

## Use of Geocells and Working Mechanism

Kaan Yüncül<sup>1\*</sup> and Ayhan Gürbüz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Engineering Faculty/Civil Engineering Division, Gazi University, Ankara, Turkey

\*Corresponding author: kaanyuncul@gazi.edu.tr

+Speaker: kaanyuncul@gazi.edu.tr

Presentation/Paper Type: Oral / Full Paper

**Abstract** – Geocell, which is one of the increasingly used geosynthetic materials in recent years, limits the lateral movement of the ground with its three-dimensional honeycomb structure. Thanks to this new technique, the cost of the soil improvement methods and the construction time are reduced. Even though various researchers have performed laboratory, field, and numerical studies, the factors affecting the working mechanism and performance of the geocells are not fully explained. With this review study, geocell history, usage areas, parameters affecting performance and working mechanism are explained.

**Keywords** – geocell, geosynthetic, soil improvement, civil engineering, geotechnical engineering

## Hücresel Dolguların Kullanım Alanları ve Çalışma Mekanizması

Kaan Yüncül<sup>1\*</sup> and Ayhan Gürbüz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mühendislik Fakültesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

\*(kaanyuncul@gazi.edu.tr) Sorumlu yazarın e posta adresi

**Özet**– Son yıllarda kullanımı artan geosentetik malzemelerden birisi olan hücresel dolgu(geocell) üç boyutlu arı peteği yapısı ile zeminin yanal hareketini sınırlandırmaktadır. Yeni gelişen bu teknik sayesinde zemin iyileştirme yöntemlerinin maliyeti ve yapım süresi azalmaktadır. Çeşitli araştırmacıların yaptıkları laboratuvar, arazi, nümerik ve sayısal çalışmalar olmasına rağmen hücresel dolgunun çalışma mekanizması ve performansını etkileyen faktörler tam olarak açıklanamamıştır. Yapılan bu derleme çalışması ile hücresel dolgunun tarihçesi, kullanım alanları, performansını etkileyen parametreler ve çalışma mekanizması açıklanmıştır.

**Anahtar Kelimeler** – hücresel dolgu, geosentetik, zemin güçlendirme, inşaat mühendisliği, geoteknik mühendisliği

### I. GİRİŞ

Çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri olmasına rağmen maliyet ve işçilik açısından son 40 yıldır kullanılmaya başlanan zemin iyileştirme yöntemlerinden biri de zemin donatısı kullanımdır. Bu yöntemin öncüsü Fransız mimar ve mühendis Henri Vidal olmuştur [1]. Bu alanda sistematik araştırmalar ise Binquet ve Lee tarafından metalik şeritler kullanılarak gerçekleştirilmiştir [2,3]. Daha sonraki yıllarda uygulamasının zorluğu, maliyetinin yüksek olması sebebiyle geosentetik olarak adlandırılan polimer malzemeler kullanılarak zeminlerin taşıma gücünde güçlendirme uygulamaları yapılmıştır. Bu geosentetik malzemelerin ayırma, güçlendirme, drenaj, filtrasyon, koruma ve yalıtım gibi fonksiyonları bulunmaktadır. Son yıllarda kullanımı artan geosentetik çeşidi olan hücresel dolgu(geocell) üç boyutlu, arı peteği şeklinde zemini sıkıştırarak ve sınırlandıran yapısı ile diğer geosentetik malzemelerden ayrılmaktadır. Zemini sınırlandırarak yanal olarak hareketi engellemesi sonucunda

hücresel dolgu zemin kompozitinde ek bir kohezyon oluşumunu görmektedir [4,5,6,7]. Üç boyutlu yapısından dolayı oluşturduğu kompozit yapı bir radye temel davranışı göstererek trafik, sürüş ve hareketli yüklerin daha geniş bir alana yayılmasını sağlamaktadır [8,9,10,11]. Bu sayede zeminin taşıma gücünde, kayma dayanımlarında ve zeminin oturma performansında önemli iyileşmeler gözlemlenmektedir. Oluşturduğu membran etkisinden kaynaklanan çekme gerilmeleri de taşıma gücü oturma performansını artırmaktadır.

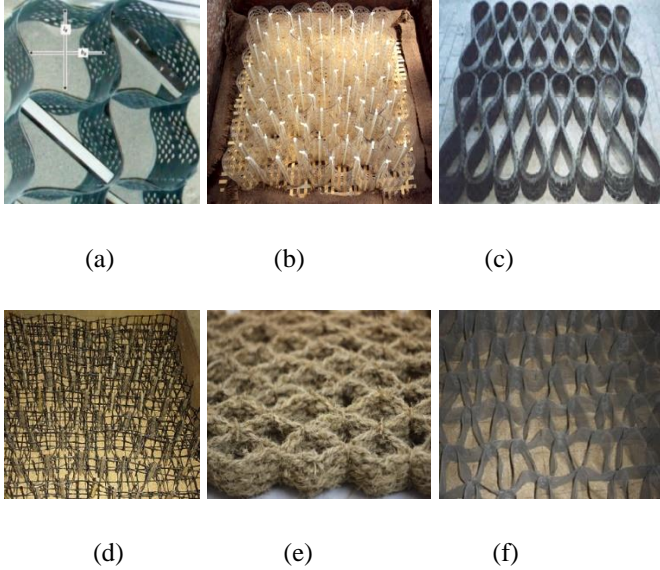
Çeşitli araştırmacılar; hücresel dolgu malzemesini araştırmasına rağmen bu sistemin çalışma mekanizması tam olarak belirlenememiştir. Bu çalışma kapsamında günümüzde kullanım alanı artmakta olan, hücresel dolgu (geocell) malzemesinin tarihçesi, kullanım alanları, geçmişten günümüze kadar yapılan akademik çalışmalar araştırılarak sunulmuştur.

### II. HÜCRESEL DOLGUNUN TARİHÇESİ

ISO 13426-1:2003 EN açıklamasına göre hücresel dolgu; “üç boyutlu polimerik (sentetik veya doğal) arı peteği veya web şeklinde birbirine bağlı şaşırtmalı şekilde şeritlerden yapılmış zemin partiküllerini tutan, çatılarda ve küçük bitkiler için erozyon kontrolü amacıyla ve zemin tutma özelliği olan malzemelerdir” olarak tanımlanmaktadır [12].

Hücresel dolgu malzemesi kullanılarak yapılan ilk çalışma Webster (1979a,b) tarafından gerçekleştirilmiştir [13,14]. İlk uygulamalarda dayanımın yüksek olmasından dolayı metalik malzemeler tercih edilse de, maliyetin yüksek ve uygulamasının zor olması nedeniyle bu uygulamadan vazgeçilmiştir.

Hücresel dolgular üç boyutlu, arı peteği şeklinde, zemini hapseden ve sıkıştıran, yüksek yoğunlukta polimerden(HDPE) veya polimerik alaşımdan(NPA) meydana gelen bir yapıdır. Günümüzde hücresel dolgu malzemesi olarak kullanılan HDPE'den üretilmiş ürünlerin zeminin taşıma gücü-oturma performansı açısından performansının NPA hücresel dolgu sistemine göre düşük olduğu kanıtlanmıştır [15]. Genellikle hücresel dolgu üretiminde bu malzemeler kullanılsa da çeşitli araştırmacılar geogrid [8,9,10,16,17,18,19,20,21,22,23], geonet [24], plastik şişe [25], bambu [26], atık lastik [27], Hindistan cevizi lifi [28], örgüsüz geotekstil [29,30,31], örgülü geotekstil [31,32] gibi malzemeleri kullanılarak hücresel dolgunun davranışını incelemiştirlerdir.



Şekil 1. Çeşitli hücresel dolgu malzemeleri; (a):HDPE [33], (b):plastik şişe [25], (c):atık lastik [27], (d):geogrid [24], (e):Hindistan cevizi lifi [28], (f):geonet [24]

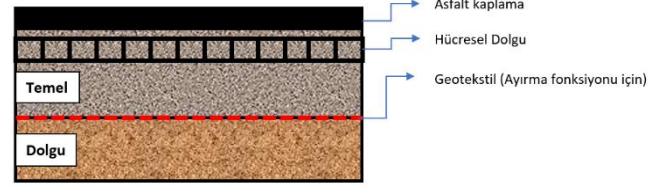
### III. KULLANIM ALANLARI

Başlıca temel kullanım alanları; dolgular, temeller, kaplamalı yollar, demiryolları, istinat duvarları ve şev stabilitesi ve şevlerin erozyon kontrolü olarak düşünülebilir. Ayrıca son zamanlarda peyzaj projeleri, boru hatlarının korunması gibi alanlarda da hücresel dolgular kullanılmaktadır.

#### KAPLAMALI VE KAPLAMASIZ YOLLAR

Kaplamalı veya kaplamasız yollar ile ilgili tasarım yöntemleri genellikle büyük ölçekli yol testlerinden veya çeşitli saha deneylerinden elde edilen amprik eşitliklerden meydana gelmektedir. Son yıllarda ortaya çıkan hücresel dolgu malzemesi için böyle bir yaklaşım söz konusu değildir.

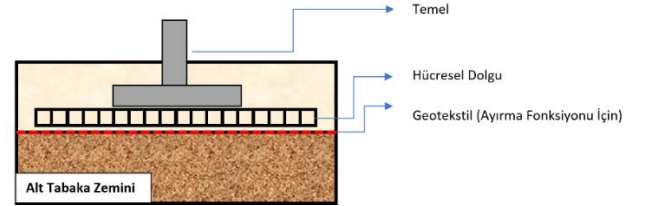
Ama şu bilinen bir gerçektir ki 2 boyutlu geosentetik malzemeler ince daneli granüler malzemeler için uygun değilken 3 boyutlu hücresel dolgu malzemesi için uygulama ve performansta herhangi bir sorun bulunmamaktadır [5] (Şekil 2.). Çeşitli araştırmacılar; [34,35] yaptıkları arazi çalışmalarında geleneksel olarak güçlendirilmiş bir kaplamalı yol tabakası ile hücresel dolgu ile güçlendirilmiş tabakayı karşılaştırarak dolgu tabakası üzerine gelen düşey gerilmelerde %50 oranında bir azalış olduğunu tespit etmişlerdir. Hücresel dolgu içine hapsediği zemin tabakasının modülünü artırması da elde edilen başka bir sonuçtur.



Şekil 2. Hücresel dolgunun kaplamalı yollarda uygulanması

#### TEMELLER

Genellikle hücresel dolgular istinat duvarları, gömülü borular, şerit temellerde kullanımı varken birçok araştırmacı kare ve dairesel temeldeki davranışını da incelemiştir. Genellikle temel problemi olan aşırı oturma, düşük taşıma gücü veya yetersiz kayma gerilmesi gibi nedenlerle oluşabilen sorunların çözümünde kullanılmaktadır (Şekil 3.)



Şekil 3. Hücresel dolgunun temellerde uygulanması

Araştırmacılar hücresel dolgu malzemesi ile güçlendirilmiş temel yüklemesi ile güçlendirilmemiş durumu karşılaştırmışlardır. Hücresel dolgu ile güçlendirilmiş taşıma gücü ile güçlendirilmemiş taşıma gücü arasındaki orana; nihai taşıma gücü iyileşme oranı adı verilirken (BCIR), aynı gerilme değeri için oturma oranlarındaki azalmaya ise temel oturması azalma oranı (FSRR) adı verilmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda hücresel dolgu malzemesinin alt tarafına yerleştirilen düzlemsel geosentetik malzemenin de taşıma gücü oturma ilişkisi bakımından etkili olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

$$BCIR = \frac{q_{güçlendirilmiş}}{q_{güçlendirilmemiş}} \quad (1)$$

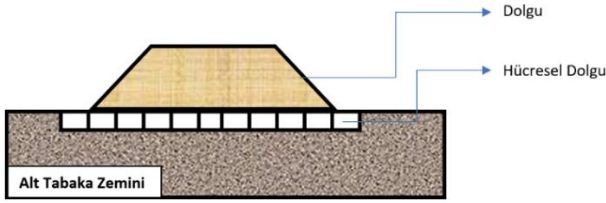
$$FSRR = \frac{S_{güçlendirilmemiş} - S_{güçlendirilmiş}}{S_{güçlendirilmemiş}} \quad (2)$$

Burada;  $q_{güçlendirilmiş}$  hücresel dolgu ile güçlendirilen zemindeki taşıma gücünü belirtirken,  $q_{güçlendirilmemiş}$  ise güçlendirilmeyen durumdaki taşıma gücünü belirtmektedir.

Bu oranlar çeşitli araştırmalar tarafından incelenmiştir. BCIR değeri 1,5 ile 6 arasında bulunmuştur [8,9,10,15,17,18,19,20,21,22,30,32,33,36,37]. Hücresel dolgunun rijitliği, zeminin karakteristik özellikleri, hücresel dolgunun genişliği, yüksekliği, hücre açıklığı sayısı gibi faktörler bu orana etki etmektedir.

#### DOLGULAR

Dolgu işlemi yapmak ise hem zor hem de maliyet açısından pahalı bir işidir. Hatta bazı zayıf zeminler inşaat ekipmanlarını bile taşıyamamaktadır. İnşaat sonrası aşırı oturma ve buna bağlı stabilite kaybı da dolgularda karşılaşılan en büyük problemlerden biridir. Bu yüzden ekonomik ve uzun ömürlü olmasından dolayı hücresel dolgular tercih edilmektedir (Şekil 4.). Bush ve diğ. (1990) [16] tarafından belirtilen bilgilere göre yapım maliyeti hücresel dolgular kullanılarak %30 azalmaktadır.

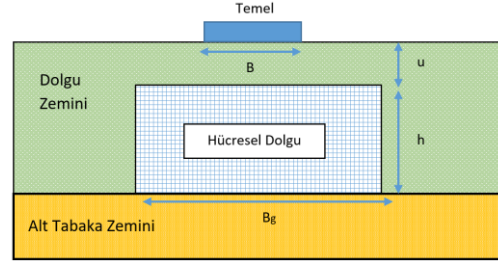


Şekil 4. Hücresel dolgunun dolgularda kullanılması

Cowland ve Wong (1993), [38] Hong Kong'da yaptıkları çalışmalar ile bu uygulamanın ilk örneklerini oluştururken, Latha ve diğ. (2006) [39] ve Zhang ve diğ. (2010) [40] yaptıkları laboratuvar ortamındaki dolgu yüklemesi ile temellerde olduğu gibi taşıma oranında artış ve oturma miktarında azalma meydana gelirken oluşan ek kohezyondan dolayı zeminin kayma dayanımının arttığı da gözlemlenmiştir.

#### IV. HÜCRESEL DOLGUNUN ÇALIŞMA MEKANİZMASI

Hücresel dolgu sistemleri zeminleri hapsederek ve sıkıştırarak kompozit bir davranış göstererek davranış olarak radye temellere benzemektedirler [8,38,41]. Bu sayede hapsedtiği zeminin yanıl ve düşey hareketlerini sınırlamaktadır. Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalara göre hücresel dolgu ile güçlendirilen zeminlerde temelin taşıma gücünün artmasının ve oturma miktarının azalmasının yanında kohezyonsuz zeminlerde bile ek olarak da bir görünür kohezyon oluştuğu gözlemlenmiştir [4,5,6,7]. Hücresel dolgu malzemesinin bir önemli özelliği de yüklemesi esnasında zeminde oluşan yenilme kamasını kesmesi ve aktarılan yükün daha derinlere ulaşmasını sağlaması olarak gösterilebilir. Alt tabaka zeminini tanımlarken, dolgu zeminini ise hücresel dolgu yerleştirildikten sonra eklenen zemin tanımlamaktadır (Şekil 5). B temel genişliği, u hücresel dolgu üzerinde bulunan dolgu tabakasının kalınlığını (gömülme derinliği), h hücresel dolgunun yüksekliğini, B<sub>g</sub> ise hücresel dolgunun genişliğini simgelemektedir.



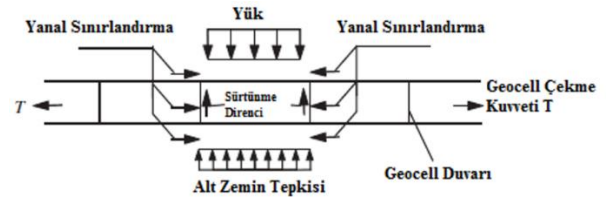
Şekil 5. Hücresel dolgu ile güçlendirilmiş zemin profili

Çeşitli araştırmacılar [5,8,10,11,30] hücresel dolgu sisteminin çalışma mekanizmasını açıklayan yaklaşımlarda bulunmasına rağmen en çok kabul edilen yaklaşım Zhang ve diğ. (2010) [40] tarafından açıklanan yaklaşımdır. Bu yaklaşıma göre hücresel dolgu kullanılarak güçlendirilmiş zeminlerin taşıma gücü aşağıdaki etkilere bağlıdır.

- Yanal Sınırlandırma Etkisi
- Gerilim Yayılma Etkisi
- Membran Etkisi

#### YANAL SINIRLANDIRMA ETKİSİ

Hücresel dolgu sistemleri dolgu zeminini hapsedtiği ve sıkıştırdığı için bu zeminlerin temel yükü altında hareket etmesini zorlamaktadırlar. Bu şekilde hücresel dolgu tabakasının içinde bulunan zeminin rijitliği artacaktır ve davranışı kompozit malzeme davranışına benzeyecektir (Şekil 6.).



Şekil 6. Hücresel dolgu ile zemin arasında meydana gelen yanıl sınırlandırma etkisi

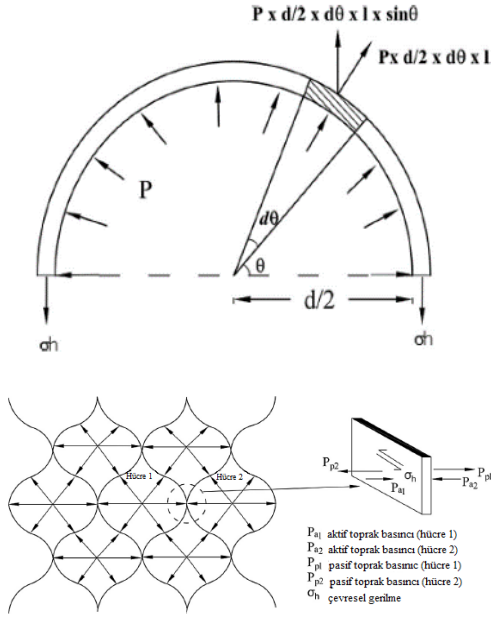
Hücresel dolgu duvarı ile dolgu malzemesi arasında bu sınırlanmadan dolayı mobilize olan yanıl gerilmeler oluşacak ve bu gerilmeler yüzey kayma gerilmelerini meydana getirecektir. Bu şekilde zeminin kayma dayanımında bir artış meydana gelecektir. Oluşan bu yatay gerilmeler hücresel dolgunun iç tarafında aktif toprak basıncını oluştururken, aktif toprak basıncından meydana gelen yanıl genişleme ise komşu hücrede meydana gelen pasif toprak basıncı ile ve hücre duvarı arasında oluşan çevresel gerilme ile de hücre duvarındaki deformasyonlar sınırlanmaktadır [30,41,42] (Şekil 7.). Bu nedenle genellikle hücresel dolguların yenilmesi hücreleri birbirine bağlayan kaynaklarda kopmalardan meydana gelmektedir. Hedge ve Sitharam (2015) [43] aşağıdaki eşitlik ile çevresel gerilmenin elde edilebileceğini açıklamışlardır.

$$\sigma_h = \frac{Pd}{2t} \quad (3)$$

$$\epsilon_h = \frac{Pd(2-\mu)}{4tE} \quad (4)$$

$$\epsilon_v = \frac{Pd}{4tE} (5 - 4\mu) \quad (5)$$

$\sigma_h$  hücresel dolgu üzerinde bulunan çevresel gerilmeyi,  $\epsilon_h$  çevresel gerilmenden meydana gelen birim şekil değiştirmeyi,  $\epsilon_v$  hacimsel birim şekil değiştirmeyi,  $P$  aktif toprak basıncını,  $E$  hücresel dolgu malzemesinin Young Modülünü,  $d$  hücresel dolgunun açıklık genişliğini,  $t$  hücresel dolgunun kalınlığını ve  $\mu$  hücresel dolgunun Poisson oranını simgelemektedir.

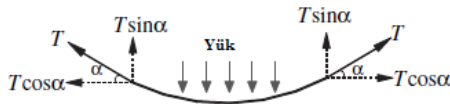


Şekil 7. Hücresel dolguda yüklenme sonucunda meydana gelen çevresel gerilmeler [56]

Bu oluşan gerilmelerin yanında hücresel dolgu malzemesi ile zemin arasında bir sürtünme kuvveti meydana gelmektedir.

#### MEMBRAN ETKİSİ

Hücresel dolgunun altında bulunan zemin temel yüklemesi etkisiyle yer değiştirdiği için hücresel dolgu konkav bir şekil alır. Bunun sonucunda hücresel dolgu üzerinde çekme kuvveti oluşacaktır (Şekil 8.). Bu olay zeminin taşıma gücünde bir artış meydana getirirken hücresel dolgunun altında bulunan zemine aktarılacak gerilme miktarını da azaltmaktadır. Bu etkinin mobilizasyonu için zeminin aşırı yer değiştirmesi gerekmektedir. Bu yüzden bazı araştırmacılara göre bu etki hizmet verebilirlik sınırları açısından ihmal edilmesi gereken bir etki olarak görülmüştür.

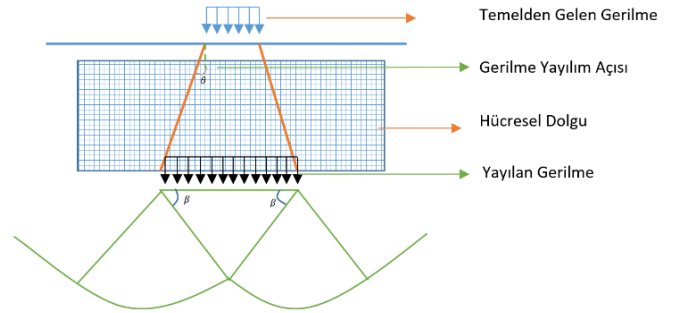


Şekil 8. Hücresel dolgu elamanlarında membran etkisi

#### GERİLİM YAYILMA ETKİSİ

Hücresel dolgu malzemesi üç boyutlu yapısı nedeniyle ve yanal sınırlandırma etkisi sonucunda rijit kompozit bir

davranış sergilemektedir. Bazı araştırmacılar bu etkiyi kiriş etkisi olarak da adlandırmaktadırlar [8,9,10,11]. Bu etki sayesinde hücresel dolgu sistemine üzerine gelen yük daha geniş alanlara yayılacak ve daha derinlere aktarılacaktır. Bu sayede temelin taşıma gücünde bir artış, oturma miktarında da azalma meydana gelecektir. Yükün genişlemesinden dolayı oluşacak açığa gerilme yayılım açısı adı verilmektedir. Bu açının değerinin elde edilmesi ile hücresel dolgu üzerine gelecek yük hesaplanabilmektedir. Neto ve diğ. (2013) [11] yaptığı yaklaşıma göre gerilim yayıldığı yüzey ile temel genişliği arasındaki mesafenin farkını 2 tane hücre açıklığının toplamına eşit olduğunu varsayarken, Zhang ve diğ. (2013) [40] elde ettikleri sonuçlara göre gerilme yayılım açısı 25° ile 55° arasında, Dash ve diğ. (2007) [10] elde ettiği sonuçlarda bu açının 8.08° ile 41.6° arasında elde etmişlerdir. Bu açının hücreler arasındaki açıklık mesafesi, hücresel dolgunun yüksekliği, hücresel dolgu gömülme derinliği arttıkça ve hücresel dolgu genişliği azaldıkça azaldığı görülmüştür [10]. Gerilim yayılma etkisi Şekil.9 da gösterilmiştir.



Şekil 9. Hücresel Dolgu Elemanı İle Güçlendirilmiş Zeminlerde Gerilme Yayılım Etkisi

Gerilme yayılım açısı ise gelen yükün yayıldığı açıdır ve aşağıdaki eşitlik ile elde edilir.

$$\tan \theta = \frac{\Delta B}{2(h+u)} \quad (6)$$

Burada;  $\Delta B$  yayılan gerilmenden meydana gelen genişlik ile temel genişliği arasındaki fark,  $h$  hücresel dolgu yüksekliği,  $u$  ise hücresel dolgu gömülme derinliği olarak belirtilmiştir.

#### V. HÜCRESEL DOLGU İLE İLGİLİ PARAMETRELER

Çeşitli araştırmacılar laboratuvar koşullarında tasarladıkları zemin tankının içine hücresel dolgu malzemesi yerleştirerek temel altında yüklemeye yaparak çeşitli parametrelerin hücresel dolgu ile güçlendirilmiş zeminin performansına etkisini incelemişlerdir. Bu parametreler sırasıyla;

#### HÜCRESEL DOLGUNUN DİĞER GEOSENTETİKLER İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Birçok araştırmacı [13,27,29,30,31,32] hücresel dolgu sistemi ile diğer geosentetik malzemelerin performansını karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre hücresel dolgu sistemi ile güçlendirilen zeminler taşıma gücünde artış ve

oturma oranında azalma bakımından en verimli sonucu verdiği ortaya çıkmıştır.

#### HÜCRESEL MALZEMENİN YÜKSEKLİĞİ

Araştırmacılar [10,15,17,20,21,23,25,29,30,32,33,37,42,44] hücresel dolgu malzemesinin yüksekliğini değiştirerek taşıma gücüne olan etkisini incelemiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda yükseklik arttıkça taşıma gücünde artış ve temel zemininde oluşan oturma miktarında azalma gelmektedir. Bunun nedeni daha fazla yüzey sürtünmesinin meydana gelmesi, yayılım açısının büyümesi ve oluşan pasif gerilmelerden dolayı hücresel dolgunun sınırlandırmasının daha fazla olmasıdır. Elde edilen çalışmalara göre optimum hücre yüksekliği temel genişliğinin 1.8 katı ile 2.1 katı arasında değişmektedir. Bu değerden daha fazla olan hücre yüksekliklerinde ise yükleme altında yerel burulmalar meydana gelmektedir. Dash ve diğ. (2007) [10] yaklaşımına göre ise hücresel dolgu yüksekliği temel genişliğinin 2 katından fazla olduğu zaman davranışı geniş kirişe benzerken, bu orandan küçük olduğu zaman sığ kiriş davranışına benzediğini belirtmişlerdir.

#### HÜCRESEL MALZEMENİN GENİŞLİĞİ

Hücresel dolgu sisteminin genişliği arttıkça, çevresini sardığı zemin ile daha iyi bir yüzey sürtünmesi meydana getirebilecek, membran etkisinden dolayı da taşıma gücüne katkısı daha fazla olacaktır. Araştırmacılar [8,9,10,21,22,27,32,33,36,45] yaptıkları çalışmalar sonucunda optimum elde edilen hücresel dolgu genişliği, temel genişliğinin 4 ile 8 katı arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Chummar 1972 [46] yaptığı çalışmalar sonucunda, güçlendirilmemiş sığ temeller için yenilme zonu temel köşelerinden 2B uzaklıkta olduğu düşünülürse bulunan temel genişliği değerleri bu değer ile paralellik göstermektedir.

#### HÜCRESEL MALZEMENİN GÖMÜLME DERİNLİĞİ

Yapılan çeşitli araştırmalar sonucunda [8,10,15,21,36,37,47] hücresel dolgu malzemesi üzerinde bulunan dolgu malzemesinin derinliğinin taşıma gücüne etki ettiği ortaya çıkmıştır. Bu dolgu malzemesi temel yükü altında bulunan hücresel dolgunun deforme olmasını engellerken yükün daha geniş bir alana yayılmasını sağlayacaktır. Elde edilen optimum gömülme derinliği kum türü dolgular için temel derinliğinin 0,05 katı ile 0,1 katı arasında değişirken kil türü dolgular için bu değer 0'dır.

#### HÜCRESEL DOLGU SİSTEMİNİN HÜCRE AÇIKLIĞI

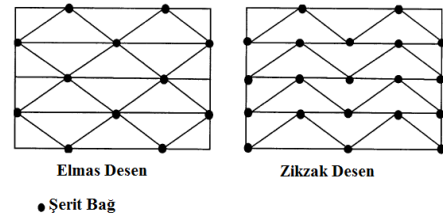
Hücre açıklığı hücresel dolgu sistemlerindeki bir tane hücrenin içine yerleşen eş değer dairesel alanın çapı olarak tanımlanmaktadır. Çeşitli araştırmacıların [4,13,15,18,27] yaptıkları çalışmalar sonucunda hücre açıklığının küçülmesi sonucunda zeminin sınırlandırılması ve sıkışması oranının da artmasından dolayı zeminin taşıma gücünde artış meydana gelmektedir. Birçok araştırmacı [13,18,26] hücre açıklığı değerinin en az temel genişliği kadar olması gerektiğini önerirken; Dash ve diğ. (2003) [9] ise optimum hücre açıklığı temel genişliğinin 0,8 katı olması gerektiğini belirtmiştir.

#### HÜCRESEL DOLGUNUN GEOMETRİK ŞEKLİ

Pokharel ve diğ. (2010) [15] yaptığı çalışmada dairesel şekilli hücresel dolgunun eliptik şekilli dolguya göre dayanımını daha yüksek bulmuştur. Sherin ve diğ. (2017) [37] dairesel, kare ve anüler şekilde hücrelerin dayanım oturma ilişkisini incelemiş ve elde ettiği sonuca göre dairesel ve kare şekilli hücrenin dayanımının birbirine yakın olduğu, anüler şekilli hücrenin dayanımının daha yüksek olduğunu bulmuştur.

#### GEOGRİDLERDEN MEYDANA GELEN HÜCRESEL DOLGUNUN DESENİ

Dash ve diğ. (2001) [8] yaptığı çalışmada geogridlerden meydana getirdiği hücresel dolgunun deseninin taşıma gücü üzerindeki etkisini incelemiştir. Şekil 10.'da gösterilen desenlerden zikzak desenin performansının daha yüksek olduğunu bulmuştur.



Şekil 10. Geogridlerden Meydana Gelen Hücresel Dolgu Desenleri [8]

#### ZEMİNİN SIKILIĞIN İNCELENMESİ

Çeşitli araştırmacılar [8,18,27,45] sıklığın taşıma gücü ile olan ilişkisini incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre sıklığın artması taşıma gücünü artırırken temel oturma miktarında ise azalma meydana getirecektir. Zeminin sıklığı ile taşıma gücünün doğrudan bir ilişkisi bulunmaktadır. Sıkı malzemeler hücresel dolguyu sınırlandırarak daha iyi bir kompozit haline gelmesini sağlayarak zemine penetre olmasını zorlayacaktır. Ayrıca sıklığın artması ile hücresel dolgu duvarı ile zemin arasında meydana gelen sürtünme değeri de artış göstermektedir. Hücresel dolgu kompozitini bir temel tabakası gibi düşünürsek taşıma gücü yaklaşımları sıklıkla arttığı için bu açıdan da bir artış söz konusu olduğunu belirtmek yanlış olmayacaktır. Bu yüzden araştırmacılar maksimum taşıma gücü elde etmek için mümkün olan en iyi sıklığın elde edilmesini istemektedirler.

#### HÜCRESEL DOLGU ALTINA YERLEŞTİRİLEN GEOGRİDİN ETKİSİ

Çeşitli araştırmacıların [9,21,25,26] yaptığı çalışmalarda hücresel dolgu malzemesi altına yerleştirilen geogridin taşıma gücünü artırdığı görülmüştür. Geogrid malzeme ile hücresel dolgu malzemesinin penetrasyonu sınırlandırılarak sistem daha rijit bir duruma getirilmiştir. Ayrıca geogrid malzeme sayesinde gelen yükler çekme kuvveti altında aktararak taşıma gücünde artış meydana gelmektedir.

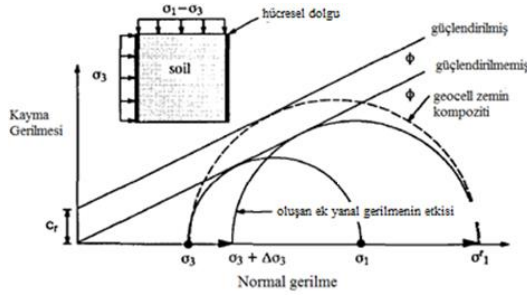
#### GEOGRİDLERDEN MEYDANA GELMİŞ HÜCRESEL DOLGULARDA GRİD AÇIKLIĞININ ETKİSİ

Grid açıklıkları hücresel dolgu zemin kompozitinin davranışını oldukça etkilemektedir. Elde edilen sonuçlara göre delikli hücresel dolgu sistemlerine göre daha geniş grid açıklığı olan geogridlerden meydana gelmiş hücresel dolguların performansının daha yüksek olduğu görülmüştür.

Buna rağmen küçük grid açıklıkları zemin ile yüzey sürtünmesini ve sınırlandırma etkisini artırmaktadır. Dash ve diğ. (2001) [8], optimum grid açıklığını zemin sınıflandırma deneyleri sonucu elde edilen sonuçlara dayanarak, zeminde bulunan yüzde 50 malzemenin geçtiği dane boyutunu 80 katı olarak belirlemiştir.

#### HÜCRESEL DOLGU İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ ZEMİNİN GERİLME BİRİM ŞEKİL DEĞİŞTİRME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Araştırmacılar [4,5,6,7] hücresel dolgu ile çevrelen zemine üç eksenli basınç deneyi ile davranışı incelediklerinde, bu kompozit sistemde ek bir kohezyon ve yanal gerilme artışı gözlemlerken, içsel sürtünme açısından herhangi bir değişiklik meydana gelmemiştir (Şekil 11.).



Şekil 11. Hücresel dolgu ile güçlendirilmiş zemin numunesinde oluşan ek kohezyon

Elde edilen sonuçlara göre kohezyon artışının hücresel dolgu malzemesinin çekme modülü ile doğrudan bir ilişkisi olduğunu ortaya çıkarılmıştır. Tek bir hücresel dolguda meydana gelen yanal gerilmedeki artışı ve gözlemlenen kohezyonu bulmak için Henkel ve Gilbert. (1952) [48] membran teorisinden yararlanılmıştır. Ortaya çıkan ek kohezyon ve gerilme artışının eşitliği aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

$$c_r = \frac{\Delta\sigma_3}{2} \tan \left[ \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right] \quad (7)$$

$$\Delta\sigma_3 = \frac{2M\varepsilon_c}{d(1-\varepsilon_a)} = \frac{2M}{d_0} \left[ \frac{1-\sqrt{1-\varepsilon_a}}{1-\varepsilon_a} \right] \quad (8)$$

Burada,  $c_r$  ek kohezyon artışını,  $\Delta\sigma_3$  yanal gerilemedeki artışı,  $\varepsilon_c$  çevresel birim şekil değiştirmesi,  $\varepsilon_a$  yenilme anındaki aksenal birim şekil değiştirmesi,  $d_0$  bir hücresel dolgu hücresinin deney öncesi çapını,  $M$ ,  $\varepsilon_a$  anından membranın sekant modülü olarak belirtilmektedir.

Hücresel dolgu ile güçlendirilen zeminler için Madhavi Latha. (2000) [49] aşağıdaki eşitlikte verilen eş değer modülü önermiştir. Bu önerilen yöntem Duncan ve Chang. (1970) [50] tarafından hiperbolik yöntemden geliştirilerek elde edilmiştir. 200 ve 0.16 değerleri orta sıkı kumlu zeminler için önerilmektedir.

$$K_r = K_e + 200M^{0.16} \quad (9)$$

Burada;  $K_r$  hücresel dolgu ile güçlendirilmiş kum zeminin Young modülü parametresi,  $K_e$  güçlendirilmeyen kum zeminin Young modülü parametresi,  $M$  de hücresel dolgu malzemesinden çekme deneyi sonucu elde edilen modülünü belirtmektedir.

Hücresel dolgu tabakasının tanjant modülü ise Janbu. (1963) [51] eşitliğinden aşağıdaki gibi bulunması araştırmacılar [39,40,41,42] tarafından önerilmektedir.

$$E_i = K_r P_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (10)$$

Burada;  $E_i$  hücresel dolgu tabakasının tanjant modülünü,  $K_r$  hücresel dolgu ile güçlendirilmiş kum zeminin Young modülünü,  $P_a$  bir atmosfer basıncını (100kPa),  $n$  de güçlendirilmeyen zeminin üst katsayısını belirtmektedir.

#### VI. SONUÇ

Bu makalede hücresel dolgu ile ilgili geçmişte yapılan çalışmalar, kullanım alanları, hücresel dolgunun performansını etkileyen parametreler ve hücresel dolgu ile güçlendirilmiş temellerin taşıma gücü ile ilgili yaklaşımlar açıklanmıştır. Önceki yapılan çalışmalardan da görülebileceği gibi hücresel dolgunun çalışma mekanizmasında önemli eksiklikler bulunmaktadır. Gelecekte bu alanda yapılacak çalışmalar sayesinde kaplamalı-kaplamasız yollarda, demiryollarında, dolgularda, erozyon kontrolünde, temellerde ve istinat yapılarında kullanım alanları artacaktır.

Hücresel dolgunun faydalarını şu şekilde sıralamak mümkündür.

- Zemini yanal olarak sınırlandırarak oluşan kompozit yapıda ek bir kohezyon oluşmasını sağlamaktadır.
- Oluşan kompozit yapı rijit bir radye temel davranışına benzeyerek, gelen yükün daha geniş alanlara yayılmasını sağlamaktadır.
- Hücresel dolgunun yer değiştirmesi ile oluşan membran etkisi ile çekme kuvvetleri meydana gelmektedir.
- Zeminin taşıma gücünü artırırken, temel oturmalarını ve yüzey kabarmalarını azaltmaktadır.
- Diğer zemin iyileştirme yöntemleri ile karşılaştırıldığında arazide uygulanması oldukça kolay, maliyeti daha düşüktür.
- Geosentetik malzemeler ile karşılaştırıldığında ise performans açısından en optimum sonuçlar elde edilmektedir.

#### REFERANSLAR

- [1] Vidal H., "The principle of reinforced earth, Highway Research Record No. N.282", Highway Research Board, Washington DC, 1-16, 1969
- [2] Binquet J. and Lee K.L., "Bearing capacity tests on reinforced earth slabs", Journal of Geotechnical Engineering Division (ASCE), 101 (12), 1241-1255, 1975.
- [3] Binquet J. and Lee K.L., "Bearing capacity analysis on reinforced earth slabs", Journal of Geotechnical Engineering Division (ASCE), 101 (12), 1257-1276, 1975.

- [4] Bathurst R.J. and Karpurapu R., "Large scale triaxial compression testing of geocell reinforced granular soils", *Geotechnical Testing Journal (ASTM)*, 16 (3), 296-303, 1993.
- [5] Rajagopal K., Krishnaswamy N.R., Latha G.M., "Behaviour of sand confined with single and multiple geocells", *Geotextiles and Geomembranes*, 17, 171-181, 1999.
- [6] Latha G.M. and Murthy V.S., "Effect of reinforcement form on the behaviour of geosynthetic reinforced sand", *Geotextiles and Geomembranes*, 25, 23-32, 2007.
- [7] Chen R.H., Huang Y.W., Huang F.C., "Confinement effect of geocells on sand samples under triaxial compression", *Geotextiles and Geomembranes*, 37, 35-44, 2013.
- [8] Dash S.K., Krishnaswamy N.R., Rajagopal K., "Bearing capacity of strip footing supported on geocell reinforced sand", *Geotextiles and Geomembranes*, 19 (4), 235-256, 2001.
- [9] Dash S.K., Sireesh S., Sitharam T.G., "Model studies on circular footing supported on geocell reinforced sand underlain by soft clay", *Geotextiles and Geomembranes*, 21 (4), 197-219, 2003.
- [10] Dash S.K., Rajagopal K., Krishnaswamy N.R., "Behaviour of geocell-reinforced sand beds under strip loading", *Canadian Geotechnical Journal*, 44 (7), 905-916, 2007.
- [11] Neto J.O.A., Bueno B.S., Futai M.M., "A bearing capacity calculation method for soil reinforced with a geocell", *Geosynthetics International*, 20 (3), 129-141, 2013.
- [12] ISO 13426-1:2003, "International Organization for Standardization, Geotextiles and geotextile related products", Strength of internal structural junctions, Part 1: Geocells, [www.iso.org](http://www.iso.org)
- [13] Webster S.L., "Investigation of beach sand trafficability enhancement using sand-grid confinement and membrane reinforcement concepts", Report 1, Sand Test Sections 1 and 2, Vicksburg, MS U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Technical Report GL-79-20, 1979
- [14] Webster S.L., "Investigation of beach sand trafficability enhancement using sand-grid confinement and membrane reinforcement concepts", Report 2, Sand Test Sections 3 and 4, Vicksburg, MS U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Technical Report GL-79-20, 1979.
- [15] Pokharel S.K., Han J., Leshchinsky D., Parsons R.L., Halahmi I., "Investigation of Factors Influencing Behavior of Single Geocell Reinforced Bases under Static Loading", *Geotextiles and Geomembranes*, 28 (6), 570-578, 2010.
- [16] Bush D.I., Jenner C.G., Bassett R.H., "The design and construction of geocell foundation mattresses supporting embankments over soft ground", *Geotextiles and Geomembranes*, 9 (1), 83-98, 1990.
- [17] Dash S.K., Rajagopal K., Krishnaswamy N.R., "Strip footing on geocell reinforced sand beds with additional planar reinforcement", *Geotextiles and Geomembranes*, 19 (8), 529-538, 2001.
- [18] Dash S.K., "Influence of relative density of soil on performance of geocell-reinforced sand foundations", *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 22 (5), 533-538, 2010.
- [19] Dash S.K., "Effect of geocell type on load-carrying mechanisms of geocell-reinforced sand foundations", *International Journal of Geomechanics (ASCE)*, 12 (5), 537-548, 2012.
- [20] Biswas A., Dash S.K., Krishna A.M., "Influence of subgrade strength on the performance of geocell-reinforced foundation systems", *Geosynthetics International*, 20 (6), 376-388, 2013.
- [21] Sitharam T.G., Sireesh S., Dash S.K., "Performance of surface footing on geocell-reinforced soft clay beds", *Geotechnical and Geological Engineering*, 25 (5), 509-524, 2007.
- [22] Sitharam T.G. and Sireesh S., "Behavior of embedded footings supported on geogrid cell reinforced foundation beds", *Geotechnical Testing Journal*, 28 (5), 452-463, 2005.
- [23] Sitharam T.G., Sireesh S., Dash S.K., "Model studies of a circular footing supported on geocell-reinforced clay", *Canadian Geotechnical Journal*, 42 (2), 693-703, 2005.
- [24] Latha G.M. and Somnash A., "Effect of reinforcement form on the bearing capacity of square footing on sand", *Geotextiles and Geomembranes*, 27 (6), 409-422, 2009.
- [25] Dutta S. and Mandal J.N., "Model studies on geocell-reinforced fly ash bed overlying soft clay", *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 28 (2), 2016.
- [26] Hedge A. and Sitharam T.G., "Use of bombo in soft ground engineering and its performance comparison with geosynthetics: experimental studies", *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 27 (9), 2015.
- [27] Yoon Y.W., Heo S.B., Kim K.S., "Geotechnical performance of waste tires for soil reinforcement from chamber tests", *Geotextiles and Geomembranes*, 26 (1), 100-107, 2008.
- [28] Lal D., Sankar N., Chandrakaran S., "Behaviour of square footing on sand reinforced with coir geocell", *Arabian Journal of Geosciences*, 10 (15), 2017.
- [29] Dabiryan H., Kargar M., Aghabeigi E., Hosseini M.M.M., Varkiyani S.M.H., "Evaluating the performance of geocells made from needle-punched nonwoven layers in the bearing capacity of reinforced soil", *Journal of the Textile Institute*, 108 (10), 1747-1752, 2017.
- [30] Mandal J.N. and Gupta P., "Stability of geocell reinforced soil, Construction and Building Materials", 8 (1), 55-62, 1994.
- [31] Mhaskar S.Y. and Mandal J.N., "Investigation on soft clay subgrade strengthening using geocells", *Construction and Building Materials*, 10 (4), 281-286, 1996.
- [32] Kargar M. and Hosseini M.M.M., "Effect of reinforcement geometry on the performance of a reduced-scale strip footing model supported on geocell-reinforced sand", *Scientia Iranica*, 24 (1), 96-109, 2017.
- [33] Gurbuz A. and Mertol H.C., "Interaction between Assembled 3D Honeycomb Cells Produced from High Density Polyethylene and a Cohesionless Soil", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31 (12), 828-836, 2012.
- [34] Kief O., Rajagopal K., Veerarayagan A., Chandramouli S., "Modulus improvement factor for geocell-reinforced bases", *Geosynthetics India*, Chennai, India, 22-23 September 2011.
- [35] Rajagopal K., Veeragavan A., Chandramouli S., "Studies on geocell reinforced road pavement structures", *Geosynthetics Asia*, 5th Asian Regional Conference of Geosynthetics, Bangkok, Thailand, 13-15 December 2012.
- [36] Tafreshi S.N.M. and Dawson A.R., "Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell with planar form of geotextile reinforcement", *Geotextiles and Geomembranes*, 28 (1), 72-84, 2010.
- [37] Sherin K.S., Chandrakaran S., Sankar N., "Effect of Geocell Geometry and Multi-Layer System on the Performance of Geocell Reinforced Sand Under a Square Footing", *International Journal of Geosynthetics and Ground*, 3 (3), 20, 2017.
- [38] Cowland J.W. and Wong S.C.K., "Performance of a road embankment on soft clay supported on a geocell mattress foundation", *Geotextiles and Geomembranes*, 12 (8), 687-705, 1993.
- [39] Latha M.G., Rajagopal K., Krishnaswamy N.R., "Experimental and theoretical investigations on geocell supported embankments", *International Journal of Geomechanics (ASCE)*, 6 (1), 30-35, 2006.
- [40] Zhang L., Zhao M., Shi C., Zhao H., "Bearing capacity of geocell reinforcement in embankment engineering", *Geotextiles and Geomembranes*, 28 (5), 475-482, 2010.
- [41] Bathurst R.J. and Jarrett P.M., "Large scale model tests of geocomposite mattresses over past subgrades", *Transportation Research Record (1188)*, 28-36, 1988.
- [42] Emersleben A. and Meyer M., "Bearing Capacity Improvement of Gravel Base Layers in Road Constructions Using Geocells", 12th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Goa-India, 3538-3575, 1-6 October, 2008.
- [43] Hedge A., Sitharam T.G., "Joint strength and Wall deformation characteristics of a single cell geocell subjected to uniaxial compression", *International Journal of Geomechanics (ASCE)*, 15 (5), 1-8, 2015.
- [44] Kumar K.V.S.P., Venkata K.R.P., Satish K.K., "Bearing Capacity of Square Footing on Geocell Sand Mattress Overlying Clay Bed", *International Journal of Emerging trends in Engineering and Development*, 5 (2), 563-573, 2012.
- [45] Sireesh S., Sitharam T.G., Dash S.K., "Bearing Capacity of Circular Footing on Geocell-Sand Mattress Overlying Clay Bed with Void", *Geotextiles and Geomembranes*, 27 (2), 89-98, 2009.
- [46] Chummar A.V., "Bearing capacity theory from experimental results", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division (ASCE)*, 98 (12), 1311-1324, 1972.
- [47] Sanjei C. and De Silva L.I.N., "Numerical modelling of the behaviour of model shallow foundations on geocell reinforced sand", *Moratuwa Engineering Research Conference (MERCCon)*, Moratuwa-Sri Lanka, 5-6 April 2016.
- [48] Henkel D.J. and Gilbert G.D., "The effect of the rubber membrane on the measured triaxial compression of clay samples", *Geotechnique*, 3 (1), 20-29, 1952.
- [49] Latha M.G., "Investigation on the behaviour of geocell supported embankments", *Phd Thesis*, Indian Institute of Technology Madras, India
- [50] Duncan J.M., and Chang C.Y., "Nonlinear analysis of stress and strain in soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, 96 (5), 1629-1653, 1970.
- [51] Janbu N., "Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests", 3rd European conference on soil mechanics and foundation engineering, Wiesbaden, Germany, 1, 19-25, 1963.