

## ***KAYMA DAİRESİ GÖÇME MEKANİZMASI İÇİN PLASTİK STABİLİTE ÇÖZÜMÜ***

Gülğün YILMAZ<sup>1</sup>, Türcan TUTUK<sup>2</sup>, Emre Aytuğ ÖZSOY<sup>1</sup>

**ÖZET:** Bir zemin kütleğinde ortaya çıkan göçme ve kayma hareketinin incelenmesi stabilite problemleri olarak isimlendirilir. Bu çalışmada şev göçmesinin oluştuğu kayma dairesi mekanizması çözülmüştür. Mohr gerilme dairesi ve plastisite teorisinin alt sınır göçme kriterine göre yöntemin esas davranışının aktif, rotasyonel kayma ve pasif davranış bölgelerinden oluştuğu kabulü yapılmıştır ve bu çalışma bir şevde güvenlik sayısının belirlenmesinde geometrik ve mukavemet parametrelerinin etkisini tanımlayabilmek açısından yararlıdır. Çalışmadan elde edilebilecek en önemli fayda ise dairesel kayma mekanizmasına esas olan gerilme davranışının çözümüdür.

**Anahtar kelimeler:** Şev Stabilitesi, Plastisite Teorisi, Gerilme Davranışı

## ***A PLASTIC STABILITY SOLUTION FOR SLIP CIRCLE FAILURE MECHANISM***

**ABSTRACT:** The investigation of collapsing and sliding action on a soil mass is named as stability problem. In this study, the slide mechanism of a slope is solved by stress compatibility conditions in the sliding blocks. The lower bound collapse criteria of plasticity theory and drawing to Mohr stress circles according to this criteria the solutions are made. It is assumed that stress transfer during sliding occurs between active rotational slip and passive blocks. This study is useful to define the effect of geometric and strength parameters on determining the factor of safety of a slope.

**Keywords:** Slope Stability, Plasticity Theory, Stress Behavior

---

<sup>1</sup> Anadolu Üniversitesi, Porsuk Meslek Yüksekokulu, 26470 ESKİŞEHİR

<sup>2</sup> Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 26470 ESKİŞEHİR

## ***I. GİRİŞ***

Şevlerde ortaya çıkan kayma davranışının temel sebebi stabilitelerini kaybetmeleri ve deformasyona uğramalarıdır. Şevde kaymanın oluşabilmesi için zeminin izin verdiği gerilme değerlerinin aşılması gerekmektedir. Şev kaymaları bazen ani olarak bazen de şev tepesinde çatlakların bulunması, şev topuğuna yakın kısımların kabarması gibi belirtilerin sonradan toptan bir kaymaya dönüşmesi gibi yavaş yavaş meydana gelebilir. Kayma yüzeyi genellikle yatay veya eğimli olabilen daha sert bir tabakanın varlığına veya daha düşük mukavemetli zemin tabakasının bulunduğu derinliğe bağlı olarak değişim gösterir. Şev içerisindeki tüm zemin bölgelerindeki davranış ve taşıma gücü sınır değerleri göz önüne alınarak şevlerde ortaya çıkan dairesel göçmenin mekanizmasını çözmek mümkündür.

## ***II. ŞEV STABİLİTESİNDE LİMİT ANALİZ ÇÖZÜMLERİ***

Limit denge yöntemlerinde belirli bir kayma yüzeyi kabulü yapılmaktadır. Zemin mekaniğinde karşılaşılan problemlerde ise zeminin iç bünyesindeki gerilme-şekil değiştirme davranışının da kaymaya sebep olduğu görülmektedir. Dolayısıyla geliştirilmiş olan limit analiz çözümleri gerilme-deformasyon ilişkisine bağlı olarak akma kriteri ve birleştirilmiş akma kuralı kavramlarını gözönüne almaktadır. Limit analiz yaklaşımları basit ve karşılaşılabilecek çoğu durumlara uyumludur. Çözüm yöntemi elastisite ve plastisitenin iki temel teoremini; üst sınır ve alt sınır teoremlerini esas almaktadır. Üst sınır teoremine göre uygun bir göçme mekanizması bulmak gereklidir. Alt sınır teoremine göre ise tüm şartların, arazideki gerilme durumunu tam anlamıyla yansıtması gereklidir. Zemin mekaniği ve temel mühendisliğindeki farklı problemler limit analizin temel kavramları ile ilişkilendirilerek açıklanabilmektedir. [1] ve [2] uygulamalı çalışmalarında limit analizin üst sınır teoremine göre çözüm ile limit denge yöntemlerine göre çözümü karşılaştırmışlardır. Şev stabilitesi problemlerinde kayma yüzeyi önce bir doğru çizgi daha sonra ise logaritmik spiral kabul edilerek, kayma yüzeyinin topuktan veya derinden geçtiği durumuna göre farklı çözümler geliştirilmiştir. [3-5] ve [6] şev stabilitesi hesaplarında Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Tresca Von Mises kırılma kriterlerini kullanmışlardır.

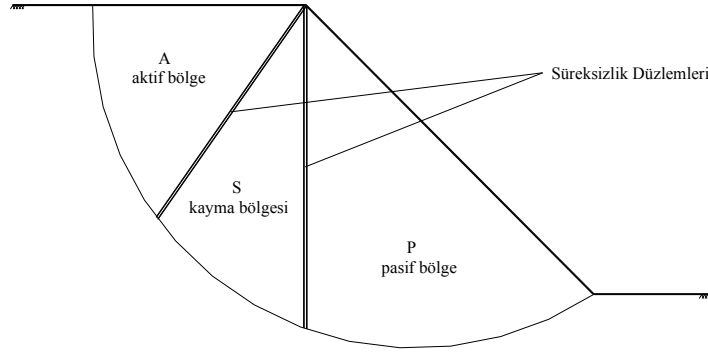
### **III. ŞEV STABİLİTESİNİN BELİRLENMESİNDE TOPLAM VE EFEKTİF GERİLME ANALİZLERİ**

Stabilité analizinde toplam gerilme analizine göre çözümler kullanılmaktadır. Bu tercihin önemli sebeplerinden birisi de zemin içerisindeki boşluk suyu dağılımının ve miktarlarının belirlenmesindeki zorluklardır. Toplam gerilmelere göre yapılan stabilité hesaplarında kullanılan drenajsız kayma mukavemeti değerlerinin arazideki değerleri doğru olarak yansıtmasında güçlükler vardır. İsveçli araştırmacılar araziden elde edilen veriler ile laboratuvar verileri arasındaki ilişkiyi arttırmak amacıyla yaptıkları çalışmalarda çeşitli düzeltme faktörleri önermişlerdir. [7] ve [8] tarafından drenajsız kayma mukavemetinin ön konsolidasyon basıncına bağlı olduğu ifade edilmiştir. Bu sebeple efektif gerilmelere dayandırılmış yöntemler geliştirilmiştir. Ayrıca toplam gerilmelere göre kayma dairesi analizi bir limit denge analizi olması sebebiyle zemin bünyesi içerisindeki davranışı göz önüne almamaktadır. Bu eksikliği gidermek amacıyla çalışmada sunulan çözüm yöntemi efektif gerilmelere dayandırılmıştır.

Şev stabilitesinde plastisite hesapları zeminin drenajlı ve drenajsız durumda davrandığı kabulüne göre iki şekilde yapılır. Drenajsız yükleme için toplam gerilmeler, drenajlı yükleme için efektif gerilmeler göz önüne alınır. Drenajsız yüklemelerde boşluk suyu basıncının dağılımına ve efektif gerilmelerin buna bağlı olarak artmasına fırsat kalmamaktadır. Drenajlı yüklemelerde ise ilave boşluk suyu basıncı oluşmamaktadır. Gerçekte bu iki durum arasında bir davranış söz konusu olabilirse de stabilité hesaplarında ikisinden birisi tercih edilerek kolaylık sağlanmaktadır [9].

### **IV. ŞEV STABİLİTESİNDE GERİLME DAĞILIŞI**

Şevi oluşturan zeminde gerilme dağılışı şevin geometrisine, yüklenen alanın boyutlarına, zeminin derinlikle değişimine, tabakalanma durumu ile özelliklerine bağlıdır. Zemin tabakalarının gerilme geçmişi ve zeminin drenaj özellikleri; gerilme dağılımı, zeminin davranış mekanizması ve mukavemetin mobilizasyonu üzerinde etki ederek stabilitéyi belirlemektedir. Şev içerisindeki gerilme dağılımını inceleyebilmek amacıyla gerilme dağılımının değişiklik gösterdiği bölgeleri şematik olarak birbirinden ayırmak gerekmektedir (Şekil 1),[10].

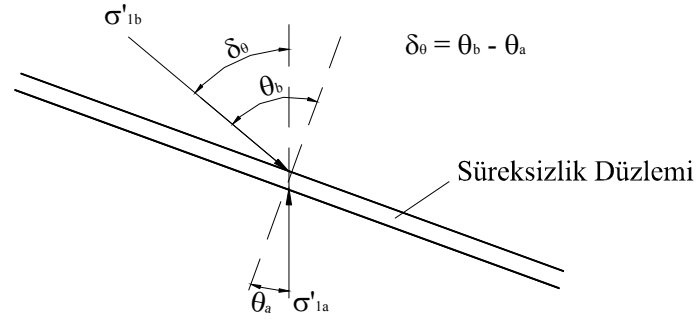


**Şekil 1.** Süreksizlik düzlemlerinin yerleştirilmesi

Aktif bölge içerisinde yatay ve düşey eksenler üzerine etki eden kayma gerilmeleri sıfırdır, dolayısıyla asal eksenler yatay ve düşeydir. Büyük asal gerilmenin etki ettiği düzlem yatay olup, bölge aktif zemin davranışı içerisinde yer almaktadır. Kayma bölgesi içerisinde ise kayma gerilmelerinin etkisi görülmekte dolayısıyla zemin davranışı rotasyonel olmaktadır. Şevin alt kısmında, pasif bölgede ise asal gerilme eksenleri düşey ve yatay ve büyük asal gerilmenin etki ettiği düzlem düşeydir.

#### **V. DAİRESEL GÖÇME MEKANİZMASI**

Şekil 1’de verilen şeve ait gerilme bölgeleri yöntemin temelini oluşturacaktır. Bölgeleri birbirinden ayıran düzlemler süreksizlik düzlemleri olarak isimlendirilecektir. Şevler geleneksel olarak topukla tepe noktası arasında üniform eğimle artan bir şekilde oluşmaktadır. Bu çalışmada süreksizlik yelpazesi pasif davranış bölgesi ile aktif davranış bölgesi arasında yer almaktadır. Bu durumda iki bölge arasında asal eksendeki dönüş miktarı  $\Delta\theta = 90^\circ$  dir.  $\phi'_{cs}$  drenajlı kayma direnci açısı olup üç eksenli deneylerden elde edilir.  $\delta_0$  bir süreksizlik düzlemine bir yönden etkiyen büyük asal gerilmenin, süreksizlik düzleminin diğer yanında yapacağı sapmanın ölçüsüdür (Şekil 2).



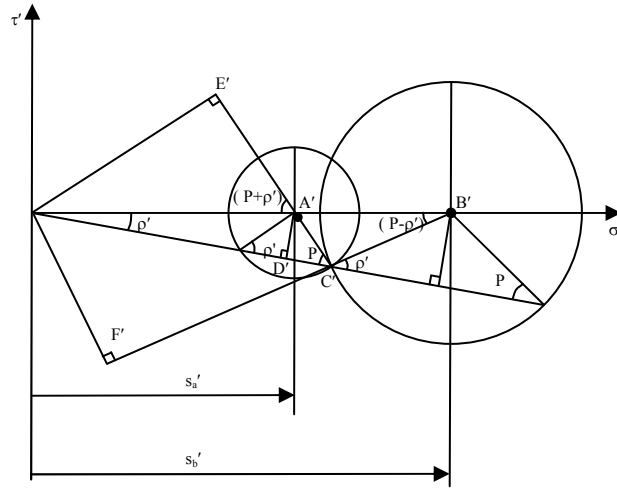
**Şekil 2.** Bir süreksizlik düzleminin geçilmesi sırasındaki gerilme durumu

Mohr gerilme daireleri üzerindeki gerilmeler düzlem deformasyon için kullanılan  $t, s$  parametreleri ile  $(s_a, t_a)$  ve  $(s_b, t_b)$  olarak ifade edilmektedir. Alt sınır hesaplamalarında olası gerilme durumu, zeminin uygun göçme kriterini aşamaz ve elde edilen gerilmeler Mohr dairesi ile sınırlanmaktadır. Bunlar Mohr dairesine teğet olarak geçirilen kırılma zarfının değme noktalarıdır. Zeminlerde drenajsız yükleme durumunda kırılma zarfının değeri  $\tau=t=c_u$  eşitliğinden, drenajlı yükleme durumundaki kırılma zarfı ise efektif gerilme terimleri ile yazılan eşitlikten bulunmaktadır.

$$\tau' = \sigma_n' \tan \phi'_{cs} \quad (1)$$

veya

$$t' = s' \sin \phi'_{cs} \quad (2)$$



**Şekil 3.** Drenajlı yükleme durumunda bir süreksizliği geçen gerilmelere uygun Mohr daireleri [11]

Şekil 3’de görülen P açısı tariflenecek olursa, değerinin  $P=(90^\circ-\delta_\theta)$  olduğunu görmek mümkündür. Şekil 3’ün geometrisinden yarıçap  $A'C'=ta'$  ve dolayısı ile

$$\sin p = \frac{A'D'}{ta'} \quad \text{ve} \quad \sin \rho' = \frac{A'D'}{sa'} \quad (3)$$

$$\sin \rho' = \sin p \cdot \sin \phi'_{cs} \quad (4)$$

$$\sin \rho' = \cos \delta_\theta \cdot \sin \phi'_{cs} \quad (5)$$

elde edilmektedir.

$$\frac{O'E'}{s_a'} = \sin(p + \rho') \quad \frac{O'F'}{s_b'} = \sin(p - \rho') \quad (6)$$

$O'E'=O'F'$  olduğundan

$$\frac{s_b'}{s_a'} = \frac{\sin(P + \rho')}{\sin(P - \rho')} \quad (7)$$

bulunur, burada  $\rho'$  mobilize olmuş kayma direnci açısıdır, Eşitlik (5).

P değeri Eşitlik (7) de yerine yazıldığında

$$\frac{s_b'}{s_a'} = \frac{\cos(\delta_\theta - \rho')}{\cos(\delta_\theta + \rho')} \quad (8)$$

olmaktadır.

## VI. MEKANİZMANIN ÇÖZÜMÜ

Yönteme esas olan gerilme durumu Şekil 4’de gösterilmektedir. Mekanizması şekilde verilen şevde  $\gamma$ : zeminin birim hacim ağırlığı,  $z_1$ : zeminin hesap derinliği,  $K_A$ : Aktif toprak basıncı katsayısı,  $K_p$ : Pasif toprak basıncı katsayısı olmak üzere süreksizliklerle bölünmüş olan aktif bölge içerisinde oluşan asal gerilmeler;

$$\sigma'_{1a} = \gamma \cdot z_1 \quad (9)$$

$$\sigma'_{3a} = K_A \cdot \gamma \cdot z_1 \quad (10)$$

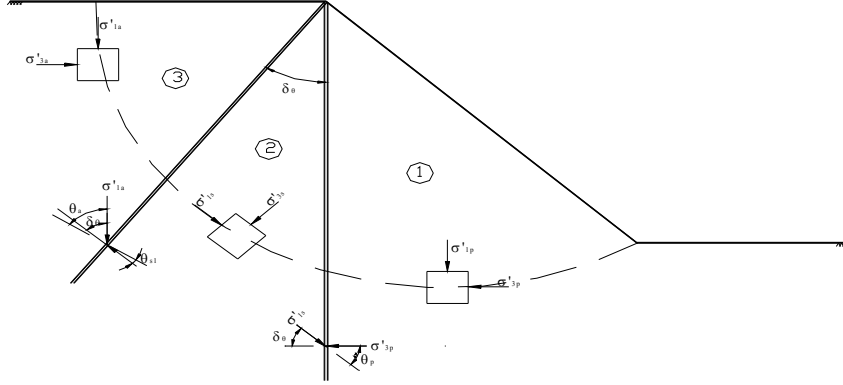
$$K_A = \left[ \frac{1 - \sin \phi'_{cs}}{1 + \sin \phi'_{cs}} \right] \quad (11)$$

Pasif bölgede oluşan gerilmeler ise

$$\sigma'_{1p} = \gamma \cdot z_2 \quad (12)$$

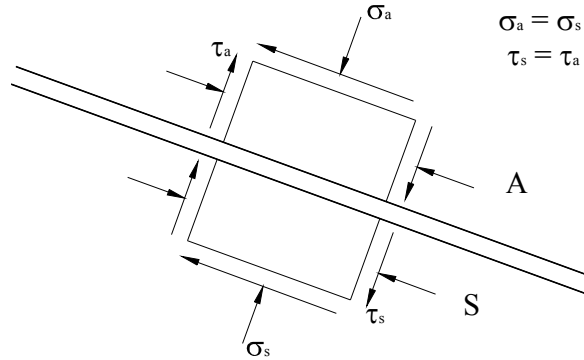
$$\sigma'_{3p} = K_p \cdot \gamma z_2 \quad (13)$$

ile ifade edilir.



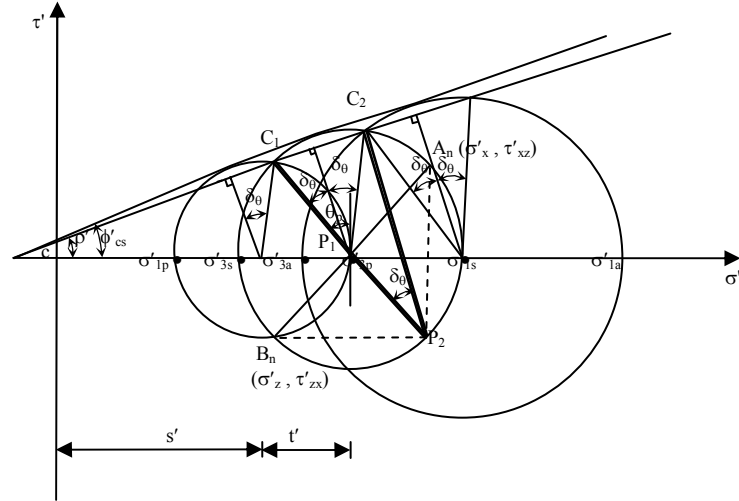
Şekil 4. Yönteme esas olan gerilme durumu mekanizması

İki süreksizlik düzlemi arasında kalan bölgede; rotasyonal kayma bölgesindeki gerilmeler  $\sigma'_{1s}$  ve  $\sigma'_{2s}$  olmaktadır.  $\delta_\theta$  büyük asal gerilmenin doğrultusunda her bir süreksizlik düzlemi geçildiğinde meydana gelen açsal değişimi (dönüşü) ifade etmektedir.  $\theta_s$  değerleri büyük asal gerilmelerin doğrultularının etki ettiği düzleme dik olan doğrultuyla yaptıkları açılarıdır.



Şekil 5. Bir süreksizlik düzleminin iki tarafındaki gerilme değerleri

Şekil 5'de A ve S bölgelerinin arasında bulunan süreksizlik düzlemi ve gerilmeler görülmektedir. Gerilme durumunun her iki tarafta eşit olması beklenemez fakat denge şartı sağlanmak zorundadır. Buna göre  $\sigma_a = \sigma_s$  ve  $\tau_a = \tau_s$  yazıldığında  $(\sigma_a, \tau_a)$  ve  $(\sigma_s, \tau_s)$  noktalarının ortak gerilme değerlerine sahip olduğu görülür.



**Şekil 6.** Gerilme davranış mekanizmasının Mohr gerilme daireleri ile gösterilmesi

Şekil 6'da görülen  $C_1, C_2, \dots, C_n$  noktaları bir süreksizlik düzleminin iki yanında oluşan gerilmelerin ortak değerlerinin oluşturduğu ortak gerilme noktalarıdır. Başka bir ifade şekliyle, süreksizlik düzleminin iki yanındaki gerilme durumlarına ait Mohr dairelerinin kesiştiği ortak gerilme noktalarıdır.  $C_1P_1, C_2P_2, \dots$  süreksizlik düzlemleri,  $A_1, A_2, \dots$  ve  $B_1, B_2, \dots$  ise belli bir bölge içerisinde düşey ve yatay düzlemler üzerinde oluşan  $(\sigma, \tau)$  gerilmelerinin elde edildiği noktalarlardır. Büyük asal gerilmenin doğrultusu pasif durumda yatay konumdadır. Herhangi bir  $S_n$  bölgesindeki gerilme dairesinden  $A_n$  ve  $B_n$  gerilme noktaları elde edilir. Pasif bölgeden hareket edilerek ulaşılan son bölge aktif bölgedir. Bu bölgeye ait gerilmeler ise  $\sigma'_{1a}$  ve  $\sigma'_{3a}$  olarak verilmektedir.  $C_1, C_2, \dots, C_n$  gerilme noktalarını birleştiren doğrunun yatay  $\sigma$  eksenine yaptığı açı  $\rho'$  açısıdır ve  $\rho'$  düzlemler üzerinde efektif kayma direnci açısının hareket geçmiş değeridir. Mohr gerilme daireleri düzlem deformasyon şartlarındaki efektif gerilme parametreleri ile ifade edilebilir.

$$t' = 0.5 (\sigma'_1 - \sigma'_3) \quad s' = 0.5 (\sigma'_1 + \sigma'_3) \quad (14)$$

Bu durumda pasif bölgedeki gerilme dairesine ait gerilme noktaları  $t'_1$  ve  $s'_1$  olursa takip eden gerilmeler de  $(t'_2, s'_2)$  ve  $(t'_3, s'_3)$  olur. Bir süreksizlik denkleminin iki tarafında bulunan bölgedeki normal gerilmeler arasındaki oran Eşitlik (8) de verilmişti, bu eşitlik normal gerilmedeki değişim oranı ile yazılırsa



$$\frac{\delta'_s}{s'} = \frac{2 \sin \delta_\theta \sin \rho'}{\cos(\delta_\theta + \rho')} \quad (15)$$

bulunur. Pasif bölgeye ait Mohr gerilme dairesinden

$$s'_1 = \left( \frac{\sigma'_{3p} + \sigma'_{1p}}{2} \right) \quad t'_1 = \left( \frac{\sigma'_{3p} - \sigma'_{1p}}{2} \right) \quad (16)$$

elde edilir. Şekil 6 takip edilerek normal gerilmeler

$$\sigma'_{3p} = s'_1 + t'_1$$

$$\sigma'_{s1} = s'_2 + t'_2$$

$$\sigma'_{a1} = s'_{n+1} + t'_{n+1}$$

olarak bulunur.

Şekil 6'daki Mohr gerilme daireleri üzerinde bulunan A ve B noktalarından, A ( $\sigma'_{xz}, \tau'_{xz}$ ) düşey z düzlemi üzerinde etkili olan gerilmeleri, B ( $\sigma'_{zx}, \tau'_{zx}$ ) ise yatay x düzlemi üzerinde etkili olan gerilmeleri vermektedir. Böylece bir kayma dairesinin her iki bölgesinde etkili olan ve sistemi harekete geçmeye zorlayan gerilme değerlerinin alt sınırları elde edilmiş olur.

## VII. SONUÇLAR

Bu çalışmada herhangi bir şevde göçmenin oluştuğu kayma dairesi mekanizmasının çözümü yapılmıştır. Şevin geometrisine bağlı olarak kayma dairesi üç bölgeye ayrılmış (aktif, rotasyonel kayma, pasif) ve mekanizmanın çözümü sırasında Mohr gerilme dairesi, göçme kriterleri ve plastisite teorisi alt sınır göçme teoremi kullanılmıştır. Yönteme esas olan gerilme durumu mekanizması ve süreksizlik düzlemleri belirlendikten sonra göçme sınırını aşmayacak şekilde Mohr gerilme daireleri üzerinde bulunan noktaların koordinatları ile düşey z düzlemi üzerinde ve yatay x düzlemi üzerinde etkili olan gerilme değerleri elde edilmiştir. Bu değerler kayma mekanizmasında bir süreksizlik düzleminin her iki tarafında etkili olan ve sistemi harekete geçmeye zorlayan gerilmelerin alt sınırları olmuştur. Özetle bu çalışmada bir şevde gerçek davranışı yansıtan efektif gerilmelerle sonuca ulaşan, farklı gerilme davranışına sahip

bölgelerdeki değişimi göz önüne alan ve şevlerde ortaya çıkan, en sık rastlanan ve kullanılan kayma dairesi mekanizması çözümlenmiştir.

### **VIII. KAYNAKLAR**

- [1] W.F. Chen ve C.R. Scawthorn, “Limit Analysis and Limit Equilibrium Solutions in Soil Mechanics”, *Soils and Foundations*, No.3, pp.13–49, 1970.
- [2] H.Y. Fang ve T.J. Hirst, “Application of Plasticity Theory to Slope Stability Problems”, *Highway Research Record*, No.323, pp.26–38, 1970.
- [3] W.F. Chen, “Plasticity in Soil Mechanics and Landslides”, *Journal Engineering Div. ASCE*, No.106, pp.443–464,1980.
- [4] N.Snitbhan, W.F. Chen ve H.Y. Fang, “Slope Stability of Layered Soils”, Proc. 4th Southeast Asia Conference on Soil Engineering, 1975, Malaysia, pp.11–26.
- [5] E. Mizuno ve W.F. Chen, “Analysis of Soil Response with Different Plasticity Models”, In: R.N. Yong ve E.T. Selig (Editors), *Limit Equilibrium, Plasticity and Generalised Stress – Strain Applications in Geotechnical Engineering. ASCE*, New York, N.Y., pp.115–138, 1980.
- [6] X.J. Zhang ve W.F. Chen, “Stability Analysis of Slopes”, *Journal Engineering Division*, No.106, pp.591–602, 1987.
- [7] B. Trak, P. La Rochelle, F. Tavenas, S. Leroueil ve M. Roy, “A New Approach to the Stability Analysis of Embankments on Sensitive Clays”, *Canadian Geotechnical Journal*, No.4, pp.591–602, 1980.
- [8] R.P.Chapuis, “New Stability Method for Embankments on Clay Foundations”, *Canadian Geotechnical Journal*, pp.44–48, 1982.
- [9] G. Yılmaz, “Yumuşak Kil Temelli Toprak Dolguların Tasarımı (Birleştirilmiş Plastik Denge-Gerilme İzi Çözümü)”, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Eskişehir, 1994.
- [10] T. Tutuk, “Zemin Tabakalanması ve Yer Altı Su Seviyesi Değişiminin Şev Stabilitesi Üzerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği, Eskişehir, 2004.
- [11] J.H. Atkinson,. “An Introduction to Applications of Critical State Mechanics”, *Foundations and Slopes*, Mc Graw Hill, England, 1981.