4. Ulusal
Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu

14 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

GGM4

DENİZ SUYUNUN YUMURTA KABUĞU İLE STABİLİZE EDİLMİŞ KİLLİ ZEMİNLER ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

EFFECT OF SEAWATER ON CLAYEY SOILS STABILIZED WITH WASTE EGGSHELL

Mehmet Murat KUĞU[1], Emre FIRAT[2], Yusuf Şamil AYDIN[3], Nazır Göktuğ GÜZEL[4], Şükran Gizem ALPAYDIN[5], Recep ÖZAY[6]

ÖZET

Zayıf killi zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi, geoteknik projelerde güvenlik ve ekonomi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, geleneksel stabilizasyon malzemelerine alternatif olarak sürdürülebilir atıkların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada, yüksek kalsiyum karbonat içeriğine sahip atık yumurta kabuğunun killi zeminlerin (bentonit-zeolit) stabilizasyonundaki potansiyeli deneysel olarak araştırılmıştır. Deney programı kapsamında, zemin numunelerine kuru ağırlıkça %5 ve %10 oranlarında öğütülmüş yumurta kabuğu ilave edilerek farklı katkı oranlarının etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, kıyı bölgelerindeki çevresel koşulları temsil etmek amacıyla, iyileştirilmiş numunelerin deniz suyu etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Numunelerin mekanik performansı serbest basınç dayanımı deneyleri ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, belirli katkı oranlarında yumurta kabuğunun zemin dayanımını artırdığını göstermektedir. Bununla birlikte, deniz suyu koşullarının stabilizasyon performansı üzerinde belirgin etkiler yarattığı ve katkı oranına bağlı olarak farklı davranışlar sergilendiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, atık yumurta kabuğunun killi zemin stabilizasyonunda kullanımı hem çevresel sürdürülebilirlik hem de maliyet etkinliği açısından uygulanabilir bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Zemin iyileştirme, sürdürülebilirlik, atık yumurta kabuğu, serbest basınç deneyi, deniz suyu etkisi*

ABSTRACT

Improving the engineering properties of weak clayey soils is of great importance for safety and economic feasibility in geotechnical projects. In this context, the use of sustainable waste materials as an alternative to conventional stabilization agents has gained increasing

[1] (Sorumlu yazar) Lisans Öğrencisi, İstanbul Arel Üniversitesi, mehmetkugu22@istanbularel.edu.tr
[2] Lisans Öğrencisi, İstanbul Arel Üniversitesi, emrefirat22@istanbularel.edu.tr
[3] Lisans Öğrencisi, İstanbul Arel Üniversitesi, nazirguzel22@istanbularel.edu.tr
[4] Lisans Öğrencisi, İstanbul Arel Üniversitesi, yusufaydin22@istanbularel.edu.tr
[5] Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Arel Üniversitesi, sukrangizemalpaydin@arel.edu.tr
[6] Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Arel Üniversitesi, recepozay@arel.edu.tr

attention. In this study, the potential of waste eggshells, characterized by their high calcium carbonate content, to stabilize clayey soils (bentonite-zeolite) was experimentally investigated. Within the scope of the experimental program, ground eggshell powder was added to soil samples at proportions of 5% and 10% by dry weight to investigate the effect of different additive contents. In addition, to simulate environmental conditions in coastal areas, the behavior of the treated samples under seawater exposure was also examined. The mechanical performance of the samples was evaluated using an unconfined compressive strength test. The results indicated that adding eggshells at specific proportions improved the strength of the clayey soil. However, seawater conditions had a noticeable influence on stabilization performance, leading to different behaviors depending on the additive content. Overall, the use of waste eggshells in clay soil stabilization can be considered a viable alternative in terms of both environmental sustainability and cost-effectiveness.
Keywords: *Soil stabilization, sustainability, waste eggshell, unconfined compressive strength test, seawater effect*

1. GİRİŞ

Kıyı bölgelerinde inşa edilen mühendislik yapıları, genellikle düşük taşıma gücüne ve yüksek hacimsel değişim (şişme/büzülme) potansiyeline sahip sorunlu zeminler üzerine oturmaktadır. Bu tür zeminlerde zemin iyileştirme çalışmaları; olası deformasyonları ve çökmeleri önlemek, taşıma kapasitesini arttırmak ve yapı güvenliğini uzun vadeli olarak sağlamak amacıyla zorunlu bir mühendislik adımıdır (Firoozi vd., 2017). Geoteknik uygulamalarda ve özellikle kıyı bariyer sistemlerinde, sızdırmazlık özelliklerinden dolayı kil minerali olan bentonit sıklıkla tercih edilirken; bentonitin dezavantajı olan yüksek şişme potansiyelini dengelemek ve sahip olduğu yüksek iyon değiştirme kapasitesiyle zararlı kimyasalları tutmak amacıyla matrise zeolit eklenmektedir (Kaya ve Durukan, 2004).

Son yıllarda zemin stabilizasyonunda hem atık yönetimini desteklemek hem de çevresel zararları azaltmak amacıyla geleneksel bağlayıcılara alternatif olarak atık yumurta kabuğu tozu (YKT) gibi sürdürülebilir malzemelerin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Yumurta kabuğu, içerdiği yüksek kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) sayesinde zemin matrisindeki boşlukları doldurarak (filler etkisi) daha yoğun bir yapı oluşturabilmektedir. Literatürde ayrıca yumurta kabuğunun kil mineralleriyle puzolanik reaksiyonlara girerek çimentolaşma ürünleri oluşturabileceği bildirilmektedir (Hasheminezhad vd., 2026). Literatürdeki çalışmalar, bu katkının killi zeminlerin serbest basınç dayanımını artırdığını göstermektedir (Yang vd., 2025; Hasheminezhad vd., 2026).

Ancak kıyı şeridindeki uygulamalarda zemin; dalga hareketleri, gelgitler ve yeraltı suyu sızıntıları nedeniyle sürekli olarak deniz suyuna maruz kalmaktadır. Deniz suyu, içerdiği yüksek orandaki klorür, sülfat ve magnezyum gibi agresif iyonlar nedeniyle stabilize edilmiş zeminler için büyük bir risk oluşturur. Bu agresif iyonlar zamanla zemin matrisine nüfuz ederek yumurta kabuğu ile kil arasındaki kalsiyum bazlı bağları zayıflatır; sülfat atakları sebebiyle kimyasal tahribata, hacimsel genleşmelere ve ciddi mukavemet kayıplarına yol açabilir (Firoozi vd., 2017).

Literatürde yumurta kabuğu katkısının standart zeminlerdeki olumlu etkileri bilinse de, deniz suyunun bu kalsiyum bazlı stabilizatörlerle girdiği karmaşık iyonik reaksiyonlar ve uzun dönem dayanıklılık sorunları tam olarak aydınlatılamamıştır. Bu bildirinin sunduğu temel yenilik (özgün değer); geoteknik bariyerlerde sıklıkla kullanılan zeolit-bentonit

karışımlı killi zeminlerin atık yumurta kabuğu ile stabilize edildiğinde, 14 günlük deniz suyu maruziyeti sonrasında serbest basınç dayanımında meydana gelen değişimin belirlenmesidir. Bu çalışma, hem sürdürülebilir atık yönetimine katkı sunmakta hem de kıyı yapılarında deniz suyu etkisine maruz kalan stabilize zeminlerin davranışının anlaşılmasına yönelik literatüre katkı sağlamaktadır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Deneysel çalışmada kullanılan zemin karışımı, ticari olarak temin edilen bentonit (<0.0075 mm) ile 2 mm açıklıklı elekten elenen zeolitten hazırlanmıştır. Temel karışım kuru ağırlıkça %50 bentonit ve %50 zeolit içerecek şekilde oluşturulmuştur. Stabilizasyon katkısı olarak kullanılan atık yumurta kabukları laboratuvar ortamında öğütülmüş ve No.40 elekten geçirilerek deneylerde kullanılacak dane boyutu elde edilmiştir. Deneylerde kullanılan bentonit, zeolit ve yumurta kabuğuna ait fotoğraflar Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Deneyde kullanılan bentonit, zeolit ve yumurta kabuğuna ait fotoğraflar

Deney programında katkı içermeyen referans karışımı "R", kuru ağırlıkça %5 yumurta kabuğu katkılı karışımı "YK5" ve %10 yumurta kabuğu katkılı karışımı ise "YK10" olarak kodlanmıştır. Hazırlanan numunelerin bir kısmı kompaksiyon işleminin ardından doğrudan serbest basınç dayanımı deneyine tabi tutulurken, diğer numuneler 14 gün süreyle çeşme suyu (ÇS) ve Büyükçekmece sahilinden temin edilen doğal deniz suyu (DS) içerisinde bekletilmiştir. Deney programı ve numune kodları Tablo 1'de verilmiştir.

Deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılacak kompaksiyon parametrelerinin belirlenmesi amacıyla katkısız %50 bentonit–%50 zeolit karışımı üzerinde ASTM D698 standardına uygun olarak Standart Proctor deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri, referans numuneler ile %5 ve %10 yumurta kabuğu katkılı tüm karışımların hazırlanmasında esas alınmıştır. Elde edilen kompaksiyon parametreleri esas alınarak serbest basınç dayanımı numuneleri mini Harvard kompaksiyon kalıbı kullanılarak 38 mm çapında ve 76 mm yüksekliğinde hazırlanmıştır. Numuneler üç tabaka halinde sıkıştırılmış ve her tabakaya 20 darbe uygulanmıştır. Hazırlanan numunelerin doğrudan deney grubunda serbest basınç dayanımı deneyleri kompaksiyon işleminin ardından gerçekleştirilmiş, bekletme grubundaki numuneler ise 14 günlük maruziyet süresinin sonunda ASTM D2166 standardına uygun olarak 0.5 mm/dk yükleme hızıyla deney edilmiştir. Her karışım ve deney koşulu için tek bir numune üzerinde deney yapılmış olup deney tekrarının bulunmaması çalışmanın bir sınırlılığı olarak değerlendirilmelidir. Elde edilen sonuçlar kullanılarak yumurta kabuğu

katkısının ve farklı su ortamlarının bentonit-zeolit karışımlarının mekanik davranışı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Tablo 1. Deneyde kullanılan numuneler

Numune Kodu	Bentonit (%)	Zeolit (%)	Yumurta Kabuğu (%)	Deney Koşulu
R	50	50	0	Doğrudan deney
R-ÇS	50	50	0	14 gün çeşme suyu
R-DS	50	50	0	14 gün deniz suyu
YK5	50	50	5	Doğrudan deney
YK5-ÇS	50	50	5	14 gün çeşme suyu
YK5-DS	50	50	5	14 gün deniz suyu
YK10	50	50	10	Doğrudan deney
YK10-ÇS	50	50	10	14 gün çeşme suyu
YK10-DS	50	50	10	14 gün deniz suyu

2.1. Standart Proctor Deneyi Sonuçları

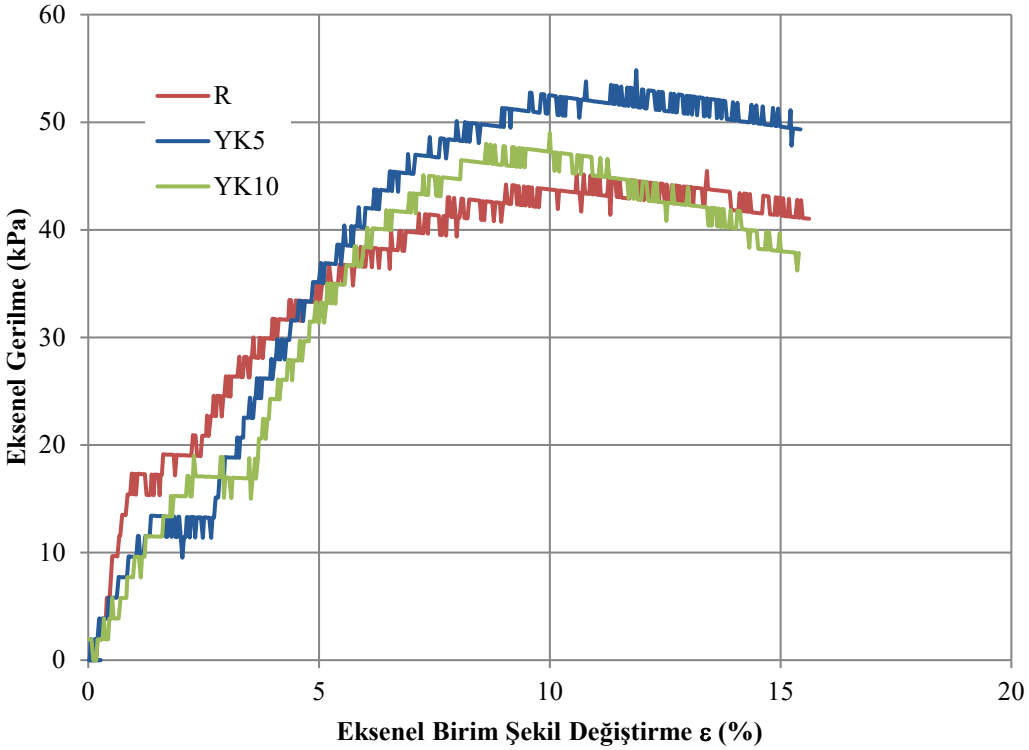
Referans karışım (%50 bentonit-%50 zeolit) üzerinde gerçekleştirilen Standart Proctor deneyi sonucunda optimum su muhtevası yaklaşık %33.5, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise yaklaşık 12.54 kN/m³ olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu kompaksiyon parametreleri, referans numuneler ile %5 ve %10 yumurta kabuğu katkılı tüm serbest basınç dayanımı numunelerinin hazırlanmasında esas alınmıştır.

2.2. Kür Uygulanmayan Numunelerin Serbest Basınç Dayanımı

Şekil 2'de kür uygulanmayan referans (R), %5 yumurta kabuğu katkılı (YK5) ve %10 yumurta kabuğu katkılı (YK10) numunelere ait eksenel gerilme–eksenel birim şekil değiştirme eğrileri verilmiştir. Eğriler incelendiğinde, yumurta kabuğu katkısının bentonit-zeolit karışımının serbest basınç dayanımını olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Referans numunesine kıyasla en yüksek dayanım 54.8 kPa ile YK5 numunesinde elde edilirken, YK10 numunesi 49.0 kPa ile referans numuneye göre daha yüksek, ancak YK5 numunesine göre daha düşük bir dayanım sergilemiştir.

Sonuçlar, yumurta kabuğu katkısının belirli bir orana kadar zemin iskeletini güçlendirdiğini ve daneler arası etkileşimi iyileştirerek serbest basınç dayanımını arttırdığını göstermektedir. Bununla birlikte, katkı oranının %10'a çıkarılması dayanımda ilave bir artış sağlamamış, aksine %5 katkılı numuneye göre daha düşük dayanım değerleri elde edilmiştir. Bu durum, çalışmada kullanılan bentonit-zeolit karışımı için %5 yumurta kabuğu katkısının incelenen katkı oranları içerisinde en yüksek dayanımı sağlayan oran olduğunu göstermektedir.

Gerilme–şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde tüm numunelerde pik dayanım sonrasında ani bir dayanım kaybı meydana gelmediği, dayanımın kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Bu davranış, numunelerin gevrek kırılmadan ziyade sünek bir deformasyon karakteri sergilediğini göstermektedir.



Şekil 2. Kür uygulanmayan numunelere ait eksenel gerilme–eksenel birim şekil değiştirme eğrileri

Kür uygulanmayan numunelerden elde edilen bu sonuçlar, yumurta kabuğu katkısının başlangıç dayanımı üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Katkılı numunelerin deniz suyu ve çeşme suyu ortamlarında bekletilmesi sonrasında meydana gelen dayanım değişimleri ise bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

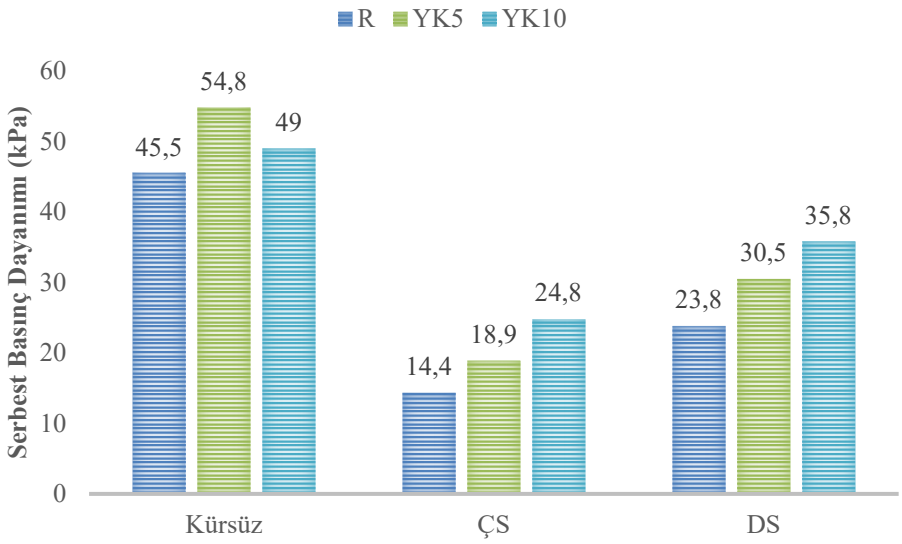
2.3. Kürün Serbest Basınç Dayanımına Etkisi

Şekil 3'te kür uygulanmayan, 14 gün boyunca çeşme suyu (ÇS) ve deniz suyu (DS) içerisinde bekletilen numunelere ait serbest basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Sonuçlar, hem kür ortamının hem de yumurta kabuğu katkı oranının serbest basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Kür uygulanmayan numunelerde en yüksek serbest basınç dayanımı 54.8 kPa ile %5 yumurta kabuğu katkılı numunede (YK5) elde edilmiştir. Referans numunesi 45.5 kPa, %10 yumurta kabuğu katkılı numune (YK10) ise 49.0 kPa dayanım göstermiştir. Bu sonuç, kür uygulanmayan koşullarda %5 yumurta kabuğu katkısının bentonit-zeolit karışımı için incelenen katkı oranları içerisinde en yüksek dayanımı sağlayan oran olduğunu göstermektedir.

Numunelerin 14 gün boyunca tamamen su içerisinde bekletilmesi, tüm karışımlarda serbest basınç dayanımının azalmasına neden olmuştur. Çeşme suyunda bekletilen numunelerde

referans, YK5 ve YK10 karışımlarında sırasıyla 14.4 kPa, 18.9 kPa ve 24.8 kPa dayanım elde edilmiştir. Buna karşılık deniz suyunda bekletilen numunelerde aynı karışımlar için sırasıyla 23.8 kPa, 30.5 kPa ve 35.8 kPa dayanım belirlenmiştir. Buna göre deniz suyunda bekletilen tüm numunelerin serbest basınç dayanımları, çeşme suyunda bekletilen numunelerden daha yüksek bulunmuştur.



Şekil 3. Farklı kür ortamlarının karışımların serbest basınç dayanımına etkisi

Deniz suyu ortamında elde edilen daha yüksek dayanım değerlerinin, deniz suyunda bulunan çözünmüş iyonların bentonitin şişme davranışını saf suya veya düşük iyon konsantrasyonlu suya göre sınırlandırmasıyla ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir. Buna bağlı olarak, deniz suyunda bekletilen numunelerde zemin iskeletinin daha iyi korunduğu ve bu nedenle daha yüksek serbest basınç dayanımı elde edildiği düşünülmektedir. Bununla birlikte, bu mekanizmanın doğrulanabilmesi için mikroyapısal ve kimyasal analizlerin yapılması gerekmektedir.

Ayrıca en yüksek dayanımı sağlayan katkı oranının kür ortamına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Kür uygulanmayan numunelerde en yüksek dayanım %5 yumurta kabuğu katkısında elde edilirken, hem çeşme suyu hem de deniz suyu ortamında bekletilen numunelerde en yüksek dayanım %10 katkılı numunelerde belirlenmiştir. Bu durum, en yüksek dayanımı sağlayan katkı oranının maruz kalınan çevresel koşullara bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir.

Literatürde yumurta kabuğunun büyük oranda kalsiyum karbonattan ($CaCO_3$) oluştuğu ve ince öğütülmüş yumurta kabuğu parçacıklarının zemin boşluklarını doldurarak daha yoğun bir yapı oluşturabildiği bildirilmektedir. Ayrıca $CaCO_3$ bakımından zengin bu katkının daneler arası temasını iyileştirdiği ve buna bağlı olarak serbest basınç dayanımını artırabildiği ifade edilmektedir. Bununla birlikte, katkı oranına bağlı olarak elde edilen dayanım artışının zemin türü, kür koşulları ve kullanılan katkı miktarına göre değişebileceği de vurgulanmaktadır. Bu çalışmada tüm kür koşullarında gözlenen dayanım artışının literatürde belirtilen dolgu etkisi ve dane etkileşiminin iyileşmesiyle ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir (Hasheminezhad vd., 2026).

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada, %50 bentonit–%50 zeolit karışımına farklı oranlarda yumurta kabuğu ilave edilerek hazırlanan numunelerin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi ile çeşme suyu ve deniz suyu ortamında bekletilmesinin mekanik davranış üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Kür uygulanmayan numunelerde yumurta kabuğu katkısı serbest basınç dayanımını artırmış, en yüksek dayanım 54.8 kPa ile %5 yumurta kabuğu katkılı (YK5) numunede elde edilmiştir. Katkı oranının %10'a yükseltilmesi ise ilave bir dayanım artışı sağlamamıştır.

2. Numunelerin 14 gün boyunca su içerisinde bekletilmesi, tüm karışımlarda serbest basınç dayanımının azalmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, deniz suyunda bekletilen numuneler çeşme suyunda bekletilen numunelere göre daha yüksek dayanım değerleri göstermiştir.

3. Çeşme suyu ve deniz suyunda bekletilen numunelerde en yüksek serbest basınç dayanımı %10 yumurta kabuğu katkılı (YK10) numunelerde elde edilmiştir. Bu durum, kür ortamının yumurta kabuğu katkısının performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

4. Çalışma sonuçları, bentonit–zeolit karışımlarının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde atık yumurta kabuğunun sürdürülebilir bir katkı malzemesi olarak değerlendirilebileceğini ve deniz suyu koşullarında mekanik performansın çeşme suyuna kıyasla daha iyi korunabildiğini ortaya koymuştur.

5. Her deney koşulu için tek numune kullanıldığından sonuçlar ön çalışma niteliğindedir ve tekrarlı deneylerle doğrulanmalıdır. Daha uzun maruziyet sürelerinin ve etki mekanizmalarının mikroyapısal ve kimyasal analizlerle incelenmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Firoozi, A.A., Olgun, C.G., Firoozi, A.A. ve Baghini, M.S. (2017), "Fundamentals of Soil Stabilization", International Journal of Geo-Engineering, Vol 8, 26.

Hasheminezhad, A., Yang, B., Alsheyab, M. A., vd. (2026), "State-of-the-art review on mechanisms and microstructural insights of eggshell powder for clay soil stabilization", Next Materials, Vol 11, 101658.

Kaya, A. ve Durukan, S. (2004), "Utilization of Bentonite-Embedded Zeolite as Clay Liner", Applied Clay Science, Vol 25, 83-91.

Yang, B., Yin, Z., Hasheminezhad, A., Alsheyab, M.A., Ceylan, H. ve Kim, S. (2025), "Enhancing Soil Engineering Properties with Eggshell Powder: A Laboratory-Based Approach to Sustainable Road Construction", Journal of Cleaner Production, Vol 505, 145464.