlarından, ana kaya üzerine bir çakıl tabakasının üzerlemesinden oluşur. Kilin organik içeriği göreceli olarak yüksektir (% 11'e kadar), bu, ince, konsolide kil kabuğunun altında yüksek bir su içeriği (% 130'a kadar) ile sonuçlanır. Kil ayrıca çok plastiktir, plastiklik endeksi bölgesel olarak % 80'e ulaşır. Vane testleri ile yerinde ölçülen drenajsız kesme dayanımı 12 ila 20 kPa arasında değişen değerlerle oldukça düşüktür.

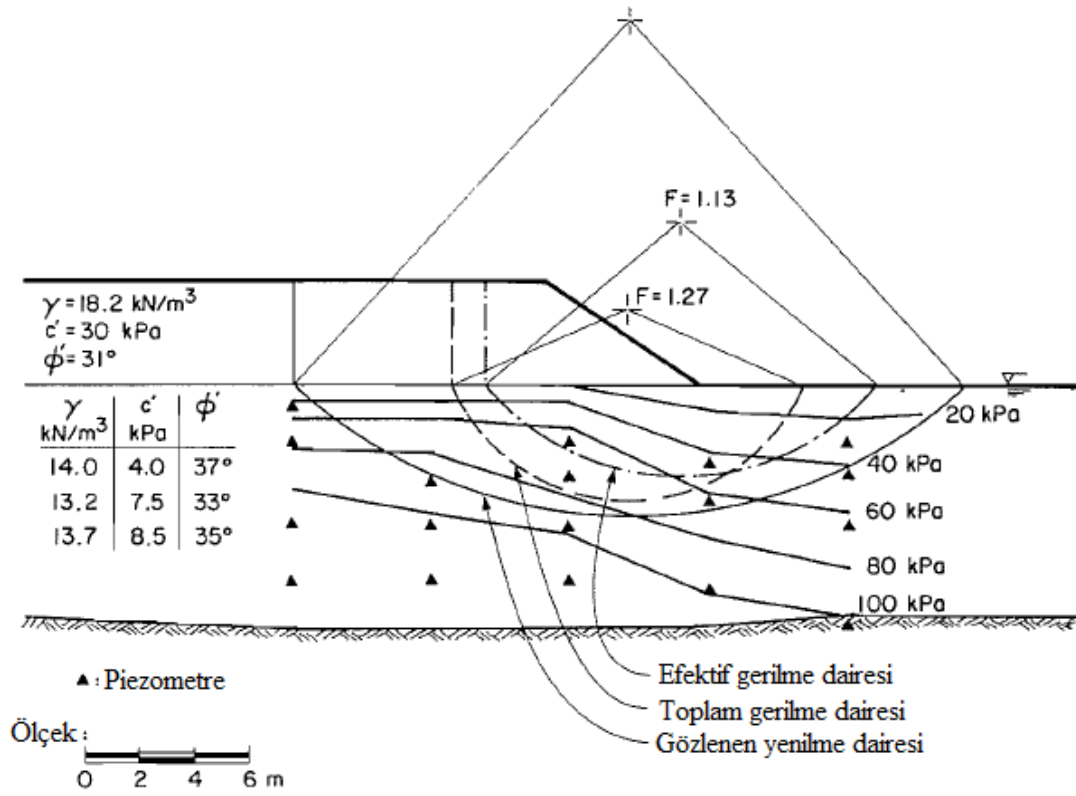
Gözenek basıncı ölçümleriyle yapılan CIU üç eksenli testler, c'nin 4 ila 8 kPa ve ϕ' '33° ila 37° arasında değişen efektif gerilme parametrelerinin değerlerini vermiştir.

Dolgu malzemesi yoğunluğu 18.2 kN/m^3 olan sıkıştırılmış kumlu killi çakıldır; büyük bir kesme kutusu kullanılarak bu yoğunlukta ölçülen etkili kayma dayanımı parametreleri, $c'= 30 \text{ kPa}$, $\phi' = 31^\circ$ 'dir.

Dolgu, özellikle yaklaşık 4 m yükseklikte meydana gelen yenilme anında, yer değiştirmelerin ve gözenek basınçlarının sürekli olarak ölçüldüğü dört günde inşa edilmiştir.

Kayma, dolguda dikey çatlakların oluşumuna neden olan yanıl yer değiştirmelerden önce olmuştur. Dolgunun şevi ve tepenin çok az bozulma ile döndüğü ve bunların arkasında daha örselenmiş bir zonun ana eğimli yüzeye uzandığı görülmüştür.

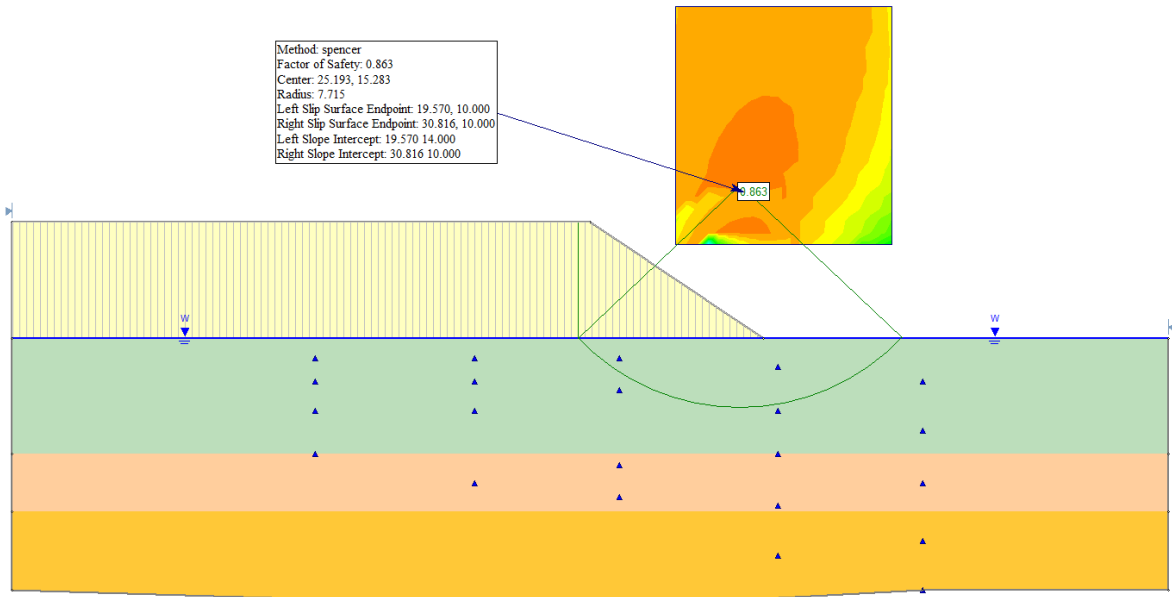
Lanester dolgusunun yenildiği 4m dolgu yüksekliğini baz alarak model oluşturulmuştur, gözenek suyu basıncı parametreleri sık sık aralıklarla konulan piezometrelerden alınan değerlerle birlikte modele işlenmiştir (Şekil 2) Bu modele göre yapılan analizlerin sonuçları Tablo 4'te verilmiştir [15].



Şekil 2. Lanester dolgusunun tip kesiti ve eş gözenek basıncı hatları [15]

Tablo 4. Lanester(Fransa) dolgusu için güvenlik katsayıları ve başarı oranı

Yöntem	Fellenius	Bishop	Janbu	Geliştirilmiş Janbu	Spencer	GLE/Morgenstern&Price	Phase 2
-	0.824	1.069	1.059	1.138	1.079	1.077	0.950
Başarı Oranı	0.549	0.713	0.706	0.759	0.719	0.718	0.633
DA1C1	1.018	1.233	1.189	1.281	1.263	1.268	0.920
DA1C2	0.659	0.855	0.847	0.911	0.863	0.861	0.820
DA2	0.925	1.137	1.132	1.217	1.141	1.140	0.890
DA3	0.659	0.855	0.847	0.911	0.863	0.861	0.820



Şekil 3. Lanester(Fransa) dolgusunun Slide'daki gösterimi (Eurocode 7 DA1-C2 yöntemiyle)

Lanester dolgusu sonuç tablosu (Tablo 4) Kalecik heyelanının sonuç tablosuna benzer şekilde sonuçlanmıştır. Geleneksel limit denge analizlerinden Morgenstern&Price yöntemi en düşük başarı oranı yakalamıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizde bu sonucu destekler niteliktedir.

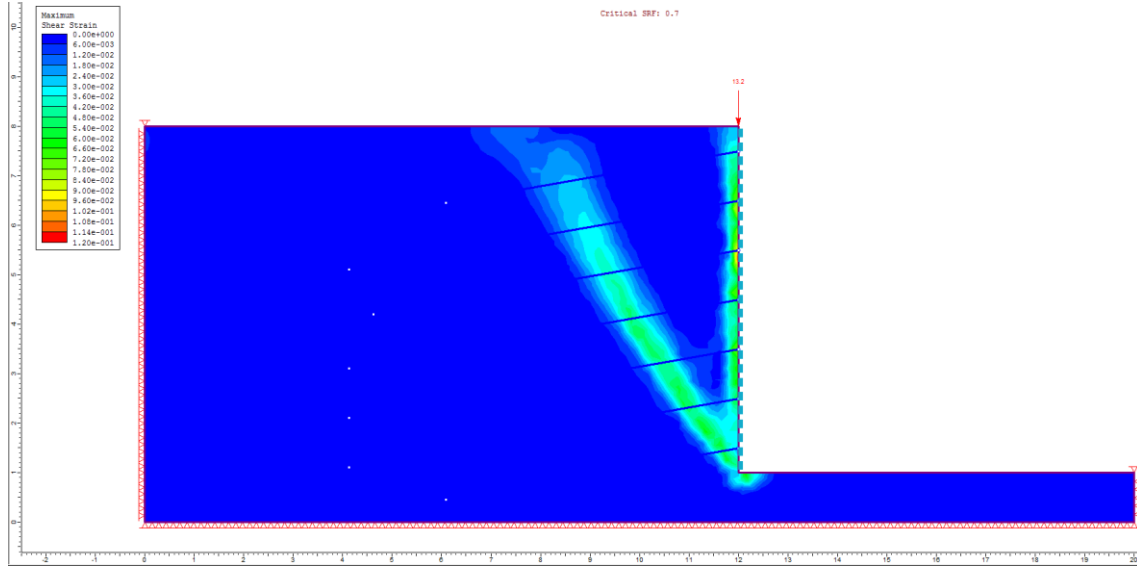
3.3 Clouture Test Duvarı

Fransa'da Clouterre olarak bilinen zemin çivileme projesinin bir parçası olarak, Test Duvar No. 1 olarak bilinen bir test duvarı, sıkıştırılmış Fontainebleau kum dolgusu kullanılarak yapılmıştır (FHWA 1993; Plumelle ve diğerleri, 1990). Kum, laboratuvarında ölçülmüş bir sürtünme açısı, $\phi = 38^\circ$ ve kohezyon, $c = 3$ kPa çıkmıştır. 8 cm kalınlığında püskürtme beton kaplamaya sahip 7 m yüksekliğindeki duvar, harç içinde alüminyum borular olan zemin "çivileri" ile güçlendirilmiştir. Tablo 5, test duvarını analiz etmek için kullanılan girdi parametrelerini göstermektedir ve Çizelge 6, duvarda çivi olarak kullanılan farklı alüminyum tüplerin detaylarını göstermektedir (çünkü her bir çivi seviyesi, Şekil 4 ve Çizelge 6'da A ile E harfleri ile gösterilen özel bir çivi tipini kullanmıştır) [16].

Tablo 5. Clouterre test duvarı için kullanılan malzemeler ve özellikleri [16]

	Özellik	Clouterre Test Duvarı
Zemin	Duvar yüksekliği m (ft)	7.0 (23)
	Zemin birim hacim ağırlık kN/m^3 (pcf)	20 (127)
	İçsel sürtünme açısı, ϕ , derece	38
	Örselenmiş kohezyon, c_u , kPa (psf)	3 (63)
Zemin Çivisi	Yatay boşluk m (ft)	1.15 (3.77)
	Dikey boşluk m (ft)	1 (3.28)
	Sıra sayısı	7
	Sapma açısı, α , derece	10
	Uzunluk, L, m (ft)	6 - 8 (19.7 - 26.2) ^a
	Malzeme	Alüminyum Tüp
	Çivi çapı, D, cm (in.)	1.6 - 4 (0.63 - 26.2)
	Enjeksiyon çapı cm (in.)	6.3 (2.48)
	Başlık direni, kN (kip)	59 (13.3)
	Kopma direnci, kN (kip)	15 (3.37) ^b
Sıyırılma direnci kN/m (lb/ft)	7.5 (514) ^b	
Shotcrete	Kalınlık, cm (in.)	8 (3.15)
	Tahmini ağırlık kN/m (lb/ft)	13.2 (900) ^c

dairese olmamasından ötürü burda sadece dikkate alabileceğimiz limit denge yöntemi Janbu yöntemidir. BS 8006 kısmi faktörleri uygulanarak Janbu yöntemiyle yapılan analiz en doğru sonucu vermektedir.



Şekil 7. Clouterre test duvarının BS 8006 kısmi faktörleri kullanılarak Sonlu Elemanlar yöntemiyle (Phase2) çözümü

4. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada ülkemizde kullanılan TS 8853 standardı ile AB'nin geliştirdiği tasarım standartları olan Eurocode 7 ve BS 8006 her biri ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Şev duraylılığı analizlerinde TS 8853 ile limit denge (özellikle Morgenstern&Price ve Spencer) yöntemleri, kısmi faktörleri kullanan Eurocode 7'ye göre daha güvenilir sonuçlar vermiştir. Güçlendirilmiş şevler ve toprakarme duvarların analizlerinde ise BS 8006 standardı ile daha güvenilir sonuçlar elde edilmiştir.

5. KAYNAKLAR

- [1] TERZAGHI, K., and PECK, R.B. 1967. Soil mechanics in engineering practice. (2nd ed.). John Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y.
- [2] WRIGHT, S. 1969. A study of slope stability and the undrained shear strength of clay shales. PhD thesis, University of California, Berkeley, CA.
- [3] FREDLUND, D. G. 1975. A comprehensive and flexible stability program. Presented at the Roads and Transportation Association of Canada Meeting, Calgary, Alta.
- [4] NAUGHTON, P., SCUTTO, M., RIMOLDI, P., VICARI, M. 2013. External Stability of Reinforced Soil Walls. Conference: International Symposium on Design and Practice of Geosynthetic-Reinforced Soil Structures- Honouring Research Achievement of Prof. Dov Leshchinsky, At Bologna, Italy.
- [5] MISIR, G. 2018. Şev Stabilesi Problemlerinin Sayısal Analizler ile Karşılaştırılmalı Çözümü. DÜMF Mühendislik Dergisi 9:1 (2018).
- [6] DARYANI, M.B.E., BAHADORI, H., DARYANI, K.E., 2015. Soil Probabilistic Slope Stability Analysis Using Stochastic Finite Difference Method. Doi:10.3233/978-1-61499-580-7-710.
- [7] Bond A.J., Schuppener B., Scarpelli G., Orr T.L.L, 2013. Eurocode 7: Geotechnical Design Worked Examples, Dublin (Ireland) 13-14 June, 2013. 59-63.
- [8] Bond, A. and Harris, A. 2008. Decoding Eurocode 7. Taylor & Francis, New York.
- [9] Simpson, B. , 2011. Concise Eurocodes: Geotechnical design BS EN 1997-1: Eurocode 7, Part 1. BSI, London, UK.
- [10] EN 1997-1. 2004. Eurocode 7: Geotechnical design - part 1: General rules. European Committee for Standardization, Brussels.
- [11] CHAN, S.H., YOO, Y.H., LIM, C.S., YAP, K.C., HIEW, L.C., 2017. Assessment of External Stability of Reinforced Soil Wall using British Standard BS 8006 and Eurocode 7. *HKIE-IEM-CIE TRIPARTITE SEMINAR*.
- [12] British Standard, BS8006-1, 1995. Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils and Other Fills.
- [13] Toker, M., Kasım, E. ve Ünlü, G. 2006. “(Elmadag-Kırıkkale) Ayr.- Kalecik Yolu Km:17+200 Heyelanı İyileştirme Projesi Hazırlanması İşİ”, 107 s.
- [14] ŞEKER N.P. 2010. Kırıkkale - Kalecik (Ankara) karayolundaki heyelanın jeoteknik değerlendirmesi. Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- [15] Pilot, G., Trak, B. and La Rochelle, P. (1982). “Effective stress analysis of the stability of embankments on soft soils.” Canadian Geotechnical Journal, vol.19, pp. 433-450.
- [16] Sheahan, T., and Ho, L. (2003), “Simplified trial wedge method for soil nailed wall analysis.” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, February 2003, pp. 117-124.
- [17] Plumelle, C., Schlosser, F., Delage, P., and Knochenmus, G. ~1990!. “French national research project on soil nailing: Clouterre.” Design and performance of earth retaining structures, P. C. Lambe and L. A. Hansen, eds., Geotechnical Special Publication No. 25, ASCE, Reston, Va., 660–675.