Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

CH Sınıfı Kilin Yüksek Fırın Cürufu ve Nano-SiO_2 ile Stabilizasyonunda Zamana Bağlı Dayanım Gelişimi

Firdevs UYSAL [1,a], **Esra TATLIOĞLU** [1,b], **Resul MUT** [1,c]

[1]*Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Niğde, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0003-0944-0638; [b]**ORCID**: 0000-0002-5396-1361; [c]**ORCID**: 0009-0008-7274-0514*

Makale Bilgileri
Geliş : 01.03.2026
Kabul : 11.08.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1900353

Sorumlu Yazar
Firdevs UYSAL
firdevsuysal@ohu.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Nano-SiO_2
Serbest basınç dayanımı
Yüksek fırın cürufu
Yüksek plastisiteli kil
Zemin stabilizasyonu

***Atıf şekli:** UYSAL, F., TATLIOĞLU, E., MUT R., (2026). CH Sınıfı Kilin Yüksek Fırın Cürufu ve Nano-SiO_2 ile Stabilizasyonunda Zamana Bağlı Dayanım Gelişimi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 593-603.*

ÖZ

Bu çalışma, laboratuvar koşullarında yapay olarak üretilen yüksek plastisiteli kil (CH) zeminin stabilizasyonunda yüksek fırın cürufu (YFC), Nano-SiO_2 (NS) ve bu katkıların birlikte kullanımının (YFC+NS) serbest basınç dayanımı üzerindeki zamana bağlı etkilerini incelemektedir. Bu amaçla yapay zemine %10, %20, %30 ve %40 YFC, tek başına %1.5 NS ve her YFC oranıyla birlikte %1.5 NS ilave edilerek toplam on farklı karışım hazırlanmıştır. Numuneler 0, 7, 30 ve 60 gün süreyle kür edilmiş ve serbest basınç dayanımları belirlenmiştir. Sonuçlar, YFC katkısının tüm oran ve kür sürelerinde dayanımı artırdığını göstermiştir. En yüksek dayanım değeri 60 günlük kür sonunda %40 YFC içeren karışımda elde edilmiş ve aynı kür süresindeki referans numuneye göre yaklaşık %142 oranında artış sağlamıştır. NS tek başına dayanımı artırmasına rağmen etkisi YFC'ye kıyasla daha sınırlı kalmıştır. YFC+NS karışımlarında dayanım gelişimi kür süresi ve katkı oranına bağlı olarak değişmiş, yüksek YFC içeriklerinde NS ilavesinin ilave dayanım kazancı sağlamadığı belirlenmiştir.

Time-Dependent Strength Development of CH Clay Stabilized with Ground Granulated Blast Furnace Slag and Nano-SiO_2

Article Info
Received : 01.03.2026
Accepted : 11.08.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1900353

Corresponding Author
Firdevs UYSAL
firdevsuysal@ohu.edu.tr

Keywords
Ground granulated blast furnace slag
High-plasticity clay
Nano-SiO_2
Soil stabilization
Unconfined compressive strength

***How to cite:** UYSAL, F., TATLIOĞLU, E., MUT R., (2026). Time-Dependent Strength Development of CH Clay Stabilized with Ground Granulated Blast Furnace Slag and Nano-SiO_2. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 593-603.*

ABSTRACT

This study investigates the time-dependent effects of ground granulated blast furnace slag (GGBFS), nano-silica (NS), and their combined use (GGBFS+NS) on the unconfined compressive strength (UCS) of an artificially prepared high-plasticity clay (CH). A total of ten mixtures were prepared by incorporating 10%, 20%, 30%, and 40% GGBFS, 1.5% NS alone, and 1.5% NS combined with each GGBFS content into the artificial soil. The specimens were cured for 0, 7, 30, and 60 days, after which UCS tests were conducted. The results showed that GGBFS significantly improved the UCS at all contents and curing periods. The highest strength was obtained in the mixture containing 40% GGBFS after 60 days of curing, exhibiting an approximately 142% increase compared with the reference specimen at the same curing age. Although NS used alone enhanced the strength of the soil, its contribution was more limited than that of GGBFS. In the GGBFS+NS mixtures, strength development varied depending on curing duration and additive content. However, it was determined that NS did not provide an additional strength gain at high GGBFS contents.

1. GİRİŞ

Yüksek plastisiteli kil (CH) zeminler yüksek boşluk oranları, yetersiz kayma dayanımı özellikleri ve belirgin şişme potansiyelleri nedeniyle inşaat mühendisliği uygulamalarında sorun teşkil edebilir [1]. Bu zeminler hem inşaat aşamasında hem de yapıların hizmet ömrü boyunca taşıma gücü yetersizliği, oturma ve şişme gibi çeşitli sorunlara neden olabilir. Mühendislik açısından dikkat edilmesi gereken bu tür zeminleri iyileştirmek için ön yükleme, kompaksiyon, kimyasal stabilizasyon ve zemin değiştirme gibi çeşitli zemin iyileştirme teknikleri geliştirilmiştir [2-5] Bu tekniklerin seçimi ve uygulanabilirliği büyük ölçüde zemin koşulları ve proje gereksinimlerine bağlıdır [6].

Zemin iyileştirme yöntemlerinden, zemin stabilizasyonu uzun yıllardır kullanılan ve yeni nesil malzemeler ile gelişime açık bir yöntemdir. Yöntem, zemine çimento esaslı bağlayıcı malzemelerin eklenmesiyle zeminin mekanik ve hidrolik özelliklerinin sistematik olarak iyileştirilmesi esasına dayanır. Çoğu zaman uygun maliyetli bir zemin iyileştirme tekniği olan stabilizasyon, çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [7]. Çimento ile zemin stabilizasyonu uzun süredir uygulanan bir yöntemdir. Geçmişten günümüze yürütülen çok sayıda çalışmada, zemin özelliklerini iyileştirmede çimentonun etkinliği araştırılmıştır [8-12] Yumuşak zeminlerin lif ve çimento katkılarıyla stabilizasyonuna yönelik çalışmalar, çimento ilavesinin karışım mukavemetini artırırken davranışı gevrekleştirdiğini, lif kullanımının ise mikro çatlakları sınırlayarak sünekliği artırdığını göstermektedir [13,14]. Çimentoya benzer şekilde kireç de zemin stabilizasyonunda mekanik özelliklerin iyileştirmesi amacıyla kullanılmaktadır [15-17]. Bununla birlikte, çimento ve kireç gibi kalsiyum bazlı stabilizatörlerin kullanımı, yüksek enerji gereksinimi ve CO_2 emisyonları nedeniyle ekonomik ve çevresel açıdan dezavantajlar oluşturmaktadır [18]. Bu durum, çimento ve kireç gibi geleneksel bağlayıcıların karbon ayak izinin azaltılmasını ve çevre dostu alternatif stabilizatörlerin kullanımını önemli hale getirmiştir [19]. Bu kapsamda çeşitli endüstriyel yan ürünler ve atıklar sürdürülebilir zemin iyileştirme uygulamaları açısından çevre dostu bağlayıcılar olarak değerlendirilmektedir. Demir üretiminin yan ürünü olan yüksek fırın cürufu (YFC), içeriğindeki silika ve alümina nedeniyle puzolanik özelliklere sahiptir [20]. Puzolanik malzemeler alkali bir ortamda çimento benzeri yapılar oluştururlar. Bu nedenle, YFC zemin stabilizasyonunda çimento ikamesi olarak kullanılabilir [21-24]. Son yıllarda literatürde, YFC'nin zemin stabilizasyonunda puzolanik malzeme olarak etkisini araştıran çalışmalar bulunmaktadır [25,26].

Günümüzde, nanomalzemeler bir çok alanda olduğu gibi inşaat mühendisliğinin çeşitli alanlarında da önem kazanmıştır. Nano katkıların zemin stabilizasyonunda kullanımı, özellikle mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde dikkat çekmektedir [27]. Nano-SiO_2 (NS), nano katkılar arasında en yaygın kullanılanlardan biri olup, zemine ilavesiyle gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucunda zeminin bileşiminde ve mikro yapısında önemli değişikliklere yol açmaktadır [28].

Zemin stabilizasyonunda kullanılan bağlayıcılar tek başına kullanılabileceği gibi farklı bağlacılar ile birlikte de uygulanabilir [29,30]. Bu tür kullanımlarda katkı malzemelerinin birlikte oluşturduğu etkinin her bir malzemenin ayrı ayrı kullanımına kıyasla daha fazla etki sağlayıp sağlamadığı durumu araştırılmaktadır. Bu çalışmada, NS'nin YFC ile birlikte kullanılmasıyla malzemelerin olası etkileşimlerinin sağlanması ve daha yoğun bir mikro yapı sayesinde stabilize zeminin zamana bağlı dayanım performansının arttırılması hedeflenmiştir. NS ve YFC katkılarının zemin stabilizasyonundaki bireysel etkileri literatürde yaygın olarak araştırılmış olmasına rağmen, bu katkıların yüksek plastisiteli killerde birlikte kullanımının zamana bağlı dayanım gelişimi üzerindeki etkileri henüz yeterince açıklığa kavuşturulamamış olup, bu durum konuya ilişkin önemli bir araştırma boşluğunun varlığına işaret etmektedir. Literatürde zemin stabilizasyonuna yönelik yapılan çalışmalar incelendiğinde, YFC'nin genellikle kireç, uçucu kül ve zeytin külü gibi katkı malzemeleriyle birlikte kullanıldığı görülmektedir [31-33] Buna karşılık, yüksek reaktiviteye sahip yeni nesil bir nano katkı malzemesi olan NS'nin YFC ile birlikte kullanımını inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu konuda gerçekleştirilen az sayıdaki çalışmadan biri olan Uysal ve Yılmaz [34], CH sınıfı killerin YFC ve NS ile stabilizasyonunda konsolidasyon davranışı, sıkışabilirlik ve şişme özelliklerini incelemiş ve hibrit katkı kullanımının hacimsel stabiliteyi iyileştirdiğini göstermiştir. Bununla birlikte, literatürdeki çalışmaların çoğunlukla 28 günlük kür süreleriyle sınırlı kaldığı ve benzer stabilizasyon sistemlerinde uzun dönem mukavemet gelişimi ile dayanım kazanım mekanizmalarına ilişkin bilgilerin halen yetersiz olduğu görülmektedir [35]. Ayrıca, literatürdeki araştırmalar ağırlıklı olarak düşük plastisiteli killer veya killi kum zeminler üzerine yoğunlaşmış olup en problemli zemin gruplarından biri olan CH sınıfı killerin stabilizasyonu ise nispeten daha az araştırılmıştır. Bu nedenle, yüksek plastisiteli CH sınıfı killerde YFC ve NS katkılarının tekil ve

birlikte kullanımının farklı kür sürelerindeki dayanım performansının araştırılması, mevcut literatürdeki bilgi eksikliğinin giderilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada, laboratuvar ortamında yapay olarak oluşturulan yüksek plastisiteli kil zeminde YFC, NS ve YFC+NS katkılarının serbest basınç dayanımı üzerindeki zamana bağlı etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Yapay zemine (YZ) %10, %20, %30 ve %40 oranlarında YFC, yalnızca NS ve ayrıca tüm YFC oranları ile birlikte %1.5 NS ilave edilerek toplam on farklı karışım hazırlanmıştır. Tüm karışımlar 0, 7, 30 ve 60 günlük küre bırakılarak kür sonrasındaki dayanımları tespit edilmiştir. YFC ve NS katkılarının ayrı ayrı kullanılması durumunda tüm karışımlar ve kür sürelerinde dayanımların belirgin şekilde arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, YFC ve NS'nin birlikte kullanımında, incelenen tüm karışım oranları ve kür süreleri boyunca elde edilen ek dayanım kazancının sınırlı kaldığı belirlenmiştir.

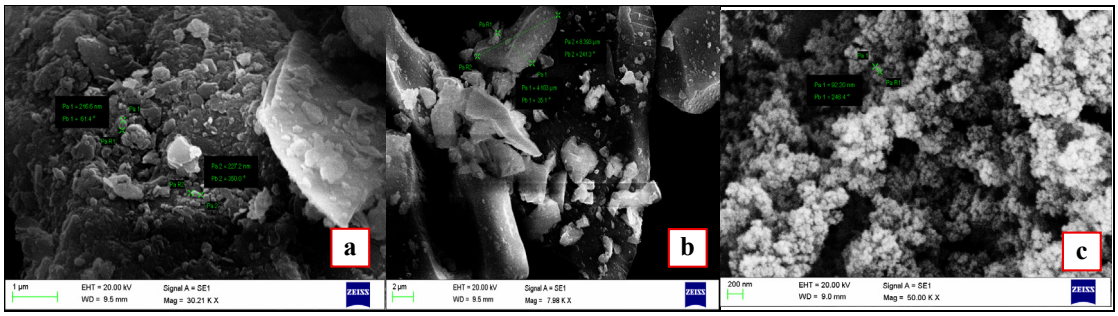
2. MALZEME ÖZELLİKLERİ VE YÖNTEM

2.1. Malzeme Özellikleri

Deneysel çalışmalarda homojen ve tutarlı özelliklerde numune elde etmek amacıyla, laboratuvar koşullarında USCS'ye göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılan yapay zemin (YZ) oluşturulmuştur. Bu amaçla ticari olarak temin edilen Na-bentonit (%25) ve kaolen (%75) homojen biçimde karıştırılmıştır. Bu karıştırma oranları istenen özelliklere sahip zemini oluşturmak için çeşitli denemeler sonucunda belirlenmiştir. Yapay zemin kullanımı, doğal zeminlerde görülebilen mineralojik yapı, organik madde içeriği ve gözenek suyu kimyasından kaynaklanan değişkenlikleri en aza indirerek katkı malzemelerinin etkilerinin kontrollü ve tekrarlanabilir koşullar altında değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. TS1900-1 [36]' e göre YZ'nin plastik limiti %24.11, likit limiti %106.5 olarak tespit edilmiştir. Bu değerlere göre plastisite indisi değeri 82.39 olarak hesaplanmıştır. Çalışmada, yüksek özgül yüzeyi ve mikro yapısal iyileştirme etkisinden faydalanmak için NS stabilizatör olarak tek başına ve YFC ile birlikte kullanılmıştır. YFC, İskenderun'da bulunan Çimsa Beton Tesislerinden temin edilmiştir (Şekil 1). YZ, YFC ve NS'nin deneyler öncesindeki mikro yapısını, dane görüntüsünü ve boşluk yapısını tespit etmek için SEM (Taramalı Elektron mikroskobu) analizleri yapılmıştır (Şekil 2). Malzemelerin birim hacim ağırlıklarının tespiti için ise piknometre deneyleri yapılarak YZ ve YFC'nin birim hacim ağırlıkları sırası ile 25.18 kN/m^3 ve 27.96 kN/m^3 olarak tespit edilmiştir.

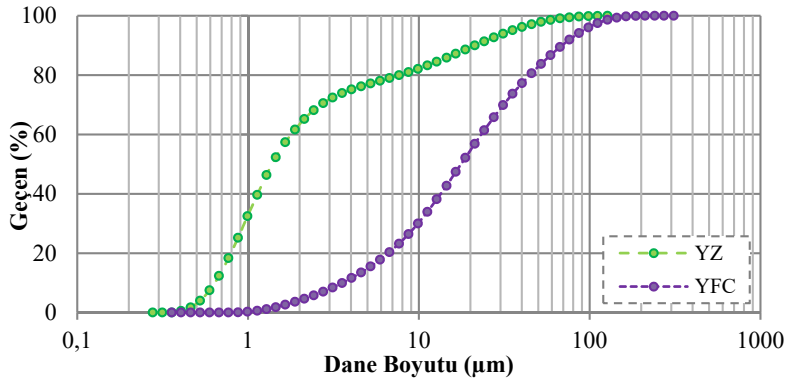


Şekil 1. YZ bileşenleri ve YFC'nin görüntüsü

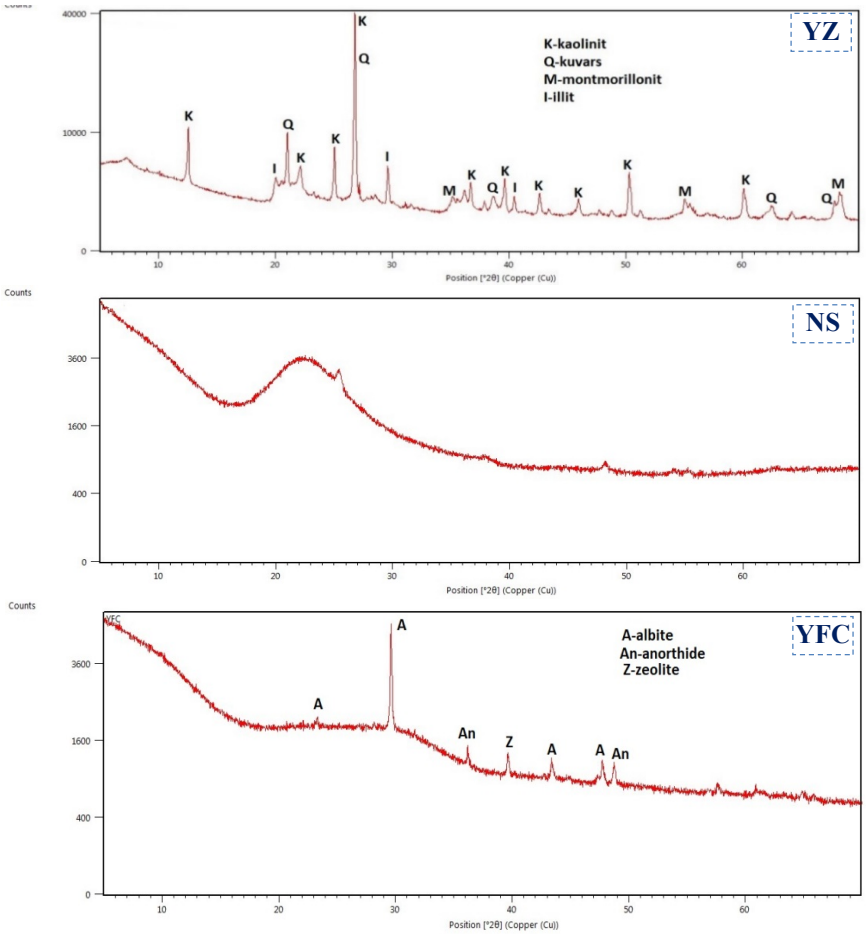


Şekil 2. YZ (a), YFC (b) ve NS (c)'nin deney öncesi SEM görüntüleri

YZ ve YFC'nin dane dağılımını belirlemek için lazer kırınım, malzemelerin kimyasal bileşimini tespit etmek için ise XRF (X-Ray Fluorescence) analizleri yapılmıştır (Şekil 3, Çizelge 1). YZ, YFC ve NS'nin deney öncesindeki kristal faz bileşenleri ve mineralojik özelliklerini belirlemek amacıyla XRD (X ışınları kırınımı) analizleri yapılmıştır (Şekil 4). XRD analizi sonucunda YZ'nin kaolenit (K), kuvars (Q), montmorillonit (M) ve illit (I) minerallerince yoğun içeriğe sahip olduğu görülmüş ve bu mineral bileşimlerinin yüksek plastisiteli kil özelliklerine sahip olduğu deneyler yapılmadan önce doğrulanmıştır. NS deseni tipik bir form vererek geniş amorf bir kubbe göstermiş ve kristal faz piklerini çok az sayıda içermiştir. YFC'de ise albite (A), anortit (An) ve zeolit türü fazların (Z) az belirgin pikleri izlenmektedir. XRD grafiği, YFC'nin geniş bir amorf kubbe sergileyerek önemli ölçüde cam fazı içerdiğini ve puzolanik reaksiyonlar için reaktivitesinin yüksek olduğunu vermektedir. Bu sonuçlar, YZ'nin zayıf zemini temsil etmesi için istenen özelliklere sahip olduğunu, YFC ile NS'nin de beklenen bağlayıcı reaksiyonlar için uygun fazlara sahip olduğunu vermektedir.



Şekil 3. YZ ve YFC'nin dane dağılım eğrileri



Şekil 4. YZ, NS ve YFC'nin XRD sonuçları

Çizelge 1. YZ, YZ bileşenleri ve YFC'nin kimyasal içeriği

İçerik	YZ (%)	Na-bentonit (%)	Kaolen (%)	YFC (%)
SiO_2	77.307	64.767	80.503	36.820
Al_2O_3	15.768	18.650	15.589	13.301
Fe_2O_3	1.530	4.759	0.685	0.740
CaO	2.565	4.202	1.826	38.834
MgO	0.919	2.350	0.311	5.636
K_2O	0.523	1.496	0.390	0.765
TiO_2	0.380	0.473	0.302	0.761
SO_3	0.112	0.063	0.134	0.586
Mn_3O_4	0.052	0.136	0.005	1.870
Na_2O	0.560	2.725	0.058	-
BaO	0.026	0.081	0.076	0.001
P_2O_5	0.220	0.153	0.090	0.009
SrO	0.038	0.104	0.023	0.018

2.2. Yöntem

Bu çalışmada, yüksek plastisiteli bir zeminde YFC, NS ve YFC+NS katkılarının dayanımdaki zamana bağlı etkileri araştırılmıştır. YFC katkılı (%10-40), NS katkılı (%1.5) ve YFC+NS katkılı olmak üzere on farklı karışım oluşturulmuştur (Çizelge 2). NS katkı oranı, literatürde yüksek plastisiteli zeminlerin stabilizasyonunda kullanılan ve etkili sonuçlar verdiği bildirilen %1.5 olarak seçilmiştir [37]. Oluşturulan karışımlardaki oranlar ağırlıkça yüzde değerlerine karşılık gelmekte olup, toplam karışım YZ ile %100 olacak şekilde düzenlenmiştir. Deneyler öncesinde deneylerde kullanılan malzemeler için SEM, XRD, XRF, Piknometre ve lazer kırınım analizleri yapılmıştır. Hazırlanan karışımlara ASTM D698-78A [38] standardına uygun olarak standart proktor deneyleri yapılmış ve karışımların optimum su muhtevası (w_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) değerleri tespit edilmiştir (Çizelge 3). Bu değerler, çalışmanın esas deneyi olan serbest basınç deney numuneleri hazırlamak için kullanılmıştır.

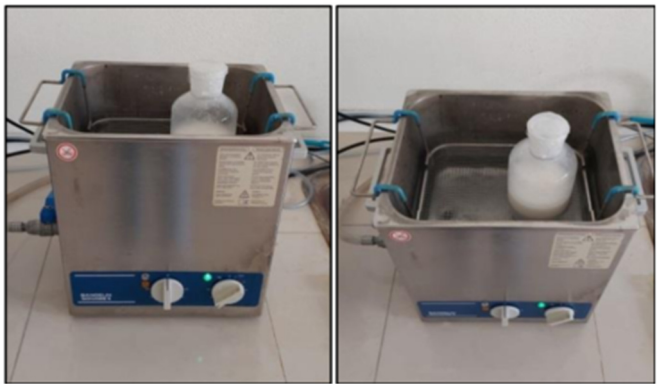
Çizelge 2. Deney karışımları ve kür süreleri

Karışım no	YFC (%)	NS (%)	Kür süresi (gün)
1	-	-	0, 7, 30, 60
2	10	-	0, 7, 30, 60
3	20	-	0, 7, 30, 60
4	30	-	0, 7, 30, 60
5	40	-	0, 7, 30, 60
6	-	1.5	0, 7, 30, 60
7	10	1.5	0, 7, 30, 60
8	20	1.5	0, 7, 30, 60
9	30	1.5	0, 7, 30, 60
10	40	1.5	0, 7, 30, 60

Serbest basınç deney numuneleri optimum su muhtevasında hazırlanarak maksimum yoğunlukta olacak şekilde hazırlanmıştır. Numuneler bu amaç için geliştirilmiş silindirik çelik numune hazırlama kalıplarında oluşturulmuştur (Şekil 5). NS'nin doğrudan zemine katılması durumunda zemin içinde homojen dağılması zorlaşacağından, NS'nin su içinde çözelti haline getirilerek zemine katılması tercih edilmiştir. Bu amaçla çözeltinin homojenliği ultrasonik banyo kullanarak sağlanmıştır (Şekil 6). Numunelerin Çizelge 2'de verilen 0, 7, 30 ve 60 günlük kür sürelerinde su kaybını önlemek ve sabit kür koşullarını sağlamak amacıyla numuneler kür süresince desikatörde bekletilmiştir (Şekil 7).



Şekil 5. Silindirik numune hazırlama aşamaları

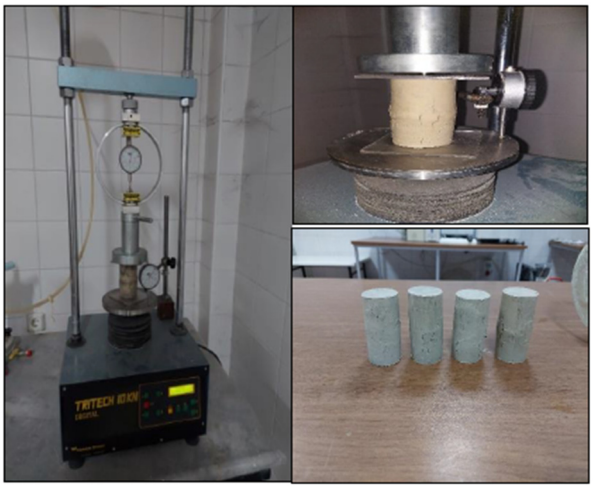


Şekil 6. NS süspansiyonunun ultrasonik banyoda oluşturulması



Şekil 7. Kür sürecince numunelerin saklandığı desikatör

Çizelge 2'de verilen karışımlar için ASTM D2166 [39] standardına uygun olarak serbest basınç deneyleri yapılmıştır (Şekil 8). Her bir karışım için dört adet deney numunesi hazırlanmıştır. Bu numunelerin 0, 7, 30 ve 60 günlük kür sonrası performansları değerlendirilmiştir. Bu kapsamda yapılan deneyler kontrollü olarak yürütülmüştür.



Şekil 8. Serbest basınç deney düzeneği ve numune görünümü

2.3. Ön Araştırmalar

Standart proktor deneyleri, serbest basınç deney numunelerini hazırlamak amacıyla yapıldığından öncelikle YFC ve NS'nin sıkışmaya etkisi değerlendirilmiştir (Çizelge 3). Elde edilen sonuçlara göre, YZ'ye artan oranlarda YFC eklendiği zaman w_{opt} değerleri düşerken, γ_{kmax} değerleri artmıştır. Bu durum, dane boyutu YZ'ye göre daha büyük olan YFC'nin zeminin su alma yeteneğini azaltması ve YFC'nin YZ'ye göre daha yüksek yoğunluğa sahip olması nedeniyle karışımın yoğunluğunun artırması şeklinde yorumlanabilir. YZ'ye %1.5 oranında NS eklendiği zaman NS'nin yüksek özgül yüzeyi nedeniyle zeminin ihtiyaç duyduğu su artarak w_{opt} değerleri artmıştır. Ayrıca, YZ'ye göre düşük yoğunluğa sahip NS, γ_{kmax} değerlerinin azalmasına neden olmuştur. YFC ve NS'nin birlikte kullanıldığı karışımlarda, NS'nin artan su ihtiyacı ve düşük yoğunluk etkisi ile YFC'nin sıkışmayı arttırıcı etkileri yalnızca YFC kullanılan veya NS içeren karışımlara göre birim hacim ağırlık değerlerinin orta düzeyde kalmasına neden olmuştur.

Çizelge 3. Deney karışımlarının standart proktor deney sonuçları

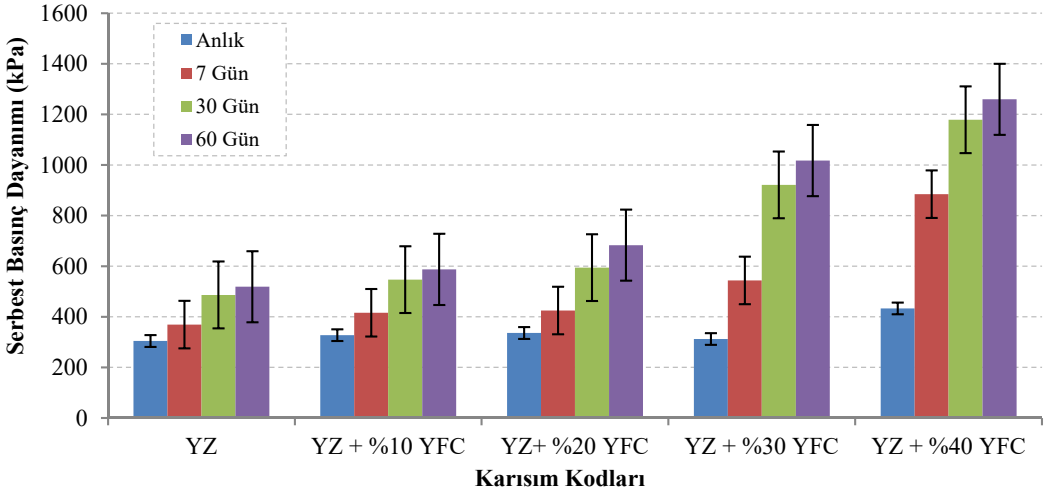
Karışım no	w_{opt} (%)	γ_{kmax} (kN/m^3)
1	23.78	15.79
2	22.62	15.89
3	22.26	15.99
4	21.44	16.68
5	20.80	16.78
6	26.38	14.96
7	25.72	15.22
8	25.02	15.37
9	24.07	15.78
10	23.81	15.91

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

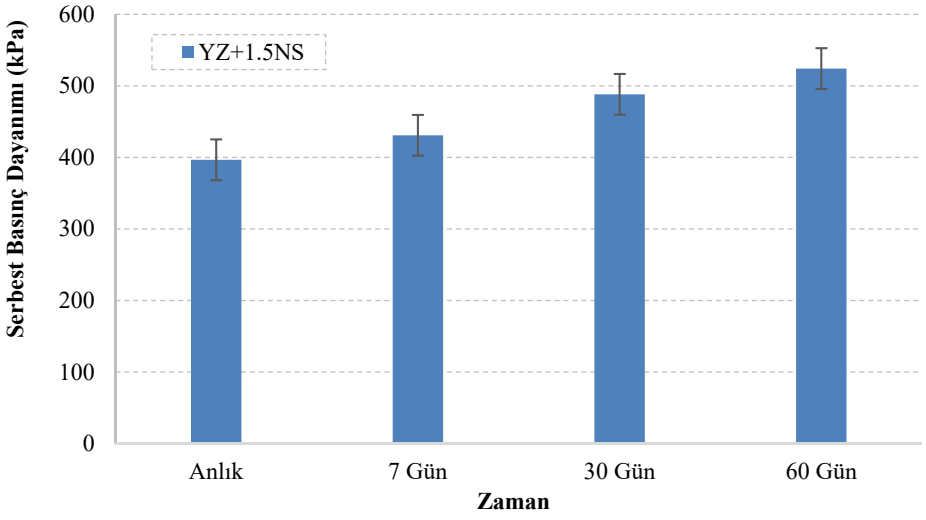
Deneysel programın başlangıcında, referans numune (YZ) için herhangi bir katkı ilavesi yapılmadan anlık dayanım değeri 304.36kPa olarak tespit edilmiştir. Deneylerin ilk serisinde YZ'ye %10, %20, %30 ve %40 oranlarında YFC eklenerek zamana bağlı dayanım değerleri tespit edilmiştir (Şekil 9). Her bir YFC oranının zamana bağlı etkisi incelendiğinde, kür süresi arttıkça dayanımın da arttığı görülmüştür. Özellikle 30 günlük kür ile dayanımdaki artış belirgindir. YFC oranları ve kür sürelerine göre en iyi performans 60 günlük kür sonrasında %40YFC'de görülmüştür. 60 günlük kür sonunda %40 YFC katkılı numunede yaklaşık 1260 kPa dayanım elde edilmiş olup, bu değer referans numunenin anlık dayanımına göre yaklaşık %314'lük bir artışa karşılık gelmektedir.

İkinci seri deneylerde YZ'ye sadece %1.5NS eklenerek zamana bağlı dayanım performansları araştırılmıştır (Şekil 10). Elde edilen sonuçlara göre %1.5NS oranında dayanımın zamana bağlı arttığı tespit edilmiştir. 60 günlük kür sonunda dayanım yaklaşık 525 kPa'ya ulaşmış ve referans numunenin anlık dayanımına göre

yaklaşık %73 oranında artış göstermiştir. Elde edilen sonuçlar sadece YFC katkısı ile elde edilen deneyler ile karşılaştırıldığında, özellikle uzun kürlerde (30 ve 60 gün) NS katkısının görece daha az etkili olduğu görülmüştür. Ancak, referans numuneye göre az miktarda NS katkısının dayanımda artışa neden olduğu belirlenmiştir.



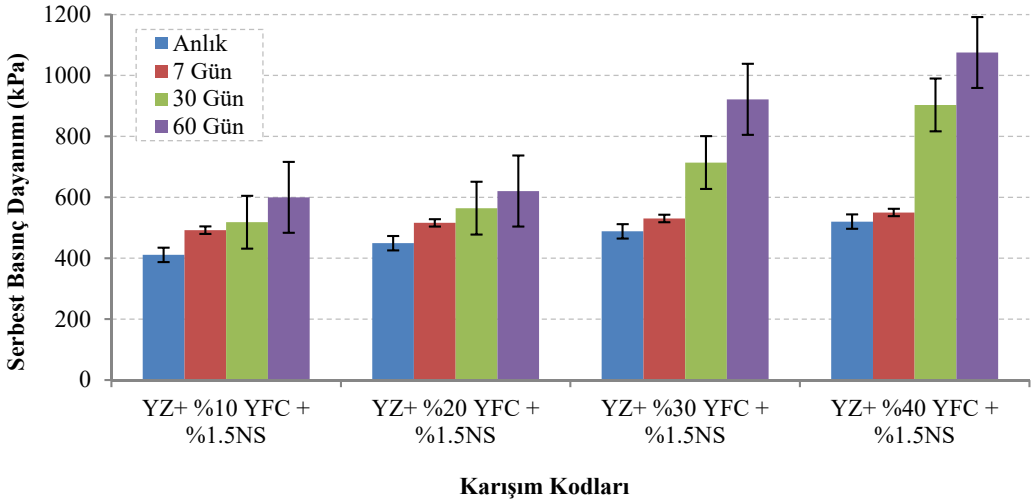
Şekil 9. Farklı YFC oranları ile dayanımın zamana bağlı değişimi



Şekil 10. %1.5NS ile dayanımın zamana bağlı değişimi

Son seri deneylerde %10-%40YFC oranları %1.5 NS katkısı ile birlikte kullanılarak dayanım değerlerinin 0, 7, 30 ve 60 günlük kürleri sonrasındaki değişimi değerlendirilmiştir (Şekil 11). Tüm karışım oranlarında zamana bağlı dayanımın arttığı görülmüştür. Anlık ve 7 günlük dayanım değerlerinde artış sınırlı iken, 30 ve 60 günlük değerde belirgin bir artış görülmektedir. Bu durum zeminde gerçekleşen reaksiyonların zamana bağlı olarak ilerlediğini göstermektedir. YFC+NS karışımları içerisinde en yüksek dayanım değeri 60 günlük kür sonunda %40YFC+%1.5NS karışımında yaklaşık 1075 kPa olarak elde edilmiş olup, bu değer referans numunenin anlık dayanımına göre yaklaşık %253'lük bir artışa karşılık gelmektedir. YFC ile NS'nin birlikte kullanımı ile sadece YFC kullanılan karışımların performansları karşılaştırıldığında %1.5NS katkısının tüm oranlar ve kürlerde dayanımı arttığı söylenemez. Düşük ve orta YFC oranlarında (%10-30), erken ve orta yaşlarda (0-30gün) NS içeren karışımların çoğu benzer ya da nispeten daha fazla dayanım sergilemiştir. Ancak %40 YFC içeriğinde ileri yaşlarda (60gün) NS ilavesi dayanımın düşmesine neden olmuştur. Bu durumun, NS'nin yüksek özgül yüzey alanına bağlı olarak karışımın su gereksinimini artırması ve bunun sonucunda işlenebilirlik ile kompaksiyon verimliliğinin değişmesiyle ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, hem YFC'nin hem de NS'nin dayanım gelişimine katkı sağladığı belirlenmiştir. Ancak iki malzemenin birlikte kullanımının tüm oran ve kür sürelerinde ek bir dayanım artışı sağlamadığı, etkinin belirli karışım oranları ve kür koşullarında daha belirgin hale geldiği görülmüştür. YFC dayanım artışında baskın bir rol oynarken, NS katkısının etkisi oran ve kür süresine bağlı olarak değişmektedir. Tüm deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde optimum karışımın %40YFC olduğu, bu karışımın hem en yüksek dayanım değerini sağlaması hem de YFC+NS karışımlarına kıyasla daha yüksek performans göstermesi nedeniyle en etkili stabilizasyon alternatifi olduğu belirlenmiştir.



Şekil 11. Farklı YFC oranları ve %1.5NS ile dayanımın zamana bağlı değişimi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yapay olarak oluşturulan CH sınıfı kil zemine dört farklı oranda (%10-40) YFC, %1.5 oranında NS ve tüm YFC oranları ile birlikte %1.5NS katkıları eklenerek serbest basınç dayanımının 0, 7, 30 ve 60 günlük kür süresi sonundaki değişimi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre YFC ve NS katkılarının tüm kür sürelerinde dayanımın arttırılmasına olumlu katkı sağladığı görülmüştür. Çalışma sonunda ulaşılan başlıca bulgular aşağıda özetlenmektedir.

- YFC, tüm oran ve kür sürelerinde serbest basınç dayanımını artırmıştır. Bu artış özellikle %30 ve %40 YFC içeren karışımların 30 ve 60 günlük dayanım artışında daha belirgindir. En yüksek dayanım değeri 60 günlük kür sonunda %40 YFC içeren karışımda elde edilmiş ve referans numunenin anlık dayanımına göre yaklaşık %314 oranında artış sağlamıştır. Bu durum YFC etkili bağlayıcıların zamanla daha etkili olduğunu göstermektedir.
- Yalnızca NS içeren karışımlarda ölçülen dayanım değerlerinin referans zemine kıyasla artmış olduğu, ancak bu artışın YFC katkısına göre nispeten daha sınırlı kaldığı belirlenmiştir. %1.5 NS katkılı numunelerde 60 günlük kür sonunda dayanım yaklaşık %73 oranında artmıştır.
- YFC ve NS'nin birlikte kullanıldığı karışımlarda dayanım gelişimi oran ve kür süresine bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Bazı karışım oranlarında ek dayanım artışı gözlenmiş olmakla birlikte, özellikle yüksek YFC içeriklerinde NS katkısının ek bir dayanım kazancı sağlamadığı durumlar tespit edilmiştir. YFC+NS karışımları içerisinde en yüksek dayanım değeri 60 günlük kür sonunda %40YFC+%1.5NS karışımında elde edilmiş ve referans numunenin anlık dayanımına göre yaklaşık %253 oranında artış sağlamıştır.
- NS katkısının sınırlı kaldığı durumların, NS'nin yüksek özgül yüzey alanına bağlı olarak karışımın su gereksinimini artırması ve kompaksiyon verimliliğini etkileyebilmesi ile ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir.
- Kür süresinin artması ile tüm karışımlarda dayanım artışı sağlanmıştır. En yüksek dayanım değerleri 60 günlük kür sonunda elde edilmiştir. Bu durum, reaksiyon ürünlerinin zamanla geliştiğini ve matris yapısının daha kompakt hale geldiğini göstermektedir.

Sonuçlar, yüksek plastisiteli kil zeminlerin stabilizasyonunda en uygun katkı oranının %40 YFC olduğunu ortaya koymuştur.

5. KAYNAKLAR

1. Matajinimvar, S., Choobbasti, A.J. & Soleimani Kutanaei, S. (2025). The effect of construction moisture content on the mechanical, shear and environmental characteristics of clay stabilized with cement and CS: A micro and macro study. *Case Studies in Construction Materials, 22*, e04818.

2. Barman, D., Dash, S.K. (2022). Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 14*, 1319-1342.

3. Furlan, A.P., Razakamanantsoa, A., Ranaivomanana, H., Levacher, D. & Katsumi, T. (2018). Shear strength performance of marine sediments stabilized using cement, lime and fly ash. *Construction and Building Materials, 184*, 454-463.

4. Li, J., Yang, K., Wang, Y., Chen, R. & Chen, Y. (2023). Centrifuge modeling of seismic response of slope on partially replaced soft soil ground. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 165*, 107669.

5. Morales, L., Romero, E., Jommi, C., Garzón, E. & Giménez, A. (2015). Feasibility of a soft biological improvement of natural soils used in compacted linear earth construction. *Acta Geotechnica, 10*, 157-171.

6. Liu, C., Zhang, Q., Zhao, C., Deng, L. & Fang, Q. (2023). Assessment of strength development of soil stabilized with cement and nano SiO_2. *Construction and Building Materials, 409*, 133889.

7. Li, N., Zhu, Q., Wang, W., Song, F., An, D. & Yan, H. (2019). Compression characteristics and microscopic mechanism of coastal soil modified with cement and fly ash. *Materials, 12*, 3182.

8. Horpibulsuk, S., Bergado, D.T. & Lorenzo, G.A. (2004). Compressibility of cement-admixed clays at high water content. *Géotechnique, 54*, 151-154.

9. Horpibulsuk, S., Miura, N. & Bergado, D.T. (2004). Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130*, 1096-1105.

10. Chew, S.H., Kamruzzaman, A.H.M. & Lee, F.H. (2004). Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130*, 696-706.

11. Moses, G.G. & Rao, S.N. (2009). Strength behavior of cemented marine clay subjected to storm type loading. *Marine Georesources and Geotechnology, 27*, 1-16.

12. Xiao, H.W. & Lee, F.H. (2008). Curing time effect on behavior of cement treated marine clay. *World Academy of Science, Engineering and Technology, 43*, 144-151.

13. Consoli, N.C., Prietto, P.D.M. & Ulbrich, L.A. (1998). Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124*, 1211-1214.

14. Liu, C. & Starcher, R.D. (2012). Effects of curing conditions on unconfined compressive strength of cement- and cement-fiber-improved soft soils. *Journal of Materials in Civil Engineering, 25*, 1134-1141.

15. Afrin, H. (2017). A review on different types soil stabilization techniques. *International Journal of Transportation Engineering and Technology, 3*, 19-24.

16. Pongsivasathit, S., Horpibulsuk, S. & Piyaphipat, S. (2019). Assessment of mechanical properties of cement stabilized soils. *Case Studies in Construction Materials, 11*, e00301.

17. Bağrıaçık, B. (2017). Ulaşım yapıları temel/alt temel zeminlerinin kireçle stabilizasyonu. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32*(1), 39-48.

18. Manaviparast, H., Cristelo, N., Pereira, E. & Miranda, T. (2025). A comprehensive review on clay soil stabilization using rice husk ash and lime sludge. *Applied Sciences, 15*(5), 2376.

19. Gupta, S. & Kumar, S. (2024). Mechanical and microstructural analysis of soft kaolin clay stabilized by GGBS and dolomite-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 421.

20. Sun, Z., Chen, W.B., Zhao, R.D., Shen, P., Yin, J.H. & Chen, Y.G. (2023). Effect of seawater on solidification/stabilisation treatment of marine soft soil slurry by lime-activated ISSA and GGBS. *Engineering Geology, 323*, 107216.

21. Taslimi Paein Afrakoti, M., Janalizadeh Choobbasti, A., Ghadakpour, M. & Soleimani Kutanaei, S. (2020). Investigation of the effect of the coal wastes on the mechanical properties of the cement-treated sandy soil. *Construction and Building Materials, 239*, 117848.

22. Kutanaei, S.S., Afrakoti, M.T.P. & Choobbasti, A.J. (2021). Effect of coal waste on grain failure of cement-stabilized sand due to compaction. *Arabian Journal of Geosciences*, 14.

23. Yoobanpot, N. & Jamsawang, P. (2014). Effect of cement replacement by rice husk ash on soft soil stabilization. *Kasetsart Journal* (*Natural Science), 48*(2), 323-332.

24. Laguna-Torres, C.A., González-López, J.R., Guerra-Cossío, M., Guerrero-Baca, L.F., Chávez-Guerrero, L., Figueroa-Torres, M.Z. & Zaldívar-Cadena, A.A. (2024). Effect of physical, chemical, and mineralogical properties for selection of soils stabilized by alkaline activation of a natural pozzolan for earth construction techniques such as compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 419.

25. Mohan, N.M., Reddy, G.S., Jyothirmayee, S., Reddy, B.L.N., Reddy, N.M. & Rafi, V. (2026). Investigation of the mechanical and microstructural properties of black cotton soil stabilized with industrial wastes. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 35*, 101756.

26. Soğancı, A.S., Yenginar, Y. & Orman, A. (2023). Geotechnical properties of clayey soils stabilized with marble dust and granulated blast furnace slag. *KSCE Journal of Civil Engineering, 27*, 4622-4634.

27. Kulkarni, P.P. & Mandal, J.N. (2022). Strength evaluation of soil stabilized with nano silica-cement mixes as road construction material. *Construction and Building Materials, 314*, 125363.

28. Kannan, G. & Sujatha, E.R. (2022). A review on the choice of nano-silica as soil stabilizer. *Silicon, 14*, 6477-6492.

29. Şengül, T. ve Vitoşoğlu, Y. (2023). *Geoteknik mühendisliğinde yenilikçi araştırmalar.* Özgür Yayınları, Gaziantep.

30. Diab, A.S., Allam, A.A., Rudayni, H.A., Abdelfadil, K.M., Arman, H., Al Zoubi, W. & Abukhadra, M.R. (2026). Clay nanostructures in geotechnical engineering: A critical review of mechanisms, performance, and sustainable soil stabilization. *Materials Today Sustainability*, 101284.

31. Bilici, H., Okur, D. V., Türköz, M. ve Savaş, H. (2020). Kil zeminin dayanımı üzerinde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılarının etkisi ve karşılaştırmalı analizi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9*(2), 910-919.

32. Wan, Y., Liu, W., Liu, X., Mai, Q., Li, H., Zhao, P., Zhang, J. & Xu, S. (2026). Activation methods and performance of steel slag–granulated blast furnace slag cementitious materials: A review. *Case Studies in Construction Materials*, e05840.

33. Uysal, F., Yılmaz, V. ve Topçu, H.M. (2020). Farklı atık malzemeler ile stabilize edilmiş ince daneli zeminin mühendislik özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *35*(1), 19-26.

34. Uysal, F. & Yılmaz, V. (2026). Synergistic effects of ground granulated blast furnace slag and nano-silica on the consolidation, compressibility and microstructural behavior of high plasticity clay. *Scientific Reports, 16*, 6548.

35. Yeşiltepe, Ö. (2026). Kumlu zemin stabilizasyonunda zeytin külü ve yüksek fırın cürufu kullanımı: Serbest basınç dayanımının deneysel ve makine öğrenmesi ile tahmini. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *16*, 1-9.

36. TS 1900-1. (2006). *İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri – Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini.* Türk Standartları Enstitüsü.

37. Ai, X., Luo, F., Ma, W., Qi, Y. & Zhu, Z. (2025). The study on the dynamic deformation characteristics of loess reinforced by nano-silica based on shakedown theory. *Construction and Building Materials*, *458*, 139546.

38. ASTM D698-78A. (2000). *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort* (12 400 Ft-Lbf/Ft³ 600 KN-m/M³).

39. ASTM D2166. (2016). *Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil.* ASTM International, West Conshohocken.