

## KUMLARDA RÖLATİF SIKILIK İLE PASİF BİRİM DEFORMASYON ARASINDAKİ İLİŞKİNİN MODEL DENEYLERLE ARAŞTIRILMASI

Özcan TAN<sup>1</sup> ve Bayram Ali UZUNER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>S.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya

<sup>2</sup>K.T.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon

**Makalenin Geliş Tarihi:** 04.04.2005

**ÖZET:** Bu çalışmada, kum zeminlerde rijit model bir dayanma duvarının rijit yatay hareketi ile pasif durum oluşturulması araştırılmıştır. Pasif durumun oluşması için gerekli yatay hareket miktarı ve pasif Rankine durumun oluştuğu andaki kayma yüzeyi stereo-fotogrametri tekniği ile belirlenmiştir. Deney tankının genişliği 9.8 cm, yüksekliği 40 cm ve uzunluğu ise 70 cm'dir. Tankın yan duvarları 8 mm kalınlıklı cam plakadan yapılmıştır. Tanka yerleştirilen kumun rölatif sıklığı çok gevşekten çok sıkıya kadar değiştirilmiştir. Model dayanma duvarı, zemine doğru adım adım hareket ettirilmiş her adımda stereoskop ile değerlendirmek için fotoğraflar çekilmiştir. Her rölatif sıklık için çekilen fotoğraflar değerlendirilerek pasif durumun oluşması için gerekli yatay hareket miktarları ve kayma yüzeylerinin şekilleri belirlenmiştir. Deney sonuçları önceki çalışmalarla karşılaştırılmış ve pasif durum için bazı kriterler verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yanal zemin basıncı, model dayanma duvarı, rölatif sıklık, pasif durum, stereo-fotogrametri tekniği.

### Investigation of Relationship between Relative Density and Passive Unit Lateral Strain on Sand with Model Tests

**ABSTRACT:** In this study, passive states developed by a horizontal movement of a rigid model retaining wall in sand were experimentally investigated. The amounts of the necessary lateral movements in order to create passive cases and the first phase of the failure surfaces were determined by using stereo-photogrammetric technique. The inner dimensions of the experiment tank were 9.8 cm (width), 70 cm (length) and 40 cm (height). The sides of the tank were made of 8 mm thick glass plates. The relative density of the poorly graded sand deposited in the tank was varying from loose to dense. The model retaining wall was moved against the soil step by step with a hand operated mechanism. In each steps, photographs were taken with a camera. The photographs were evaluated in stereoscope and thus occurring time of passive case was determined. Consequently, some criteria were given for creating passive state. Experimental results were compared with the previous works.

**Keywords:** Lateral earth pressure, model retaining wall, relative density, passive state, stereo-photogrammetric technique.

### GİRİŞ

Dayanma yapıları, zemini iki farklı seviyede tutan ve yanal zemin basınçlarının etkisinde olan yapılardır. Bu tür yapıların güvenli ve ekonomik bir şekilde projelendirilmesi için yanal zemin basınçlarının doğru bir şekilde belirlenmesi gereklidir. Yanal zemin basınçlarını belirlemek

için çeşitli teori ve çözüm yöntemleri geliştirilmiş olup bunlardan başlıcaları; Rankine Toprak Basıncı Teorisi (Rankin, 1857), Coulomb Kama Teorisi (Coulomb, 1776), Culmann grafik yöntemi (Culmann, 1886) ve Sokolovski (1964) çözüm yöntemidir. Bu teori ve yöntemler, aktif ve pasif durumlar göz önüne alınarak geliştirilmiştir.

Rankine Teorisinde plastik denge durumuna ulaşıldığı andaki gerilme durumu göz önüne alınmaktadır. Zeminin homojen ve izotrop olduğu, duvar ile zemin arasında sürtünme olmadığı kabul edilir. Zemin ortamında herhangi bir noktadaki zemin elemanı yatay ve düşey gerilmelerin etkisi altındadır. Zemin mekaniğinde yatay ve düşey düzlemler genellikle asal düzlemlerdir. Zemin ortamında elastik ve plastik olmak üzere iki denge durumu söz konusudur. Zemin ortamında herhangi bir deformasyonun olmadığı doğal duruma elastik denge (sükunet) durumu denilmektedir. Yarı sonsuz zemin ortamındaki her noktada kırılmaların olduğu durum ise plastik denge durumudur. Zemin ortamında plastik denge durumuna iki şekilde ulaşılmaktadır. Bunlar aktif Rankine durumu ve pasif Rankine durumudur. Yarı sonsuz zemin ortamının yanal bir genişlemeye maruz kalması ile aktif durum, yanal bir sıkışmaya maruz kalması ile de pasif durum meydana gelmektedir. Bu çalışmada aktif ve sükunet durumları incelenmediğinden, aşağıda sadece pasif Rankine durumu özet olarak açıklanmıştır (Rankin, 1857).

Yarı sonsuz ortamda  $z$  derinliğindeki bir zemin elamanı düşünülün (Şekil 1a). Zemin ortamı yanal bir sıkışmaya maruz bırakılırsa, plastik denge durumuna (pasif Rankine durumuna) ulaşıncaya kadar elemana etkiyen düşey gerilme ( $\sigma_v$ ) sabit kalırken, yatay gerilme ( $\sigma_h$ ) artarak sabit bir değere ulaşır. Pasif Rankine

durumuna ulaşıldığında zemin yatayla belirli açılar ( $45-\phi/2$ ) yapan düzlemler boyunca kırılır (Şekil 1b). Bu durumda yatay gerilme (büyük asal gerilme) maksimum bir değere ulaşarak pasif yanal zemin basıncına eşit ( $\sigma_p=\sigma_h$ ) olur ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$\sigma_p = \sigma_v \cdot K_p = \gamma \cdot z K_p \quad (1)$$

Bu bağıntıda  $\gamma$ : zeminin birim hacim ağırlığı,  $K_p$ : pasif yanal basınç katsayısıdır. Zemin üst yüzeyi yatay bir ortam için Rankine Teorisine göre pasif yanal basınç katsayısı;

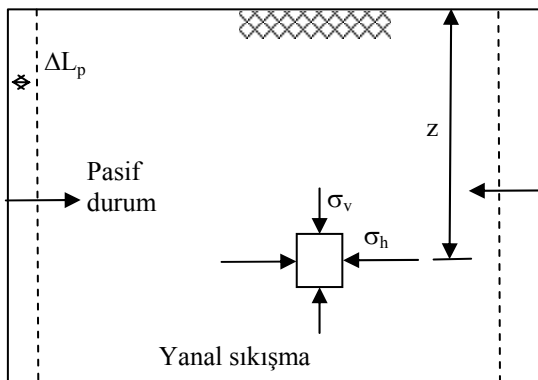
$$K_p = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2)$$

bağıntısı ile belirlenmektedir. Bu bağıntıda,  $\phi$  zeminin içsel sürtünme açısıdır. Pasif Rankine durumunun oluşması, sürtünmesiz rijit dayanma duvarının zemine doğru yatay hareket miktarı ile de açıklanabilir (Şekil 2).

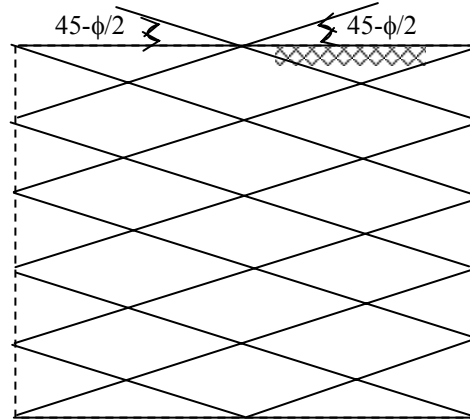
Pasif durumun oluşması için gerekli yatay hareket miktarı  $\Delta L_p$  olarak tanımlanırsa, birim deformasyon;

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta L_p}{L_p} \quad (3)$$

bağıntısı ile belirlenebilir. Burada,  $L_p$ : kayma bölgesinin zemin üst yüzeyindeki yatay uzunluğudur.



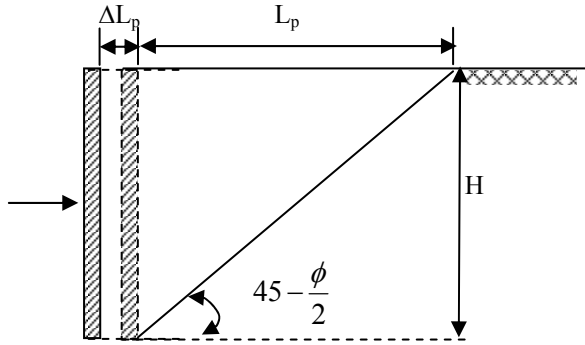
(a) Yarı sonsuz zemin ortamının sıkışması.  
(a) Compression of semi infinite soil mass.



(b) Kırılma düzlemleri.  
(b) Failure planes.

Şekil 1. Pasif Rankine durumu.

Figure 1. Passive Rankine state.



Şekil 2. Dayanma duvarı arkasında pasif durumun oluşması.

Figure 2. Passive Rankine state for a retaining wall.

Bazı araştırmacılar tarafından aktif ve pasif durumlar değişik yönleri ile araştırılmıştır. Woodward (1997) yanal zemin basınç katsayılarını sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmıştır. Çalışmada aktif ve pasif yanal basınç katsayılarını hesaplamak için Lade-Duncan kırılma kriteri kullanılmıştır. Zhu ve Qian (2000) yanal basınç katsayılarını belirlemek için dilim yöntemini kullanarak yeni bir prosedür geliştirmişlerdir. Soubra (2000) tarafından rijit dayanma yapıları için statik ve dinamik yanal zemin basınç katsayıları, sayısal bir yöntemle hesaplanmış ve sonuçlar önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Bir dayanma duvarında pasif durumun oluşması için gerekli yatay hareket miktarının ( $\Delta L_p$ ) zeminin rölatif sıklığı ile değişimi oldukça önemlidir. Araştırmacılar daha çok yanal basınç katsayılarının belirlenmesine ilgi göstermişlerdir. Bu nedenle, hareket miktarı ile ilgili bilgilerin geliştirilmesinin gerekli olduğu düşünülmüştür. Bu çalışmada kumlarda pasif durumun oluşması için gerekli yatay hareket miktarları, farklı rölatif sıklıklar için deneysel olarak araştırılmıştır.

## MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada kullanılan deney verileri Tan (1996) dan alınmıştır. Deneylerde tane çapı büyüklüğü 0.1-2 mm olan kuru ve temiz sahil kumu (Trabzon) kullanılmıştır. Kumun bazı geoteknik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Model deneyler 700 mm uzunluğunda, 98 mm genişliğinde ve 400 mm yüksekliğindeki bir tank (Şekil 3) içerisinde yapılmıştır. Deneyler

esnasında fotoğraf çekebilmek ve sürtünmeleri en aza indirilebilmek için, deney tankının yan duvarlarında 8 mm kalınlıklı cam plakalar kullanılmıştır. Sert ahşaptan yapılmış dikdörtgen prizma şeklindeki model dayanma duvarının arka yüzeyi, pürüzsüzlüğü sağlamak için sert plastik plaka ile kaplanmıştır. Deneyler düzlem deformasyon koşullarında gerçekleştirilmiştir. Deney tankı içerisinde düzlem deformasyon koşullarını sağlamak amacı ile dayanma duvarının genişliği ile deney tankının iç genişliğinin birbirine çok yakın olmasına dikkat edilmiştir. Yan duvarların deformasyonunu izin verilen değerlerin altında tutmak için, cam yan duvarlar çelik kuşaklar ile sıkıştırılmıştır. Deneyler esnasında yan duvarların deformasyonları, deformasyon saatleri ile ölçülmüştür. Diğer düzlem deformasyon koşulu olan, zemin taneleri ile yan duvarlar arasındaki sürtünmeler deneylerde ihmal edilmiştir. Duvar iç yüzeyi ile zemin taneleri arasındaki sürtünmeleri minimuma indirmek için duvar iç yüzeyine plastik levhalar yapılandırılmıştır.

Tablo 1. Deney kumunun bazı geoteknik özellikleri.

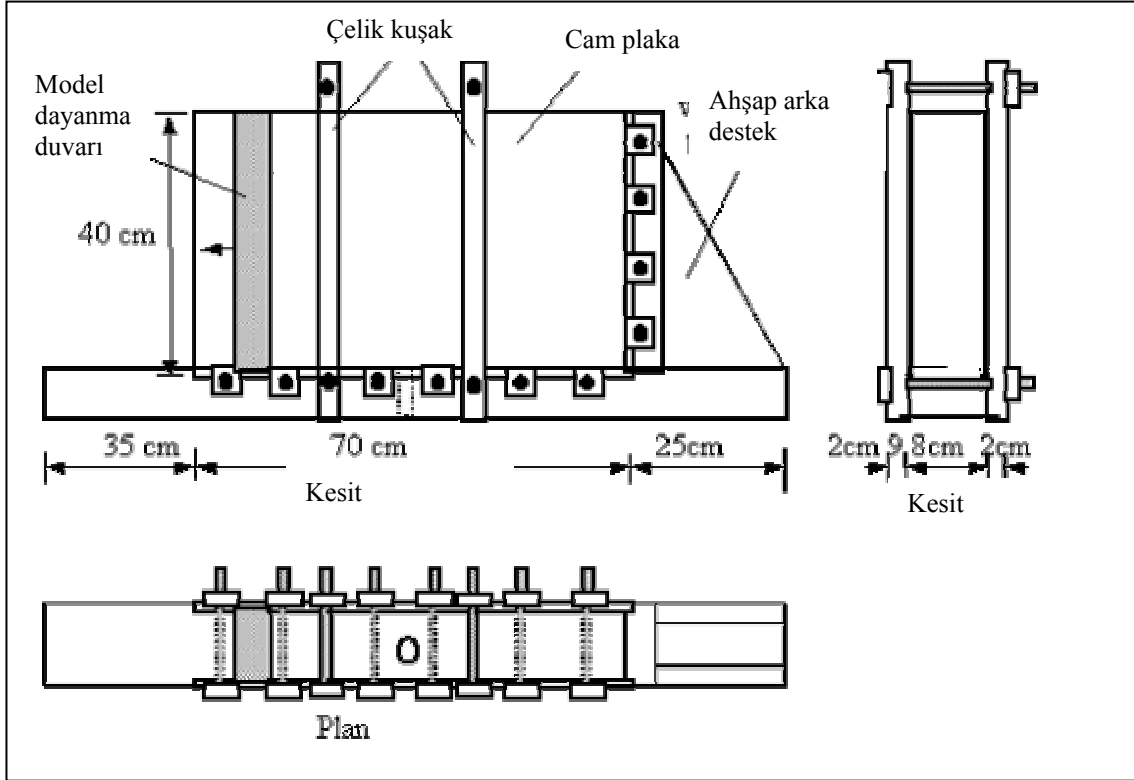
Table 1. Some geotechnical properties for sand used in the experiments.

Özgül ağırlık ( $G_s$ )	2.65
Maksimum kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_{kmax}$ ), kN/m <sup>3</sup>	16.7
Minimum kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_{kmin}$ ), kN/m <sup>3</sup>	13.7
Efektif çap ( $D_{10}$ ), mm	0.30
Üniformluk sayısı, $C_u$	1.70
Derecelenme sayısı, $C_r$	1.80
Zemin sınıfı (USCS)	SP

Ayrıca, deneyler esnasında plastik levhaların üzerine ince bir yağ tabakası sürülmüştür. Pasif durumun oluşması için gerekli yatay hareket miktarları, çıplak gözle izlemeye göre oldukça doğru sonuçlar veren stereo-fotogrametri tekniği ile belirlenmiştir. Çıplak göz ile pasif Rankine durumunun oluştuğu an hemen fark edilememekte, kayma yüzeyinin gözle fark edilebilmesi için duvarın bir miktar daha hareket etmesi gerekmektedir.

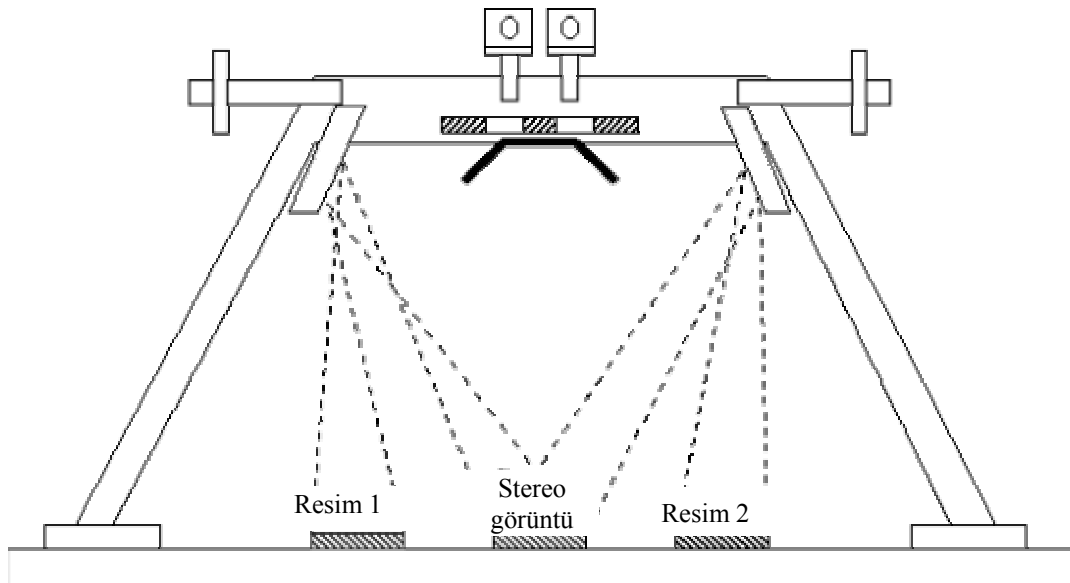
Kum deney tankı içerisinde, özel olarak hazırlanmış kum serme aleti ile farklı rölatif sıklıklarda yerleştirilmiştir. Model duvar, el ile kontrol edilebilen bir mekanizma ile zemine doğru adım adım hareket ettirilmiştir. Her adımda stereoskop için gerekli olan fotoğraflar çekilmiştir. Deneyler esnasında duvarın yatay

hareket miktarı ve cam duvarların yanıl deformasyonları ölçülmüştür. Fotoğraflar sırası ile stereoskopta değerlendirilmiş ve pasif Rankine durumunun oluştuğu an, bir başka deyişle pasif duruma ulaşılması için gerekli yatay hareket miktarları ve kayma yüzeyleri belirlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 3. Deney tankı.

Figure 3. Experiment tank.



Şekil 4. Deneylerde stereoskopun kullanılması.

Figure 4. The usage of the stereoscope in the experiments.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneyler 0.23-0.91 arasında değişen dokuz farklı rölatif sıklıkta yapılmıştır. Her bir deney sonunda belirlenen kum yüksekliği (H), pasif yatay hareket miktarı ( $\Delta L_p$ ), pasif kamanın uzunluğu ( $L_p$ ) ve pasif birim deformasyon ( $\epsilon_p$ ) Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Farklı sıklıklarda yapılan deney sonuçları.

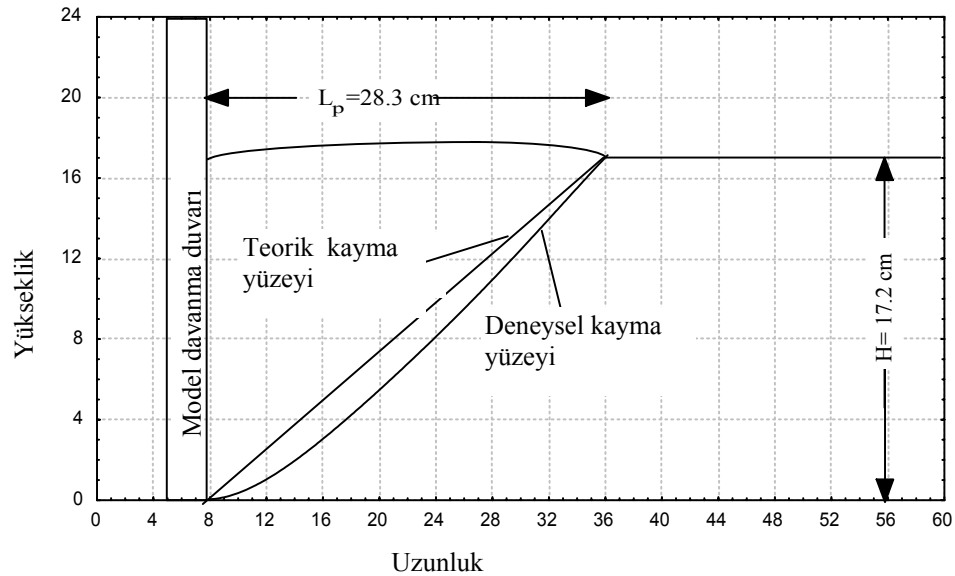
*Table 2. Tests results for different relative densities.*

Test No	$D_r$	H (cm)	$\Delta L_p$ (mm)	$L_p$ (cm)	$\epsilon_p$ (%)
1	0.23	16.5	22.0	23.1	9.52
2	0.35	17.2	21.0	28.3	7.42
3	0.45	22.8	22.0	37.4	5.88
4	0.51	20.5	17.0	35.8	4.75
5	0.64	23.6	16.0	45.5	3.50
6	0.73	22.8	13.5	45.6	2.96
7	0.78	19.0	10.5	40.1	2.62
8	0.88	17.8	8.5	41.5	2.05
9	0.91	19.0	8.5	47.2	1.80

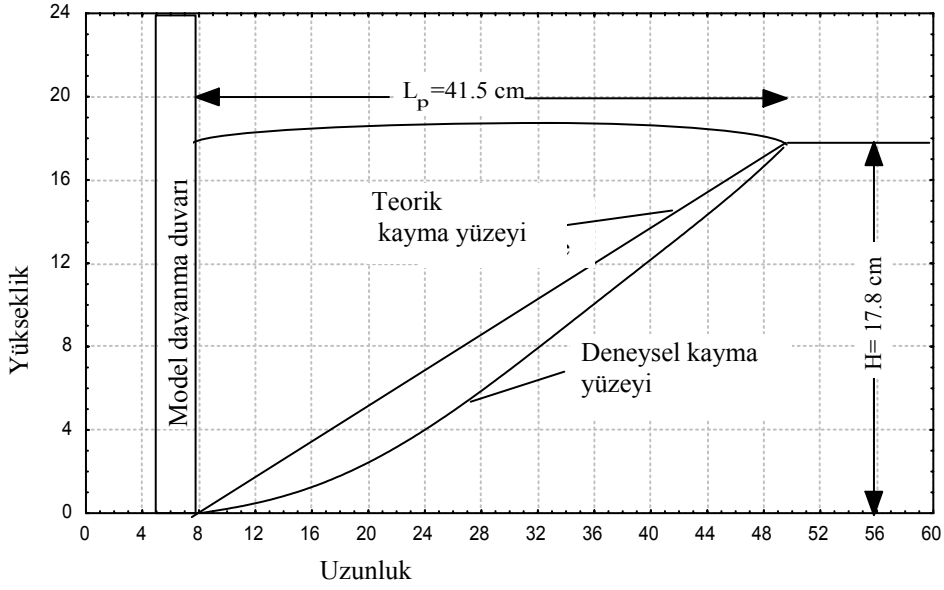
Deneyler sonucunda stereo-fotogrametri tekniği ile çizilen kayma yüzeylerinden ikisi ( $D_r=0.35$  ve  $D_r=0.88$  için) Şekil 5-6’da verilmiştir.

Pasif birim deformasyon ile rölatif sıklık arasındaki ilişki Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 7’den görüldüğü gibi rölatif sıklık arttıkça pasif birim deformasyon hızlı bir şekilde azalmaktadır. Bu hızlı azalmanın nedeni; rölatif sıklık arttıkça boşluk oranı azalmakta, kritik boşluk oranı değerine çok çabuk ulaşılmakta ve taneler birbirlerini hareket ettirmeye başlamaktadır. Rölatif sıklığın 0.23’den 0.91’e yükselmesi durumunda pasif birim deformasyon % 9.52 değerinden % 1.80 değerine düşmüştür. Bu aralıkta pasif birim deformasyondaki azalma oranı % 81’dir.

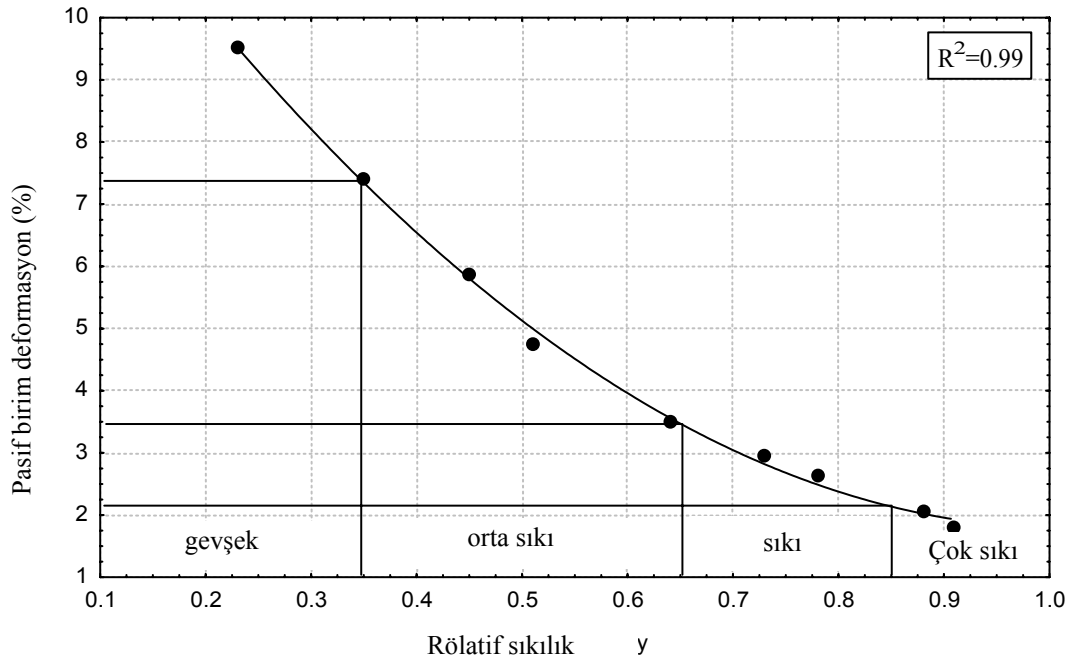
Pasif birim deformasyon ile rölatif sıklık arasındaki ilişkiyi belirlemek için Tablo 3’de verilen deneysel veriler kullanılarak 2. dereceden polinom şeklinde ( $y=ax^2+bx+c$ ) matematik model geliştirilmiştir. Yapılan istatistiksel analizler sonucunda modelin determinasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0.99 ve polinomun katsayıları  $a=12.47$ ,  $b=-25.381$  ve  $c=14.701$  olarak belirlenmiştir. Rölatif sıklık ile pasif birim deformasyon arasındaki ilişkiyi veren model aşağıda verilmiştir.



**Şekil 5.** Stereoskop ile belirlenen kayma yüzeyi ( $D_r=0.35$ ).  
*Figure 5. Failure surface determined by the stereoscope ( $D_r=0.35$ ).*



Şekil 6. Stereoskop ile belirlenen kayma yüzeyi ( $D_r=0.88$ ).  
Figure 6. Failure surface determined by the stereoscope ( $D_r=0.88$ ).



Şekil 7. Rölatif sıklık ile pasif birim deformasyonun değişimi.  
Figure 7. Variation of the relative density with passive lateral strain.

$$\varepsilon_p = (12.470D_r^2 - 25.381D_r + 14.701) \times 10^{-2} \quad (4)$$

(4) nolu bağıntı kullanılarak gevşek, orta sıkı, sıkı ve çok sıkı kum aralıkları için hesaplanan pasif birim deformasyon değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Lambe ve Whitman (1982)

tarafından, genel bir bilgi olarak pasif birim deformasyonun çok gevşek kumlarda 0.15'den büyük, çok sıkı kumlarda ise 0.02'den küçük olabileceği belirtilmiştir. Tablo 3 genel olarak bu bilgileri doğrulamakla birlikte, daha geniş ve kapsamlı bir sıklık aralığını kapsamaktadır.

Ayrıca deneysel olarak çizilen kayma yüzeylerinin Rankine Toprak Basıncı Teorisinde belirtilen şekle genel olarak uymakla birlikte alt kısımlarda çok az bir eğrilik olduğu görülmüştür.

**Tablo 3.** Farklı sıklık durumları için pasif birim deformasyonlar.

*Table 3. Passive unit strains for different densities.*

Kumun Sıklık durumu	Rölâtif Sıklık ( $D_r$ )	Pasif Birim Deformasyon ( $\epsilon_p$ )
Gevşek kum	0.0-0.35	>0.074
Orta sıkı kum	0.35-0.65	0.074-0.035
Sıkı kum	0.65-0.85	0.035-0.021
Çok sıkı kum	0.85-1.00	0.021-0.018

## SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmanın sonuçları; rölâtif sıklığın dayanma yapısı arkasındaki zeminde pasif durumun oluşmasında oldukça önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Pasif birim deformasyon, rölâtif sıklığın artması ile hızlı bir şekilde azalmaktadır. Rölâtif sıklığa bağlı olarak geliştirilen matematiksel ifade veya Tablo 3'de verilen değerler, kumlu zeminlerde pasif durumun oluşması için gerekli yatay hareket miktarının belirlenmesinde kullanılabilir. Rankine Toprak Basıncı Teorisinde belirtildiği gibi, kayma yüzeylerinin üst kısımlarının yaklaşık olarak doğrusal olduğu fakat alt kısımlarında bir miktar eğrisellik bulunduğu belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Coulomb, C.A., 1776, Essai Sur une Application de R'egles des Maximis and Minimis a l'architecture, Mem Acad. Roy., Press Drivers Savant 7.
- Culmann, K., 1886, Die Graphise Statik, Zürich.
- Lambe, T.W., Whitman R.V., 1982., Soil Mechanics. John Wiley and Sons, 165.
- Rankine, W.J.H., 1857, Theory on the Stability of Loose Earth based on the Ellipse of Stresses, Philosophical Transactions of the Royal Society N.147.
- Soubra, A.H., 2000, Static and seismic passive earth pressure coefficients on rigid retaining structures, Canadian Geotechnical Journal, **37**, 463-478.
- Sokolovski, V.V., 1964, Statics of Granular Media, Pergamon Press, New York, 1965.
- Tan, Ö., 1996, Kumlarda Aktif ve Pasif Durumlar İçin Hareket Miktarlarının Model Deneylerle Araştırılması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Woodward, P.K., 1997, Earth pressure coefficients based on the lade-duncan failure, Engineering Structures, **19**, 9, 733-737.
- Zhu, D.Y., Qian, Q. 2000, Determination of passive earth pressure coefficients by the method of triangular slices, Canadian Geotechnical Journal, **37**, 2, 485-491.

