



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN  
ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ZEMİNLERİN C SINIFI UÇUCU KÜL, NANO  
SİLİKA VE KIRMIZI ÇAMUR İLE  
İYİLEŞTİRİLMESİ

YAHYA ALABİDO

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim -2025  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır

## TEZ KABUL VE ONAYI

YAHYA ALABIDO tarafından hazırlanan “ZEMİNLERİN C SINIFI UÇUCU KÜL, NANO SİLİKA VE KIRMIZI ÇAMUR İLE İYİLEŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması 03/10/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Dr. Öğretim Üyesi Esra URAY

#### Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Yavuz YENGİNAR

#### Üye

Prof. Dr. Ali Sinan SOĞANCI

### İmza

.....

.....

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun 12/09/2025 gün ve 35/44 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY  
FBE Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

YAHYA ALABIDO

Tarih: 13/10/2025

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## ZEMİNLERİN C SINIFI UÇUCU KÜL, NANO SİLİKA VE KIRMIZI ÇAMUR İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Yahya ALABIDO

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Yavuz YENGİNAR

2025, 188 Sayfa

Jüri

Dr. Öğretim Üyesi Yavuz YENGİNAR

Dr. Öğretim Üyesi Esra URAY

Prof. Dr. Ali Sinan SOĞANCI

Tez çalışmasında, zemin iyileştirme uygulamalarında Portland çimentosuna sürdürülebilir bir alternatif geliştirmek amacıyla, C sınıfı uçucu kül (UK) temelli çimentosuz bağlayıcı sistemlerin performansı kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Çalışmanın özünü, dört farklı bağlayıcı kombinasyonunun (yalnız UK, UK+Kırmızı Çamur (KÇ), UK+Nano Silika (NS) ve UK+KÇ+NS) performansı sistematik olarak kıyaslanmıştır. Çalışma kapsamında, tane dağılımı ve ince tane içeriği farklılık gösteren (%9,0, 18,5, 37,8) üç zemin (A: SP-SC, B: SC, C: SC) kullanılarak farklı karakteristikteki enjeksiyonlarla iyileştirilmiştir. Enjeksiyon özellikleri Marsh hunisi ve çökme deneyleriyle belirlenirken, iyileştirilmiş zeminin dayanım ve rijitlik özellikleri serbest basınç deneyleri ile belirlenmiştir.

Mekanik performans üzerinde parametrelerin etkisi sistematik olarak belirlenmiştir. Bağlayıcı içeriği, dozajı ve kür süresindeki artışın dayanımı olumlu yönde etkilediği; buna karşılık, su muhtevası ve toplam su/bağlayıcı oranı ( $W_T/W_b$ ) arttıkça dayanımın belirgin şekilde azaldığı tüm sistemlerde gözlemlenen ortak eğilim olmuştur. Zemin tipinin etkisi belirgin olup, kumlu zemindeki ince tane oranı arttıkça ( $A < B < C$ ) boşlukların daha iyi dolması nedeniyle genel dayanım sıralaması  $C > B > A$  şeklinde gerçekleşmiştir.

Yalnızca UK içeren enjeksiyonlarla, %30-40 gibi yüksek bağlayıcı içeriklerinde ~4600 kPa'ya varan yüksek dayanımlar elde edilmiştir. Ancak maliyet etkin bir çözüm sunmak ve toplam bağlayıcı tüketimini azaltmak amacıyla, bağlayıcı içeriği %10-20 için UK'nin performansının KÇ ve NS katkılarıyla artırılması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, UK+KÇ ikili sistemi, sağladığı alkali aktivasyon ile dayanımda %35-96'lık çarpıcı bir artışa yol açmıştır. UK+NS ikili sistemi ise, NS'nin dispersiyon zorluğu ve seyreltici etkisi nedeniyle tutarsız sonuçlar vermiştir.

En üstün mekanik performans, UK+KÇ+NS üçlü sisteminden elde edilmiştir. Optimum KÇ ikame oranı zemin tipine bağlı olarak %10 (C zemini) ile %30 (A ve B zeminleri) arasında değişmekle birlikte, çevresel sürdürülebilirlik ve endüstriyel atığın değerlendirilmesi perspektifiyle %30 KÇ kullanımı önerilmiştir. Araştırmanın temel bulgusu, UK:%69-KÇ:%30-NS:%1 bileşimindeki optimize edilmiş üçlü sistemin, hem işlenebilirlik hem de mekanik performans açısından en üstün dengeyi sağladığıdır. Bu sistem,  $W_T/W_b=1,2-1,5$  aralığında 30-50 saniyelik Marsh hunisi akma süresi ve  $<10\%$  çökme oranı ile sahada pompalanabilir ve stabil karışımlar sunmuştur. Mekanik performans üzerinde ise, KÇ'nin sağladığı alkali aktivasyon ile NS'nin katalitik çekirdeklenme etkisi sinerjistik bir şekilde birleşerek 56 günlük kür sonunda ~8200 kPa gibi geleneksel çimento değerleriyle rekabet edebilen bir serbest basınç dayanımına ulaşılmıştır.

Elastisite modülü ( $E_{50}$ ) değerlerinin tüm sistemlerde  $60q_u-130q_u$  bandında dağılım göstermesi üzerine, güvenli bir tasarım için  $E_{50} \approx 100q_u$  değerinin kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak, bu araştırma, UK+KÇ+NS üçlü sisteminin, optimize edilmiş  $W_T/W_b$  oranları ile uygulandığında, teknik performansın yanı sıra çevresel ve ekonomik avantajlar da sunan, zemin enjeksiyon ve derin karıştırma uygulamaları için güvenilir bir çimentosuz çözüm olduğunu kanıtlamıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Elastisite modülü, Enjeksiyon, Kırmızı çamur, Nano silika, Serbest basınç dayanımı, Uçucu kül, Zemin iyileştirme

## ABSTRACT

### MS THESIS

## STABILIZATION OF SOILS USING CLASS C FLY ASH, NANO SILICA AND RED MUD

Yahya ALABIDO

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN CIVIL ENGINEERING

Advisor: Asst. Prof. Dr. Yavuz YENGINAR

2025, 188 Pages

### Jury

Asst. Prof. Dr. Yavuz YENGINAR

Asst. Prof. Dr. Esra URAY

Prof. Dr. Ali Sinan SOĞANCI

The thesis study comprehensively investigates the performance of cementless binder systems based on Class C fly ash (FA), aimed at developing a sustainable alternative to Portland cement for ground improvement applications. The core of the study consists of a systematic comparison of the performance of four different binder combinations: FA alone, FA+Red Mud (RM), FA+Nano Silica (NS), and FA+RM+NS. The research involved the improvement of three soils (A: SP-SC, B: SC, C: SC) with varying grain size distributions and fine contents (9,0%, 18,5%, and 37,8%, respectively) using injections with different characteristics. The fresh properties of the grouts were determined by Marsh funnel and sedimentation tests, while the strength and stiffness properties of the improved soil were evaluated through unconfined compression tests.

The influence of various parameters on mechanical performance was systematically identified. A common trend observed across all systems was that increases in binder content, dosage, and curing duration positively affected strength, whereas increases in water content and the total water/binder ratio ( $W_T/W_b$ ) led to a significant decrease in strength. The influence of soil type was distinct; as the fine content in the sandy soils increased ( $A < B < C$ ), the general strength ranking was  $C > B > A$ , which is attributed to more effective filling of voids.

Using injections containing only FA, high strengths up to ~4600 kPa were achieved at high binder contents of 30-40%. However, aiming to provide a cost-effective solution and reduce total binder consumption, the goal was to enhance the performance of FA at lower binder contents (10-20%) through the contributions of RM and NS. Accordingly, the FA+RM binary system led to a striking strength increase of 35-96%, due to the alkali activation it provided. In contrast, the FA+NS binary system yielded inconsistent results, primarily due to NS's dispersion difficulties and diluting effect.

The superior mechanical performance was obtained from the FA+RM+NS ternary system. Although the optimum RM replacement ratio varied with soil type—10% for Soil C and 30% for Soils A and B—a usage of 30% RM is recommended from the perspectives of environmental sustainability and industrial waste valorization. A key finding of the research is that the optimized ternary system with a composition of FA:69%–RM:30%–NS:1% provides the best balance between workability and mechanical performance. This system offered pumpable and stable mixtures, with a Marsh funnel flow time of 30-50 seconds and a sedimentation rate of <10% within a  $W_T/W_b$  range of 1,2-1,5. Regarding mechanical performance, the synergistic combination of the alkali activation provided by RM and the catalytic nucleation effect of NS resulted in the achievement of an unconfined compressive strength of ~8200 kPa after 56 days of curing, a value competitive with traditional cement grouts.

Based on the finding that the Elasticity Modulus ( $E_{50}$ ) values for all systems distributed within a band of  $60q_u-130q_u$ , it was concluded that a value of  $E_{50} \approx 100q_u$  can be used for safe design.

In conclusion, this research demonstrates that the FA+RM+NS ternary system, when applied with optimized  $W_T/W_b$  ratios, constitutes a reliable, cementless solution for ground injection and deep mixing applications, offering not only technical performance but also environmental and economic advantages.

**Keywords:** Fly ash, Red mud, Nano-silica, Soil improvement, Injection, Unconfined compressive strength, Elasticity modulus, Pozzolanic reactions

## ÖNSÖZ

Tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Yavuz Yenginar'ın kıymetli rehberliği, sabırlı desteği ve her aşamada gösterdiği titiz yaklaşımı sayesinde bu çalışmayı başarıyla tamamlayabildim. Hocamın akademik bilgisi, yapıcı eleştirileri ve yol gösterici tavsiyeleri, araştırmamın doğru bir şekilde yönlendirilmesine ve olgunlaşmasına büyük katkı sağlamıştır. Bu süreç boyunca bana duyduğu güven, gösterdiği sabır ve sağladığı sürekli destek için kendisine en içten teşekkürlerimi sunarım.

YAHYA ALABIDO  
KONYA-2025

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT .....	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	xiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ENJEKSİYON YÖNTEMLERİYLE ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ.....</b>	<b>2</b>
2.1. Enjeksiyon Yöntemleri.....	2
2.2. Permeasyon (Emdirme) Enjeksiyonu .....	3
2.3. Çatlatma (Telafi) Enjeksiyonu .....	5
2.4. Jet Grout Enjeksiyonu .....	6
2.5. Derin Karıştırma Yöntemi.....	8
<b>3. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>11</b>
3.1. C Sınıfı Uçucu Kül ile Zemin İyileştirme .....	11
3.1.1. Killi zeminlerin iyileştirilmesi .....	12
3.1.2. Kumlu zeminlerin iyileştirilmesi.....	15
3.1.3. Sahadaki uygulamalar .....	17
3.1.4. Literatür özeti .....	17
3.2. Nano Silika ile Zeminlerin İyileştirilmesi.....	19
3.2.1. Killi zeminlerin iyileştirilmesi .....	20
3.2.2. Kumlu zeminlerin iyileştirilmesi.....	21
3.2.3. Literatür özeti .....	22
3.3. Kırmızı Çamur ile Zeminlerin İyileştirilmesi .....	26
3.3.1. Kumlu zeminlerin iyileştirilmesi.....	26
3.3.2. Killi zeminlerin iyileştirilmesi .....	28
3.3.3. Literatür özeti .....	29
<b>4. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>32</b>
4.1. Malzemeler.....	32
4.1.1. Zeminler ve özellikleri .....	32
4.1.2. Uçucu kül .....	39
4.1.3. Kırmızı çamur .....	40
4.1.4. Nano silika .....	42
4.2. Yöntem.....	42
4.2.1. Deney programları .....	43
4.2.2. Numunelerin hazırlanması .....	50

4.3. Deneyleer .....	52
4.3.1. Enjeksiyon deneyleeri .....	52
4.3.2. Serbest basınç deneylei .....	52
<b>5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>54</b>
5.1. Enjeksiyon Özellikleri.....	54
5.1.1. Marsh hunisi akma süresi.....	54
5.1.2. Çökelme (Sedimentasyon) yüzdesi .....	55
5.2. Serbest Basınç Mukavemeti .....	58
5.2.1. Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirme .....	58
5.2.2. Uçucu kül ve kırmızı çamur enjeksiyonuyla iyileştirme.....	66
5.2.3. Uçucu kül ve nano silika enjeksiyonuyla iyileştirme.....	79
5.2.4. Uçucu kül, kırmızı çamur ve nano silika enjeksiyonuyla iyileştirme .....	88
5.2.5. Kür süresinin etkisi .....	92
5.3. Elastisite Modülü .....	98
5.3.1. Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirme .....	99
5.3.2. Uçucu kül ve kırmızı çamur enjeksiyonuyla iyileştirme.....	104
5.3.3. Uçucu kül ve nano silika enjeksiyonuyla iyileştirme.....	110
5.3.4. Uçucu kül, kırmızı çamur ve nano silika enjeksiyonuyla iyileştirme .....	114
5.3.5. Kür süresinin etkisi .....	117
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>123</b>
6.1. Sonuçlar.....	123
6.1.1. Enjeksiyon akma süresi .....	124
6.1.2. Sedimentasyon yüzdesi .....	125
6.1.3. Serbest basınç dayanımı .....	126
6.1.4. Elastisite modülü .....	133
6.1.5. Genel değerlendirme .....	134
6.2. Öneriler .....	135
<b>7. KAYNAKLAR.....</b>	<b>137</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>143</b>
EK-1: Serbest Basınç Deneyi Sonuçları: Uçucu Kül Enjeksiyonu .....	143
EK-2: Serbest Basınç Deneyi Sonuçları: Uçucu kül ve Kırmızı Çamur Enjeksiyonu	152
EK-3: Serbest Basınç Deneyi Sonuçları: Uçucu kül ve Nano Silika Enjeksiyonu .....	161
EK-4: Serbest Basınç Deneyi Sonuçları: Uçucu Kül, Kırmızı Çamur, Nano Silika Enjeksiyonu.....	167
EK-5: Serbest Basınç Deneyi Sonuçları: Kür süresinin etkisi (UK, KÇ, NS Enjeksiyonu) .....	170

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Emdirme (Permeasyon) enjeksiyonu .....	5
Şekil 2.2. Çatlatma (Telafi) enjeksiyonu .....	5
Şekil 2.3. Jet grout yöntemi .....	6
Şekil 3.1. C sınıfı uçucu kül (a) ve F sınıfı uçucu külün (b) 20 µm'deki SEM görüntüleri. .....	12
Şekil 3.2. Yüksek ve düşük plastisiteli kilin sıkıştırma özellikleri üzerine F ve C sınıfı uçucu külün etkisi (a) maksimum kuru birim ağırlık ve (b) optimum su muhtevası .....	13
Şekil 3.3. 1 günlük kür süresinde C ve F sınıfı uçucu kül ile stabilize edilen düşük plastisiteli kilin UCS sonuçları.....	14
Şekil 3.4. 7 ve 28 günlük kürlenme sonrası CBR test sonuçları.....	15
Şekil 3.5. Düşen seviyeli geçirimsizlik testi sonuçları.....	16
Şekil 3.6. Nano Silika (NS) ile işlenmiş kilin gerilme-deformasyon davranışı.....	21
Şekil 4.1. İyileştirme çalışmalarında kullanılan zemin numuneleri: (a) A zemini, (b) B zemini, (c) C zemini .....	32
Şekil 4.2. Zemin A, B ve C için elek analizi sonuçları .....	33
Şekil 4.3. (a)-(b) Casagrande Deneyi ile likit limitin belirlenmesi .....	34
Şekil 4.4. Zemin-A için Casagrande likit limit deneyi sonuçları .....	34
Şekil 4.5. Plastik limit değerlerinin belirlenmesi .....	35
Şekil 4.6. Zeminlerdeki ince tanelerin plastisite kartındaki yeri .....	36
Şekil 4.7. a, b, c) Maksimum boşluk oranının belirlenmesi .....	37
Şekil 4.8. Kompaksiyon deneyi sonucu .....	38
Şekil 4.9. Laboratuvara getirilen uçucu kül numunesi .....	40
Şekil 4.10. Uçucu küle ait SEM görüntüleri: (a) 1000, (b) 10.000 ve (c) 50.000 kat büyütülmüş görüntüleri .....	40
Şekil 4.11. Laboratuvarda öğütülmüş kırmızı çamur numunesi .....	41
Şekil 4.12. Kırmızı çamurun tane boyutu dağılımı .....	41
Şekil 4.13. Kırmızı çamura ait SEM görüntüleri: (a) 1000, (b) 10.000 ve (c) 50.000 kat büyütülmüş görüntüler .....	42
Şekil 4.14. Deneylerde kullanılan koloidal nano silika numunesi.....	42
Şekil 4.15. (a)-(b)-(c): UCS (Serbest basınç dayanımı) deneyi için numune hazırlıkları	51
Şekil 4.16. (a)-(b): UCS deney numunelerinin kalıptan çıkarılması .....	51
Şekil 4.17. (a)-(b)-(c): Serbest basınç deneyinin yapılması.....	53
Şekil 4.18. (a)-(b)-(c): Serbest basınç deneyi sonrası kırılan numunelerin görüntüsü .....	53
Şekil 5.1. Marsh hunisi deneyi sonuçları .....	55
Şekil 5.2. Sedimentasyon deneyi sonuçları: a) su/bağ. = 1, b) su/bağ. = 1.2 olan farklı karışımlar için çökelme oranı .....	56
Şekil 5.3. Sedimentasyon deneyi sonuçları ( $W_T/W_b = 1.5$ ) .....	57
Şekil 5.4. Sedimentasyon deneyi sonuçları ( $W_T/W_b = 2$ ) .....	57
Şekil 5.5. Sedimentasyon deneyi sonuçları ( $W_T/W_b = 2.5$ ) .....	57
Şekil 5.6. Bağlayıcı içeriğinin dayanıma etkisi .....	61
Şekil 5.7. Bağlayıcı dozajının dayanıma etkisi .....	61
Şekil 5.8. A zemininde uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları.....	64
Şekil 5.9. B zemininde uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları.....	64
Şekil 5.10. C zemininde uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları.....	64
Şekil 5.11. A, B ve C zeminlerinde aynı bağlayıcı oranında ( $a_w = \%30$ ve $\%40$ ) elde edilen en yüksek $q_u$ değerlerinin karşılaştırılması.....	65

<b>Şekil 5.12.</b> A, B ve C zeminlerinin serbest basınç dayanımlarının karşılaştırılması ( $a_w = \%20$ , $W_T/W_b \approx 1.6$ ) .....	66
<b>Şekil 5.13.</b> Bağlayıcı içeriğinin ( $a_w = \%10$ ) dayanıma etkisi.....	69
<b>Şekil 5.14.</b> Zeminlerin hacimsel bileşimi ve serbest basınç dayanımı. (a) Zemin bileşimi (A, B, C zeminleri için hacimsel oranlar) (b) Serbest basınç dayanımı değerleri ( $q_u$ ) .....	70
<b>Şekil 5.15.</b> A zemininde kırmızı çamur ve uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları: (a) $W_T/W_b$ oranına göre, (b) su içeriğine göre. ....	72
<b>Şekil 5.16.</b> B zemininde kırmızı çamur ve uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları: (a) $W_T/W_b$ oranına göre, (b) su içeriğine göre. ....	73
<b>Şekil 5.17.</b> C zemininde kırmızı çamur ve uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları: (a) $W_T/W_b$ oranına göre, (b) su içeriğine göre. ....	74
<b>Şekil 5.18.</b> Uçucu kül ve uçucu kül + kırmızı çamur katkısının UCS dayanımı üzerindeki etkisinin karşılaştırılması (a: $a_w = \%10$ , b: $a_w = \%20$ ) .....	76
<b>Şekil 5.19.</b> Uçucu kül ve uçucu kül + kırmızı çamur katkısının UCS dayanımı üzerindeki etkisinin karşılaştırılması (a: $a_w = \%10$ , b: $a_w = \%20$ ) .....	77
<b>Şekil 5.20.</b> Uçucu kül ve uçucu kül + kırmızı çamur katkısının UCS dayanımı üzerindeki etkisinin karşılaştırılması (a: $a_w = \%10$ , b: $a_w = \%20$ ) .....	78
<b>Şekil 5.21.</b> Bağlayıcı içeriğinin dayanıma etkisi .....	81
<b>Şekil 5.22.</b> Bağlayıcı dozajının dayanıma etkisi.....	81
<b>Şekil 5.23.</b> A zemininde nano silika ve uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları: (a) $W_T/W_b$ oranına göre, (b) su içeriğine göre. ....	83
<b>Şekil 5.24.</b> C zemininde nano silika ve uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları: (a) $W_T/W_b$ oranına göre, (b) su içeriğine göre. ....	84
<b>Şekil 5.25.</b> Uçucu kül ve nano silika + kırmızı çamur katkısının UCS dayanımı üzerindeki etkisinin karşılaştırılması: a) $a_w = \%10$ , b) $a_w = \%20$ .....	86
<b>Şekil 5.26.</b> Uçucu kül ve nano silika + kırmızı çamur katkısının UCS dayanımı üzerindeki etkisinin karşılaştırılması: a) $a_w = \%10$ , b) $a_w = \%20$ .....	87
<b>Şekil 5.27.</b> Zemin A Karışımlarında UK, KÇ ve NS katkılarının kür süresine göre UCS dayanımları .....	94
<b>Şekil 5.28.</b> A Zemin için farklı katkı kombinasyonlarında kür süresine bağlı serbest basınç dayanımı ( $q_u$ ) değişimi .....	95
<b>Şekil 5.29.</b> Zemin C Karışımlarında UK, KÇ ve NS katkılarının kür süresine göre UCS dayanımları.....	96
<b>Şekil 5.30.</b> C Zemin için farklı katkı kombinasyonlarında kür süresine bağlı serbest basınç dayanımı ( $q_u$ ) değişimi .....	97
<b>Şekil 5.31.</b> $E_{50}$ sekant modülünün belirlenmesi .....	98
<b>Şekil 5.32.</b> A zemini için %100 UK katkılı numunelerin 28 günlük $E_{50}$ değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b) $q_u-E_{50}$ ilişkisi .....	100
<b>Şekil 5.33.</b> B zemini için %100 UK katkılı numunelerin 28 günlük $E_{50}$ değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b) $q_u-E_{50}$ ilişkisi .....	101
<b>Şekil 5.34.</b> C zemini için %100 UK katkılı numunelerin 28 günlük $E_{50}$ değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b) $q_u-E_{50}$ ilişkisi .....	103
<b>Şekil 5.35.</b> A zemini için KÇ + UK katkılı numunelerin 28 günlük $E_{50}$ değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b) $q_u-E_{50}$ ilişkisi .....	106
<b>Şekil 5.36.</b> B zemini için KÇ + UK katkılı numunelerin 28 günlük $E_{50}$ değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b) $q_u-E_{50}$ ilişkisi .....	107
<b>Şekil 5.37.</b> C zemini için KÇ + UK katkılı numunelerin 28 günlük $E_{50}$ değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b) $q_u-E_{50}$ ilişkisi .....	109

<b>Şekil 5.38.</b> A zemin için NS + UK katkılı numunelerin 28 günlük $E_{50}$ değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b) $q_u-E_{50}$ ilişkisi .....	112
<b>Şekil 5.39.</b> C zemin için NS + UK katkılı numunelerin 28 günlük $E_{50}$ değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b) $q_u-E_{50}$ ilişkisi .....	114
<b>Şekil 5.40.</b> A zemin için UK + KÇ + NS katkılı numunelerin 28 günlük $E_{50}$ değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b) $q_u-E_{50}$ ilişkisi .....	115
<b>Şekil 5.41.</b> C zemin için UK + KÇ + NS katkılı numunelerin 28 günlük $E_{50}$ değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b) $q_u-E_{50}$ ilişkisi .....	117
<b>Şekil 5.42.</b> A zemin için UK + KÇ + NS katkılı numunelerin 3, 7, 14, 28 ve 56 günlük kürlerdeki $E_{50}$ değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b) $q_u-E_{50}$ ilişkisi .....	118
<b>Şekil 5.43.</b> A zemin için UK + KÇ + NS katkılı numunelerin 3, 7, 14, 28 ve 56 günlük kürlerdeki $E_{50}$ değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b) $q_u-E_{50}$ ilişkisi .....	119
<b>Şekil 5.44.</b> C zemin için UK + KÇ + NS katkılı numunelerin 3, 7, 14, 28 ve 56 günlük kürlerdeki $E_{50}$ değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b) $q_u-E_{50}$ ilişkisi .....	121
<b>Şekil 5.45.</b> C zemin için UK + KÇ + NS katkılı numunelerin 3, 7, 14, 28 ve 56 günlük kürlerdeki $E_{50}$ değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b) $q_u-E_{50}$ ilişkisi .....	122
<b>Şekil Ek 1.1.</b> Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A1-1 / A1-8 tasarımları (28 gün kür süresi) .....	143
<b>Şekil Ek 1.2.</b> Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A1-9 / A1-16 tasarımları (28 gün kür süresi) .....	144
<b>Şekil Ek 1.3.</b> Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A1-17 / A1-20 ve B1-1 / B1-4 tasarımları (28 gün kür süresi) .....	145
<b>Şekil Ek 1.4.</b> Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: B1-5 / B1-12 tasarımları (28 gün kür süresi) .....	146
<b>Şekil Ek 1.5.</b> Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: B1-13 / B1-20 tasarımları (28 gün kür süresi) .....	147
<b>Şekil Ek 1.6.</b> Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: B1-21 / C1-6 tasarımları (28 gün kür süresi) .....	148
<b>Şekil Ek 1.7.</b> Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C1-7 / C1-14 tasarımları (28 gün kür süresi) .....	149
<b>Şekil Ek 1.8.</b> Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C1-15 / C1-22 tasarımları (28 gün kür süresi) .....	150
<b>Şekil Ek 1.9.</b> Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C1-23 / C1-24 tasarımları (28 gün kür süresi) .....	151
<b>Şekil Ek 2.1.</b> Uçucu kül ve Kırmızı Çamur enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A2-1 / A2-8 tasarımları (28 gün kür süresi) .....	152
<b>Şekil Ek 2.2.</b> Uçucu kül ve Kırmızı Çamur enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A2-9 / A2-16 tasarımları (28 gün kür süresi) .....	153
<b>Şekil Ek 2.3.</b> Uçucu kül ve Kırmızı Çamur enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A2-17 / A2-24 tasarımları (28 gün kür süresi) .....	154
<b>Şekil Ek 2.4.</b> Uçucu kül ve Kırmızı Çamur enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: B2-1 / B2-8 tasarımları (28 gün kür süresi) .....	155
<b>Şekil Ek 2.5.</b> Uçucu kül ve Kırmızı Çamur enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: B2-9 / B2-16 tasarımları (28 gün kür süresi) .....	156
<b>Şekil Ek 2.6.</b> Uçucu kül ve Kırmızı Çamur enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: B2-17 / B2-24 tasarımları (28 gün kür süresi) .....	157
<b>Şekil Ek 2.7.</b> Uçucu kül ve Kırmızı Çamur enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C2-1 / C2-8 tasarımları (28 gün kür süresi) .....	158

<b>Şekil Ek 2.8.</b> Uçucu kül ve Kırmızı Çamur enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C2-9 / C2-16 tasarımları (28 gün kür süresi).....	159
<b>Şekil Ek 2.9.</b> Uçucu kül ve Kırmızı Çamur enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C2-17 / C2-24 numuneleri (28 gün kür süresi).....	160
<b>Şekil Ek 3.1.</b> Uçucu kül ve Nano Silika enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A3-1 / A3-8 tasarımları (28 gün kür süresi).....	161
<b>Şekil Ek 3.2.</b> Uçucu kül ve Nano Silika enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A3-9 / A3-16 tasarımları (28 gün kür süresi).....	162
<b>Şekil Ek 3.3.</b> Uçucu kül ve Nano Silika enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A3-17 / A3-24 tasarımları (28 gün kür süresi).....	163
<b>Şekil Ek 3.4.</b> Uçucu kül ve Nano Silika enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C3-1 / C3-8 tasarımları (28 gün kür süresi).....	164
<b>Şekil Ek 3.5.</b> Uçucu kül ve Nano Silika enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C3-9 / C3-16 tasarımları (28 gün kür süresi).....	165
<b>Şekil Ek 3.6.</b> Uçucu kül ve Nano Silika enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C3-17 / C3-24 tasarımları (28 gün kür süresi).....	166
<b>Şekil Ek 4.1.</b> UK, KÇ ve NS enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A4-1 / A4-8 tasarımları (28 gün kür süresi).....	167
<b>Şekil Ek 4.2.</b> UK, KÇ ve NS enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A4-9 / C4-4 tasarımları (28 gün kür süresi).....	168
<b>Şekil Ek 4.3.</b> UK, KÇ ve NS enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C4-5 / C4-12 tasarımları (28 gün kür süresi).....	169
<b>Şekil Ek 5.1.</b> UK, KÇ ve NS enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A5-1 / A5-8 tasarımları.....	170
<b>Şekil Ek 5.2.</b> UK, KÇ ve NS enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A5-9 / A5-16 tasarımları.....	171
<b>Şekil Ek 5.3.</b> UK, KÇ ve NS enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A5-17 / C5-4 tasarımları.....	172
<b>Şekil Ek 5.4.</b> UK, KÇ ve NS enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C5-5 / C5-12 tasarımları.....	173
<b>Şekil Ek 5.5.</b> UK, KÇ ve NS enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C5-13 / C5-20 tasarımları.....	174

## ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 2.1. Enjeksiyon yöntemlerinin sınıflandırılması.....	2
Çizelge 2.2. Çeşitli enjeksiyon malzemelerinin zeminlerin dane çaplarına göre penetrasyon yetenekleri .....	4
Çizelge 2.3. Derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmiş zeminlere ait mühendislik özellikleri.....	9
Çizelge 2.4. Derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilen zeminlerin mukavemetini etkileyen faktörler .....	10
Çizelge 2.5. Islak yöntem ile iyileştirilen zeminlerin mukavemet değerleri .....	10
Çizelge 4.1. Tane çapı dağılımı .....	33
Çizelge 4.2. Zemin A, B ve C için karakteristik dane çapları.....	33
Çizelge 4.3. Zemin-A için plastik likit limit deneyi sonuçları.....	35
Çizelge 4.4. Zeminlerin USCS'ye göre sınıflandırılması .....	36
Çizelge 4.5. A Zemini için maksimum boşluk oranı ( $e_{max}$ ) deney sonuçları .....	37
Çizelge 4.6. B Zemini için maksimum boşluk oranı ( $e_{max}$ ) deney sonuçları .....	37
Çizelge 4.7. C Zemini için maksimum boşluk oranı ( $e_{max}$ ) deney sonuçları .....	37
Çizelge 4.8. Zeminlerin $G_s$ , $\rho_{d,max}$ ve $e_{min}$ Değerleri (A, B, C) .....	38
Çizelge 4.9. Zeminlerin geoteknik özellikleri.....	39
Çizelge 4.10. Uçucu külün kimyasal bileşimi ve sınıflandırma kriterleri .....	40
Çizelge 4.11. Kırmızı çamurun (KÇ) fiziksel ve mekanik özellikleri .....	41
Çizelge 4.12. Atık malzemelerin kimyasal bileşimi .....	42
Çizelge 4.13. Numune karışımları tablosu.....	43
Çizelge 4.14. A zemininin sadece uçucu kül ile iyileştirildiği deney programı .....	45
Çizelge 4.15. B zemininin sadece uçucu kül ile iyileştirildiği deney programı .....	45
Çizelge 4.16. C zemininin sadece uçucu kül ile iyileştirildiği deney programı .....	46
Çizelge 4.17. A zemininin uçucu kül ve kırmızı çamur ile iyileştirildiği deney programı .....	46
Çizelge 4.18. B zemininin uçucu kül ve kırmızı çamur ile iyileştirildiği deney programı.....	47
Çizelge 4.19. C zemininin uçucu kül ve kırmızı çamur ile iyileştirildiği deney programı.....	47
Çizelge 4.20. A zemininin uçucu kül ve nano silika ile iyileştirildiği deney programı....	48
Çizelge 4.21. C zemininin uçucu kül ve nano silika ile iyileştirildiği deney programı....	48
Çizelge 4.22. A zemininin uçucu kül, kırmızı çamur ve nano silika ile iyileştirildiği deney programı .....	49
Çizelge 4.23. C zemininin uçucu kül, kırmızı çamur ve nano silika ile iyileştirildiği deney programı .....	49
Çizelge 4.24. A zemininin UK, KLÇ ve NS ile iyileştirildiği ve kür süresinin araştırıldığı deney programı.....	49
Çizelge 4.25. C zemininin UK, KLÇ ve NS ile iyileştirildiği ve kür süresinin araştırıldığı deney programı.....	49
Çizelge 5.1. Marsh hunisi deneyi sonuçları .....	55
Çizelge 5.2. Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen A zemininin 28 günlük dayanım sonuçları .....	59
Çizelge 5.3. Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen B zemininin 28 günlük dayanım sonuçları .....	59
Çizelge 5.4. Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen C zemininin 28 günlük dayanım sonuçları .....	60
Çizelge 5.5. A zemininde kırmızı çamur ve uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları.....	67

<b>Çizelge 5.6.</b> B zemininde kırmızı çamur ve uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları.....	67
<b>Çizelge 5.7.</b> C zemininde kırmızı çamur ve uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları.....	68
<b>Çizelge 5.8.</b> A serisine ait dayanım sonuçları – uçucu kül (UK) ve uçucu kül + kırmızı çamur (UK+KÇ) kullanımının karşılaştırılması.....	76
<b>Çizelge 5.9.</b> B serisine ait dayanım sonuçları – uçucu kül (UK) ve uçucu kül +kırmızı çamur (UK+KÇ) kullanımının karşılaştırılması.....	77
<b>Çizelge 5.10.</b> C serisine ait dayanım sonuçları – uçucu kül (UK) ve uçucu kül + kırmızı çamur (UK+KÇ) kullanımının karşılaştırılması.....	78
<b>Çizelge 5.11.</b> A3 zemininde nano silika ve uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları.....	79
<b>Çizelge 5.12.</b> C3 zemininde nano silika ve uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları.....	80
<b>Çizelge 5.13.</b> A serisine ait dayanım sonuçları – uçucu kül (UK) ve uçucu kül + nano silika (UK+NS) kullanımının karşılaştırılması.....	86
<b>Çizelge 5.14.</b> A Serisine ait dayanım sonuçları – uçucu kül (UK) ve uçucu kül + nano silika (UK+NS) kullanımının karşılaştırılması.....	87
<b>Çizelge 5.15.</b> A zemininde UK, KÇ ve NS katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları.....	88
<b>Çizelge 5.16.</b> C zemininde UK, KÇ ve NS katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları.....	89
<b>Çizelge 5.17.</b> A zemini için UK, KÇ ve NS kombinasyonlarında tek eksenli basınç dayanımı ( $q_u$ ), maksimum birim şekil değiştirme ( $\epsilon_{max}$ ), su içeriği ve dozaj değerleri ile UK'ye göre görece değişim ( $\% \Delta q_u$ ).....	90
<b>Çizelge 5.18.</b> C zemini için UK, KÇ ve NS kombinasyonlarında tek eksenli basınç dayanımı ( $q_u$ ), maksimum birim şekil değiştirme ( $\epsilon_{max}$ ), su içeriği ve dozaj değerleri ile UK'ye göre görece değişim ( $\% \Delta q_u$ ).....	91
<b>Çizelge 5.19.</b> UK, KÇ ve NS katkılı A5 karışımlarının farklı kür sürelerinde UCS dayanımları.....	93
<b>Çizelge 5.20.</b> UK, KÇ ve NS katkılı C5 karışımlarının farklı kür sürelerinde UCS dayanımları.....	96

## 1. GİRİŞ

Günümüzde artan nüfus, hızlı kentleşme ve sanayileşme sonucunda mühendislik yapılarının inşa edileceği uygun alanların azalması ve problemlili zeminlerle karşılaşma sıklığının artması, geoteknik mühendisliği açısından önemli sorunları beraberinde getirmektedir. Taşıma gücü düşük, yüksek sıkışabilirlik ve oturma potansiyeline sahip zeminler, yapı güvenliğini doğrudan tehdit etmektedir. Bu nedenle, zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, modern inşaat mühendisliği uygulamalarında vazgeçilmez bir ihtiyaç haline gelmiştir.

Geleneksel olarak zemin iyileştirmesinde çimento ve kireç gibi bağlayıcılar kullanılmaktadır. Ancak bu malzemelerin üretim süreçleri yüksek enerji tüketimi ve CO<sub>2</sub> salınımı nedeniyle çevresel açıdan olumsuz etkiler doğurmaktadır. Ayrıca maliyetlerinin yüksek olması, sürdürülebilir inşaat uygulamaları açısından alternatif malzemelerin araştırılmasını gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, endüstriyel atıkların ve yan ürünlerin zemin iyileştirme çalışmalarında değerlendirilmesi hem ekonomik fayda sağlamakta hem de çevresel açıdan önemli katkılar sunmaktadır.

Son yıllarda uçucu kül (UK), kırmızı çamur (KÇ) ve nano silika (NS) gibi endüstriyel atıkların zeminlerin dayanım ve rijitlik özelliklerini artırmada etkili olduğu çeşitli araştırmalarla ortaya konmuştur. Bu katkılar, puzolanik reaksiyonlar sayesinde zemin içerisinde çimentolanmayı desteklemekte, boşluk yapısını iyileştirmekte ve mühendislik özelliklerini geliştirmektedir. Ancak literatürde bu üç katkının birlikte ve sistematik olarak farklı zemin türleri üzerinde incelenmesine yönelik çalışmalar sınırlıdır.

Bu tez çalışmasının amacı, enjeksiyon ile zemin iyileştirme yöntemlerinde (permeasyon enjeksiyonu, jet grout ve derin karıştırma yöntemleri gibi) bağlayıcı olarak kullanılacak C sınıfı uçucu kül (UK), kırmızı çamur (KÇ) ve nano silika (NS) katkılarının kumlu zeminler üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Çalışmada üç farklı zemin tipi kullanılmış, hazırlanan karışımlar farklı bağlayıcı oranları ve kür süreleri dikkate alınarak laboratuvar ortamında test edilmiştir. Böylece serbest basınç dayanımı ( $q_u$ ), elastisite modülü ( $E_{50}$ ) ve karışımların stabilite-pompalanabilirlik özellikleri değerlendirilmiş, alternatif bağlayıcıların zemin iyileştirme potansiyeli ortaya konmuştur.

## 2. ENJEKSİYON YÖNTEMLERİYLE ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ

### 2.1. Enjeksiyon Yöntemleri

Enjeksiyon ile zemin iyileştirme, zemin içindeki kırıklar, çatlaklar ve boşluklara farklı yöntemler ve basınçlar uygulanarak bu boşlukların azaltılması işlemidir. En basit tanımıyla, enjeksiyon yöntemi zemindeki gözenekli yapının doldurulmasını hedefler.

Diğer zemin iyileştirme yöntemlerinde olduğu gibi, enjeksiyonun amacı da zeminin geçirimsizliğini azaltmak ve deformasyona karşı mekanik dayanımını artırmaktır. Enjeksiyon uygulamalarında kullanılacak basınç, malzeme türleri ve karışım oranları, iyileştirme hedeflerine bağlı olarak belirlenmektedir. Düşük geçirimsizlik katsayısına sahip zeminlerde çatlak oluşumu daha yaygındır ve bu tür zeminlerde enjeksiyon yöntemi daha da önem kazanmaktadır. Üretim şekillerine ve amaçlarına göre enjeksiyon yöntemlerinin sınıflandırılması Çizelge 2.1’de sunulmuştur (Taşçı, 2021).

**Çizelge 2.1.** Enjeksiyon yöntemlerinin sınıflandırılması

Amacına Göre Enjeksiyonlar	Kullanılan Karışım Malzemelerine Göre Enjeksiyonlar	Zemine Yerleşimine Göre Enjeksiyonlar
- Perde enjeksiyonu - Konsolidasyon enjeksiyonu - Dolgu enjeksiyonu	- Çimento enjeksiyonu - Kil enjeksiyonu - Kimyasal enjeksiyon	- Permeasyon enjeksiyonu - Sıkıştırma enjeksiyonu - Çatlama enjeksiyonu - Jet enjeksiyonu

Enjeksiyon için kullanılacak malzemeler, zemindeki boşlukların yerine ve parçacık boyutlarına göre belirlenmelidir. Yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde enjeksiyon yöntemleri her zaman yeterli olmayabilir; bu yöntemler çoğunlukla kuru ve belirgin çatlakların doldurulması amacıyla tercih edilir. Reçine, akrilamid, çeşitli kimyasallar, silikatlar, krom lignin ve poliüretan bazlı çözeltiler; ince kum ve suya doymuş zeminlerde yaygın olarak kullanılan enjeksiyon malzemeleridir. Bentonit ve çimento karışımları ise orta derecede kum ve silt içeren zeminlerde kullanılmaktadır.

Zemindeki boşluklara erişebilmek için enjeksiyon malzemesinin, doldurulacak boşluklardan daha ince taneli olması gereklidir (Fırat, 2015).

Enjeksiyon yönteminin seçimindeki ilk adım, iyileştirilecek zeminin sınıflandırılmasıdır. Genellikle zeminlerin ince taneli, iri taneli ya da kaya zemin olduğu görsel olarak ayırt edilebilir. Bu sınıflandırma hem uygun enjeksiyon yönteminin hem de enjeksiyon malzemesinin belirlenmesinde ve teknik şartnamenin hazırlanmasında kritik bir

öneme sahiptir. Ayrıca atmosferik koşulların da göz önünde bulundurulması gerekebilir (Taşçı, 2021).

Tek bir enjeksiyon yöntemi her projede yeterli olmayabilir. Bu nedenle projelerin farklı aşamalarında farklı enjeksiyon teknikleri birlikte kullanılabilir. Örneğin, sert kaya kazılarında geçirimsizlik enjeksiyonu, yumuşak zeminlerde ise sıkıştırma, penetrasyon, hidrofraksiyon ve jet grout enjeksiyon yöntemleri tercih edilmektedir.

Çimento/su oranı (w/c) genellikle 0,6 ile 1,3 aralığında tutulur. Su miktarının artması, enjeksiyon malzemesinin daha ince hale gelmesini ve daha dar çatlaklara ulaşabilmesini sağlar.

Bentonit, enjeksiyon sürecini güçlendiren temel bir katkı malzemesi olarak kullanılırken, sodyum silikat da enjeksiyon verimliliğini artırmak için tercih edilmektedir. Portland çimentosu, kimyasal reaksiyonların oluşabileceği ortamlarda öne çıkarken; puzolanik ve yüksek fırın cürufu çimentosu da alternatif bağlayıcılar arasında yer almaktadır (Croce, 2014).

#### *Enjeksiyon Yöntemlerinin Uygulama Alanları:*

Geniş bir uygulama alanına sahip olan enjeksiyon yöntemi;

- Gevşek kumlarda sıvılaşmayı önlemek için,
- Hacim değişiklikleri gösterebilen kil içerikli zeminlerin şişme ve büzülme potansiyelini azaltmakta,
- Mühendislik yapılarının yer altı zemin mukavemetini artırmakta,
- Komşu yapıların stabilitesini sağlamakta,
- Temel kazıları çevresindeki şevlerin stabilitesini sağlamak için,
- Tünel çevre duvarlarının stabilitesini sağlamak için,
- Mevcut temellerin istikrarını artırmakta,
- Geçirimsizlik perdelerinin imalatında ve mühendislik yapıları altındaki zeminin geçirimliliğini azaltmak için kullanılabilir (Fırat, 2015).

## **2.2. Permeasyon (Emdirme) Enjeksiyonu**

1802 yılında Fransa'da, kum ve çakıl gibi granüler yüzeylerin özelliklerine dayanan, düşük viskoziteli ve ince granül yapısına sahip karışımlar kullanılarak permeasyon (emdirme) yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde, enjeksiyon malzemesi zemin yüzeyindeki boşluk ve çatlaklara nüfuz eder, boşlukları doldurarak çevredeki zemin parçacıklarına tutunur. Böylece zemin geçirimliliği azalır, sıkıştırılabilirlik artar ve kayma



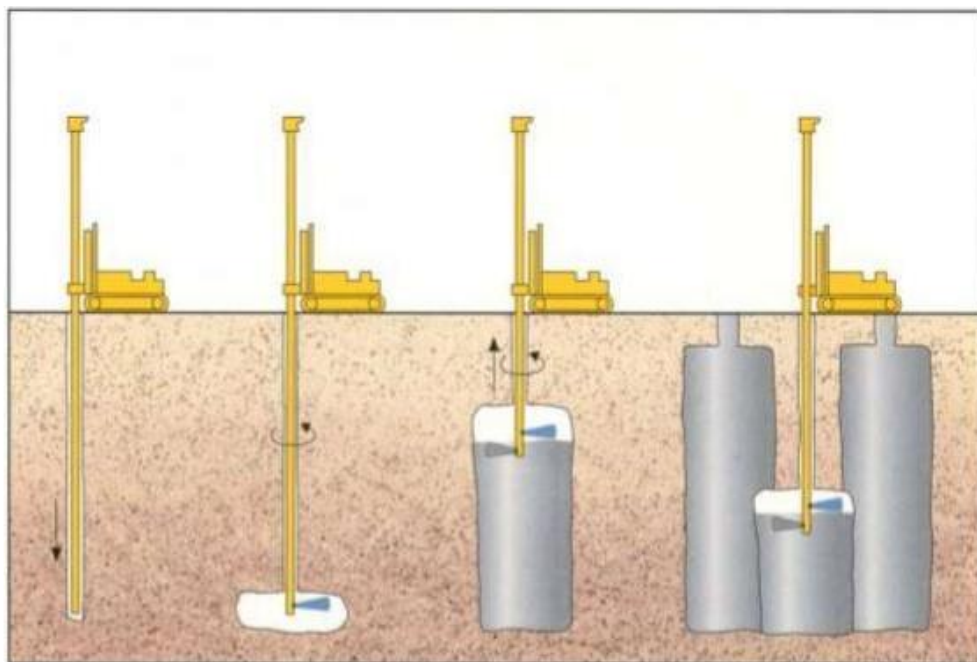


Telafi enjeksiyon yöntemi, mühendislik yapılarının altındaki kanal ve tünel kazılarında, aynı zamanda yüzeydeki yapıların ve kazı bölgesinin korunmasında etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

#### 2.4. Jet Grout Enjeksiyonu

Jet grout yöntemi, çimento, su ve katkı maddeleri kullanılarak zeminde bir kaplama oluşturmayı amaçlar. Bu kaplama, yüzeyin tutunma kapasitesini ve uzun ömürlülüğünü artırır. Jet grout, geleneksel enjeksiyon tekniklerine kıyasla daha maliyet etkin bir alternatiftir. Uygulama sırasında, mevcut zeminin yerinden çıkarılmadan enjeksiyon harcının zemine yerleştirilmesi sağlanır. Enjeksiyon malzemesi, yüksek basınç yardımıyla zeminin içinde silindirik, sıkıştırılmış kompozit bir sütun oluşturur. Jet grout yöntemiyle yapılan zemin iyileştirme işlemi Şekil 2.3'te şematik olarak gösterilmiştir (Rajaratnam, 1976).

Jet grout, beton yapılar oluşturmak için ekonomik, çevre dostu ve bakım gereksinimi düşük bir teknik olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntemin, tarihi yapıların stabilitesini sağlama, derin kazılar ve bina temellerinin güçlendirilmesi gibi zemin iyileştirme uygulamalarında etkili olduğu yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur. Ayrıca, kalıpsız perde imalatına da olanak sağlamaktadır (Taşçı, 2021).



Şekil 2.3. Jet grout yöntemi (Keller, 2020)

Jet grout imalatında, enjeksiyon harcında su/çimento oranı genellikle 1–1,5 aralığında seçilmekte olup en yaygın oran 1/1'dir. Uygulamada kullanılan grout harcının yoğunluğu ise 1,410–1,570 kg/m<sup>3</sup> arasında olmalıdır. Enjeksiyon harcındaki su/çimento oranının artması, karışımdaki su miktarının fazlalaşmasına neden olur ve bu durum jet grout kolonunun mukavemetinde düşüşe yol açar. Su/çimento oranı arttıkça, vizkozite de artar; bu da enjeksiyon malzemesinin yayılım eğilimini artırarak daha büyük çaplı kolonların oluşmasına olanak tanır. Ancak yüksek vizkozite, aynı zamanda akışkanın odaklanmasını ve parçalama enerjisini de etkiler. 1 m<sup>3</sup> zeminde kullanılan çimento miktarı genellikle 350–700 kg arasında değişmektedir. Uygulanacak su/çimento oranına, jet grout sistemine ve hedeflenen kolon imalat parametrelerine göre karar verilebilir (Yağizatlı, 2012).

Jet grout yöntemi, kil, kum, çakıl ve diğer malzemelerin karışımıyla hasar görmüş alanları onarmak, görünüm, dayanım ve ekonomik performansı iyileştirmek amacıyla kullanılır. Aynı zamanda, beton yüzeylerde meydana gelen çatlakların onarılmasında da etkilidir.

Durgunoğlu'na (2004) göre jet grout yönteminin başlıca kullanım alanları şunlardır:

- Temellerde düşey yükleri karşılamak için taşıma gücünün artırılması ve oturmaların kontrolü,
- Yayılı yükler altında zeminin taşıma kapasitesinin artırılması,
- Dolguların altında düşey basınç elemanı olarak kullanım,
- Köprü yaklaşım dolgularında oturma kontrolü ve kenar kazıklara destek,
- Su yapıları, yer altı su depoları ve havuz tabanlarında geçirimsizlik elemanı olarak,
- Ağırlık istinat duvarı şeklinde yanal zemin basınçlarını dengelemek için,
- Derin kazılarda düşey stabilite sağlamak amacıyla,
- Ankrajlı istinat yapıları ve kazılarda özel donatı ile ankraj uygulamaları,
- Geçirimsiz perdeler olarak batardo elemanı olarak kullanımı,
- Kazı tabanının altında payanda elemanı olarak,
- Yer altı su seviyesi yüksek zeminlerde su kontrolü sağlamak için geçirimsizlik uygulamaları,
- Zemin takviyesi ile şev stabilitesinin sağlanması,
- Tünel kazılarında yüzey altı zemin iyileştirme uygulamaları,

- Sıvılaşma potansiyeli yüksek bölgelerde kazıklı temellerin çevresinde destek elemanı olarak, Mühendislik yapılarının etrafında yatay ve düşey deplasmanların sınırlandırılması.

## 2.5. Derin Karıştırma Yöntemi

Derin zemin karıştırma yöntemi, problemlı zeminlerin çeşitli katkı maddeleriyle mekanik olarak karıştırılması yoluyla mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesini amaçlayan bir stabilizasyon tekniğidir. Bu yöntemde, tekli veya çoklu shaftlara sahip kesme ve karıştırma ekipmanları kullanılarak bağlayıcı malzemeler zemine enjekte edilir ve zeminle homojen şekilde karıştırılır. Sonuç olarak, doğal zemine kıyasla daha yüksek dayanım, daha düşük geçirimsizlik ve sıkışabilirlik özelliklerine sahip sertleşmiş bir zemin elde edilir. Bu iyileşme, özellikle katyon değişimi, dane bağlanması veya kimyasal reaksiyon ürünlerinin boşlukları doldurmasıyla sağlanır. Başlıca bağlayıcılar çimento ve kireç olmakla birlikte, yüksek fırın cürufu, alçıtaşı ve uçucu kül gibi alternatif malzemeler de kullanılabilir. Yöntem; yumuşak killer, siltler ve ince daneli kumlar gibi farklı zemin türlerine uygulanabilir ve tasarımı büyük ölçüde deneyim temelli olup, güncel araştırmalar ve uygulama yenilikleriyle gelişimini sürdürmektedir. Uygulama süreci, uygun karıştırma türünün seçimi, stabilize zemin dayanımının belirlenmesi ve geoteknik tasarım kapsamında iyileştirme modelinin oluşturulması adımlarını içermektedir (Topolnicki, 2004a).

Derin zemin karıştırma yönteminin uygulama modelleri; grup kolonları, duvar tipi, grid (ızgara) tipi ve blok tipi olarak uygulanabilmektedir.

Derin karıştırma yöntemi, zemine bağlayıcı malzemelerin enjekte edilerek mekanik olarak karıştırılması esasına dayanan bir zemin iyileştirme tekniğidir. Yöntem, bağlayıcının durumu (ıslak veya kuru), karıştırma tipi (döner enerji veya yüksek basınçlı jet) ve uygulama yeri (sondaj ucunda veya shaft boyunca) dikkate alınarak sınıflandırılmaktadır.

Derin zemin karıştırma yöntemi uygulama alanları:

- Hidrolik cut-off duvarları
- Kazı destek duvarları
- Sıvılaşma kontrolü
- Zemin iyileştirme uygulaması
- Yerinde güçlendirme (veya zemin iyileştirme) ve kazıklar
- Çevresel iyileştirme

Derin zemin karıştırma yönteminin temel amacı, iyileştirme bölgesinde homojen özelliklere sahip zemin kütleleri elde etmektir. Bu hedefe ulaşmak için uygun su/çimento oranı ile birlikte bağlayıcının zeminle koordineli şekilde karıştırılması büyük önem taşır. Yöntem sonrasında elde edilen kolonların performansı, laboratuvar deneyleriyle değerlendirilir. Ancak bu testlerde, bağlayıcı miktarı ve kürleme süresi dışındaki faktörlerin kontrolü ve simülasyonu sınırlıdır. Bu nedenle laboratuvar sonuçları kesinlik taşımamakla birlikte, geçmiş çalışmalardan elde edilen ampirik veriler dayanım tahminlerinde yol gösterici olmaktadır (Bruce, 2000)

İyileştirme sonrasında zeminlerin mühendislik özelliklerinde önemli değişiklikler gözlenir. Bunlar arasında dayanım, elastisite modülü, poisson oranı, permeabilite katsayısı ve birim hacim ağırlık yer alır. Stabilite analizlerinde dayanım ve birim hacim ağırlık, oturma analizlerinde ise elastisite modülü ile kullanılır. Hidrolik bariyer uygulamalarında ise sızıntı analizleri için permeabilite katsayısından faydalanılır (Federal Highway Administration, 2013b). Bu özellikler çoğunlukla Çizelge 2.3’de verilen aralıklar içinde yer almakla birlikte, özel projelerde farklı değerler elde etmek amacıyla karışım parametreleri geliştirilebilir (Bruce, 2000).

**Çizelge 2.3.** Derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmiş zeminlere ait mühendislik özellikleri

Özellik	Değer
Serbest basınç mukavemeti ( $q_u$ )	0,2-5,0 MPa (0,5-5 MPa granüler zeminlerde) (0,2-2 MPa kohezyonlu zeminlerde)
Permeabilite katsayısı (k)	$1 \times 10^{-6}$ - $1 \times 10^{-9}$ m/s (Bentonit kullanılması halinde daha düşük bir değer alır.)
Elastisite modülü (E)	(350-1000) $q_u$ (laboratuvar) (150-500) $q_u$ (arazi)
Kayma mukavemeti	$q_u < 1$ MPa ise (%40-50) $q_u$
Çekme mukavemeti	(%8-14) $q_u$
28 günlük serbest basınç mukavemeti	Silt ve killer için 7 günlük dayanımın 1,4-1,5 katı Kumlar için 7 günlük dayanımın 2 katı
60 günlük serbest basınç mukavemeti	28 günlük dayanımın 1,5 katı

İyileştirilmiş zeminin dayanımı; kullanılan bağlayıcı maddenin türü ve miktarı, zemin özellikleri, karıştırma süreci, su/çimento oranı, kür koşulları ve yükleme zamanı gibi birçok etkene bağlıdır. Bu faktörlerin optimize edilmesi, nihai zemin performansının güvenilir ve öngörülebilir olmasında kritik rol oynamaktadır (Çizelge 2.4).

**Çizelge 2.3.** Derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilen zeminlerin mukavemetini etkileyen faktörler (Terashi, 1999)

Bağlayıcı maddenin özellikleri	1. Bağlayıcının türü 2. Bağlayıcının kalitesi 3. Su ve diğer katkı maddeleriyle karıştırılması
İyileştirilecek zeminin özellikleri	1. Zeminin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri 2. Organik içerik 3. Boşluk suyunun pH değeri 4. Su muhtevası
Karıştırma durumu	1. Karıştırma derecesi 2. Karıştırma süresi 3. Bağlayıcı kalitesi
Kürlenme durumu	1. Sıcaklık 2. Kürlenme süresi 3. Nem oranı 4. Islaklık ve kuruluk/ donma ve çözülme vb.
Yükleme durumu	1. Yükleme oranı 2. Yanal basınç 3. Gerilme (Basınç, kesme vb.)

Mevcut yöntemlerdeki gelişmeler ve malzeme yenilikleri, derin karıştırma yönteminin etkinliğini artırmaya devam etmektedir. Kullanılan bağlayıcı malzemeler; yöntem, zeminin özelliklerine ve hedeflenen performansa göre uyarlanmakta olup, genellikle çimento, su, bentonit, kil, alçıtaşı, uçucu kül ve çeşitli katkı maddelerinden oluşmaktadır. Su/çimento oranı genellikle 1 ile 2 arasında değişmekte ve zeminin geçirimsizliğine bağlı olarak ayarlanmaktadır. Kohezyonlu zeminlerde aynı dayanımı sağlamak için kohezyonsuz zeminlere kıyasla daha fazla bağlayıcıya ihtiyaç duyulmaktadır. Kuru enjeksiyon yöntemlerinde çimento ve/veya kireç kullanılırken, tipik olarak 1 m<sup>3</sup> zemin için 100-300 kg kuru malzeme gerekmektedir. Islak yöntemlerde ise bu oran 100-500 kg/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir. Sahada yapılan ıslah çalışmaları sonucunda elde edilen dayanım değerlerinin, laboratuvar ortamında elde edilenlere kıyasla 1/2 ila 1/5 oranında düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca kürleme süresi arttıkça zemin mukavemetinin de zamanla artmaya devam ettiği, bazı durumlarda bu artışın 6 aya kadar sürebildiği bildirilmiştir (Çizelge 2.5) (Bruce, 2000; New York State Department of Transportation, 2013).

**Çizelge 2.4.** Islak yöntem ile iyileştirilen zeminlerin mukavemet değerleri (Elias, 2006)

Zemin cinsi	Mukavemet Değeri (psi)
Organik ve çok plastik killer	175
Yumuşak killer	60 – 220
Orta / sert kil	100 – 360
Siltler	145 – 435
İnce ve orta dereceli kumlar	220 – 725

### 3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

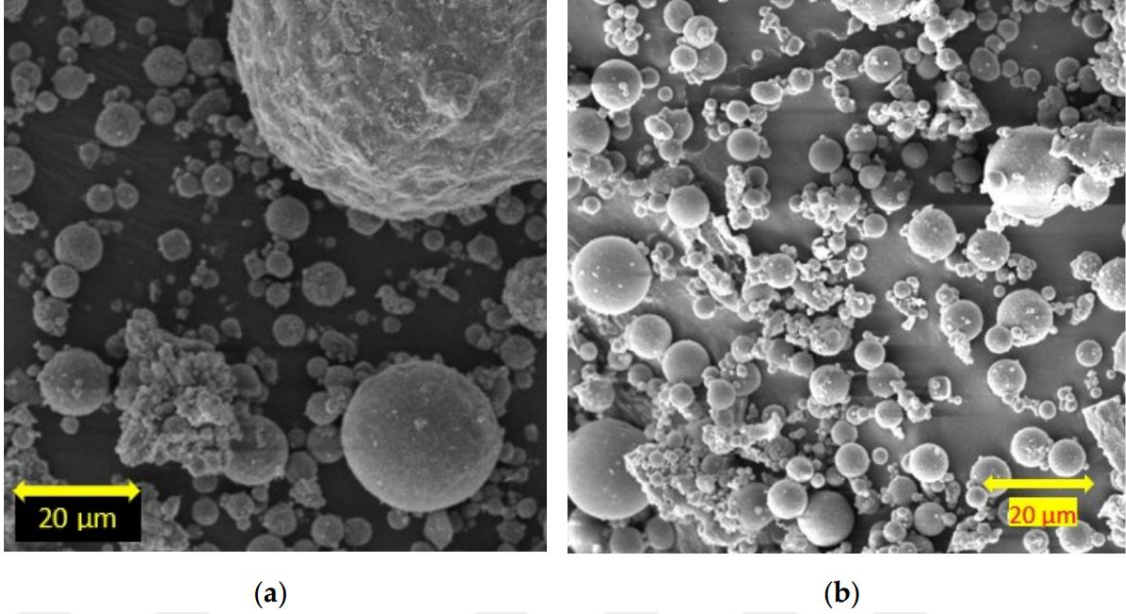
#### 3.1. C Sınıfı Uçucu Kül ile Zemin İyileştirme

Kumlu ve killi ince taneli zeminler, düşük mekanik dayanımları ve yük altında gösterdikleri hacim değişiklikleri nedeniyle yapıların stabilitesini olumsuz etkileyerek büyük yapısal hasarlara yol açabilir. Bu durum, özellikle bu tür zeminlerde inşa edilen yapılarda ciddi mali kayıplara neden olmaktadır (Turan vd., 2022c). Bu zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için çeşitli stabilizasyon yöntemleri kullanılmakta olup, kimyasal stabilizasyon, bu yöntemler arasında kalıcı ve etkili çözümler sunması nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu bağlamda, çevre dostu ve ekonomik özellikleri ile öne çıkan C sınıfı uçucu kül, kil ve kum içeren zeminlerin stabilizasyonunda güçlü bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Yazıcı ve Unsever, 2024).

C sınıfı uçucu kül, yüksek kalsiyum içeriği sayesinde puzolanik ve çimentomsu özelliklere sahiptir. Bu özellikleriyle, zeminlerin optimum su içeriğini artırmak, maksimum kuru yoğunluk değerlerini iyileştirmek ve kesme ile sıkıştırma dayanımını yükseltmek için etkin bir katkı maddesi olarak kullanılır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, C sınıfı uçucu külün ince taneli zeminlerdeki şişme potansiyelini azaltarak ve taşıma kapasitesini artırarak bu zeminlerin inşaat projelerinde güvenli bir temel oluşturduğunu göstermektedir (Turan vd., 2022; Yazıcı ve Unsever, 2024).

C sınıfı uçucu kül, yüksek kalsiyum içeriği (%20-40) nedeniyle kendiliğinden çimentolanma özelliği gösterir. Bu, su varlığında sertleşmesini sağlayarak, zemin stabilizasyonunda bağlayıcı madde eklemeye gerek kalmadan kullanım imkânı sunar. Parçacık boyutları genellikle ince taneli olup, küresel veya düzensiz şekillerde olabilir ve ortalama 12-80 µm arasında değişir. C sınıfı uçucu kül, kum ve silt zeminlere kıyasla daha düşük maksimum kuru yoğunluğa ve geçirimsizliğe sahiptir. Bu düşük geçirimsizlik, yüksek kalsiyum içeriğinden kaynaklanır ve zemin iyileştirme projelerinde önemli bir avantaj sağlar. Ayrıca, C sınıfı uçucu külün kesme direnci açısı 26° ile 42° arasında olup, zemin dayanımını artırmada etkilidir (Turan vd., 2022c).

C sınıfı uçucu külün mikro yapısı ve yüzey morfolojisi Şekil 3.1'de sunulmaktadır.



**Şekil 3.1.** C sınıfı uçucu kül (a) ve F sınıfı uçucu külün (b) 20  $\mu\text{m}$ 'deki SEM görüntüleri (Turan vd., 2022a).

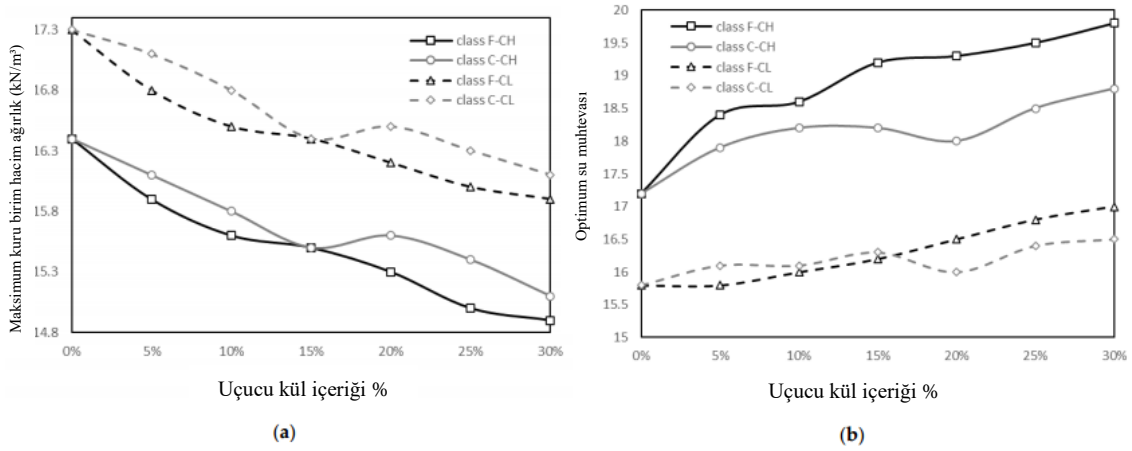
C sınıfı uçucu kül, silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ), alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) gibi bileşenlerin yanı sıra yüksek miktarda kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ) içerir. Pozolanik reaksiyon yeteneğine sahip olması sayesinde, su ile birleştiğinde çimentomsu bir yapı oluşturarak zemin dayanımını zamanla artırır. C sınıfı uçucu kül, doğal pozolanik özelliği sayesinde stabilizasyon projelerinde kendi başına etkili bir madde olarak kullanılabilir. Bu özellikleri, kil gibi ince taneli zeminlerde şişme ve oturma problemlerini azaltmada oldukça faydalıdır (Turan vd., 2022c).

### 3.1.1. Killi zeminlerin iyileştirilmesi

C sınıfı uçucu kül kullanılarak ince taneli zeminlerin (özellikle kil ve silt) stabilize edilmesi, zemin özelliklerini önemli ölçüde iyileştirir. Bu iyileştirmeler, zeminlerin stabilite, taşıma kapasitesi, dayanım ve şişme gibi temel geoteknik özelliklerini kapsar (Turan vd., 2022c).

- *Kıvam Limitleri:* C sınıfı uçucu külün zeminle karıştırılması, zeminlerin plastik ve likit kıvam limitlerini artırarak plastik sınırlarını artırır. Bu durum, kil içeriğinin azalması ve uçucu kül parçacıklarının kil ile flokülasyon yaparak kilin çift tabaka kalınlığını azaltmasından kaynaklanır. Bu etki, zeminin şişme potansiyelini azaltır ve yüksek plastisiteli kil (CH) zeminlerin düşük plastisiteli kil (CL) veya silt (ML) sınıflarına dönüşmesini sağlar. Böylece, şişme sorunu olan zeminlerin kullanım potansiyeli artırılır (Turan vd., 2022c).

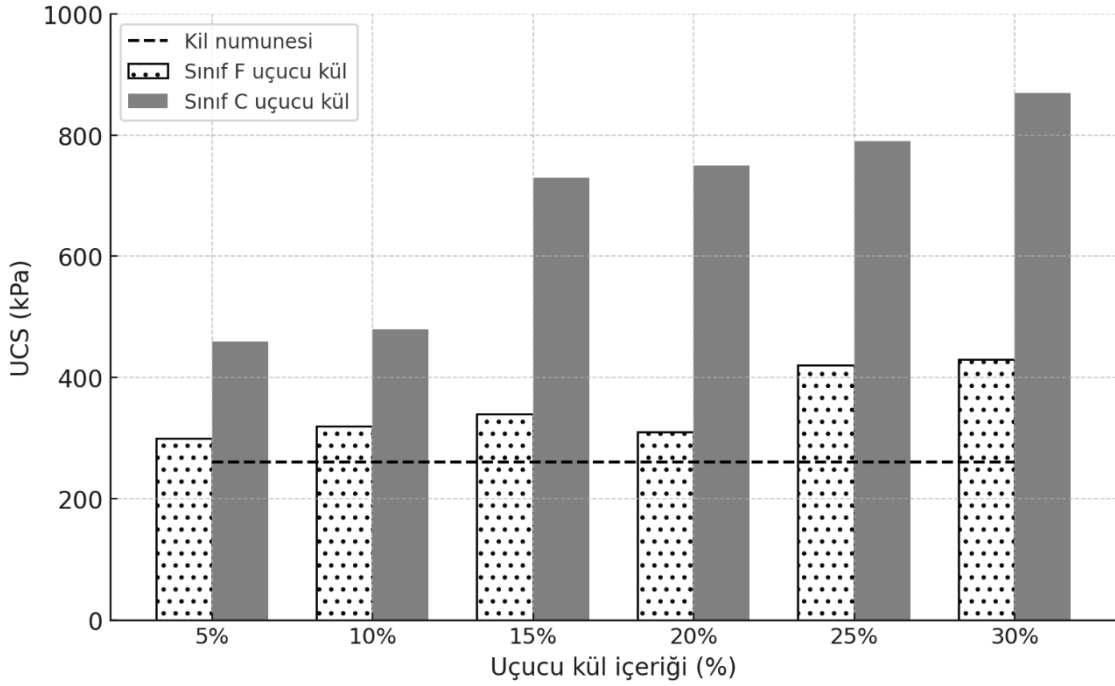
- **Kompaksiyon özellikleri:** Sıkıştırma işlemi sırasında C sınıfı uçucu kül eklenmesi, zeminin maksimum kuru yoğunluğunu düşürür ve optimum nem içeriğini artırır. Uçucu külün düşük özgül ağırlığı ve ince taneli yapısı, zeminle birleştiğinde kuru yoğunluğun düşmesine yol açar. Bu değişiklik, yol alt yapılarında veya dolgu projelerinde kompaksiyon parametrelerinin optimum seviyede olmasını sağlar. Ayrıca, uçucu kül, çimentomsu yapısı sayesinde, zemin parçacıkları arasında çimentolu ürünler oluşturarak zemin sıkıştırıldığında daha dayanıklı hale gelir (Turan vd., 2022c). Uçucu kül katkısının farklı zemin sınıflarında kompaksiyon parametreleri üzerindeki etkileri Şekil 3.2’de sunulmuştur.



**Şekil 3.2.** Yüksek ve düşük plastisiteli kilin sıkıştırma özellikleri üzerine F ve C sınıfı uçucu külün etkisi (a) maksimum kuru birim ağırlık ve (b) optimum su muhtevası (Seyrek, 2018)

- **CBR özellikleri:** California Taşıma Oranı (CBR) değeri, özellikle yol yapımı gibi projelerde alt temel veya dolgu malzemesi olarak kullanılan zeminlerin taşıma kapasitesini değerlendirmede önemlidir. C sınıfı uçucu kül, katkı olarak kullanıldığında, ince taneli zeminlerin CBR değerlerini artırır. Uçucu külün yüksek kalsiyum içeriği ve çimentomsu özellikleri, kür süresi boyunca dayanımı artırarak zeminin taşıma kapasitesini yükseltir. 7 gün veya daha uzun süre kür uygulandığında, CBR değerinde daha fazla artış gözlenir ve bu, stabilizasyon uygulamalarında uzun vadeli performans sağlar (Turan vd., 2022c).
- **Serbest Basınç Dayanımına (UCS) Etkisi:** Serbest basınç dayanımı (UCS), zemin stabilizasyon projelerinde önemli bir dayanım göstergesidir. C sınıfı uçucu kül ile stabilize edilen zeminlerde, yüksek kalsiyum içeriği ve çimentomsu reaksiyonlar nedeniyle UCS değeri önemli ölçüde artar (Şekil 3.3). Bu uçucu kül türü, kalsiyum oksit (CaO) içeriği yüksek olduğu için, zemin parçacıkları arasında pozolanik

reaksiyonlar yoluyla dayanıklı bağlar oluşturarak zemin dayanımını artırır. Kür süresi uzadıkça UCS değeri artmaya devam eder, çünkü çimentomsu bileşiklerin oluşumu zamanla güçlenir ve daha sağlam bir yapı sağlar (Turan vd., 2022c).



Şekil 3.3. 1 günlük kür süresinde C ve F sınıfı uçucu kül ile stabilize edilen düşük plastisiteli kilin UCS sonuçları (Savaş vd., 2018)

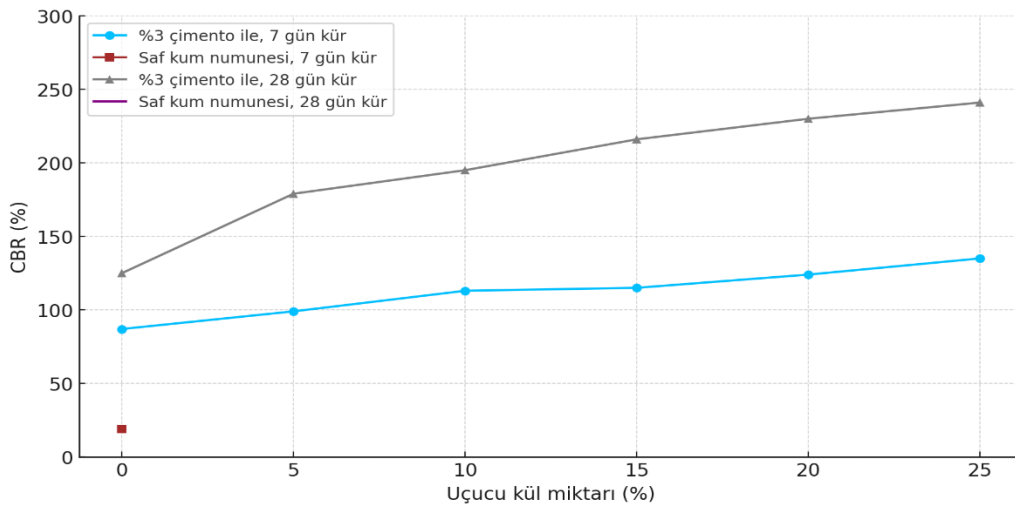
- *Kesme Dayanımına Etkisi:* Kesme dayanımı, zemin stabilizasyonunda kritik bir parametredir ve zeminin stabilitesini ve dayanımını etkiler. C sınıfı uçucu kül, kil partikülleri ile etkileşime girerek kesme direnci açısını ve kohezyonu artırır. Bu etki, uçucu külün içindeki pozolanik bileşiklerin çimentomsu bağlar oluşturmasından kaynaklanır. Uçucu kül, suyla birleştiğinde kalsiyum silikat hidrat (CSH) ve kalsiyum alüminat hidrat (CAH) gibi dayanıklı bileşikler oluşturarak zemin dayanımını artırır ve zeminlerde uzun vadeli stabilizasyon sağlar (Turan vd., 2022c).
- *Şişme, Konsolidasyon ve Geçirimsizliğe Etkisi:* Şişen zeminler, özellikle suya duyarlı olan yapılar ve hafif binalar için problem teşkil eder. C sınıfı uçucu kül, bu tür zeminlerde şişme potansiyelini azaltmak için etkin bir katkı malzemesidir. Şişme oranı ve serbest şişme indeksi gibi parametreler, uçucu kül katkısı ile önemli ölçüde azalır. Uçucu külün içindeki çok değerli katyonlar, kil partikülleri ile etkileşime girerek flokülasyon yaratır ve zeminin su tutma eğilimini düşürür.

Ayrıca, C sınıfı uçucu kül, zeminlerin sıkıştırılabilirlik katsayısını düşürerek konsolidasyon özelliklerini iyileştirir. Uçucu kül, pozolanik reaksiyonlarla zeminde çimentomsu bağlar oluşturarak konsolidasyon sürecinde daha yüksek dayanım sağlar. Geçirimsizlik açısından, uçucu kül ile stabilize edilmiş zeminlerin geçirimsizliği artabilir; ancak kür süresi ile birlikte çimentomsu bağların oluşması geçirimsizlik oranını azaltır. Böylece, uzun vadeli kür süreci sayesinde zeminlerin dayanımı artarken, geçirimsizlik azalarak zeminlerde daha stabil bir yapı elde edilir (Turan vd., 2022c).

### 3.1.2. Kumlu zeminlerin iyileştirilmesi

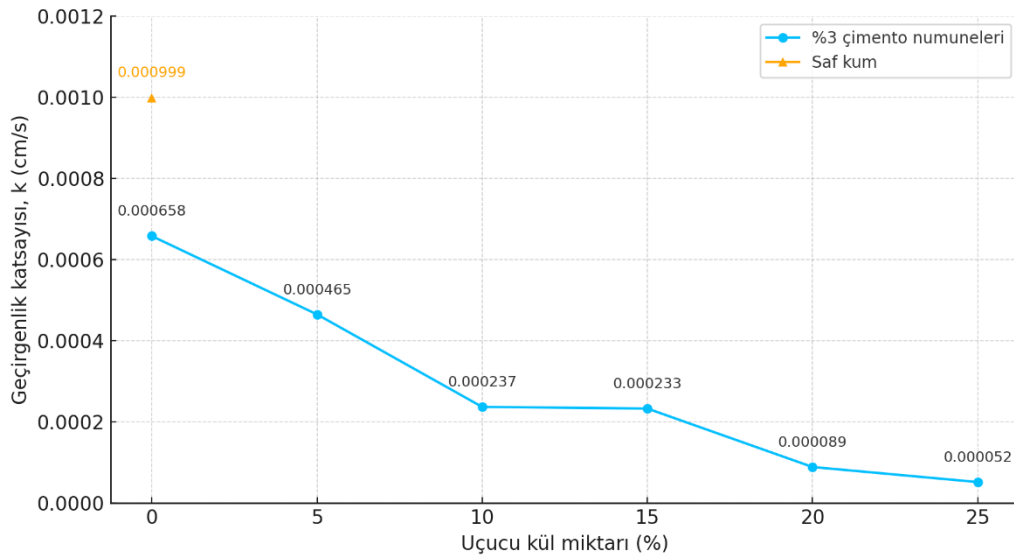
C sınıfı uçucu kül kullanımı, kumlu zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirerek zemin dayanımını ve stabilitesini artırır. C sınıfı uçucu kül, yüksek kalsiyum içeriği nedeniyle çimentomsu ve pozolanik özellikler gösterir. Bu, özellikle kumlu zeminlerin sıkıştırılabilirlik, taşıma kapasitesi, kesme dayanımı ve geçirimsizlik gibi özelliklerinde önemli iyileştirmeler sağlar (Yazıcı vd., 2024).

- **CBR özelliği:** California Taşıma Oranı (CBR) testleri, C sınıfı uçucu külün kumlu zeminlerin taşıma kapasitesini artırmada oldukça etkili olduğunu göstermektedir. Uçucu kül oranının artırılması, zemin dayanımında önemli bir yükselişe yol açar (Şekil 3.4). Bu etkinin en belirgin olduğu nokta, kür süresidir. Örneğin, 7 günlük bir kür süresine kıyasla 28 gün sonunda zemin dayanımında yaklaşık iki kat artış gözlemlenir. Bu artış, C sınıfı uçucu külün çimentomsu özelliklerinin kür süresiyle güçlenmesiyle ilgilidir ve uzun vadede dayanıklı bir zemin yapısı sağlar.



Şekil 3.4. 7 ve 28 günlük kürleme sonrası CBR test sonuçları (Yazıcı vd., 2024)

- *Kesme Dayanımı ve İçsel Sürtünme Açısına Etkisi:* C sınıfı uçucu kül eklenmesiyle yapılan doğrudan kesme testleri, kumlu zeminlerde içsel sürtünme açısının ve kohezyon değerlerinin arttığını göstermektedir. Özellikle gevşek kumlu zeminlerde içsel sürtünme açısında belirgin bir artış gözlenirken, sıkı kumlu zeminlerde kohezyon değeri daha fazla artar. Bu durum, uçucu kül parçacıklarının zemin partikülleri arasındaki boşlukları doldurarak daha güçlü bir bağ yapısı oluşturmasından kaynaklanır. Pozolanik reaksiyonlar sayesinde zemin partikülleri arasında güçlü bağlar oluşur, bu da zemin dayanımını ve stabilitesini artırır (Yazıcı ve Unsever, 2024).
- *Geçirimsizliğe Etkisi:* Geçirimsizlik testleri, C sınıfı uçucu kül eklenen kumlu zeminlerin geçirimsizliğinde önemli bir azalma olduğunu göstermektedir. Uçucu kül, zemin partikülleri arasındaki boşlukları doldurarak daha yoğun bir yapı oluşturur ve böylece zemin geçirimsizliğini azaltır. Özellikle yüksek miktarda uçucu kül ilavesiyle, suyun zemin içindeki hareket hızı belirgin bir şekilde düşer. Bu özellik, zemin dolgularında ve suya duyarlı projelerde kumlu zeminlerin dayanıklılığını artırmak için avantaj sağlar. Sonuç olarak, C sınıfı uçucu kül kullanımı kumlu zeminlerin stabilizasyonunda etkin bir çözüm sunar. Bu katkı maddesi, zeminlerin taşıma kapasitesini artırmak, kesme dayanımını iyileştirmek ve geçirimsizliği azaltmak için kullanılabilir. C sınıfı uçucu kül katkısının kumlu zeminlerin geçirimsizlik katsayısına etkisi Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Düşen seviyeli geçirimsizlik testi sonuçları (Yazıcı vd., 2024)

### 3.1.3. Sahadaki uygulamalar

C sınıfı uçucu kül ile stabilize edilmiş kumlu ve killi zeminlerin saha uygulamaları, genellikle karayolu yapımı ve zemin stabilizasyonu alanlarında etkili sonuçlar göstermektedir. ABD Federal Karayolu İdaresi (FHWA) tarafından önerilen uçucu kül katkısı, temel ve alt temel tabakalarında, yanal toprak basıncının azaltılmasında ve şev stabilitesinin artırılmasında kullanılabilir. ASTM D7762 standardına göre, %8-16 arasında uçucu kül oranı stabilizasyon için uygun görülmektedir (ASTM International, 2015).

Killi zeminlerde uçucu kül katkısının plastisite indisini ve şişme potansiyelini düşürdüğü ve dayanımı önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir (Senol et al., 2006). Parsons ve Kneebone'un çalışmaları, özellikle düşük plastisiteli killerde, dayanımda %40-250 arasında artış sağlamıştır. Ancak yüksek plastisiteli killerde uçucu kül tek başına şişmeyi tamamen engellemeyebilir (Turan vd., 2022c).

Kumlu zeminlerde ise, yapılan çalışmalar %10 uçucu kül katkısının basınç dayanımını ve taşıma kapasitesini artırdığını göstermiştir. Özellikle CBR ve UCS değerlerinde saha koşullarında önemli iyileşmeler elde edilmiştir. Ayrıca, diğer bazı çalışmalar %25 uçucu kül katkısının dolgu malzemesi olarak kullanımını desteklemişlerdir, ancak saha testlerinde laboratuvar sonuçlarına göre daha düşük dayanım elde edilmiştir (Yazıcı ve Unsever, 2024).

### 3.1.4. Literatür özeti

Rivera vd. (2020) yaptıkları çalışmada, Kolombiya'da elde edilen A-4 tipi kumlu zemin, yüksek oranda yanmamış karbon içeren F1L ve F2G tipi uçucu kül bazlı alkali aktivasyonlu çimentolar ile %20 ve %30 oranlarında iyileştirilmiştir. Modifiye Proktor, serbest basınç, eğilme ve ıslanma-kuruma deneyleri uygulanmış ve özellikle %30 F2G katkısı ile 28 günlük kür sonunda serbest basınç dayanımının %44,02 oranında arttığı, 12 çevrim sonunda numunelerde %4,09 oranında kütle kaybı yaşandığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, yüksek yanmamış karbon içeriğine rağmen, bu tür bağlayıcıların kumlu zeminlerin çevreci ve etkili iyileştirme seçeneği olduğunu ortaya koymuştur (Rivera vd., 2020).

Khan vd. (2022) yaptıkları çalışmada, yüksek plastisiteli kil zemin, atık bazlı katkı maddeleri olan kırmızı çamur, uçucu kül ve nano silika ile iyileştirilmiştir. Katkılar %5–20 arasında tekli ve kombine şekilde uygulanmış; Atterberg limitleri, standart Proktor kompaksiyon, serbest basınç dayanımı (UCS), hacimsel küçülme testleri ve mikro yapısal analizler (SEM, XRD, TGA/DTA) gerçekleştirilmiştir. Bulgulara göre katkılar, plastikliği

azaltmış, kuru birim hacim ağırlığını artırmış ve UCS değerlerinde önemli iyileşmeler sağlamıştır. Özellikle üçlü katkı (uçucu kül + kırmızı çamur + nano silika) kullanımı, 28 günlük kürde en yüksek mukavemet artışını sağlamış ve mikro yapısal analizler, daha yoğun ve bağlayıcı fazların oluştuğunu göstermiştir. Bu çalışma, endüstriyel atıkların çevresel bir yaklaşımla zemin iyileştirmede etkin şekilde kullanılabileceğini ortaya koymuştur (Zimar vd., 2022).

Deepak vd. (2021) yaptıkları çalışmada, yüksek plastisiteli kil zemin üzerinde F sınıfı ve C sınıfı uçucu kül ile birlikte farklı oranlarda (%2 ve %4) kireç kullanılarak zemin stabilizasyonu yapılmıştır. Stabilizasyon etkisini değerlendirmek amacıyla Atterberg limitleri, standart Proktor kompaksiyon ve serbest basınç dayanımı (UCS) deneyleri uygulanmıştır. Sonuçlar, sadece uçucu kül katkısının zemin özelliklerinde anlamlı bir iyileşme sağlamadığını, ancak kireçle birlikte kullanıldığında plastisite değerlerinde azalma, işlenebilirlikte artış ve parçacıklar arası mesafenin azalması yoluyla daha yoğun ve dayanıklı bir zemin matrisi oluşturduğunu göstermiştir. Özellikle %4 kireç ve %3 C sınıfı uçucu kül kombinasyonu, 28 günlük kür sonunda %27,23 oranında dayanım artışı sağlayarak en iyi performansı sergilemiştir. Bu bağlamda, C sınıfı uçucu külün F sınıfına göre daha etkili olduğu ve zemin iyileştirmede tercih edilebileceği ortaya konulmuştur (Deepak vd., 2021).

Turan vd. (2022) yaptıkları çalışmada, düşük plastisiteli kil zemin, ASTM C618 standardına göre (ASTM International, 2015) sınıflandırılan C ve F sınıfı uçucu küllerin farklı oranlarda (%10, %20, %30) ilavesiyle iyileştirilmiştir. Numuneler 7, 14 ve 28 gün kürlenmiş ve serbest basınç dayanımı (UCS) ile mikro yapısal özellikler XRD, SEM ve FTIR analizleriyle değerlendirilmiştir. Sonuçlar, her iki uçucu kül sınıfının da dayanımı artırdığını, ancak C sınıfı uçucu külün içerdiği yüksek kalsiyum oranı sayesinde daha belirgin puzolanik reaksiyonlar oluşturduğunu ve böylece mukavemette daha fazla artış sağladığını göstermiştir. Mikro yapı analizleri, özellikle C sınıfı katkılı numunelerde daha yoğun ve az boşluklu matris yapısının oluştuğunu ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, C sınıfı uçucu külün düşük plastisiteli kil zeminlerin iyileştirilmesinde etkili ve sürdürülebilir bir katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Turan, 2022).

Turan vd. (2022) yaptıkları derleme çalışmasında, ince taneli zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesinde uçucu kül kullanımına dair literatürde yer alan araştırmalar kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. ASTM C618 standardına göre sınıflandırılan C ve F sınıfı uçucu küllerin, kil ve silt gibi düşük dayanımlı zeminlerin plastisite, sıkışabilirlik, geçirimsizlik, şişme ve dayanım özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bulgular,

uçucu kül katkısının genellikle optimum su muhtevasını artırdığı, maksimum kuru birim hacim ağırlığını düşürdüğü ve plastisite indeksini azalttığını göstermektedir. Ayrıca, özellikle kireç veya çimento gibi aktif bileşenlerle birlikte kullanıldığında, uçucu külün serbest basınç dayanımı, CBR ve hacimsel stabilite gibi mekanik özellikleri belirgin şekilde iyileştirdiği vurgulanmıştır. Mikro yapısal analizlerin de yer aldığı çalışmalarda, uçucu külün zemin matrisinde bağlayıcı faz oluşumuna katkı sağladığı ve çevresel olarak sürdürülebilir bir stabilizasyon malzemesi olduğu sonucuna varılmıştır (Turan ve Vinai, 2022b).

Shirkhanloo vd. (2021) yaptıkları çalışmada, yüksek plastisiteli kil zemin üzerinde gerçekleştirilen deneysel bir araştırma ile ASTM C618 standardına göre sınıflandırılan C ve F sınıfı uçucu küllerin farklı oranlarda (%10, %15, %20, %25 ve %30) katkı olarak eklenmesiyle zemin iyileştirme potansiyelleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Uygulanan deneyler arasında Atterberg limitleri, standart Proktor kompaksiyon, serbest basınç dayanımı (UCS) ve CBR testleri yer almakta olup, numuneler 1, 7 ve 28 günlük kür sürelerine tabi tutulmuştur. Elde edilen bulgulara göre %25 oranına kadar uçucu kül katkısı, sıvı limit ve plastisite indeksinde azalma, UCS ve CBR değerlerinde ise belirgin artış sağlamıştır. Özellikle C sınıfı uçucu kül, yüksek kalsiyum (CaO) içeriği sayesinde daha güçlü puzolanik ve çimentolaşma reaksiyonları oluşturmuş ve F sınıfına göre daha yüksek mekanik performans sunmuştur. %25 C sınıfı kül katkısıyla 28 günlük kür sonunda UCS değeri 470 kPa'ya ulaşmış, aynı oranda CBR değeri ise %32,7 olarak kaydedilmiştir. Ayrıca, katkı oranı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlığının azaldığı, optimum su muhtevasının ise arttığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, C sınıfı uçucu külün yüksek plastisiteli kil zeminlerin iyileştirilmesinde daha etkili ve tercih edilebilir bir katkı malzemesi olduğunu ortaya koymuştur (Shirkhanloo vd., 2021).

### **3.2. Nano Silika ile Zeminlerin İyileştirilmesi**

İnşaat alanlarında zayıf zeminlerin yaygın olarak bulunması, bu zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için yeni yöntemlerin araştırılmasını gerekli kılmaktadır. Son yıllarda nanoteknoloji, zemin iyileştirme alanında önemli bir konu haline gelmiştir. Nanoteknolojinin kullanımı, zemin parçacıklarının nano ölçekte değiştirilmesiyle daha dayanıklı, suya ve yük taşımaya karşı dirençli özellikler kazandırarak zemin özelliklerini iyileştirmeyi mümkün kılmaktadır.

Nano silika (NS), maliyetinin diğer nano malzemelere göre daha düşük olması nedeniyle bu alanda en yaygın kullanılan nano parçacıktır. Yapılan araştırmalar, nano

silikanın hem killi hem de kumlu zeminlerin iyileştirilmesinde olumlu etkiler yarattığını göstermektedir. NS katkısı, zeminlerin kıvam, kesme dayanımı, geçirimsizlik ve sıkıştırılabilirlik gibi özelliklerini artırırken, zeminlerin donma ve çözülme gibi çevresel etkilere karşı dayanıklılığını da arttırmaktadır. Bu özellikler, nano silikayı özellikle çevresel koşullarda stabilizasyon sağlamak amacıyla tercih edilen bir katkı maddesi yapmaktadır.

Araştırmalar, nano silikanın serbest basınç dayanımını (UCS) artırdığı ve geçirimsizliği azalttığını, aynı zamanda zeminlerin sıkışma ve kesme özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Küçük oranlarda NS katkısının bile zeminlerin geoteknik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebileceği kanıtlanmıştır. Bu çalışmada, çimento ile veya çimento olmaksızın stabilizasyon yapılan kumlu ve killi zeminlerde farklı NS oranlarının zeminlerin yoğunluk, sertlik, kıvam ve stabilite özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir (Aksu vd., 2023).

### 3.2.1. Killi zeminlerin iyileştirilmesi

Kil yapısındaki topraklar, yüksek su emme ve genişleme özelliklerinden dolayı genellikle stabil olmayan zeminlerdir. Bu tür zeminler, su kaybı durumunda büzülme ve çatlama gösterir. Nano silika, killi toprak ile kimyasal reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum Alüminat hidrat (C-A-H) gibi bağlayıcı jel yapılar oluşturarak zeminin stabilitesini artırır (Aksu vd., 2023).

#### *Kimyasal Reaksiyonlar:*

Nano silika ve kalsiyum hidroksit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) arasındaki temel kimyasal reaksiyonlar, killi zeminlerin mukavemet ve stabilitesini arttıran bağlayıcı maddelerin oluşumunu sağlar. Bu reaksiyonlardan bazıları şu şekildedir:

- Kalsiyum Silikat Hidrasyon Reaksiyonu:



Bu reaksiyon sonucunda oluşan C-S-H jeli, kil partikülleri arasında güçlü bağlar oluşturarak zemin içindeki boşlukları doldurur ve dayanımı artırır.

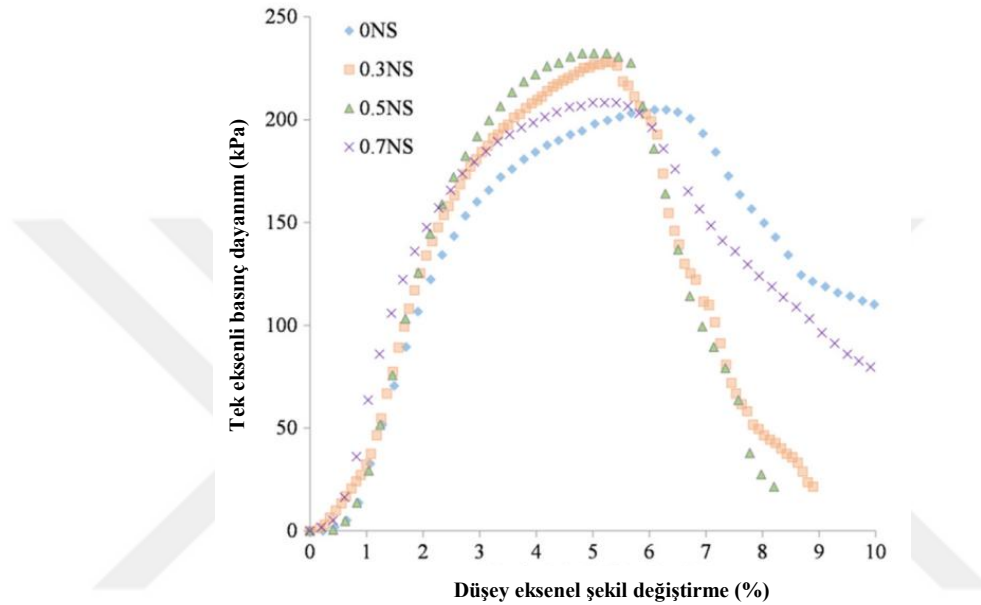
- Kalsiyum Alüminat Hidrasyon Reaksiyonu:



Bu jel yapısı, killi toprakların su ile temasında şişme oranını azaltır ve zemin yüzeyini sıkılaştırır.

### Ek Etkiler:

- *Şişme Potansiyelinin Azaltılması:* Nano silika eklenmesi, kil partiküllerinin su emme kapasitesini düşürerek zeminlerin şişme potansiyelini azaltır.
- *Mukavemet Artışı:* Kimyasal bağlanma nedeniyle killi toprakların taşıma kapasitesi artar. Nano silikanın killi zeminlerdeki gerilme-deformasyon davranışına etkisi Şekil 3.6’da sunulmuştur.



Şekil 3.6. Nano Silika (NS) ile işlenmiş kilin gerilme-deformasyon davranışı

- *Düşük Geçirimsizlik:* Nano silika, zemindeki mikro boşlukları doldurarak suyun geçişini zorlaştırır ve geçirimsizliği azaltır (Aksu vd., 2023).

### 3.2.2. Kumlu zeminlerin iyileştirilmesi

Kumlu topraklar, doğal olarak düşük bağlayıcılık ve yüksek geçirimsizlik özelliklerine sahiptir, bu da yapı projeleri için sınırlı bir stabilite sunar. Nano silika, kum taneleri arasında bağlayıcı jeller oluşturarak kumlu zeminin dayanımını artırır ve geçirimsizliğini azaltır (Aksu ve Eskisar, 2023).

Nano silikanın kumlu zeminler üzerindeki etkileri, genellikle kalsiyum bileşikleriyle girdiği reaksiyonlardan kaynaklanır:



Bu jel yapılar, kum taneleri arasındaki boşlukları doldurur, sıkışmayı ve mukavemeti artırır.

Nano silika, zemin içindeki boşlukları doldurarak geçirimsizliği azaltır ve sıkışmayı kolaylaştırır. Bu özellik, kumlu zeminlerin daha yoğun ve stabil bir yapı oluşturmalarına katkı sağlar.

*Ek Etkiler:*

- *Geçirimsizliğin Azaltılması:* Nano silika, kumlu zeminin geçirimsizliğini düşürerek suyun hızla geçişini engeller.
- *Sıkışma ve Stabilite Artışı:* Nano silika, kum taneleri arasındaki bağları güçlendirerek daha dayanıklı bir zemin yapısı sağlar.
- *Yüksek Taşıma Kapasitesi:* Kumlu zeminlerin yük taşıma kapasitesi, nano silika katkısıyla artar; bu, özellikle ağır yüklü projelerde temel olarak kullanılmasını sağlar.

Nano silika katkısının killi ve kumlu zeminlerde yarattığı bağlayıcı etkiler, bu zeminlerin mühendislik performansını büyük ölçüde iyileştirmektedir. Yapılan bu çalışmalar, nano silikanın zemin iyileştirme projelerinde çevre dostu, ekonomik ve dayanıklı bir seçenek olduğunu göstermektedir (Aksu ve Eskisar, 2023).

### **3.2.3. Literatür özeti**

Adak vd. (2014) yaptıkları çalışmada, düşük kalsiyum içeren F sınıfı uçucu kül bazlı geopolimer harçlarda nano silika katkısının etkisi, farklı molar derişimlerde (8M, 10M, 12M) ve %0, %4, %6, %8, %10 oranlarında değerlendirilmiştir. Numuneler ortam sıcaklığında kür edilmiş ve mekanik özelliklerin yanı sıra dayanıklılık parametreleri de analiz edilmiştir. Deney programı kapsamında basınç dayanımı, eğilme ve çekme dayanımı, su emme oranı, RCPT (hızlı klor iyonu geçirim testi), XRD ve FESEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre %6 nano silika katkısı, ortam sıcaklığında kürlenmiş numunelerde en yüksek mekanik dayanım değerlerini sağlamış ve aynı zamanda su emme oranı ve RCPT değerlerinde belirgin düşüşler gözlemlenmiştir. Mikroyapı analizleri, bu katkı oranında matris içinde daha yoğun ve kristalin yapılar oluştuğunu ortaya koymuş; bu gelişmelerin, nano silikanın yüksek özgül yüzeyi sayesinde polimerleşme reaksiyonlarını hızlandırmasıyla ilişkili olduğu belirtilmiştir. Bu yönüyle nano silika

katkısı, geopolimer harçların hem mekanik hem de dayanım özelliklerini geliştirmede etkili bir katkı malzemesi olarak öne çıkmıştır (Adak vd., 2014).

Alshawmar'ın (2024) yaptığı çalışmada, şişme eğilimi yüksek olan kil zeminlerin sürdürülebilir yöntemlerle iyileştirilmesi amacıyla nano silika (0,4–1,2%) ve plantain yaprağı külü (5–15%) katkılarının birlikte kullanımı araştırılmıştır. Deneysel program kapsamında serbest basınç dayanımı (UCS), doğrudan kesme, CBR, şişme potansiyeli ve SEM analizleri uygulanmıştır. Elde edilen bulgulara göre, %1,2 nano silika ve %15 plantain yaprağı külü kombinasyonu, kür süresi 28 gün olduğunda UCS değerini yaklaşık 4,6 kat artırmış, kohezyon değerini 3,3 kat ve içsel sürtünme açısını 1,6 kat yükseltmiştir. Ayrıca CBR değeri %5,8 oranında iyileşmiş, şişme potansiyeli ise %74 oranında azalmıştır. SEM analizleri, katkı maddelerinin daha sıkı ve kristalize olmuş bir matris oluşturduğunu ve boşlukların azaldığını göstermiştir. Bu iyileştirmeler, nano silikanın mikro boşlukları doldurma kabiliyetiyle ve plantain yaprağı külünün doğal puzolanik reaktivitesiyle ilişkilendirilmiştir. Çalışma, çevre dostu atık malzemelerin birlikte kullanımının şişen zeminlerin iyileştirilmesinde etkin ve sürdürülebilir bir yöntem olabileceğini ortaya koymuştur (Alshawmar, 2024).

Chaudhary vd. (2024) yaptıkları çalışmada, yüksek plastisiteli kil zeminlerin iyileştirilmesine yönelik olarak nano silika ve nano silika bazlı bileşiklerin (nano SiO<sub>2</sub>, nano CaO–SiO<sub>2</sub>, nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>) mekanik, mineralojik ve mikroyapısal etkileri değerlendirilmiştir. Stabilizasyon sürecinde katkılar %2 oranında uygulanmış ve 7, 14 ve 28 günlük kür süreleriyle numuneler hazırlanmıştır. Deney programı kapsamında serbest basınç dayanımı (UCS), Atterberg limitleri, XRD ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, özellikle nano CaO–SiO<sub>2</sub> katkısının, 28 günlük kür sonunda UCS değerini yaklaşık %94 oranında artırdığını ortaya koymuş; plastisite indeksinde önemli ölçüde azalma, yapının daha yoğun ve stabil hale geldiği belirlenmiştir. XRD analizleri, CaO içeren katkılarda daha fazla puzolanik reaksiyon ürününün oluştuğunu, SEM görüntüleri ise nano katkılarla oluşan homojen ve mikroporozitesiz bir matris yapısını doğrulamıştır. Bu bağlamda, çalışma nano silika ve türevlerinin yüksek plastisiteli kil zeminlerin mekanik özelliklerini ve içyapısını geliştirmede yüksek potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuştur (Chaudhary vd., 2024).

Mustakim vd. (2021) yaptıkları çalışmada, uçucu kül (Class F) ve yüksek fırın cürufu (GGBFS) esaslı geopolimer betona nano silika (NS) ve silis dumanı (SF) katkılarının taze, mekanik ve mikroyapısal özellikler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. %0,5–2,5 aralığında değişen oranlarla uygulanan katkılarla hazırlanan karışımlar, açık hava

koşullarında 28 gün kürlenmiştir. Deneyle kapsamında işlenebilirlik (slump), priz süresi, basınç dayanımı, XRD, XRF, FTIR, SEM ve petrografik analizler gerçekleştirilmiştir. Bulgulara göre hem NS hem de SF katkıları, optimum oranda kullanıldığında (1,5%) basınç dayanımında belirgin iyileşmeler sağlamış; en yüksek dayanım değeri NS katkılı karışımda (63 MPa) elde edilmiştir. NS, yüksek özgül yüzeyi sayesinde gözenekleri doldurarak daha yoğun bir matris oluşumunu teşvik etmiş; aynı zamanda çözünabilir silika miktarını artırarak jeopolimerleşme reaksiyonlarını hızlandırmıştır. SF katkısı da benzer şekilde dayanımı artırmış, ancak NS'ye kıyasla daha düşük performans göstermiştir. FTIR ve XRD analizleri, her iki katkı maddesinin N-A-S-H ve N-C-S-H tipi bağlayıcı fazların oluşumuna katkıda bulunduğunu doğrulamıştır. Ayrıca SEM ve petrografik gözlemler, NS katkılı karışımda daha homojen bir iç yapı ve daha kuvvetli geçiş bölgeleri oluştuğunu göstermiştir. Bu bulgular, nano ve mikro boyuttaki silika kaynaklarının jeopolimer matrisin yoğunluğunu ve dayanıklılığını artırarak, geleneksel çimento esaslı malzemelere alternatif oluşturabilecek çevre dostu ve yüksek performanslı bağlayıcı sistemler sunduğunu ortaya koymaktadır (Mustakim vd., 2021).

Rahman vd. (2022) yaptıkları çalışmada, çimento esaslı kompozitlerin mühendislik özelliklerini geliştirmek amacıyla nano boyutta çimento (NC) ve nano silika (NS) katkılarının etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Katkı oranları %1 ila %5 arasında değiştirilmiş ve elde edilen karışımlar üzerinde işlenebilirlik, basınç dayanımı, çekme dayanımı, ultrases darbe hızı (UPV), porozite ve su emme oranı gibi testler uygulanmıştır. Bulgular hem NC hem de NS katkılarının taze ve sertleşmiş beton özelliklerini iyileştirdiğini; özellikle %2 katkı oranında en iyi performansların elde edildiğini göstermiştir. NS katkısı, yüksek özgül yüzeyi sayesinde yoğun mikro yapı oluşumunu teşvik ederek, boşluk oranını %18'e kadar azaltmış ve UPV değerini önemli ölçüde artırmıştır. NC katkısının ise hidrasyon sürecini hızlandırarak erken yaş dayanımlarında etkili olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca hem çekme hem de basınç dayanımı açısından %2 NS katkılı örneklerin en yüksek değerleri sunduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, nano boyuttaki çimento ve silika katkılarının, betonun iç yapısını sıkılaştırarak hem dayanımı hem de dayanıklılığı artırma potansiyeline sahip olduğunu ve özellikle uzun ömürlü, düşük geçirgenliğe sahip beton tasarımlarında etkili olabileceğini ortaya koymaktadır (Rahman vd., 2022).

Selvakumar vd. (2021) yaptıkları çalışmada, nano silika (NS) ve sodyum silikat (SS) katkılarının, Hindistan'ın Tamil Nadu bölgesinden temin edilen orta derecede sıkışabilir kil zemin üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Deneysel program kapsamında

%1–9 aralığında değişen NS ve %2–8 aralığında değişen SS katkı oranları ile tekli ve kombine katkılar hazırlanarak, 1, 3 ve 7 günlük kür süreleri boyunca serbest basınç dayanımı (UCS), Young modülü ve mikroyapısal analizler (SEM) gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, tek başına %6 NS katkısının UCS değerini %421,99 oranında artırarak 225,98 kPa'ya çıkardığını, Young modülünde ise %515,73 oranında iyileşme sağladığını göstermiştir. Benzer şekilde, %6 oranında SS katkısı 108,8 kPa UCS değeri sağlamış ve %2,03'lük iyileşme oranı elde edilmiştir. Kombine katkılar arasında en iyi sonuç, %4 SS + %6 NS karışımıyla sağlanmış ve UCS değeri 218,23 kPa'ya ulaşmıştır. SEM analizleri, NS katkısının kil matrisinde daha yoğun ve kristalleşmiş bir yapı oluşturduğunu ve bağlayıcılık özelliklerini artırdığını göstermiştir. Ayrıca kür süresi uzadıkça UCS değerlerinin arttığı, ancak artış oranının zamanla azaldığı belirlenmiştir. Sonuçlar, NS ve SS katkılarının pozolanik reaksiyonları ve iyon değişimi mekanizmaları sayesinde zemin mukavemetini ve elastikiyetini artırdığını ve bu katkıların, temel zeminlerin ve yol kaplamalarının iyileştirilmesinde etkili katkı malzemeleri olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur (Selvakumar vd., 2021).

Srivastava ve Roy'un (2021) yaptıkları çalışmada, uçucu kül (%20) ve nano silika (%0,3, %0,5, %0,75, %1) katkılarının M20 ve M30 sınıfı çimento esaslı beton karışımlarının basınç dayanımı ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel program kapsamında karışımlar elle hazırlanmış, 150x150x150 mm ebatlarında küp numuneler üretilmiş ve 7 ile 28 günlük kürlerden sonra basınç dayanımı testleri uygulanmıştır. Ayrıca taze beton kıvamı için slump deneyi ve iç yapı analizleri için FESEM görüntüleme gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, %0,75 oranındaki nano silika katkısının her iki beton sınıfında da 28 günlük kür sonunda maksimum dayanım artışını sağladığını göstermiştir. M20 sınıfı betonda %8,96, M30 sınıfı betonda ise %14,86 oranında dayanım artışı kaydedilmiştir. Slump testine göre, düşük oranlardaki nano silika katkısı işlenebilirliği artırırken, oran yükseldikçe işlenebilirliğin düştüğü gözlemlenmiştir. FESEM görüntüleri, uçucu kül ve nano silika katkılarının birlikte kullanımıyla beton matrisinde daha yoğun ve homojen bir iç yapı oluştuğunu ortaya koymuştur. Bu veriler, nano silikanın düşük oranlarda kullanıldığında hem taze hem de sertleşmiş beton özelliklerini geliştirdiğini ve uçucu kül ile birlikte kullanıldığında çevresel açıdan sürdürülebilir ve dayanıklı beton üretimi için uygun bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir (Srivastava ve Roy, 2021).

### 3.3. Kırmızı Çamur ile Zeminlerin İyileştirilmesi

Kırmızı çamur, boksitten alümina üretiminde kullanılan Bayer prosesi sırasında ortaya çıkan bir yan üründür. Bu madde, yüksek alkalilik (pH = 11-13) ve zengin mineral içeriği ile dikkat çeker; hematit, goetit, gibsite, kalsit ve çeşitli kompleks silikatlar gibi bileşenler barındırır. Kırmızı çamur, eğer doğru şekilde yönetilmezse ekosistem üzerinde ciddi sağlık riskleri oluşturabilir. İnce taneli yapısı nedeniyle %20-30 oranında kil boyutunda partiküller içerirken, çoğu tanecik silt aralığındadır (Ujaczki vd., 2016). Kırmızı çamurun yüksek alkalili yapısı, özellikle asidik özellikteki topraklar için etkili bir düzenleyici olmasını sağlar ve toprakların pH dengesini iyileştirme potansiyeli sunar (Wang vd., 2023a).

Kırmızı çamurun fiziko-kimyasal özellikleri, onu hem kumlu hem de killi topraklarda kullanılabilir bir katkı maddesi haline getirmektedir. Kumlu topraklarda düşük su tutma kapasitesi ve zayıf dayanıklılık gibi problemler yaşanırken, killi topraklar ise genellikle yüksek plastiklik ve sınırlı drenaj sorunları ile karşı karşıyadır. Yapılan çalışmalar, kırmızı çamurun bu iki tür toprağın farklı ihtiyaçlarına uyum sağlayarak zemin dayanıklılığını artırabileceğini göstermektedir. Kırmızı çamur eklenmiş kumlu toprakların su tutma kapasiteleri artarken, killi toprakların basınç dayanımları ve hidrolik iletkenlikleri iyileştirilebilir. Ek olarak, kırmızı çamurun kaolin veya illit gibi doğal minerallerle benzer katyon değişim kapasitesine sahip olması, topraktaki besinlerin daha uzun süre tutulmasını ve bitkiler için erişilebilir hale gelmesini sağlamaktadır (Ujaczki vd., 2016).

Bu sebeplerden dolayı, kırmızı çamurun zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılması, özellikle Türkiye'deki farklı toprak türleri için ekonomik ve çevresel açıdan verimli bir seçenek olarak değerlendirilmektedir.

#### 3.3.1. Kumlu zeminlerin iyileştirilmesi

Kumlu zeminlerin dayanımını artırmak ve çevresel etkileri azaltmak amacıyla kırmızı çamur ve fosfojips gibi katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu maddeler, çimentoyla birlikte kullanıldığında, çimentolaşma ürünlerinin oluşumunu teşvik ederek mekanik özellikleri iyileştirir. Farklı karışım oranlarının zemin üzerindeki etkileri incelenmiş ve kimyasal stabilitenin sağlanmasının önemi vurgulanmıştır (Wang vd., 2023b).

Kırmızı çamur, erken dönemde dayanımı artıran CAH jellerinin oluşumuna katkı sağlar ve optimum kullanım oranı %5 olarak belirlenmiştir. Karışım oranı veya bağlayıcı miktarı arttığında, çimento stabilizasyonunun etkisi daha belirgin hale gelir. Kırmızı çamur

kullanımı, çevresel fayda sağlamak ve sürdürülebilir mühendislik çözümleri sunmak için etkili bir yöntemdir (Wang vd., 2023b).

- *Basınç Dayanımı:* Kırmızı çamur ve çimento karışımıyla stabilize edilen kumlu zeminler, erken kürlenme döneminde daha düşük sertlik ve yüksek deformasyon dayanımı göstermiştir. Ancak kürlenme süresi arttıkça, çimentoyla stabilize edilen zeminlerin sertlik ve dayanımında daha hızlı bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, kırmızı çamurun içerdiği alüminyum minerallerinin erken dayanımı artırdığı, ancak çimentonun silikon minerallerinin uzun vadeli dayanımı belirlediği ile açıklanabilir. Kırmızı çamurun çimentoyla birlikte kullanımı, çimento tasarrufu sağlarken maliyetleri düşürmek için mühendislik uygulamalarında etkili bir yöntemdir (Wang vd., 2023b).
- *Çekme Dayanımı:* Kırmızı çamur ve çimentoyla stabilize edilen kumlu zeminlerin çekme dayanımı, erken kürlenme döneminde çimentoyla stabilize edilenlere göre daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca, uzun vadede her iki stabilizasyon yöntemi de benzer çekme dayanımı sonuçları sunmuştur. Bu durum, kırmızı çamurun ve çimentonun birlikte kullanımının zemin dayanımını artırmak için etkili bir yol olduğunu göstermektedir (Wang vd., 2023b).
- *Kayma Dayanımı:* Kırmızı çamur ve çimentoyla stabilize edilen kumlu zeminler, erken kürlenme döneminde daha yüksek kohezyon göstermiş, ancak kürlenme süresi uzadıkça içsel sürtünme açılarında artış gözlemlenmiştir. Bu, kırmızı çamurun alüminyum minerallerinin daha güçlü bağlar oluşturmasına katkıda bulunmasından kaynaklanmaktadır. Çimento hidrasyonu sırasında oluşan kalsiyum hidroksit tabakalarının, kayma dayanımını olumsuz etkilediği belirtilmiştir (Wang vd., 2023b).
- *SEM-EDS:* Mikroyapısal analizler, kırmızı çamur ile stabilize edilen zeminlerin erken kürlenme döneminde daha fazla çimentolaşma jeli (CSH ve CAH) oluşturduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, kürlenme süresi ilerledikçe, çimentoyla stabilize edilen zeminlerin daha yoğun bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Kırmızı çamurun çimento hidrasyonunun neden olduğu kuruma çatlaklarını azaltarak iç yapıyı daha kompakt hale getirdiği tespit edilmiştir (Wang vd., 2023b).
- *MIP:* Gözenek analizi, kırmızı çamur ile stabilize edilen kumlu zeminlerin daha az makro gözenek (50 nm üzeri) ve daha yüksek oranda mikro gözenek (2-50 nm) içerdiğini göstermiştir. Bu durum, kırmızı çamurun zemin yapısının sıkışmasını

artırdığını ve dayanımı iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, kürlenme süresi boyunca gözenek bağlantılarının azaldığı, bunun da zemin stabilitesini artırdığı gözlemlenmiştir (Wang vd., 2023b).

### 3.3.2. Killi zeminlerin iyileştirilmesi

Kırmızı çamur, yüksek pH değeri sayesinde zemin asitliğini nötr hale getirerek kil zeminlerde olumlu etkilere sahiptir. Ayrıca, içerdiği silikatlar ve demir oksitler, zemin partikülleri arasında güçlü bağlar oluşturarak zemin dayanımını artırır. Bu, kırmızı çamurun şişme oranını azaltma, su tutma kapasitesini artırma ve geçirimsizliği düzenleme potansiyelini ortaya koymaktadır (Sridevi, 2019).

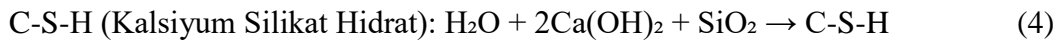
Kırmızı çamur, kil zeminlere eklendiğinde partikül yapısında iyileşme, plastiklik özelliklerinde azalma, likit ve plastik limit değerlerinde düşüş sağlar. Bu etkiler, kırmızı çamurun kil zeminlerde kompakt yapının artmasına ve boşlukların azalmasına neden olur. Örneğin, kırmızı çamur katkısı ile kil zeminlerin maksimum kuru yoğunluğu artarken, su içeriği optimum seviyede tutulabilir (Sridevi, 2019).

Kırmızı çamur ile uçucu kül kullanımı, zeminin stabilitesini daha da artırmakta ve boşlukların kapatılmasını sağlamaktadır. Uçucu külün pozzolanik özellikleri, kil partikülleri ile reaksiyona girerek dayanıklılığı artırır ve plastisiteyi düşürür. Bu özellikler, özellikle zeminlerin yüksek stabiliteye ihtiyaç duyduğu yapı projelerinde önemlidir (Sridevi, 2019).

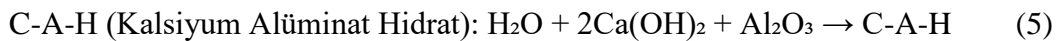
Kırmızı çamur, yüksek alkaliniteye sahip olması ve içeriğinde bulunan silikat ( $\text{SiO}_2$ ), alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ve demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) mineralleri sayesinde, zeminle etkileşimde çeşitli pozolanik reaksiyonlar gerçekleştirir. Özellikle çimento hidrasyonu sırasında açığa çıkan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile tepkimeye girerek bağlayıcı jel ürünleri oluşturur.

Başlıca reaksiyonlar aşağıdaki gibidir:

1. Silikat ile reaksiyon:



2. Alüminat ile reaksiyon:



3. Demir oksit ile reaksiyon (opsiyonel):



Bu jel ürünleri, zemin tanecikleri arasında bağlayıcılık sağlayarak zemin stabilitesini ve mukavemetini artırır. Ayrıca, kırmızı çamurun yüksek pH değeri, zeminlerdeki asidik ortamı nötralize ederek daha kararlı bir yapı oluşmasına katkı sağlar. Bu nedenle, kırmızı çamur hem kimyasal hem de çevresel olarak etkin bir stabilizasyon katkısıdır.

*Uygulama Alanları:*

- *Yol ve Altyapı Çalışmaları:* Kırmızı çamur katkılı zeminler, yolların ve altyapının temel yapısını güçlendirmede kullanılabilir.

- *Bina Temelleri:* Yapısal stabiliteyi artırmak amacıyla kırmızı çamur katkılı zeminler, binaların temel dolgularında uygulanabilir.

- *Hidrolik Yapılar ve Sulama Kanalları:* Su geçirimsizliğini düzenlemek ve dayanıklılığını artırmak için kırmızı çamur katkılı zeminler hidrolik yapılarda tercih edilmektedir (Sridevi, 2019).

### 3.3.3. Literatür özeti

Ahmed vd. (2020) yaptıkları çalışmada, kırmızı çamurun (KÇ) alkali termal aktivasyon (ATA) yöntemi ile jeopolimer bağlayıcı üretiminde etkinliği araştırılmıştır. Deneysel olarak KÇ'ye farklı oranlarda sodyum silikat ve %0,1–1,0 aralığında değişen oranlarda nano silika (Nano-SiO<sub>2</sub>) eklenmiş, priz süreleri (ASTM C191), basınç dayanımı (ASTM C109), ve mikro yapısal analizler (XRD, FTIR, SEM, SEM-EDX) gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre, SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mol oranının artırılması (S/A = 4,4) 28 günlük basınç dayanımını 37 MPa'ya kadar yükseltmiş, en iyi performans %0,4 Nano-SiO<sub>2</sub> katkısıyla 45,43 MPa değerine ulaşılmıştır. Bu katkı, matrisin gözenekliliğini azaltarak CSH ve aluminosilikat jel oluşumunu teşvik etmiş, ancak %1,0 oranındaki katkı iyon dengesizliği nedeniyle dayanımda düşüşe neden olmuştur. Mikro yapı analizleri, uygun oranda Nano-SiO<sub>2</sub> katkısının jeopolimerizasyonu güçlendirdiğini ve bağlayıcı fazların daha yoğun oluştuğunu göstermiştir. Bu bulgular, kırmızı çamurun uygun kompozisyon optimizasyonu ve nano takviyesi ile sürdürülebilir bir yapı malzemesine dönüştürülebileceğini ortaya koymuştur (Ahmed vd., 2020).

Chen vd. (2023) yaptıkları çalışmada, kırmızı çamur (KÇ) esaslı stabilize zeminlerin, nano silika (NS), alçıtaşı ve çimento katkıları ile birlikte iyileştirilmesi ve bu karışımın priz mekanizmasının deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Deneysel program kapsamında %0,5–1,5 aralığında değişen NS, sabit %6 alçıtaşı ve %3 çimento katkıları kullanılarak numuneler hazırlanmış ve 7 gün süreyle kürlenmiştir. Priz süreleri,

serbest basınç dayanımı (UCS), su emme oranı ve mikroyapısal analizler (SEM, XRD, XPS, EDX) gerçekleştirilmiştir. Bulgulara göre, %1 NS + %6 alçı + %3 çimento kombinasyonu ile elde edilen numunelerde 7 günlük UCS değeri 2748 kPa'ya ulaşmış ve bu değer yol alt temel dolguları için gerekli şartları sağlamıştır. Mikro yapı analizleri, optimum NS katkısının matris yoğunluğunu artırdığını ve ürünlerin kristalize yapısını güçlendirdiğini göstermiştir. %1'in üzerindeki NS katkılarında aglomerasyon ve reaksiyon yavaşlaması nedeniyle dayanımda düşüş gözlemlenmiştir. XRD ve XPS analizleri, AFt fazlarının oluştuğunu ve iyon etkileşimlerinin priz mekanizmasına katkı sağladığını doğrulamıştır (Chen vd., 2023).

Doğan ve Fırat'ın (2024) yaptıkları çalışmada, uçucu kül, silis dumanı ve cam elyaf katkılarının kil zeminlerin mühendislik performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Deneysel program kapsamında Atterberg limitleri, Standart Proktor kompaksiyon deneyi, serbest basınç dayanımı (UCS) ve elastisite modülü ( $E_{50}$ ) ölçümleri yapılmış; kür süreleri 0, 3, 7 ve 14 gün olarak belirlenmiş, numuneler %14, %17 ve %20 nem içeriklerinde hazırlanmıştır. Sonuçlara göre, %5 oranında silis dumanı ilavesi UCS değerini %102,86 artırmış, %5 uçucu kül katkısı ile %87,23 ve %2 cam elyaf katkısı ile %175,74 oranında artış sağlanmıştır. Nem içeriği arttıkça dayanım değerlerinin azaldığı gözlemlenmiş, en yüksek UCS değerleri optimal nem oranının altında elde edilmiştir. Atterberg limitleri açısından, katkıların özellikle plastik limit üzerinde etkili olduğu ve plastisite indeksinde düşüş sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca cam elyaf katkısı ile  $E_{50}$  modülünde belirgin iyileşmeler elde edilmiştir (Doğan ve Fırat, 2024).

Kong vd. (2023) yaptıkları çalışmada, kazıdan elde edilen doğal zemin, bağlayıcı olarak çimento, uçucu kül ve kırmızı çamur kullanılarak kontrollü düşük dayanımlı malzeme (CLSM) üretimi için değerlendirilmiştir. Deneysel programda 20 farklı karışım oranı ile akışkanlık (flowability), serbest basınç dayanımı (UCS), faz bileşimi (XRD) ve mikroyapı (SEM) analizleri yapılmıştır. Sonuçlara göre, uçucu kül karışımın akışkanlığını artırırken, kırmızı çamur dayanımı artırmıştır. %20 uçucu kül ve %30 kırmızı çamur kombinasyonu ile elde edilen optimum karışımda, 3, 7 ve 28 günlük UCS sırasıyla 1,08, 1,49 ve 3,77 MPa olarak ölçülmüş; akışkanlık ise 248 mm olmuştur. Mikro yapı analizleri, C-S-H jel ve etrenjit oluşumunun baskın olduğunu, kırmızı çamurun alkaliliğinin uçucu külün puzolanik aktivitesini artırdığını ve karışımın daha yoğun bir matris oluşturduğunu göstermiştir (Kong vd., 2023).

Luo vd. (2025) yaptıkları çalışmada, kırmızı çamur ve uçucu kül kullanılarak jeopolimer üretimi gerçekleştirilmiş ve karışım oranları ile alkali uyarıcının (sodyum

silikat + NaOH) modülü gibi parametrelerin, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı ve mikro yapı özelliklerine etkisi incelenmiştir. Numuneler 60°C’de 24 saat ön kür uygulamasından sonra 20°C’de kür edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranının artışı ve kırmızı çamur oranının yükselmesi dayanımı düşürmüştür. En iyi performans %30 kırmızı çamur ve %70 uçucu kül oranı ile 1,0–1,2 SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranında elde edilmiş ve bu durumda 28 günlük dayanım 9,6 MPa olmuştur. XRD analizleri, fazla kırmızı çamur katkısının geopolimerleşmeyi engellediğini ve amorf yapıların azalmasına neden olduğunu göstermiştir. FTIR ve TG-DTG analizleri ise jel oluşumunu ve su kayıplarını doğrulamıştır. Ayrıca sızma testleri, R-F-G numunelerinin ağır metallerin (özellikle Hg ve Ba) immobilizasyonunda etkili olduğunu göstermiştir. Böylece bu sistem, hem çevreci hem de mühendislik açısından uygulanabilir bir zemin iyileştirme ve atık geri kazanım yöntemi olarak değerlendirilmiştir (Luo vd., 2025).

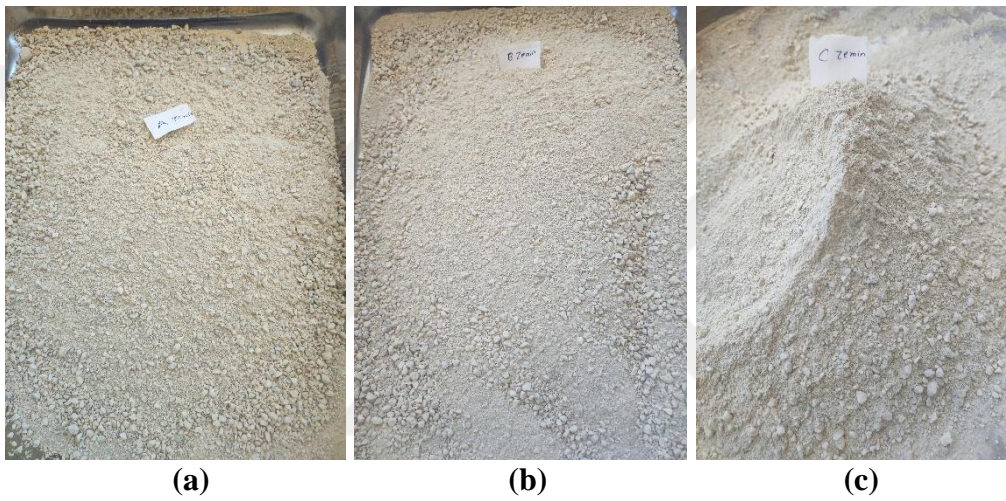
Li vd. (2025) yaptıkları çalışmada, kırmızı çamur ve uçucu kül kullanılarak hazırlanan köpüklü hafif zemin (FLS-RM), polipropilen (PP), polyester (PES) ve kenevir (KF) lifleri ile güçlendirilmiş ve mühendislik uygulamalarındaki mekanik performansı ile mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Toplamda 61 farklı karışım denenmiş ve basınç dayanımı, eğilme dayanımı, gerilme-gerinim eğrileri, kırılma modları, EDS ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre, lif katkısı FLS-RM’nin mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırmıştır. Özellikle %0,75 oranında ve 12 mm uzunluğunda PP lif katkısı ile basınç dayanımı %145,8 oranında artarak 0,87 MPa’ya ulaşmış, eğilme dayanımı ise 0,85 MPa olarak ölçülmüştür. Mikroyapı analizlerinde, PP liflerinin matrisle iyi bağlandığı ve çekilme izleri göstermediği, PES liflerinin düşük gerilme direnci nedeniyle kırılma eğiliminde olduğu ve KF liflerinin ise bağlanma kalitesinin zayıf olduğu tespit edilmiştir. EDS analizleri, oluşan dayanımın büyük ölçüde CaCO<sub>3</sub> ve Al-Si jel fazlarından kaynaklandığını ortaya koymuştur. FLS-RM, çevreci ve düşük maliyetli bir yol alt temel malzemesi olarak önerilmiş ve deneysel bulgularla tüm numunelerin dolgulu yol uygulamaları için gerekli minimum dayanım şartlarını sağladığı belirtilmiştir (Li vd., 2025).

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

### 4.1. Malzemeler

#### 4.1.1. Zeminler ve özellikleri

Araştırma kapsamında, “A”, “B” ve “C” olarak adlandırılan üç farklı kum-kil karışımı zemin hazırlanmıştır. Kullanılan kum, Konya ilinde bulunan bir kum ocağından, kil ise yine aynı bölgeden temin edilmiştir. Elde edilen karışım zeminler üzerinde elek analizi ve Atterberg limit deneyleri uygulanmıştır. Bu çalışmada kullanılan A, B ve C zemin numuneleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



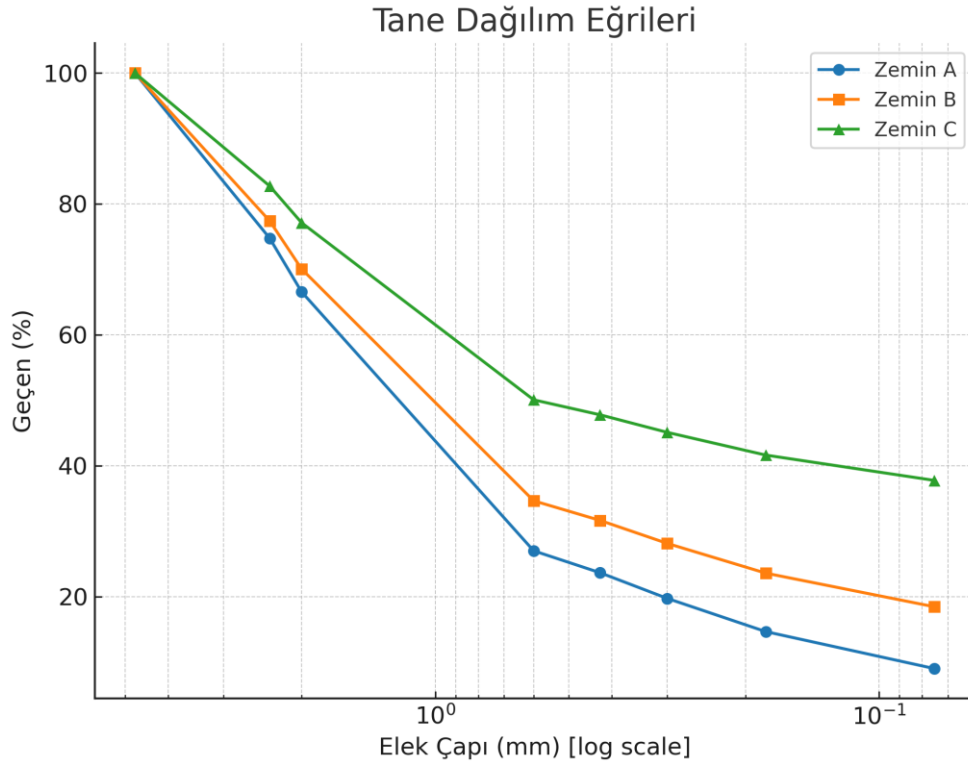
Şekil 4.1. İyileştirme çalışmalarında kullanılan zemin numuneleri: (a) A zemini, (b) B zemini, (c) C zemini

#### *Elek Analizi:*

Bu çalışmada, A, B ve C olarak adlandırılan üç farklı zemin için tane boyu dağılımını belirlemek amacıyla elek analizi yapılmıştır. Eleme işlemleri ASTM D6913 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde en üstte 4 no’lu (4,75 mm) ve en altta 200 no’lu (0,075 mm) elekler kullanılmıştır. Elekler kuru ve yıkamalı şekilde sıralanmış, uygun laboratuvar koşullarında standart prosedürlere göre analiz edilmiştir.

Analiz sonucunda, A, B ve C zeminlerine ait tane dağılım eğrileri elde edilmiş ve her bir zeminin granülometrik özellikleri değerlendirilmiştir. Elde edilen bu veriler doğrultusunda zeminlerin mühendislik davranışları analiz edilmiş ve sınıflandırmaya yönelik ilk değerlendirmeler yapılmıştır.

Zeminlerin dane çapı dağılımının belirlenmesi amacıyla üç zemin tipi üzerinde elek analizi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek ilgili grafik ve değerler Şekil 4.2 ile Çizelge 4.1 ve 4.2’de sunulmuştur.



**Şekil 4.2.** Zemin A, B ve C için elek analizi sonuçları

**Çizelge 4.1.** Tane çapı dağılımı

Numune	İçerdiği Oran (%)	
	Kum (4,75-0,074 mm)	Silt Ve Kil (<0,074 mm)
Zemin A	90,98	9,02
Zemin B	81,46	18,54
Zemin C	62,24	37,76

**Çizelge 4.2.** Zemin A, B ve C için karakteristik dane çapları

Zemin	A	B	C
D <sub>10</sub> (mm)	0,09	0,11	-
D <sub>30</sub> (mm)	0,66	0,52	-
D <sub>50</sub> (mm)	1,21	1,15	0,59
D <sub>60</sub> (mm)	1,64	1,55	0,93
D <sub>90</sub> (mm)	3,60	3,50	3,17
Uniformluk Katsayısı (c <sub>u</sub> )	18,76	14,10	-
Eğrilik Katsayısı (c <sub>c</sub> )	3,02	1,59	-

*Kıvam Limitleri Tayini:*

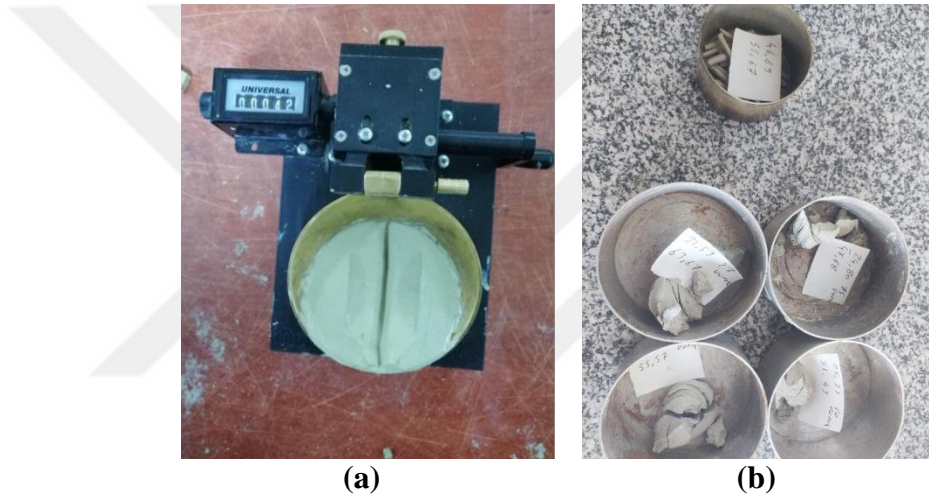
İnce taneli zeminlerde, su içeriğine bağlı olarak değişen fiziksel davranışlar kıvam olarak tanımlanmaktadır. Bu davranış sınırları, Atterberg kıvam deneyleri aracılığıyla

belirlenmektedir. Kıvam limitleri; likit limit, plastik limit ve rötire (büzülme) limiti olmak üzere üç temel sınır su muhtevassından oluşur.

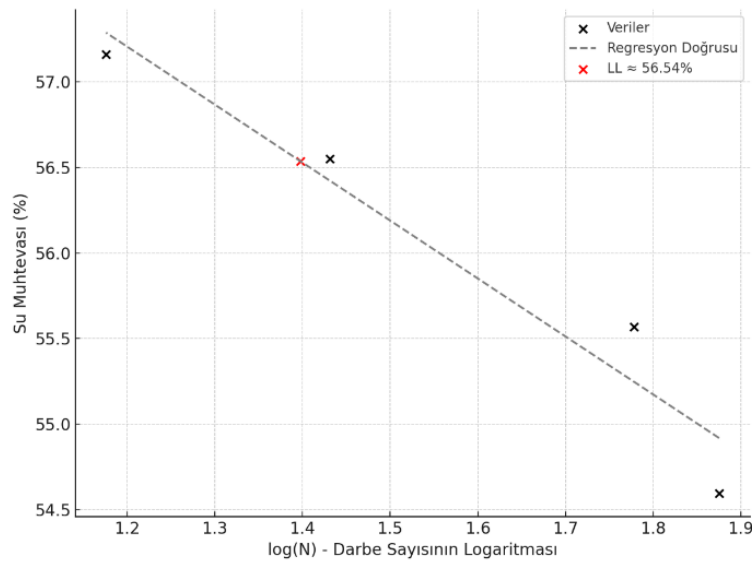
Çalışmada kullanılan zeminlerde ince malzeme cinsinin aynı olması nedeniyle kıvam limitleri deneyleri A, B veya C zeminlerinden 0,075mm elek altına geçen kısımda yapılmıştır.

- *Likit Limit Deneyi (Casagrande Yöntemi):*

Likit limit deneyleri, Casagrande deney düzeneği kullanılarak ve TS 1900-1 standardına uygun olarak yapılmıştır (Şekil 4.3). Deneyin amacı, zeminin plastik halden sıvı hale geçmeye başladığı su muhtevassını tespit etmektir. Deney sonuçları Şekil 4.4'te sunulmuştur.



Şekil 4.3. (a)-(b) Casagrande Deneyi ile likit limitin belirlenmesi



Şekil 4.4. Zemin-A için Casagrande likit limit deneyi sonuçları

- *Plastik Limit Deneyi:*

Plastik limit değerleri ASTM D4318 ve TS 1900-1 standartlarına göre belirlenmiştir (ASTM International, 2015). Plastik limit deneyinin uygulanış aşamaları Şekil 4.5'te, elde edilen sonuçlar ise Çizelge 4.3'te verilmiştir.



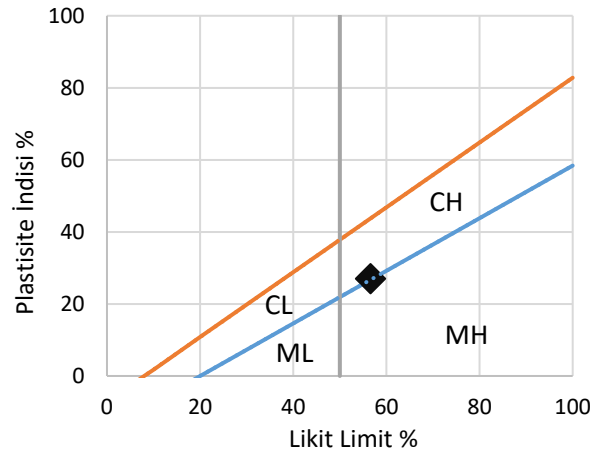
Şekil 4.5. Plastik limit değerlerinin belirlenmesi

Çizelge 4.3 Zemin-A için plastik likit limit deneyi sonuçları

Deney Kodları	W (%-Su Muhtevası)	W <sub>PL</sub> (%)
APL1	29,62	29,58
APL2	29,54	

*Zeminlerin Sınıflandırılması:*

İnce fraksiyonlar için yapılan Atterberg limit deneyleri sonucunda Likit Limit (LL) %56,54, Plastik Limit (PL) %29,58 ve buradan hesaplanan Plastisite İndisi (PI) %26,96 olarak bulunmuştur (Çizelge 4.4). Bu değerler plastisite diyagramında gösterilmiş olup, ince fraksiyonların A-doğrusu üzerinde yer aldığı ve yüksek plastisiteli kil (CH) bölgesine yakın konumlandığı görülmektedir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Zeminlerdeki ince tanelerin plastisite kartındaki yeri

A, B ve C zeminleri ASTM D2487 (USCS) standardına göre sınıflandırılmıştır (ASTM International, 2015). Tüm zeminlerde Atterberg limitleri aynı olup (LL = 56,54, PL = 29,58, PI = 26,96), farklılık %0,075 mm elekten geçen ince malzeme yüzdesinden kaynaklanmaktadır. Bu oran Zemin A için %9,02, Zemin B için %18,54 ve Zemin C için %37,76 olarak belirlenmiştir.

Zemin A için dane dağılım eğrisinden hesaplanan üniformite parametreleri  $C_u=18,76$  ve  $C_c=3,02$  olup, zeminin iyi derecelenmediğini göstermektedir. İnce malzeme yüzdesi ve Atterberg limitleri dikkate alındığında zemin SP-SC (kötü derecelenmiş killi kum) olarak sınıflandırılmıştır.

Zemin B, ince malzeme oranının %18,54 olması ve PI değerinin A-doğrusu üzerinde bulunması nedeniyle killi kum (SC) olarak sınıflandırılmıştır. Benzer şekilde, ince malzeme oranı %37,76 olan Zemin C de killi kum (SC) olarak sınıflandırılmıştır.

İlgili sınıflandırma sonuçları Çizelge 4.4'de sunulmuştur.

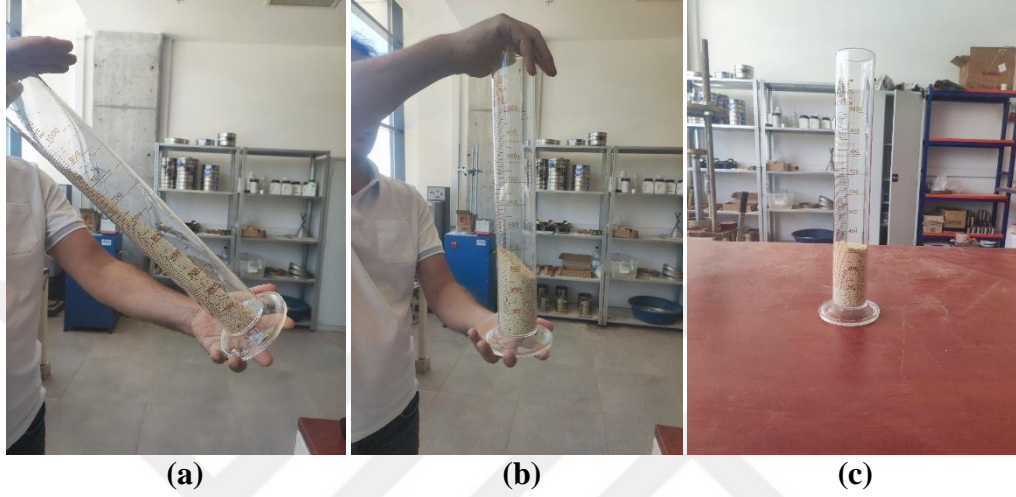
Çizelge 4.4. Zeminlerin USCS'ye göre sınıflandırılması

Zemin	%0,075 mm Elekten Geçen (%)	PI (%)	$C_u$	$C_c$	USCS Sınıfı
A	9,02	26,96	18,76	3,02	SP-SC
B	18,54	26,96	14,10	1,59	SC
C	37,76	26,96	-	-	SC

*Maksimum boşluk oranı:*

Maksimum boşluk oranı deneyinde, belirli miktarlarda kuru zemin numunesi dereceli cam silindire yerleştirilmiş ve aynı işlem üç farklı kütledeki numune ile tekrarlanmıştır. Silindir doldurulduktan sonra eğimli konumda dairesel hareketlerle

çevrilmiş, ardından yavaşça dik konuma getirilerek tanelerin sıkışmadan en gevşek şekilde yerleşmesi sağlanmıştır. Bu yöntem A, B ve C zeminleri için ayrı ayrı uygulanmış olup, her bir zemin türüne ait deney sonuçları ilgili tablolar halinde sunulmuştur (Çizelge 4.5, Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7). Deneyin uygulanışına ilişkin görsel örnek Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. a, b, c) Maksimum boşluk oranının belirlenmesi

Çizelge 4.5. A Zemini için maksimum boşluk oranı ( $e_{max}$ ) deney sonuçları

Deney	m (g)	V (cm <sup>3</sup> )	$\rho_a$ (g/cm <sup>3</sup> )	e	$e_{max}$
1	300,800	190,000	1,583	0,674	
2	500,700	320,000	1,565	0,694	0,690
3	700,600	450,000	1,557	0,701	

Çizelge 4.6. B Zemini için maksimum boşluk oranı ( $e_{max}$ ) deney sonuçları

Deney	m (g)	V (cm <sup>3</sup> )	$\rho_a$ (g/cm <sup>3</sup> )	e	$e_{max}$
1	300,000	200,000	1,500	0,767	
2	500,000	322,000	1,553	0,707	0,728
3	700,000	452,000	1,549	0,711	

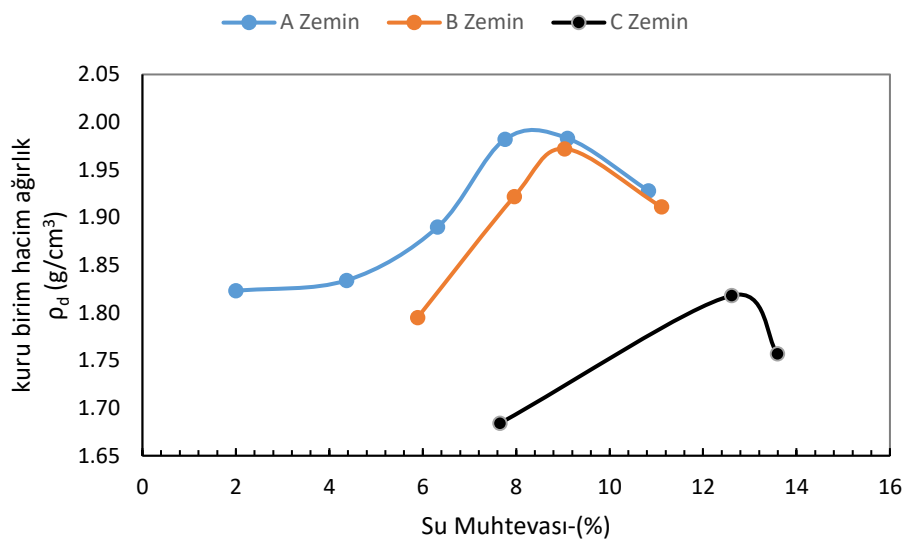
Çizelge 4.7. C Zemini için maksimum boşluk oranı ( $e_{max}$ ) deney sonuçları

Deney	m (g)	V (cm <sup>3</sup> )	$\rho_a$ (g/cm <sup>3</sup> )	e	$e_{max}$
1	300,000	205,000	1,463	0,811	
2	500,000	330,000	1,515	0,749	0,767
3	700,000	460,000	1,522	0,741	

*Minimum boşluk oranı:*

Kompaksiyon deneyleri A, B ve C zeminleri üzerinde farklı nem düzeylerinde yapılmış ve her zemin için maksimum kuru birim ağırlık ile optimum su muhtevası değerleri belirlenmiştir.

A zemini için en yüksek kuru birim ağırlık  $1,983 \text{ g/cm}^3$  olup yaklaşık %9,10 su muhtevasında elde edilmiştir. B zemini için maksimum kuru birim ağırlık  $1,972 \text{ g/cm}^3$  ve optimum su muhtevası %9,04 olarak bulunmuştur. C zemini için maksimum kuru birim ağırlık  $1,818 \text{ g/cm}^3$  olup yaklaşık %12,61 su muhtevasında elde edilmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Kompaksiyon deneyi sonucu

Proktor sıkıştırmasıyla ulaşılan minimum boşluk oranı, kompaksiyon altında en küçük boşluk oranı ( $e_{min}$ ) olarak tanımlanır. Zeminlerin özgül ağırlığı ( $G_s$ ) piknometre deneyi ile belirlenmiştir. Fiziksel bağıntılar kullanılarak A, B ve C zeminlerine ait  $e_{min}$  değerleri Çizelge 4.8'te sunulmuştur.

Çizelge 4.8. Zeminlerin  $G_s$ ,  $\rho_{d,max}$  ve  $e_{min}$  değerleri (A, B, C)

Zemin	$G_s$	$\rho_{d,max} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$\gamma_s \text{ (kN/m}^3\text{)}$	$e_{min}$
A	2,743	1,983	26,856	0,381
B	2,677	1,972	26,204	0,354
C	2,467	1,818	24,149	0,354

Yapılan deneyler sonucunda A, B ve C zeminlerine ait tane boyu dağılımı, kıvam limitleri, özgül ağırlık, maksimum ve minimum boşluk oranları, maksimum ve minimum

kuru birim hacim ağırlık değerleri ile sınıflandırma özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen tüm bu özellikler toplu olarak Çizelge 4.9’da sunulmuştur.

**Çizelge 4.9.** Zeminlerin geoteknik özellikleri

Özellik	A	B	C
% Çakıl	0	0	0
% Kum	90,98	81,46	62,24
% Kil + Silt	9,02	18,54	37,76
Tane Çapları			
D <sub>10</sub> (mm)	0,09	0,11	—
D <sub>30</sub> (mm)	0,66	0,52	—
D <sub>50</sub> (mm)	1,21	1,15	0,59
D <sub>60</sub> (mm)	1,64	1,55	0,93
D <sub>90</sub> (mm)	3,60	3,50	3,17
C <sub>u</sub>	18,76	14,10	—
C <sub>c</sub>	3,02	1,59	—
G <sub>s</sub>	2,743	2,671	2,462
γ <sub>s</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	26,856	26,204	24,149
e <sub>max</sub>	0,690	0,728	0,767
e <sub>min</sub>	0,380	0,355	0,354
γ <sub>d,max</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1,983	1,972	1,818
γ <sub>d,min</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1,620	1,546	1,393
LL	56,54	56,54	56,54
PL	29,58	29,58	29,58
PI	26,96	26,96	26,96
Zemin Sınıfı	SP-SC	SC	SC

#### 4.1.2. Uçucu kül

Uçucu kül (UK) Seydişehir Eti Alüminyum Fabrikasından temin edilmiştir. İnce taneli bir malzemedir. Kimyasal bileşimine göre UK’de SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toplamı %23,59 olup, SO<sub>3</sub> içeriği %16,5’tir. ASTM C618 standardına göre, uçucu külün sınıflandırılmasında yanmamış kireç (CaO) içeriği en önemli kriter olarak kabul edilmektedir (ASTM International, 2015). Buna göre, CaO ≤ %18 olduğunda UK F sınıfı, CaO > %18 olduğunda ise C sınıfı olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada kullanılan UK, %41,8 CaO içeriğine sahip olduğundan C sınıfı olarak sınıflandırılmıştır.

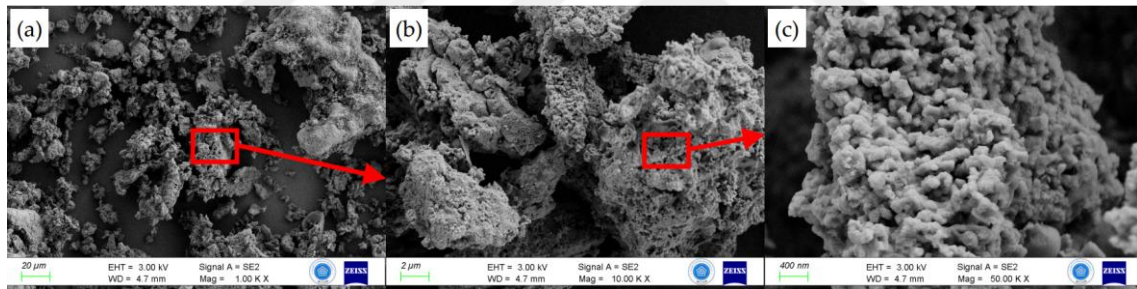
C sınıfı UK, puzolanik özelliklerin yanı sıra kendiliğinden çimentolaşma özelliğine de sahiptir. Uçucu külün kimyasal bileşimi ve sınıflandırma kriterleri Çizelge 4.10’de sunulmuş, laboratuvara getirilen uçucu kül numunesi Şekil 4.9’da gösterilmiş ve UK’nin SEM görüntüleri ise Şekil 4.10’de verilmiştir.



Şekil 4.9. Laboratuvara getirilen uçucu kül numunesi

Çizelge 4.10. Uçucu külün kimyasal bileşimi ve sınıflandırma kriterleri (Soğancı vd., 2024)

Özellik	Değer
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	23,59
SO <sub>3</sub> (%)	16,5
CaO (%)	41,8
Sınıf	C sınıfı



Şekil 4.10. Uçucu küle ait SEM görüntüleri: (a) 1000, (b) 10,000 ve (c) 50,000 kat büyütülmüş görüntüleri (Soğancı vd., 2024)

#### 4.1.3. Kırmızı çamur

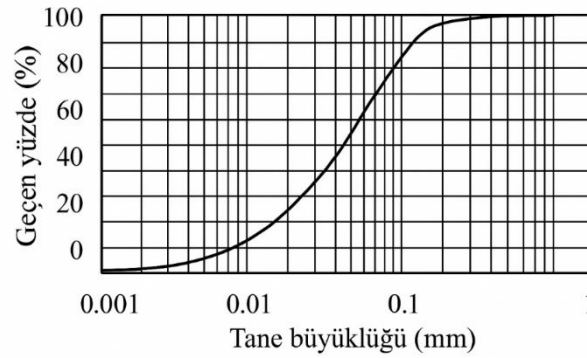
Kırmızı çamur (KÇ) Seydişehir Eti Alüminyum Fabrikasından temin edilmiştir ve esas olarak silt boyutlu tanelerden oluşmaktadır (Şekil 4.11). KÇ'nin uniformluk katsayısı ( $D_{60}/D_{10}$ ) 5,75 olarak belirlenmiş olup, maksimum tane çapı ( $D_{max}$ ) 0,3 mm'dir. Kıvam limitlerine göre plastisite indeksi düşüktür (%3,5) ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre düşük plastisiteli silt (ML) sınıfında yer almaktadır. KÇ'nin tane boyutu dağılımı Şekil 4.12'te, fiziksel ve mekanik özellikleri ise Çizelge 4.18'de sunulmuştur.

Kimyasal bileşim sonuçları XRF analizi ile elde edilmiş olup, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oksitlerinin toplamı yaklaşık %50'dir. Ayrıca, yüksek oranda CaO (%25,1) ile birlikte

belirli oranlarda  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  ve diğer oksitleri içermektedir (Çizelge 4.12). KÇ'nin morfolojik özellikleri incelendiğinde, partiküllerin bir kısmının pulsu, bir kısmının ise küresel yapıda olduğu görülmektedir (Şekil 4.13). Organik madde miktarı ise tespit edilemeyecek kadar düşük seviyededir. Bu durum biyolojik aktiviteyi sınırlandırmakta ve ince tanelerin genellikle sodyum/alüminyum mineralleri ile ilişkili olabileceğini, iri partiküllerin ise demir mineralleri veya bozulmamış boksit mineralleriyle bağlantılı olabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.11. Laboratuvarında öğütülmüş kırmızı çamur numunesi



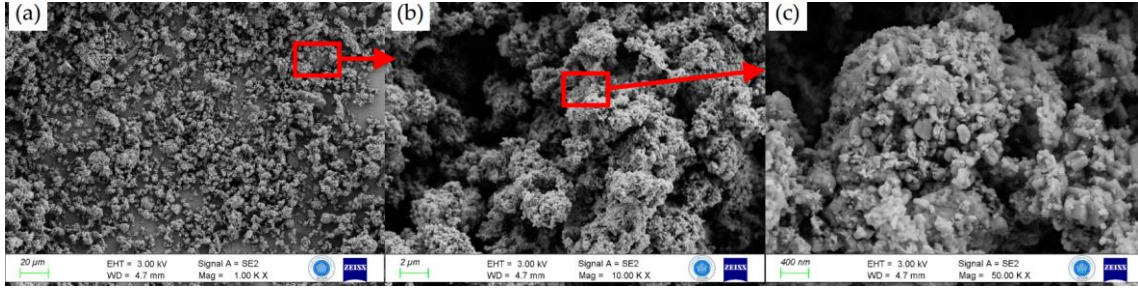
Şekil 4.12. Kırmızı çamurun tane boyutu dağılımı (Soğancı vd., 2024)

Çizelge 4.11. Kırmızı çamurun (KÇ) fiziksel ve mekanik özellikleri (Soğancı vd., 2024)

Özellik	Değer
Özgül ağırlık	2,56
Likit limit, LL (%)	40,5
Plastik limit, PL (%)	37
Plastisite indeksi, PI (%)	3,5
Zemin sınıfı (USCS)	ML
Optimum su muhtevası (%)	34
Maksimum kuru birim hacim ağırlık ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,41

Çizelge 4.12. Atık malzemelerin kimyasal bileşimi (Soğancı vd., 2024)

Malzeme	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O
KÇ (%)	14,30	11,40	24,10	25,10	9,35	2,95	0,44	0,28	0,22	0,11
UK (%)	5,10	15,50	8,09	41,80	-	0,42	0,40	16,50	1,20	0,60



Şekil 4.13. Kırmızı çamura ait SEM görüntüleri: (a) 1000, (b) 10,000 ve (c) 50,000 kat büyütülmüş görüntüler (Soğancı vd., 2024)

#### 4.1.4. Nano silika

Bu çalışmada kullanılan nano silika, Konya’da bulunan Silika Kimya firmasından temin edilmiştir. Malzeme kolloidal formda olup yoğunluğu yaklaşık 1,2 g/cm<sup>3</sup>’tür (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Deneylerde kullanılan kolloidal nano silika numunesi

## 4.2. Yöntem

Enjeksiyon yöntemi, zemin iyileştirme çalışmalarında yaygın olarak kullanılan bir tekniktir ve özellikle çatlaklı veya boşluklu zeminlerde geçirimsizliği azaltmak, sıkışabilirliği kontrol etmek ve dayanımı artırmak amacıyla tercih edilmektedir. Bu yöntem, zemine belirli basınç altında uygun kıvamda hazırlanan karışımların enjekte edilmesine dayanmaktadır. Literatürde de belirtildiği üzere, enjeksiyon yöntemleri

mühendislik yapılarında güvenlik ve performans açısından kritik bir rol oynamaktadır (Taşçı, 2021; Fırat, 2015).

Permeasyon enjeksiyonu, jet grout veya derin karıştırma yöntemi gibi enjeksiyonla zemin iyileştirme çalışmalarında genellikle çimento kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, çimentoya alternatif olarak çevreci ve sürdürülebilir malzemeler ile enjeksiyon hazırlanarak, saha uygulamalarına referans olabilecek zemin-bağlayıcı karışımlarının mekanik özellikleri belirlenmiştir. Özellikle uçucu kül (UK), kırmızı çamur (KÇ) ve nano silika (NS) gibi bağlayıcıların enjeksiyon tekniğinde kullanılabilirliği literatürde sıkça vurgulanmaktadır. Soğancı ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada, UK ve KÇ katkılarının zeminlerin mekanik özelliklerinde önemli iyileşmeler sağladığı belirtilmiştir.

#### 4.2.1. Deney programları

Çalışmada takip edilen deney programları beş ana aşamadan oluşmaktadır (Çizelge 4.13). İlk aşamada A, B ve C zeminleri sadece uçucu kül içeren enjeksiyonla iyileştirilmiştir (Çizelge 4.14, 4.15 ve 4.16). İkinci aşamada, A, B ve C zeminleri uçucu kül ve kırmızı çamur ile iyileştirilmiş olup deney tabloları Çizelge 4.17, 4.18 ve 4.19'da yer almaktadır. Üçüncü aşamada, A ve C zeminleri uçucu kül ve nano silika ile stabilize edilmiş ve ilgili veriler Çizelge 4.20 ve 4.21'de gösterilmiştir. Dördüncü aşamada, yine A ve C zeminleri uçucu kül, kırmızı çamur ve nano silika katkılarıyla hazırlanmış olup deney programları Çizelge 4.22 ve 4.23'de sunulmuştur. İlk 4 araştırma grubunda kür süresi 28 gün seçilmiştir. Beşinci ve son aşamada ise A ve C zeminleri için farklı kür süreleri uygulanmış ve deney programı Çizelge 4.24 ve 4.25'de gösterilmiştir. Deney aşamalarında kullanılan tüm karışımların içeriği ve numune kodları Çizelge 4.13'de özetlenmiştir.

Deneylerin yürütülmesi sırasında, B zemini için tüm aşamalar tekrarlanmamıştır. Bunun nedeni, B zemininin sonuçlarının A zemini ile büyük oranda benzerlik göstermesi, ayrıca deney sayısının ve gerekli numune kalıplarının oldukça fazla olmasıdır. Bu nedenle deney programı, daha verimli ve temsil gücü yüksek olacak şekilde A ve C zeminleri üzerinden yürütülmüştür.

**Çizelge 4.13.** Numune karışımları tablosu

Numune Kodu	Bağlayıcılar	Kür Süresi
A1, B1, C1	Uçucu Kül (UK)	28 gün
A2, B2, C2	Uçucu Kül (UK) + Kırmızı Çamur (KÇ)	28 gün
A3, C3	Uçucu Kül (UK) + Nano Silika (NS)	28 gün
A4, C4	UK + KÇ + NS	28 gün
A5, C5	UK + KÇ + NS	3, 7, 14, 28, 56 gün

Çimentolu zeminlerin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli parametreler, bağlayıcı dozajı ve enjeksiyonun su/bağlayıcı oranıdır. Bağlayıcı dozajı, birim hacimdeki bağlayıcı kütlesidir. Su/bağlayıcı oranı ise enjeksiyonda bulunan su ve bağlayıcı miktarlarının kütlece oranıdır. Fakat, zeminin kendi bünyesinde bulunan su nedeniyle zemin-enjeksiyon karışımının su/bağlayıcı oranı, enjeksiyonun su/bağlayıcı oranından yüksek olmaktadır. Yani iyileştirilmiş zeminin mekanik özellikleri zemin-bağlayıcı karışımının toplam su/bağlayıcı oranından ( $W_T/W_B$ ) etkilenmektedir (Yenginar ve Olgun, 2024). Ayrıca, bağlayıcı dozajı kavramı laboratuvarda hazırlanan zemin-enjeksiyon karışımları ile sahadaki büyük ölçekli zemin-enjeksiyon karışımları arasında tutarsızlık oluşturmaktadır. Laboratuvarda hazırlanan numunelerin bağlayıcı içeriğine ( $a_w$ ) göre hazırlanmasıyla laboratuvar-arazi arasındaki uyumsuzluğun en aza indirileceği bildirilmektedir (Yenginar, 2020). Bu nedenle, farklı bağlayıcı malzemelerin (UK, KÇ, NS) değişik kombinasyonları ile kumlu zeminlerin iyileştirilmesinde, bağlayıcı içeriği ( $a_w$ ) ve karışımın toplam su/bağlayıcı oranı ( $W_T/W_B$ ) değişken seçilmiştir.

#### Çalışmada kullanılan semboller ve formüller

$$a_w = (M_b / M_{zemin}) \times 100 \quad (4.7)$$

$$W_T/W_b = M_{su} / M_b \quad (4.8)$$

burada  $a_w$ : Bağlayıcı içeriği (%),  $M_b$ : Toplam bağlayıcı kütlesi (UK , KÇ , NS),  $M_{zemin}$ : Katkısız zemin kütlesi,  $W_T/W_b$ : Toplam su/bağlayıcı oranı,  $M_{su}$ : Numunedeki toplam su kütlesi (zeminin doğal su muhtevası ve enjeksiyon suyunu birlikte temsil etmektedir).

Çizelge 4.14. A zemininin sadece uçucu kül ile iyileştirildiği deney programı

Araştırma Alanı	Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	C-UK (%)	Kür süresi (gün)
A Zemini	A1-1	10	1,5	100	28
	A1-2	10	2,0	100	28
	A1-3	10	2,5	100	28
	A1-4	10	3,0	100	28
	A1-5	10	3,5	100	28
	A1-6	10	4,0	100	28
	A1-7	20	1,0	100	28
	A1-8	20	1,3	100	28
	A1-9	20	1,6	100	28
	A1-10	20	1,9	100	28
	A1-11	20	2,3	100	28
	A1-12	30	0,9	100	28
	A1-13	30	1,1	100	28
	A1-14	30	1,3	100	28
	A1-15	30	1,5	100	28
	A1-16	40	0,8	100	28
	A1-17	40	1,0	100	28
	A1-18	40	1,1	100	28
	A1-19	40	1,3	100	28
	A1-20	40	1,5	100	28

Çizelge 4.15. B zemininin sadece uçucu kül ile iyileştirildiği deney programı

Araştırma Alanı	Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	C-UK (%)	Kür süresi (gün)
B Zemini	B1-1	10	1,8	100	28
	B1-2	10	2,3	100	28
	B1-3	10	2,8	100	28
	B1-4	10	3,3	100	28
	B1-5	10	3,8	100	28
	B1-6	10	4,3	100	28
	B1-7	10	4,8	100	28
	B1-8	20	1,2	100	28
	B1-9	20	1,5	100	28
	B1-10	20	1,8	100	28
	B1-11	20	2,1	100	28
	B1-12	20	2,5	100	28
	B1-13	30	1,0	100	28
	B1-14	30	1,2	100	28
	B1-15	30	1,4	100	28
	B1-16	30	1,6	100	28
	B1-17	30	1,8	100	28
	B1-18	30	2,0	100	28
	B1-19	40	0,9	100	28
	B1-20	40	1,1	100	28
	B1-21	40	1,3	100	28
	B1-22	40	1,6	100	28

Çizelge 4.16. C zemininin sadece uçucu kül ile iyileştirildiği deney programı

Araştırma Alanı	Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	C-UK (%)	Kür süresi (gün)
C Zemini	C1-1	10	2,4	100	28
	C1-2	10	3,0	100	28
	C1-3	10	3,6	100	28
	C1-4	10	4,2	100	28
	C1-5	10	4,8	100	28
	C1-6	10	5,2	100	28
	C1-7	10	5,8	100	28
	C1-8	10	6,2	100	28
	C1-9	20	1,6	100	28
	C1-10	20	1,9	100	28
	C1-11	20	2,1	100	28
	C1-12	20	2,4	100	28
	C1-13	20	2,7	100	28
	C1-14	20	3,0	100	28
	C1-15	30	1,2	100	28
	C1-16	30	1,5	100	28
	C1-17	30	1,8	100	28
	C1-18	30	2,1	100	28
	C1-19	30	2,5	100	28
	C1-20	40	1,1	100	28
	C1-21	40	1,3	100	28
	C1-22	40	1,5	100	28
	C1-23	40	1,7	100	28
	C1-24	40	2,0	100	28

Çizelge 4.17. A zemininin uçucu kül ve kırmızı çamur ile iyileştirildiği deney programı

Araştırma Alanı	Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	C-UK (%)	KÇ (%)	Kür süresi (gün)
A Zemini	A2-1	10	1,5	90	10	28
	A2-2	10	2,0	90	10	28
	A2-3	10	2,5	90	10	28
	A2-4	10	1,5	80	20	28
	A2-5	10	2,0	80	20	28
	A2-6	10	2,5	80	20	28
	A2-7	10	1,5	70	30	28
	A2-8	10	2,0	70	30	28
	A2-9	10	2,5	70	30	28
	A2-10	10	1,5	60	40	28
	A2-11	10	2,0	60	40	28
	A2-12	10	2,5	60	40	28
	A2-13	20	1,0	90	10	28
	A2-14	20	1,3	90	10	28
	A2-15	20	1,6	90	10	28
	A2-16	20	1,0	80	20	28
	A2-17	20	1,3	80	20	28
	A2-18	20	1,6	80	20	28
	A2-19	20	1,0	70	30	28
	A2-20	20	1,3	70	30	28
	A2-21	20	1,6	70	30	28
	A2-22	20	1,0	60	40	28
	A2-23	20	1,3	60	40	28
	A2-24	20	1,6	60	40	28

**Çizelge 4.18.** B zemininin uçucu kül ve kırmızı çamur ile iyileştirildiği deney programı

Araştırma Alanı	Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	C-UK (%)	KÇ (%)	Kür süresi (gün)
B Zemini	B2-1	10	1,8	90	10	28
	B2-2	10	2,0	90	10	28
	B2-3	10	2,5	90	10	28
	B2-4	10	1,8	80	20	28
	B2-5	10	2,0	80	20	28
	B2-6	10	2,5	80	20	28
	B2-7	10	1,8	70	30	28
	B2-8	10	2,0	70	30	28
	B2-9	10	2,5	70	30	28
	B2-10	10	1,8	60	40	28
	B2-11	10	2,0	60	40	28
	B2-12	10	2,5	60	40	28
	B2-13	20	1,2	90	10	28
	B2-14	20	1,5	90	10	28
	B2-15	20	1,8	90	10	28
	B2-16	20	1,2	80	20	28
	B2-17	20	1,5	80	20	28
	B2-18	20	1,8	80	20	28
	B2-19	20	1,2	70	30	28
	B2-20	20	1,5	70	30	28
	B2-21	20	1,8	70	30	28
	B2-22	20	1,2	60	40	28
	B2-23	20	1,5	60	40	28
	B2-24	20	1,8	60	40	28

**Çizelge 4.19.** C zemininin uçucu kül ve kırmızı çamur ile iyileştirildiği deney programı

Araştırma Alanı	Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	C-UK (%)	KÇ (%)	Kür süresi (gün)
C Zemini	C2-1	10	2,4	90	10	28
	C2-2	10	3,0	90	10	28
	C2-3	10	3,6	90	10	28
	C2-4	10	2,4	80	20	28
	C2-5	10	3,0	80	20	28
	C2-6	10	3,6	80	20	28
	C2-7	10	2,4	70	30	28
	C2-8	10	3,0	70	30	28
	C2-9	10	3,6	70	30	28
	C2-10	10	2,4	60	40	28
	C2-11	10	3,0	60	40	28
	C2-12	10	3,6	60	40	28
	C2-13	20	1,6	90	10	28
	C2-14	20	1,9	90	10	28
	C2-15	20	2,1	90	10	28
	C2-16	20	1,6	80	20	28
	C2-17	20	1,9	80	20	28
	C2-18	20	2,1	80	20	28
	C2-19	20	1,6	70	30	28
	C2-20	20	1,9	70	30	28
	C2-21	20	2,1	70	30	28
	C2-22	20	1,6	60	40	28
	C2-23	20	1,9	60	40	28
	C2-24	20	2,1	60	40	28

Çizelge 4.20. A zemininin uçucu kül ve nano silika ile iyileştirildiği deney programı

Araştırma Alanı	Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	C-UK (%)	NS (%)	Kür süresi (gün)
	A3-1	10	1,5	99,5	0,5	28
	A3-2	10	2,0	99,5	0,5	28
	A3-3	10	2,5	99,5	0,5	28
	A3-4	10	1,5	99	1,0	28
	A3-5	10	2,0	99	1,0	28
	A3-6	10	2,5	99	1,0	28
	A3-7	10	1,5	98,5	1,5	28
	A3-8	10	2,0	98,5	1,5	28
	A3-9	10	2,5	98,5	1,5	28
	A3-10	10	1,5	98	2,0	28
	A3-11	10	2,0	98	2,0	28
	A3-12	10	2,5	98	2,0	28
A Zemini	A3-13	20	1,3	99,5	0,5	28
	A3-14	20	1,6	99,5	0,5	28
	A3-15	20	1,9	99,5	0,5	28
	A3-16	20	1,3	99	1,0	28
	A3-17	20	1,6	99	1,0	28
	A3-18	20	1,9	99	1,0	28
	A3-19	20	1,3	98,5	1,5	28
	A3-20	20	1,6	98,5	1,5	28
	A3-21	20	1,9	98,5	1,5	28
	A3-22	20	1,3	98	2,0	28
	A3-23	20	1,6	98	2,0	28
	A3-24	20	1,9	98	2,0	28

Çizelge 4.21. C zemininin uçucu kül ve nano silika ile iyileştirildiği deney programı

Araştırma Alanı	Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	C-UK (%)	NS (%)	Kür süresi (gün)
	C3-1	10	2,4	99,5	0,5	28
	C3-2	10	3,0	99,5	0,5	28
	C3-3	10	3,6	99,5	0,5	28
	C3-4	10	2,4	99	1	28
	C3-5	10	3,0	99	1	28
	C3-6	10	3,6	99	1	28
	C3-7	10	2,4	98,5	1,5	28
	C3-8	10	3,0	98,5	1,5	28
	C3-9	10	3,6	98,5	1,5	28
	C3-10	10	2,4	98	2	28
	C3-11	10	3,0	98	2	28
	C3-12	10	3,6	98	2	28
C Zemini	C3-13	20	1,9	99,5	0,5	28
	C3-14	20	2,1	99,5	0,5	28
	C3-15	20	2,4	99,5	0,5	28
	C3-16	20	1,9	99	1	28
	C3-17	20	2,1	99	1	28
	C3-18	20	2,4	99	1	28
	C3-19	20	1,9	98,5	1,5	28
	C3-20	20	2,1	98,5	1,5	28
	C3-21	20	2,4	98,5	1,5	28
	C3-22	20	1,9	98	2	28
	C3-23	20	2,1	98	2	28
	C3-24	20	2,4	98	2	28

**Çizelge 4.22.** A zemininin uçucu kül, kırmızı çamur ve nano silika ile iyileştirildiği deney programı

Araştırma Alanı	Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	C-UK (%)	KÇ (%)	NS (%)	Kür süresi (gün)
A Zemini	A4-1	10	1,5	89	10	1	28
	A4-2	10	1,5	88,5	10	1,5	28
	A4-3	10	1,5	79	20	1	28
	A4-4	10	1,5	78,5	20	1,5	28
	A4-5	10	1,5	69	30	1	28
	A4-6	10	1,5	68,5	30	1,5	28
	A4-7	20	1,3	89	10	1	28
	A4-8	20	1,3	88,5	10	1,5	28
	A4-9	20	1,3	79	20	1	28
	A4-10	20	1,3	78,5	20	1,5	28
	A4-11	20	1,3	69	30	1	28
	A4-12	20	1,3	68,5	30	1,5	28

**Çizelge 4.23.** C zemininin uçucu kül, kırmızı çamur ve nano silika ile iyileştirildiği deney programı

Araştırma Alanı	Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	C-UK (%)	KÇ (%)	NS (%)	Kür süresi (gün)
C Zemini	C4-1	10	2,4	89	10	1	28
	C4-2	10	2,4	88,5	10	1,5	28
	C4-3	10	2,4	79	20	1	28
	C4-4	10	2,4	78,5	20	1,5	28
	C4-5	10	2,4	69	30	1	28
	C4-6	10	2,4	68,5	30	1,5	28
	C4-7	20	1,9	89	10	1	28
	C4-8	20	1,9	88,5	10	1,5	28
	C4-9	20	1,9	79	20	1	28
	C4-10	20	1,9	78,5	20	1,5	28
	C4-11	20	1,9	69	30	1	28
	C4-12	20	1,9	68,5	30	1,5	28

**Çizelge 4.24.** A zemininin UK, KÇ ve NS ile iyileştirildiği ve kür süresinin araştırıldığı deney programı

Araştırma Alanı	Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	C-UK (%)	KÇ (%)	NS (%)	Kür süresi (gün)
A Zemini	A5-1	20	1,0	100	0	0	3-7-14-28-56
	A5-2	20	1,0	70	30	0	3-7-14-28-56
	A5-3	20	1,0	69	30	1	3-7-14-28-56
	A5-4	20	1,0	68,5	30	1,5	3-7-14-28-56

**Çizelge 4.25.** C zemininin UK, KÇ ve NS ile iyileştirildiği ve kür süresinin araştırıldığı deney programı

Araştırma Alanı	Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	C-UK (%)	KÇ (%)	NS (%)	Kür süresi (gün)
C Zemini	C5-1	20	1,6	100	0	0	3-7-14-28-56
	C5-2	20	1,6	70	30	0	3-7-14-28-56
	C5-3	20	1,6	69	30	1	3-7-14-28-56
	C5-4	20	1,6	68,5	30	1,5	3-7-14-28-56

#### 4.2.2. Numunelerin hazırlanması

Bu tez çalışmasında kullanılan numuneler, belirlenen deney programına uygun olarak beş aşamada hazırlanmıştır. İlk aşamada yalnızca uçucu kül bağlayıcısı kullanılmış; toplam karışım üzerinden %10, %20, %30 ve %40 oranlarında bağlayıcı ilave edilmiştir. Her bir bağlayıcı oranı için altı farklı su içeriği denenmiş ve böylece her oran için en uygun su içeriği belirlenmiştir. Ardından üç zemin türünde (A, B ve C) bu en uygun su içeriğinde numuneler hazırlanmış, 28 gün kür edilmiş ve her bağlayıcı oranı için serbest basınç dayanımı değerlendirilmiştir. Bu aşamada, hem en uygun su içeriğinin saptanması hem de her oran için dayanımın belirlenmesi amacıyla toplam 198 numune üretilmiştir.

İkinci aşamada, uçucu kül ve kırmızı çamur birlikte kullanılmıştır. Uçucu kül bağlayıcı oranı toplam karışım üzerinden %10 ve %20 olarak sabitlenmiş, kırmızı çamur miktarı uçucu kül kütlelerinin %10, %20, %30 ve %40'ı olacak şekilde belirlenmiştir. Üç farklı su içeriğinde hazırlanan numuneler 28 gün kür edilmiştir. Bu aşamada üç zemin türü (A, B ve C) için toplam 144 adet numune hazırlanmıştır.

Üçüncü aşamada, ikinci aşamadaki kırmızı çamur katkısı nano silika ile değiştirilmiştir. Nano silika oranı uçucu kül kütlelerinin %0,5, %1, %1,5 ve %2'si olacak şekilde uygulanmıştır. Bu aşama yalnızca A ve C zemin türleri üzerinde gerçekleştirilmiş olup, 28 gün kür edilen toplam 96 adet numune hazırlanmıştır. B zeminiyle bu aşamada devam edilmemiştir; çünkü B zemininden elde edilen ilk sonuçlar A zeminiyle büyük ölçüde benzerlik göstermiş ve aynı davranış eğilimini sergilemiştir. Ayrıca deney sayısının çok artması, gerekli numune kalıbı ve süre ihtiyacını önemli ölçüde yükselttiğinden kapsam A ve C zeminleriyle sınırlandırılmıştır.

Dördüncü aşamada, uçucu kül oranı toplam karışım üzerinden %10 ve %20, kırmızı çamur oranı uçucu kül kütlelerinin %10, %20 ve %30'u olarak belirlenmiş, nano silika oranı ise uçucu kül kütlelerinin %1 ve %1,5'i olacak şekilde sabitlenmiştir. Bu aşama yalnızca A ve C zemin türleri üzerinde uygulanmış ve 28 gün kür edilen toplam 48 adet numune hazırlanmıştır.

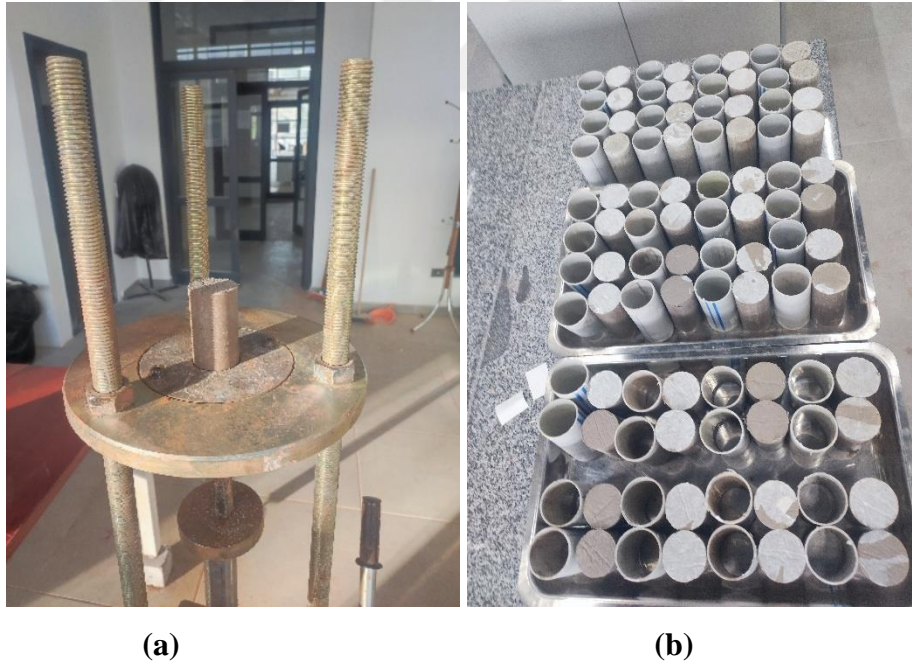
Beşinci aşamada, uçucu kül oranı toplam karışım üzerinden %20, kırmızı çamur oranı uçucu kül kütlelerinin %30'u olarak sabitlenmiş, nano silika ise uçucu kül kütlelerinin %1 ve %1,5'i oranlarında kullanılmıştır. Sabit su içeriğinde hazırlanan numuneler 3, 7, 14, 28 ve 56 gün kür edilmiştir. Bu aşama yalnızca A ve C zemin türleri üzerinde uygulanmış olup, toplam 40 adet numune hazırlanmıştır.

Tüm numuneler, plastik kalıplar (çap 4,65 cm, yükseklik 10 cm) kullanılarak hazırlanmış, kalıpların su sızdırmazlığı sağlanmış ve her kalıba ait numune kodu

etiketlenmiştir. Kalıplar, numunelerle birlikte plastik torbalar içine yerleştirilmiş, yaklaşık 2 cm yüksekliğinde su içeren kapalı kür kutularında, belirtilen süreler boyunca kür edilmiştir. Numunelerin hazırlanma aşamaları Şekil 4.15'te, kalıptan çıkarılma işlemleri ise Şekil 4.16'de gösterilmiştir.



Şekil 4.15. (a)-(b)-(c): UCS (Serbest basınç dayanımı) deneyi için numune hazırlıkları



Şekil 4.16. (a)-(b): UCS deney numunelerinin kalıptan çıkarılması

### 4.3. Deneyler

#### 4.3.1. Enjeksiyon deneyleri

Enjeksiyon karışımlarının taze hal özelliklerini belirlemek amacıyla akışkanlık ve stabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Akışkanlık deneyi, enjeksiyon karışımının pompalama ve yerleştirilebilme kabiliyetini değerlendirmek üzere standart bir Marsh hunisi kullanılarak yapılmıştır. 1,5 litre hacmindeki huninin alt deliğinden 946 cm<sup>3</sup> (1/4 ABD galonu) karışımın boşalma süresi kronometre ile ölçülmüş ve saniye cinsinden kaydedilmiştir. Bu süre, karışımın viskozitesi ve akışkanlığı hakkında doğrudan bir gösterge olarak kullanılmıştır.

Karışımın stabilitesi ve ayrışmaya (bleeding) karşı direnci ise sedimentasyon deneyi ile değerlendirilmiştir. Bu deney kapsamında, 100 ml'lik mezürlü silindirlere belirli kıvamdaki enjeksiyon karışımı yerleştirilmiş ve üstü kapatılarak sabit koşullarda bekletilmiştir. Belirli zaman aralıklarında (5, 10, 20, 30, 60 ve 120. dakikalarda) üstte biriken serbest suyun hacmi ölçülmüştür. Toplam karışım hacmine oranlanan bu değer, yüzde sedimentasyon (çökelme) miktarı olarak hesaplanmış ve karışımın homojenliğini ve dayanıklılığını karakterize etmek için kullanılmıştır. Her iki deney de her bir karışım formülasyonu için tekrarlanmıştır.

#### 4.3.2. Serbest basınç deneyi

Serbest basınç deneyi, kohezyonlu zeminlerde uygulanabilen ve örselenmemiş silindirik zemin numunesinin herhangi bir yanıl basınca tabi tutulmadan yalnızca düşey basınç gerilmesine maruz bırakıldığı bir deneydir. Deney düzeneği, biri sabit diğeri ise düşey hareket edebilen iki plakadan oluşmaktadır. Numune, bu iki plaka arasına yerleştirilerek yükleme yapılı ve yük ile deformasyon miktarları deney sırasında ölçülür.

Bu tez çalışması kapsamında serbest basınç deneyi, ASTM D2166 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler, kür süreleri 3, 7, 14, 28 ve 56 gün olan numuneler üzerinde uygulanmıştır. Numuneler, 46,5 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde silindirik kalıplarda hazırlanmış olup, kür süresi sonunda kalıplardan dikkatlice çıkarılmıştır. Deneye başlamadan önce numunelerin çapı ve boyu kumpas yardımıyla hassas bir şekilde ölçülmüştür. Yükleme hızı 1 mm/dk olarak ayarlanmış ve deney başlatılmıştır. Yükleme esnasında eksenel boy kısalması ( $\Delta H$ ) ve maksimum yük ( $P_{max}$ ) değerleri kaydedilmiştir.

Deneyde elde edilen veriler kullanılarak birim deformasyon değeri ( $\epsilon$ ), başlangıç boyuna ( $H_0$ ) göre hesaplanmıştır. Kırılma anındaki yük değeri ( $P_{max}$ ), kesit alanına ( $A_f$ )

bölünerek gerilme değeri belirlenmiştir. Düşey ekseninde gerilme, yatay ekseninde deformasyon değerleri kullanılarak gerilme-deformasyon grafikleri çizilmiş ve grafiğin tepe noktasındaki gerilme değeri, serbest basınç mukavemeti olarak alınmıştır. Düşük dayanımlı numunelerde kırılma meydana gelmediğinde, %20 birim deformasyon değerindeki gerilme, serbest basınç mukavemeti olarak kabul edilmiştir.

Yapılan deneylere ilişkin aşamalar ve kırılma sonrası numunelerin görüntüleri Şekil 4.17 ve 4.18'de sunulmuştur.

Hesaplamalar aşağıdaki gibi yapılmıştır:

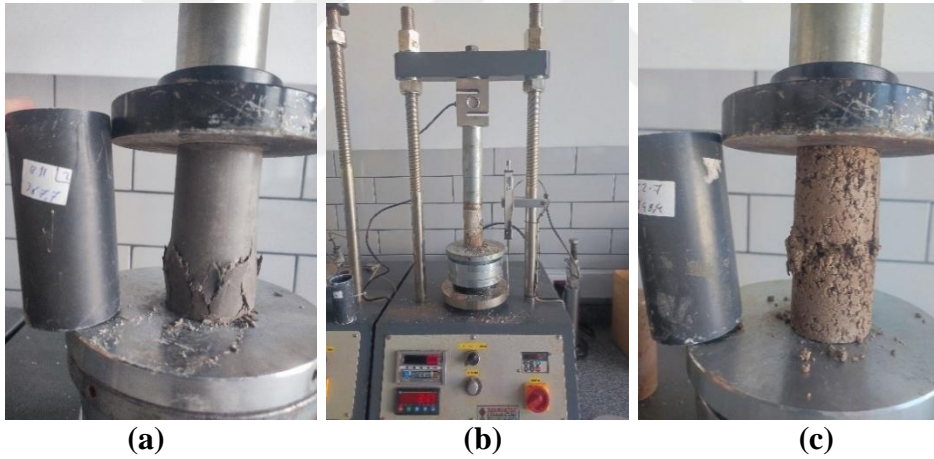
$$q_u = \sigma_1 = P_{\max} / A_f \quad (4.9)$$

$$\varepsilon = \Delta H / H_0 \quad (4.10)$$

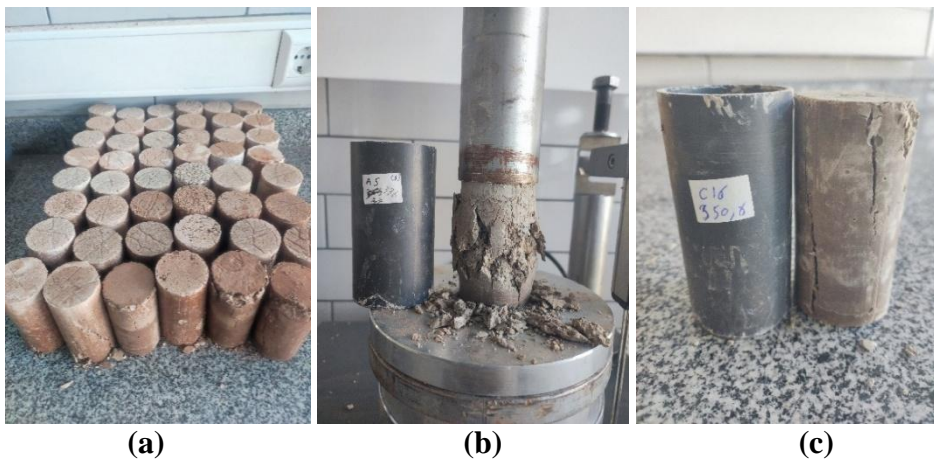
$$A_f = A_0 / (1 - \varepsilon) \quad (4.11)$$

$$\sigma_1 = P_{\max} / A_f \quad (4.12)$$

$$q_u = \sigma_1 \quad (4.13)$$



Şekil 4.17. Serbest basınç deneyinin yapılması



Şekil 4.18. Serbest basınç deneyi sonrası kırılan numunelerin görüntüsü

## 5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

### 5.1. Enjeksiyon Özellikleri

#### 5.1.1. Marsh hunisi akma süresi

Marsh hunisi deneyleri, karışımların  $W_T/W_b$  oranına ve tanelerin özelliklerine duyarlı bir akış davranışı sergilediğini göstermiştir. Şekil 5.1’de görüldüğü üzere  $W_T/W_b$  arttıkça akma süresi hızla azalmış ve  $W_T/W_b \geq 2,0$  düzeyinde yaklaşık 27–30 s’lik bir plato oluşmuştur. Sadece uçucu kül (UK:100) içeren karışımda  $W_T/W_b=1$  için ölçülen 104 s, saha hedefini ( $\leq 50-60$  s) aşarken  $W_T/W_b = 1,2$ ’de 49 s ile hedef aralığına girilmiş, daha yüksek oranlarda 30–34 s değerleri elde edilmiştir. Düşük  $W_T/W_b$  koşullarında kırmızı çamur (KÇ, %30) veya nano silika (NS, %1) ilavesi tek tek yapıldığında akma süresi ~76 s seviyesine inerken, her iki katkının birlikte kullanıldığı UK:69–KÇ:30–NS:1 karışımında süre 59 s’ye düşmüş ve malzeme özelliklerinin tamamlayıcı/sinerjik etkisi ortaya çıkmıştır.

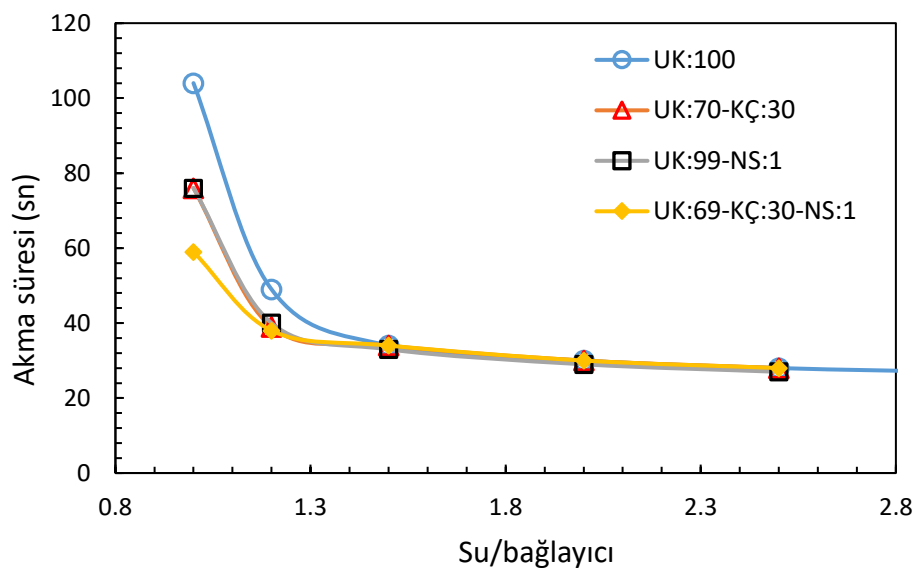
Mekanizma açısından UK tanelerinin küresel-camsı morfolojisi ile kesme direncini azaltıp akışkanlığı artırırken, KÇ’nin UK’ye göre daha kaba olması, daha düşük özgül yüzey alanı ve su talebi sayesinde UK ile daha sıkı bir tanecik paketlenmesi sağlar ve efektif viskoziteyi düşürür. NS’nin çok yüksek özgül yüzey alanı ve nanometrik boyutu nedeniyle tek başına su ihtiyacını artırma ve akma süresini uzatma eğilimi (Yıldız vd., 2020) bulunsa da, düşük dozlarda ve uygun dağıtıcı/akışkanlaştırıcıyla birlikte UK’nin dağıtıcı ve KÇ’nin paketleyici etkileriyle mikro boşlukların doldurulması, flokülasyonun kırılması ve yüzeylerin etkin ıslanması sağlanarak net akış iyileşmesi elde edilebilmektedir. Bu çalışmada  $W_T/W_b = 1$ ’de 104 s’den 59 s’ye inen belirgin düşüş bunun göstergesidir.

Elde edilen bulgular, literatürde özgül yüzeyi yüksek katkıların (ör. metakaolin, silis dumanı) karışım viskozitesini artırdığı, buna karşılık küresel yapılu uçucu külün akışkanlığı geliştirdiği yönündeki bulgularla uyumludur (Kitazume vd., 2013a). Ayrıca bağlayıcı dozajının artmasıyla  $W_T/W_b$  oranının kritik öneme sahip olduğu, belirli bir eşik altında karışımların pompalanabilirliğinin azaldığı, yüksek  $W_T/W_b$  oranlarında ise serbest su fazının baskın hale gelerek sürelerin plato yaptığı rapor edilmiştir (Bruce, 2018). Bu kapsamda, UK–KÇ–NS üçlüsünün düşük  $W_T/W_b$ ’de sağladığı paketleme–dağılım sinerjisi sayesinde literatürde belirtilen eğilimlerle uyumlu bir performans artışı net biçimde gözlenmiştir.

Çizelge 5.1. Marsh hunisi deneyi sonuçları

$W_T/W_b$	Marsh hunisi akma süresi, t (sn)			
	UK:100	UK:70+KÇ:30	UK:99+NS:1	UK:69+KÇ:30+NS:1
1	104	76	76	59
1,2	49	39	40	38
1,5	34	34	33	34
2	30	30	29	30
2,5	28	28	27	28
3	27			
3,5	27			
4	27			

Not:  $W_T/W_b$ , karışımda kullanılan suyun ( $W_T$ ) bağlayıcı miktarına ( $W_b$ ) oranını ifade etmektedir.

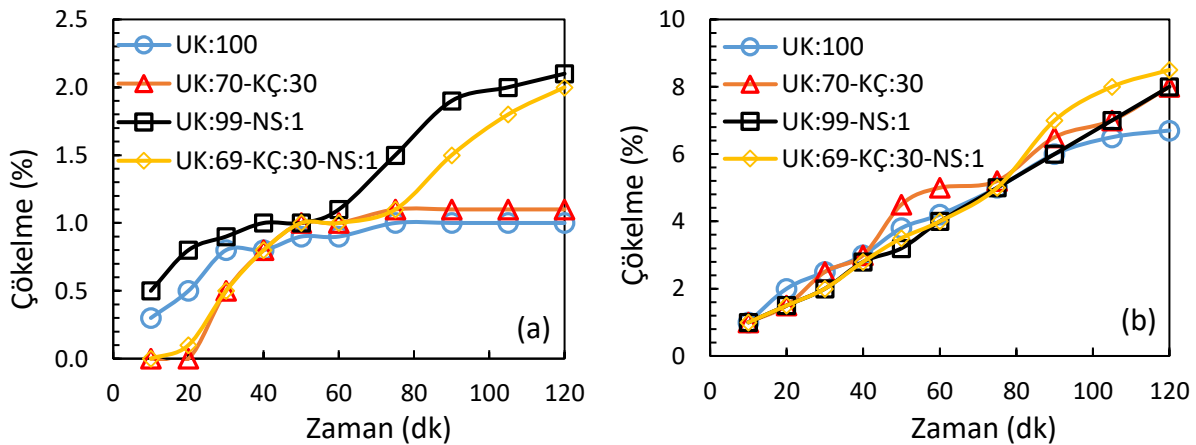


Şekil 5.1. Marsh hunisi deneyi sonuçları

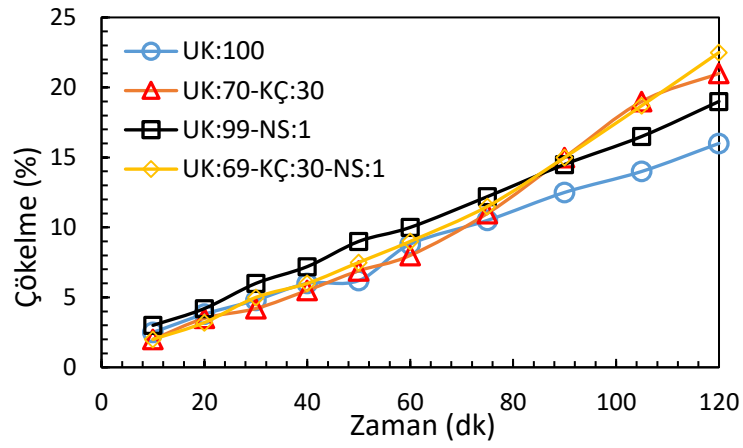
### 5.1.2. Çökeltme (Sedimentasyon) yüzdesi

Çökeltme deneyleri, farklı su/bağlayıcı oranlarında ( $W_T/W_b = 1,0-2,5$ ) hazırlanan enjeksiyon karışımlarının zamana bağlı ayrışma davranışını ortaya koymuştur. Genel eğilim olarak, zaman ilerledikçe tüm karışımlarda çökeltme yüzdesinin arttığı ve  $W_T/W_b$  oranı yükseldikçe toplam çökeltme miktarının belirgin biçimde büyüdüğü gözlenmiştir. Şekil 5.2–5.5’de görüldüğü üzere düşük  $W_T/W_b$  oranında (ör.  $W_T/W_b = 1,0$ ) karışımların akma gerilimi yüksek olduğundan sedimentasyon %1–2 seviyelerinde sınırlı kalmış, 120 dakika sonunda bile %2’nin üzerine çıkmamıştır. Buna karşılık  $W_T/W_b = 2,5$  seviyesinde çökeltme oranı %45–50’ye ulaşmış ve bu durum, serbest su fazının artışıyla doğrudan ilişkilendirilmiştir (Bruce, 2018; Kitazume vd., 2013a). Malzeme etkisi incelendiğinde; UK:100 karışımı, küresel ve camsı tanelerinin sağlaması sayesinde daha dengeli bir çökeltme eğrisi göstermiştir. KÇ (%30) içeren karışımlarda, KÇ’nin yüksek yoğunluğu

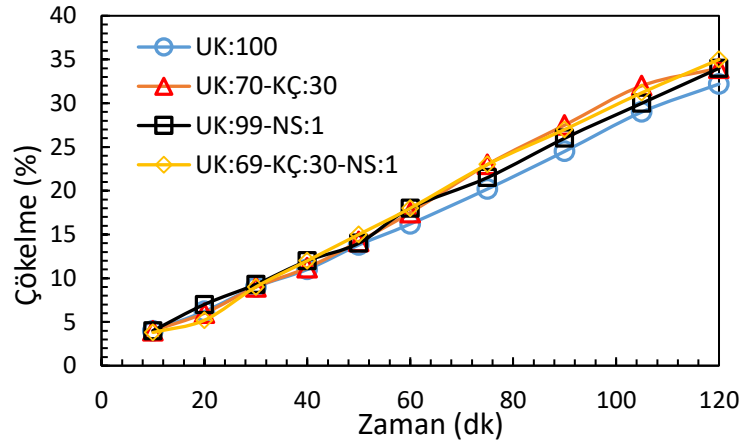
( $\approx 2,6 \text{ g/cm}^3$ ) ve daha kaba tane yapısı nedeniyle çökme eğiliminin artma potansiyeli vardır; ancak aynı zamanda yüksek su tutma kapasitesi ve koloidal yapısı, düşük  $W_T/W_b$  koşullarında çökelmeyi bastırmıştır. NS (%1) ilavesi ise yüzey alanının aşırı yüksekliği nedeniyle suyu fiziksel olarak adsorbe eder, bu da karışımın viskozitesini artırarak özellikle  $W_T/W_b = 1,0-1,2$  aralığında çökme oranını %1–2 düzeylerine kadar düşürür (Yıldız vd., 2020). Bununla birlikte  $W_T/W_b$  arttığında serbest su fazı baskın hale gelmiş, NS'nin stabilizatör etkisi kısmen azalmış ve çökme farkları küçülmüştür. UK:69–KÇ:30–NS:1 karışımı özellikle  $W_T/W_b = 1,0-1,5$  aralığında öne çıkmış; KÇ'nin yoğunluğa bağlı çökme eğilimi, NS'nin su bağlayıcı/viskozite artırıcı etkisiyle dengelenmiş ve UK'nin küresel taneleri sayesinde homojen paketleme sağlanmıştır. Böylece düşük–orta  $W_T/W_b$  'de çökme %2–10 bandında kalmış;  $W_T/W_b \geq 2,0$  koşullarında ise tüm karışımlar benzer eğilim göstermiş, farklar %2–3 bandında sınırlı kalmıştır. Bu bulgu, düşük  $W_T/W_b$  'de partikül morfolojisi ve yüzey özelliklerinin, yüksek  $W_T/W_b$  'de ise serbest su fazının belirleyici olduğunu göstermektedir. Bulgular, literatürde bildirilen değerlerle örtüşmektedir:  $W_T/W_b \geq 2,5$  'te %40–55 çökme (Kitazume vd., 2013a),  $W_T/W_b = 2,0$  'da %30–35 ve  $W_T/W_b = 2,5$  'te  $\approx$ %50 (Bruce, 2018), NS katkılı sistemlerde  $W_T/W_b = 1,0-1,2$  'de %1–3 ve  $W_T/W_b = 2,0$  'de %20–25 (Yıldız vd., 2020). Uygulama açısından, düşük  $W_T/W_b$  (1,0–1,5) sahada yüksek stabilite ve düşük bleeding ile daha kontrollü enjeksiyon sağlar; yüksek  $W_T/W_b$  'de ayrışma artarak düşük dayanım ve hacimsel büzülme riskini büyütür. Bu nedenle karışımların 30–60 s Marsh ve  $\leq$ %10 çökme penceresinde optimize edilmesi, NS'nin ise düşük dozlarda stabiliteyi artırıp bleeding'i azaltabileceği ancak su talebini de yükseltebileceği dikkate alınarak dozajlanması (Bruce, 2018; Kitazume vd., 2013a; Yıldız vd., 2020).



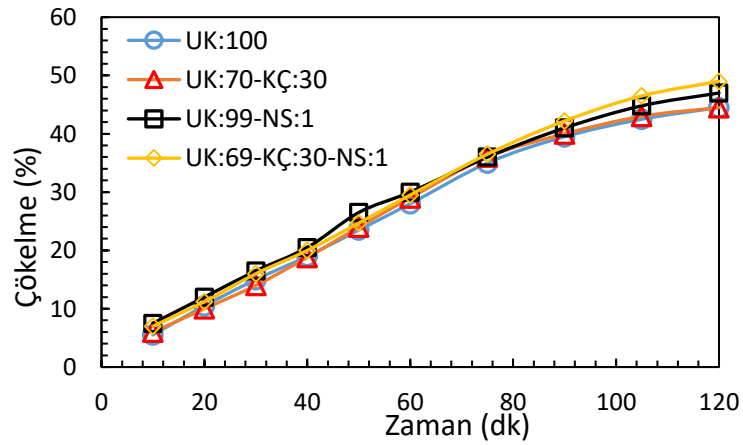
Şekil 5.2. Sedimentasyon deneyi sonuçları: a) su/bağ. = 1, b) su/bağ. = 1,2 olan farklı karışımlar için çökme oranı



Şekil 5.3. Sedimentasyon deneyi sonuçları ( $W_T/W_b = 1,5$ )



Şekil 5.4. Sedimentasyon deneyi sonuçları ( $W_T/W_b = 2$ )



Şekil 5.5. Sedimentasyon deneyi sonuçları ( $W_T/W_b = 2,5$ )

## 5.2. Serbest Basınç Mukavemeti

Farklı bağlayıcı kombinasyonları ile hazırlanan numunelerin dayanım özelliklerini ortaya koymak amacıyla, belirlenen kür süreleri sonunda serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Böylece, farklı karışım oranları ve kür sürelerinin (2, 7, 28 ve 56 gün) erken ve geç dönem dayanım gelişimine etkileri ile puzolanik reaksiyonların hız ve verimleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

### 5.2.1. Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirme

Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen A, B ve C zeminlerine ait serbest basınç deneyleri sonuçları Çizelge 5.2-Çizelge 5.4 arasında verilmiştir. Ayrıca, serbest basınç deneyi sonuçlarına ait gerilme–birim deformasyon eğrileri EK-1 olarak eklenmiştir. Dayanım değerleri bağlayıcı oranı ( $a_w$ ) ve toplam su/bağlayıcı oranı ( $W_T/W_b$ ) değerlerinden etkilenmektedir. %10 gibi düşük bir bağlayıcı oranında ( $a_w$ ), A zemininde 1510 kPa ( $W_T/W_b=1,5$ ), B zemininde 2550,2 kPa ( $W_T/W_b=1,8$ ) ve C zemininde 1308,3 kPa ( $W_T/W_b=2,4$ ) dayanım elde edilmiştir. Bağlayıcı oranı arttıkça dayanım değerlerinde artış olmaktadır. Bu sonuç, C sınıfı uçucu külün kendiliğinden çimentolanma özelliğine sahip olduğunu ve çimento esaslı enjeksiyonlar yerine kullanılabileceğini göstermektedir. %10 bağlayıcı oranında, A, B ve C zeminleri için  $W_T/W_b$  oranının sırasıyla 4,0, 4,8 ve 6,2'ye çıkmasıyla dayanım değerleri oldukça azalmıştır (237,2-330,9 kPa). Bu sonuçlara göre, bağlayıcı oranı ( $a_w$ ), su/bağlayıcı oranı ( $W_T/W_b$ ) ve zemindeki ince tane oranı dayanımı kontrol eden en temel parametreler olmuştur.

Çizelge 5.2. Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen A zemininin 28 günlük dayanım sonuçları

Araştırma alanı	Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	% C-UK	Su İçeriği %	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	$q_u$ (kPa)	$\epsilon_{max}$ (mm)
A Zemini	A1-1	10	1,5	100	13,6	174,1	1510,0	1,39
	A1-2	10	2,0	100	18,2	160,2	1071,3	1,73
	A1-3	10	2,5	100	22,7	148,3	555,7	1,72
	A1-4	10	3,0	100	27,3	138,1	396,9	1,34
	A1-5	10	3,5	100	31,8	129,1	240,4	2,51
	A1-6	10	4,0	100	36,4	121,3	237,2	2,82
	A1-7	20	1,0	100	16,7	297,9	3392,0	1,59
	A1-8	20	1,3	100	21,7	273,5	1726,9	2,03
	A1-9	20	1,6	100	26,7	252,8	1332,6	1,62
	A1-10	20	1,9	100	31,7	234,9	852,2	1,46
	A1-11	20	2,3	100	38,3	214,8	668,2	1,71
	A1-12	30	0,9	100	20,8	380,6	4608,2	1,85
	A1-13	30	1,1	100	25,4	353,7	2782,8	2,07
	A1-14	30	1,3	100	30,0	330,3	1613,5	1,43
	A1-15	30	1,5	100	34,6	309,9	1590,6	1,41
	A1-16	40	0,8	100	22,9	451,9	4176,9	1,67
	A1-17	40	1,0	100	28,6	414,4	2853,9	1,58
	A1-18	40	1,1	100	31,4	397,9	2075,8	1,47
	A1-19	40	1,3	100	37,1	368,6	964,7	1,34
	A1-20	40	1,5	100	42,9	343,3	649,0	1,37

Çizelge 5.3. Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen B zemininin 28 günlük dayanım sonuçları

Araştırma alanı	Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	% C-UK	Su İçeriği %	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	$q_u$ (kPa)	$\epsilon_{max}$ (mm)
B Zemin	B1-1	10	1,8	100	16,4	165,5	2550,2	1,72
	B1-2	10	2,3	100	20,9	152,8	1468,4	1,79
	B1-3	10	2,8	100	25,5	142,0	888,4	1,66
	B1-4	10	3,3	100	30,0	132,6	615,0	1,48
	B1-5	10	3,8	100	34,5	124,3	507,7	1,46
	B1-6	10	4,3	100	39,1	117,1	460,0	1,52
	B1-7	10	4,8	100	43,6	110,6	330,9	2,64
	B1-8	20	1,2	100	20,0	281,2	2734,6	2,05
	B1-9	20	1,5	100	25,0	259,3	1999,0	1,47
	B1-10	20	1,8	100	30,0	240,6	1207,1	1,76
	B1-11	20	2,1	100	35,0	224,4	1050,6	1,39
	B1-12	20	2,5	100	41,7	205,9	766,0	1,39
	B1-13	30	1,0	100	23,1	366,7	2841,0	0,80
	B1-14	30	1,2	100	27,7	341,6	2116,3	1,89
	B1-15	30	1,4	100	32,3	319,8	1333,4	1,54
	B1-16	30	1,6	100	36,9	300,5	839,5	1,60
	B1-17	30	1,8	100	41,5	283,5	826,5	1,31
	B1-18	30	2,0	100	46,2	268,3	662,6	1,09
	B1-19	40	0,9	100	25,7	432,4	3043,9	1,55
	B1-20	40	1,1	100	31,4	397,9	2273,0	1,61
	B1-21	40	1,3	100	37,1	368,6	1527,7	1,43
	B1-22	40	1,6	100	45,7	331,9	806,7	1,49

Çizelge 5.4. Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen C zemininin 28 günlük dayanım sonuçları

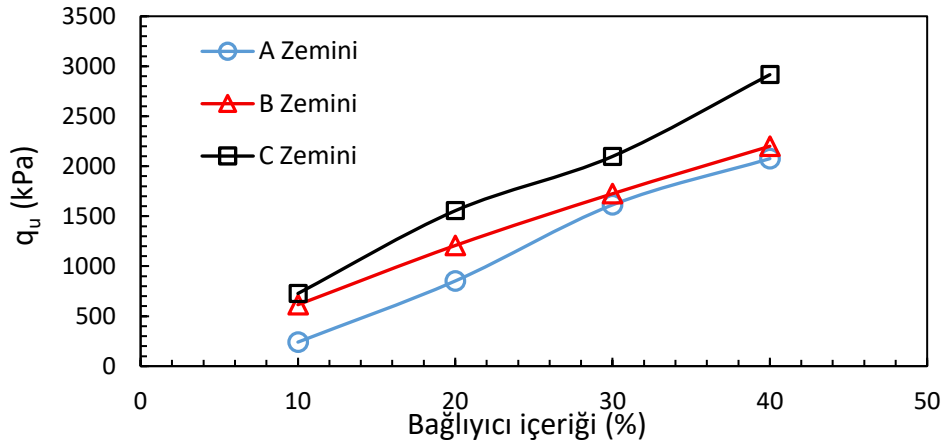
Araştırma alanı	Numune no	$a_w$ (%)	$W_T/W_b$	% C-UK	Su İçeriği %	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	$q_u$ (kPa)	$\epsilon_{max}$ (mm)
C Zemin	C1-1	10	2,4	100	21,8	150,5	1308,3	1,36
	C1-2	10	3,0	100	27,3	138,1	909,4	2,11
	C1-3	10	3,6	100	32,7	127,5	544,4	2,39
	C1-4	10	4,2	100	38,2	118,4	405,1	2,63
	C1-5	10	4,8	100	43,6	110,6	318,9	2,47
	C1-6	10	5,2	100	47,3	105,9	325,6	2,30
	C1-7	10	5,8	100	52,7	99,6	303,7	2,91
	C1-8	10	6,2	100	56,4	95,8	280,4	2,53
	C1-9	20	1,6	100	26,7	252,8	2168,5	1,75
	C1-10	20	1,9	100	31,7	234,9	1554,8	2,34
	C1-11	20	2,1	100	35,0	224,4	1165,3	2,50
	C1-12	20	2,4	100	40,0	210,2	967,8	2,49
	C1-13	20	2,7	100	45,0	197,8	861,4	2,42
	C1-14	20	3,0	100	50,0	186,7	732,8	1,90
	C1-15	30	1,2	100	27,7	341,6	2484,5	2,03
	C1-16	30	1,5	100	34,6	309,9	1710,5	2,34
	C1-17	30	1,8	100	41,5	283,5	1162,6	1,99
	C1-18	30	2,1	100	48,5	261,3	715,2	1,74
	C1-19	30	2,5	100	57,7	236,6	379,1	2,49
	C1-20	40	1,1	100	31,4	397,9	2916,1	2,40
	C1-21	40	1,3	100	37,1	368,6	2185,0	1,75
	C1-22	40	1,5	100	42,9	343,3	1381,8	1,95
	C1-23	40	1,7	100	48,6	321,2	1031,9	1,98
	C1-24	40	2,0	100	57,1	293,0	669,2	1,99

#### Bağlayıcı miktarının etkisi:

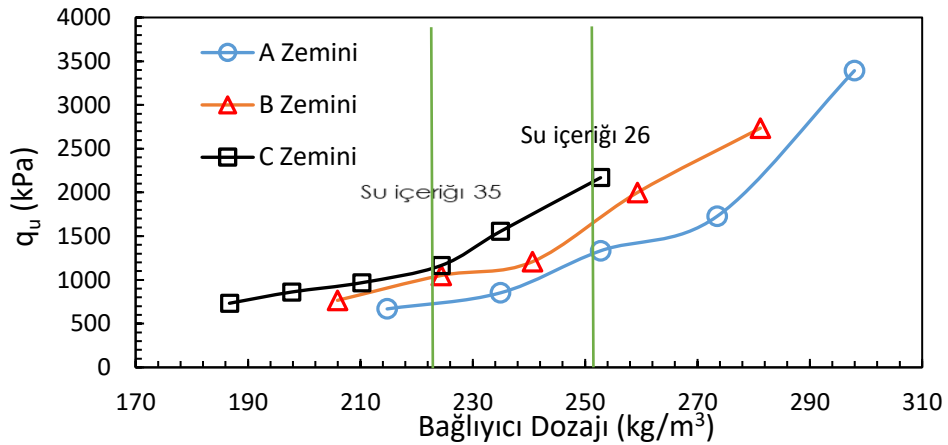
Enjeksiyonla zemin iyileştirme çalışmalarında bağlayıcı miktarını belirlemek için kullanılan parametreler bağlayıcı içeriği ( $a_w$ ) ve bağlayıcı dozajıdır. Bağlayıcı içeriği, bağlayıcı kütlelerinin zemin kütlelerine oranını ifade ederken, bağlayıcı dozajı birim hacimdeki bağlayıcı kütlelerini ifade eder. Bu parametreler, sahadaki enjeksiyon çalışmalarında, iyileştirilecek zemin bölgesine enjekte edilecek bağlayıcı kütlelerinin hesaplanmasını sağlar. Örneğin, sahada jet grout yöntemi ile 80cm çapında, 20m uzunluğunda kolon imal edilirse, kolon hacmi 10m<sup>3</sup> olur. İmalat sırasında, 300kg/m<sup>3</sup> dozaj ve su/bağlayıcı oranı 1 seçilirse bağlayıcı kütlesi 3000kg (kolon hacmi x dozaj) ve enjeksiyondaki su kütlesi 3000 kg (bağlayıcı kütlesi x su/bağlayıcı oranı) olarak hesaplanabilir.

Uçucu kül ile iyileştirilen zeminlerin bağlayıcı içeriğindeki değişime göre dayanım sonuçları Şekil 5.6'da verilmiştir. Yaklaşık %30 su muhtevasına sahip kum-enjeksiyon karışımlarında bağlayıcı içerikleri %10, 20, 30 ve 40 için karşılık gelen bağlayıcı dozajları yaklaşık olarak 130, 230, 330 ve 400 kg/m<sup>3</sup> olmaktadır. Her zemin için bağlayıcı içeriği arttıkça dayanımın arttığı görülmektedir. Bağlayıcı içeriği %10'dan %40'a arttığında A, B

ve C zeminlerindeki dayanım artışı yaklaşık olarak sırasıyla 8,6, 3,5 ve 4,0 kat olmuştur. Zemin-enjeksiyon karışımındaki bağlayıcı içeriğinin artması taneler arasında daha fazla miktarda bağlayıcı malzemenin bulunmasına neden olmaktadır. Yeterli miktarda suyun bulunması ile zemin-bağlayıcı taneleri reaksiyona girerek hidrasyon ürünleri artmaktadır ve dayanım artışı meydana gelmektedir. Benzer davranış, bağlayıcı dozajının etkisinde de görülmektedir (Şekil 5.7). Bağlayıcı dozajının artışı ile her zeminde dayanım artışı meydana gelmektedir. Birim hacimdeki uçucu külün artması, hidratlanma sonucu çimentolanma ürünlerini artırmakta ve kum taneleri arasındaki bağları güçlendirmektedir. İyileştirilen zeminlerin dayanımları her bağlayıcı içeriğinde ve dozajında C zemininde daha yüksek iken A zemininde daha düşük kalmaktadır. A, B ve C zeminlerinin ince tane oranları sırasıyla %9, 18,5 ve 37,8'dir. Buna göre, ince tane oranının artması kum taneleri arasındaki daha küçük boşlukları doldurarak zemin matrisini boşluksuz bir yapıya dönüştürmektedir.



Şekil 5.6. Bağlayıcı içeriğinin dayanıma etkisi

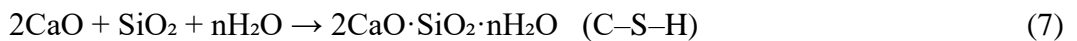


Şekil 5.7. Bağlayıcı dozajının dayanıma etkisi

C sınıfı uçucu kül, kum gibi inert bir zeminin mühendislik performansını, bağlayıcı kimyasının temelini oluşturan nükleasyon (çekirdeklenme) sürecini harekete geçirerek iyileştirir; bu süreç, suyla karışan uçucu külün çözünen kalsiyum, silikat ve alüminat iyonlarının, nihai dayanımı sağlayan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jellerini oluşturmak üzere ilk kararlı kümeleri meydana getirmesiyle başlar. Uçucu külün ince tanecikli yapısı ve yüksek özgül yüzey alanı, bu kritik çekirdeklenme reaksiyonu için çok sayıda aktif nükleasyon noktası sağlayarak, jel oluşumunun kum taneleri etrafında homojen ve yoğun bir şekilde dağılmasını sağlar. Düşük su/bağlayıcı oranı ( $W_T/W_b$ ) koşullarında, bu nükleasyon noktalarının sayısı ve etkinliği maksimuma çıkar, hidrasyon ürünleri kum taneleri arasındaki boşlukları verimlice doldurarak sağlam bir matris oluşturur ve serbest basınç dayanımını ( $q_u$ ) artırır. Buna karşılık, yüksek  $W_T/W_b$  oranlarında aşırı su, bağlayıcıyı seyrelterek ve iyonların konsantrasyonunu düşürerek nükleasyonu güçleştirir, zayıf ve süresiz bir mikro yapıya neden olur, dolayısıyla dayanım düşer. Sonuç olarak, uçucu külün sağladığı nükleasyon noktaları, kumun kimyasal olarak bağlanıp yüksek mukavemetli bir zemine dönüşmesindeki en hayati rolü oynar.

*Kimyasal Etki:*

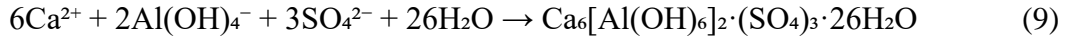
Yüksek CaO içeriğine sahip uçucu kül (UK), portland çimentosuna benzer şekilde hızlı bir hidrasyon tepkimesi başlatır ve ortamın pH değerini artırarak reaktif silika ve alüminanın çözünmesini sağlar. Bu süreçte başlıca oluşan ürün Kalsiyum Silikat Hidrat (C-S-H) jeli olup, UK içeriğindeki reaktif silika ( $SiO_2$ ) ve serbest kirecin (CaO) suyla reaksiyonu sonucu meydana gelir:



Hidrasyon sonucunda sistemde artan CaO, suyla birleşerek Kalsiyum Hidroksit (Portlandit) oluşturur:



Ayrıca, UK'nin yüksek  $SO_3$  ve  $Al_2O_3$  içeriği, ortamda yeterli  $Ca^{2+}$  ve  $OH^-$  iyonlarının bulunması durumunda etrenjit ( $Ca_6[Al(OH)_6]_2 \cdot (SO_4)_3 \cdot 26H_2O$ ) oluşumuna yol açabilir. Bu faz, erken yaşlarda hacimsel genişlemeye neden olabileceğinden dikkatle kontrol edilmelidir:



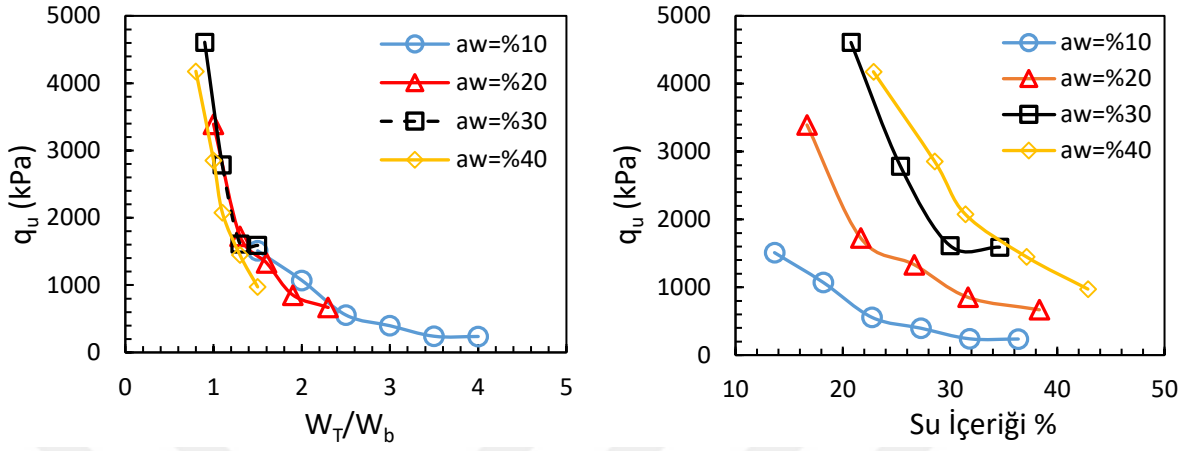
Sonuç olarak, oluşan C–S–H jeli, CH ve sınırlı miktarda etrenjit kristalleri, zemin taneleri arasındaki boşlukları doldurur ve taneler arası bağ dayanımını artırır. Bu durum, enjeksiyon karışımında daha düşük geçirgenlik, yüksek stabilite ve erken yaşta dayanım artışı olarak kendini gösterir. Ancak, yüksek sülfat veya serbest su içeriği, etrenjit kaynaklı genleşme ve ayrışma riskini artırabileceğinden,  $W_T/W_b$  oranı ile iyonik denge dikkatle kontrol edilmelidir.

#### *Suyun etkisi:*

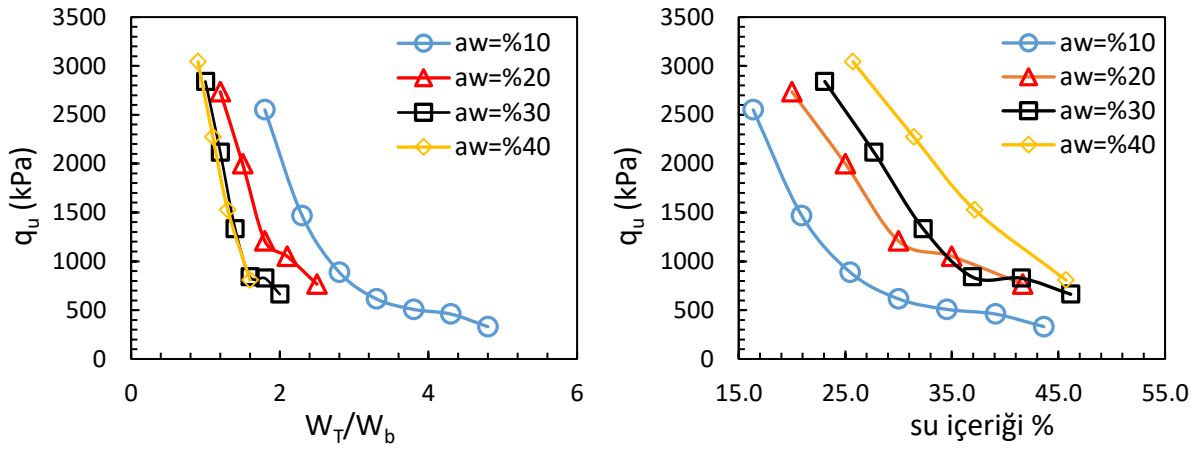
Zemin-enjeksiyon karışımında bulunan su bağlayıcı malzemenin hidrasyon reaksiyonları için gereklidir. Karışımdaki suyun gereğinden az olması tüm bağlayıcı tanelerinin suyla reaksiyona girme

A, B ve C zeminlerinde yapılan deneyler, su/bağlayıcı oranının ( $W_T/W_b$ ) serbest basınç dayanımı ( $q_u$ ) üzerindeki belirleyici etkisini ortak bir şekilde ortaya koymuştur. Her üç zemin tipinde de  $W_T/W_b$  oranındaki artış,  $q_u$  değerlerinde eksponansiyel düşüşe neden olmuş; örneğin A zemini için %20 bağlayıcıda  $W_T/W_b = 1,0$ 'da 3392 kPa olan dayanım,  $W_T/W_b = 2,3$ 'te 668 kPa'a düşerek ~%80 azalırken, B ve C zeminlerinde de benzer şekilde yüksek  $W_T/W_b$  değerlerinde dayanım 300-800 kPa seviyelerine gerilemiştir. Bu durum literatürde rapor edilen porozite/bağlayıcı hacmi ( $\eta/C_{iv}$ ) ilişkisi ile uyumludur (Kang vd., 2023a; Vergara vd., 2025a). Bu güçlü ters ilişki, literatürle uyumlu şekilde, artan  $W_T/W_b$ 'nin poroziteyi ( $\eta$ ) artırması ve bağlayıcı hacmini ( $C_{iv}$ ) seyrelterek matrisin sürekliliğini zayıflatması ve serbest suyun fazlalığı ile açıklanmaktadır. Buna karşılık, düşük  $W_T/W_b$  ( $\approx 0,9-1,5$ ) ve orta-yüksek bağlayıcı oranı (%30-40  $a_w$ ) kombinasyonları, her üç zemin için de optimum performansı sağlamış, porozitenin azalması, yoğunluğun ve hidrasyon ürünleri (C-S-H/C-A-H) sürekliliğinin artması sayesinde  $q_u$  değerleri 2500-4000 kPa bandına ulaşmıştır. Elde edilen en yüksek değerler (%30-40 bağlayıcı ve  $W_T/W_b \leq 1,0$  koşullarında ( $q_u > 4000$  kPa), White et al. (2005) ve Kitazume & Terashi (2013) tarafından bildirilen 2000-5000 kPa aralığındaki değerlerle örtüşmektedir. Özellikle uçucu külün yüksek özgül yüzey alanının hidrasyonu hızlandırması ve jel oluşumunu desteklemesi bu süreci güçlendirirken, C zemini gibi yüksek kil içeriğine sahip zeminlerde artan su tutma kapasitesi, bağlayıcının etkinliğini sınırlayarak düşük dayanıma yol açmıştır. Sonuç olarak,  $\eta/C_{iv}$  endeksi ile tanımlanan bu mekanizma, düşük boşluk-yüksek bağlayıcı kombinasyonlarının dayanımı en üst düzeye çıkardığını, aşırı suyun ise matrisi her koşulda

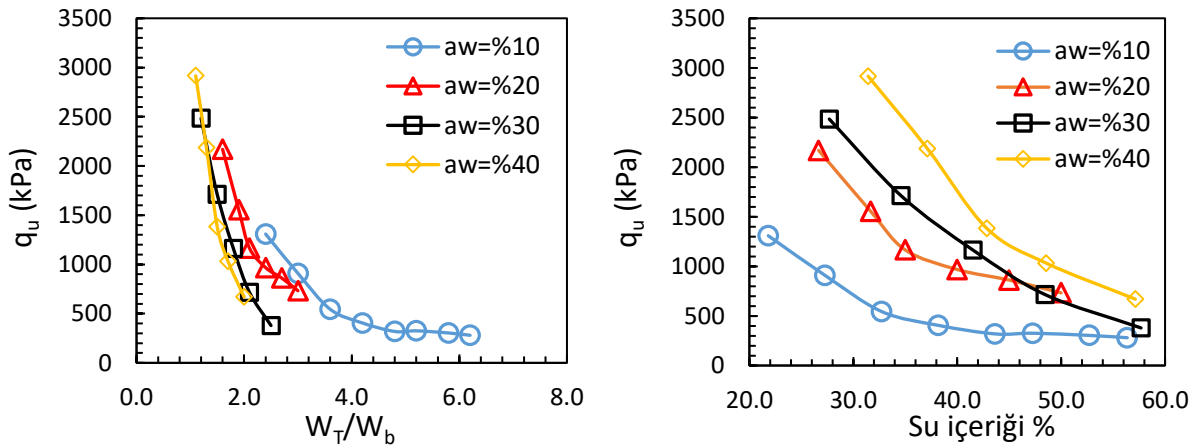
zayıflatan temel faktör olduğunu göstermiştir. Bu genel eğilim A, B ve C zeminlerine ait  $W_T/W_b$ - $q_u$  ilişkilerini gösteren Şekil 5.8–5.10’de açıkça görülmektedir.



Şekil 5.8. A zemininde uçucu kül katkı numunelerinin 28 günlük UCS dayanımları



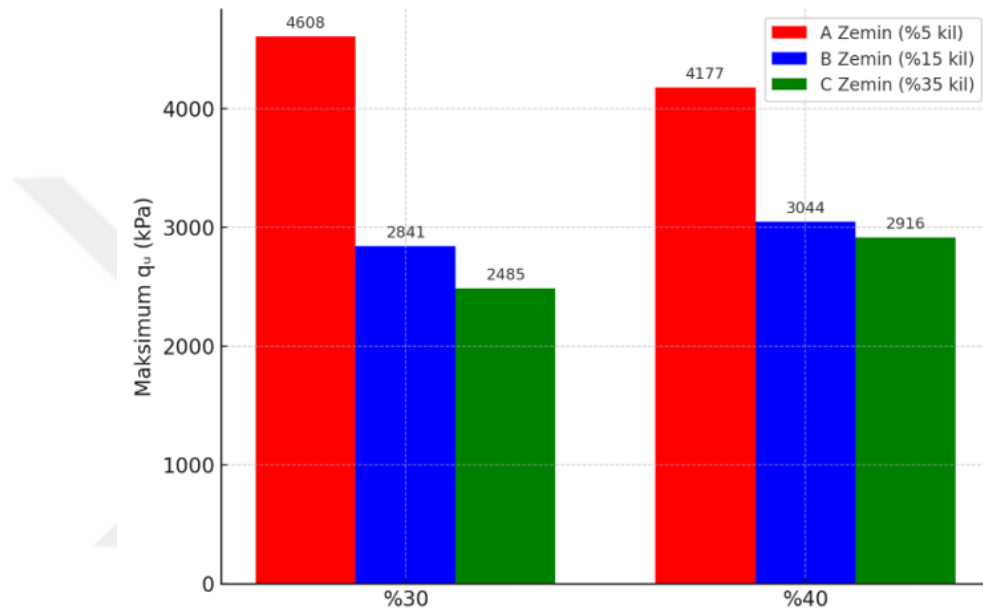
Şekil 5.9. B zemininde uçucu kül katkı numunelerinin 28 günlük UCS dayanımları



Şekil 5.10. C zemininde uçucu kül katkı numunelerinin 28 günlük UCS dayanımları

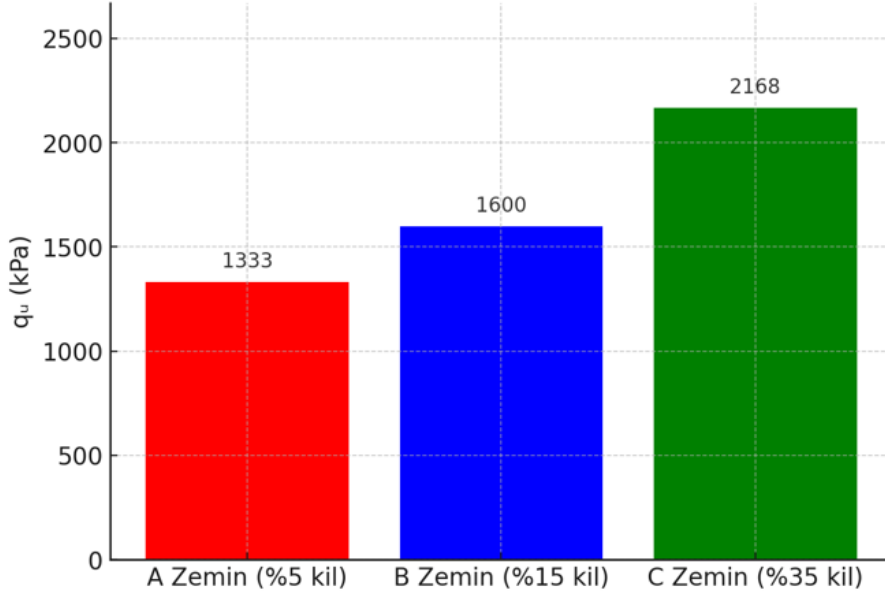
*İnce tane oranının etkisi:*

Şekil 5.11’de, yalnızca tek bir parametre olan bağlayıcı içeriği ( $a_w = \%30$  ve  $\%40$ ) dikkate alınarak yapılan karşılaştırmada A zemininin en yüksek dayanımı verdiği, ardından B ve C zeminlerinin geldiği görülmektedir. Bu durum ilk bakışta  $A > B > C$  sıralamasını göstermektedir. Ancak burada elde edilen sonuç, sadece bağlayıcı oranına göre değerlendirildiği için yanıltıcıdır; çünkü dayanım üzerinde etkili olan diğer parametreler, özellikle su/bağlayıcı oranı göz ardı edilmiştir.



**Şekil 5.11.** A, B ve C zeminlerinde aynı bağlayıcı oranında ( $a_w = \%30$  ve  $\%40$ ) elde edilen en yüksek  $q_u$  değerlerinin karşılaştırılması

Buna karşılık, Şekil 5.12’de olduğu gibi birden fazla parametre (örneğin  $a_w = \%20$  ve  $W_T/W_b \approx 1,6$ ) aynı anda dikkate alındığında, sıralamanın tamamen tersine döndüğü ve C zemininde en yüksek dayanımın (2168 kPa) elde edildiği, B zemininin ikinci sırada (1600 kPa) ve A zemininin ise en düşük değerde (1333 kPa) kaldığı görülmektedir. Bu durum, C zemininin daha yüksek ince tane oranına sahip olmasıyla ilişkilendirilebilir. İnce taneler kum taneleri arasındaki boşlukları doldurarak daha yoğun ve sürekli bir matrisin oluşmasına katkı sağlamış ve bağlayıcı-hidratasyon ürünleri ile dayanımı artırmıştır. Dolayısıyla, çoklu parametrelerin birlikte değerlendirilmesi, ince tane oranının yanı sıra su/bağlayıcı oranı ve bağlayıcı miktarı gibi diğer değişkenlerle etkileşim içinde dayanım davranışının şekillendiğini ortaya koymaktadır (Kang vd., 2023a; Vergara vd., 2025a; White vd., 2005a).



Şekil 5.12. A, B ve C zeminlerinin serbest basınç dayanımlarının karşılaştırılması ( $a_w = \%20$ ,  $W_T/W_b \approx 1,6$ )

### 5.2.2. Uçucu kül ve kırmızı çamur enjeksiyonu ile iyileştirme

Kırmızı çamur ve uçucu kül katkısıyla iyileştirilen A, B ve C zeminlerine ait serbest basınç deneyi sonuçları Çizelge 5.5–Çizelge 5.7 arasında verilmiştir. Ayrıca, serbest basınç deneyi sonuçlarına ait gerilme–birim deformasyon eğrileri EK-2 olarak eklenmiştir. Dayanım değerlerinin bağlayıcı oranı ( $a_w$ ) ve toplam su/bağlayıcı oranı ( $W_T/W_b$ ) parametrelerinden önemli ölçüde etkilendiği görülmektedir. %10 gibi düşük bir bağlayıcı oranında ( $a_w$ ), A zemininde yaklaşık 1673 kPa ( $W_T/W_b = 2,0$ ), B zemininde 1587 kPa ( $W_T/W_b = 2,0$ ) ve C zemininde 1220 kPa ( $W_T/W_b = 3,0$ ) dayanım elde edilmiştir. Bağlayıcı oranı %20'ye çıkarıldığında dayanım değerlerinde belirgin bir artış meydana gelmiştir; örneğin A zemininde 5404,8 kPa ( $W_T/W_b = 1,0$ ), B zemininde 4057,5 kPa ( $W_T/W_b = 1,2$ ) ve C zemininde 2495,0 kPa ( $W_T/W_b = 1,6$ ) seviyelerine ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, KÇ ve UK kombinasyonunun tek başına UK katkısına göre daha yüksek dayanım sağladığını ve özellikle düşük  $W_T/W_b$  oranlarında önemli bir performans artışı yarattığını göstermektedir. %10 bağlayıcı oranında  $W_T/W_b$  değerlerinin A, B ve C zeminlerinde sırasıyla 4,0, 4,8 ve 6,2 seviyelerine çıkmasıyla dayanımların 250–500 kPa aralığına kadar gerilediği tespit edilmiştir. Dolayısıyla, bağlayıcı oranı ( $a_w$ ), su/bağlayıcı oranı ( $W_T/W_b$ ) ve zemindeki ince tane oranı bu karışımların dayanımını kontrol eden temel parametreler olmaya devam etmiştir.

**Çizelge 5.5.** A zemininde kırmızı çamur ve uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları

Araştırma Alanı	Numune no	aw (%)	WT / Wb %	C-UK %	KÇ %	Su İçeriği %	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	q <sub>u</sub> (kPa)	ε <sub>max</sub> (mm)
A Zemin	A2-1	10	1,5	90	10	13,6	174,4	2252,8	1,13
	A2-2	10	2,0	90	10	18,2	160,4	1128,0	1,34
	A2-3	10	2,5	90	10	22,7	148,5	777,4	1,52
	A2-4	10	1,5	80	20	13,6	174,6	2961,2	1,57
	A2-5	10	2,0	80	20	18,2	160,6	1892,7	1,84
	A2-6	10	2,5	80	20	22,7	148,6	1165,2	1,41
	A2-7	10	1,5	70	30	13,6	174,8	2933,2	1,35
	A2-8	10	2,0	70	30	18,2	160,8	1775,2	1,41
	A2-9	10	2,5	70	30	22,7	148,8	946,1	1,79
	A2-10	10	1,5	60	40	13,6	175,1	2809,8	1,51
	A2-11	10	2,0	60	40	18,2	161,0	1442,6	1,77
	A2-12	10	2,5	60	40	22,7	149,0	704,5	1,83
	A2-13	20	1,0	90	10	16,7	298,7	3358,9	1,50
	A2-14	20	1,3	90	10	21,7	274,1	2465,2	1,72
	A2-15	20	1,6	90	10	26,7	253,3	1273,6	1,85
	A2-16	20	1,0	80	20	16,7	299,4	3719,8	2,00
	A2-17	20	1,3	80	20	21,7	274,7	2355,0	1,79
	A2-18	20	1,6	80	20	26,7	253,8	1324,8	1,72
	A2-19	20	1,0	70	30	16,7	300,1	5127,0	1,75
	A2-20	20	1,3	70	30	21,7	275,3	3222,2	2,04
	A2-21	20	1,6	70	30	26,7	254,3	1873,3	1,76
	A2-22	20	1,0	60	40	16,7	300,8	3935,6	1,70
	A2-23	20	1,3	60	40	21,7	275,9	2404,9	1,98
	A2-24	20	1,6	60	40	26,7	254,8	1251,8	1,96

**Çizelge 5.6.** B zemininde kırmızı çamur ve uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları

Araştırma Alanı	Numune no	a <sub>w</sub> (%)	W <sub>T</sub> / W <sub>b</sub>	% C-UK	% KÇ	Su İçeriği %	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	q <sub>u</sub> (kPa)	ε <sub>max</sub> (mm)
B Zemin	B2-1	10	1,8	90	10	16,4	165,7	2619,1	1,43
	B2-2	10	2,0	90	10	18,2	160,4	1586,8	1,83
	B2-3	10	2,5	90	10	22,7	148,5	987,0	1,81
	B2-4	10	1,8	80	20	16,4	165,9	2714,3	1,43
	B2-5	10	2,0	80	20	18,2	160,6	1800,0	1,52
	B2-6	10	2,5	80	20	22,7	148,6	989,8	1,67
	B2-7	10	1,8	70	30	16,4	166,1	2654,1	1,50
	B2-8	10	2,0	70	30	18,2	160,8	1608,6	1,51
	B2-9	10	2,5	70	30	22,7	148,8	828,1	1,55
	B2-10	10	1,8	60	40	16,4	166,3	1611,0	1,19
	B2-11	10	2,0	60	40	18,2	161,0	1225,8	1,78
	B2-12	10	2,5	60	40	22,7	149,0	796,5	2,01
	B2-13	20	1,2	90	10	20,0	281,8	2744,4	1,66
	B2-14	20	1,5	90	10	25,0	259,8	1591,7	1,55
	B2-15	20	1,8	90	10	30,0	241,1	1043,4	1,82
	B2-16	20	1,2	80	20	20,0	282,4	2751,6	1,56
	B2-17	20	1,5	80	20	25,0	260,4	2051,2	1,78
	B2-18	20	1,8	80	20	30,0	241,5	1245,1	2,06
	B2-19	20	1,2	70	30	20,0	283,1	3783,6	1,92
	B2-20	20	1,5	70	30	25,0	260,9	2442,3	1,77
	B2-21	20	1,8	70	30	30,0	242,0	1325,0	2,12
	B2-22	20	1,2	60	40	20,0	283,7	2686,2	1,56
	B2-23	20	1,5	60	40	25,0	261,5	1776,2	1,60
	B2-24	20	1,8	60	40	30,0	242,4	1173,0	1,74

**Çizelge 5.7.** C zemininde kırmızı çamur ve uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları

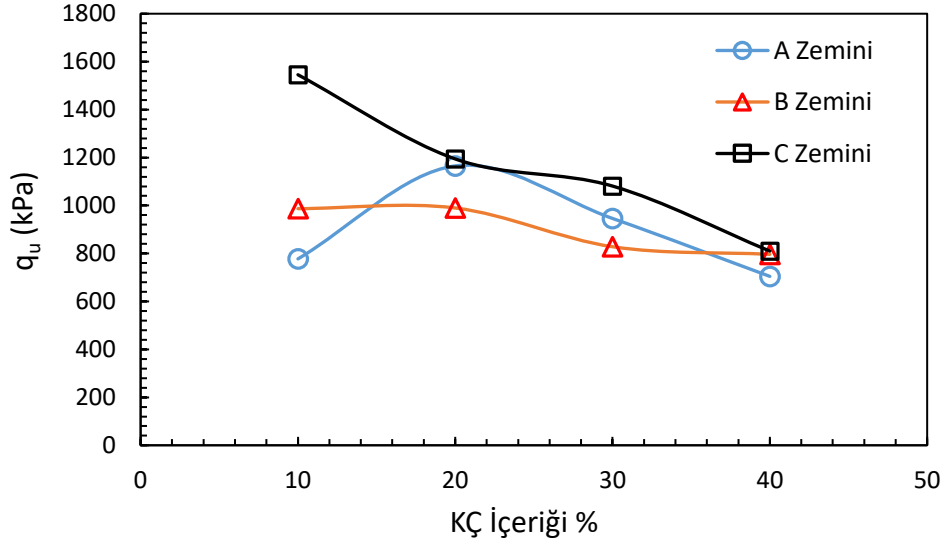
Araştırma Alanı	Numune no	$a_w$ (%)	$W_T/W_b$	% C-UK	% KÇ	Su İçeriği (%)	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	$q_u$ (kPa)	$\epsilon_{max}$ (mm)
C Zemin	C2-1	10	2,4	90	10	21,82	150,71	1545,5	1,25
	C2-2	10	3,0	90	10	27,27	138,21	1220,0	2,04
	C2-3	10	3,6	90	10	32,73	127,63	715,6	2,09
	C2-4	10	2,4	80	20	21,82	150,89	1194,3	1,32
	C2-5	10	3,0	80	20	27,27	138,36	886,9	2,12
	C2-6	10	3,6	80	20	32,73	127,76	514,8	2,56
	C2-7	10	2,4	70	30	21,82	151,07	1081,2	1,65
	C2-8	10	3,0	70	30	27,27	138,52	702,9	2,06
	C2-9	10	3,6	70	30	32,73	127,89	387,7	2,59
	C2-10	10	2,4	60	40	21,82	151,25	809,9	1,57
	C2-11	10	3,0	60	40	27,27	138,67	500,3	2,13
	C2-12	10	3,6	60	40	32,73	128,02	256,5	3,50
	C2-13	20	1,6	90	10	26,67	253,27	2396,8	1,62
	C2-14	20	1,9	90	10	31,67	235,38	1722,0	1,83
	C2-15	20	2,1	90	10	35,00	224,80	1324,6	1,91
	C2-16	20	1,6	80	20	26,67	253,77	2139,8	1,81
	C2-17	20	1,9	80	20	31,67	235,82	1676,4	2,06
	C2-18	20	2,1	80	20	35,00	225,20	1410,7	2,03
	C2-19	20	1,6	70	30	26,67	254,28	2113,0	1,79
	C2-20	20	1,9	70	30	31,67	236,26	1577,4	1,88
	C2-21	20	2,1	70	30	35,00	225,60	1489,0	1,82
	C2-22	20	1,6	60	40	26,67	254,79	1812,4	1,62
	C2-23	20	1,9	60	40	31,67	236,70	1131,8	2,00
	C2-24	20	2,1	60	40	35,00	226,00	871,7	2,62

**Bağlayıcı miktarının etkisi:**

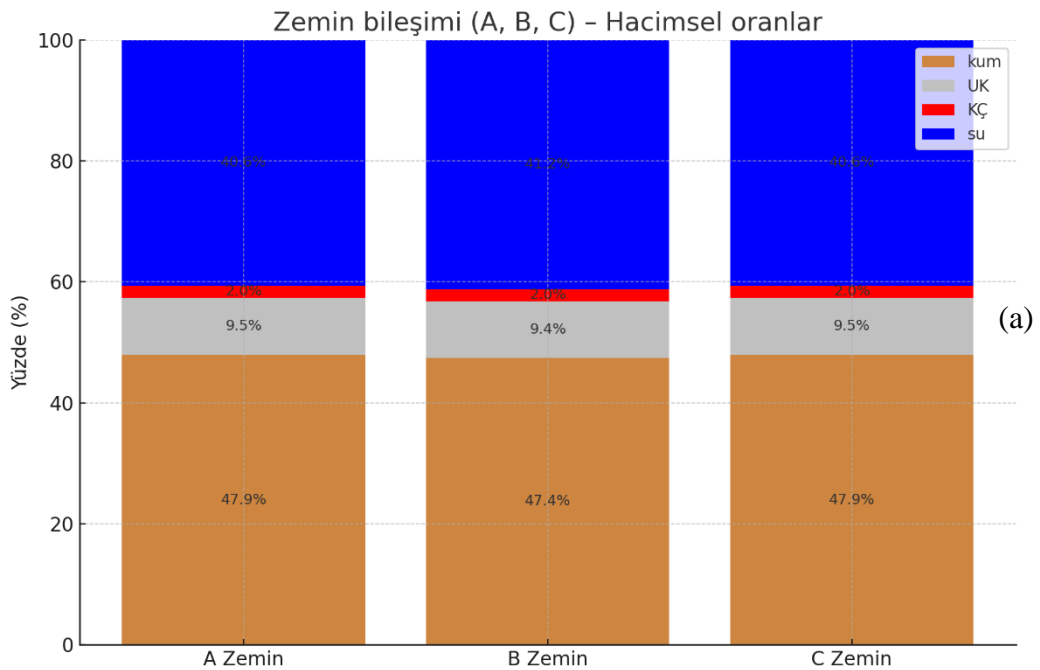
Bağlayıcı içeriği  $a_w = \%10$  iken uçucu külün farklı oranlarda (%10, %20, %30 ve %40) kırmızı çamur ile ikame edilmesi durumunda elde edilen sonuçlar, zemin türüne bağlı olarak farklılık göstermiştir. Şekil 5.13'te görüldüğü üzere A ve B zeminlerinde en uygun performans %20 ikame oranında elde edilirken, C zeminini için en yüksek dayanım %10 ikame oranında gerçekleşmiş ve %20 seviyesine çıkıldığında dayanım değerleri azalmıştır. %20 ikame oranının %10 ikame oranına göre artış oranları A, B ve C zeminlerinde sırasıyla 1,49, 1,05 ve 0,77 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, kırmızı çamurun A ve B zeminlerinde dayanımı belirgin şekilde artırdığını, ancak C zemininde görece bir azalmaya yol açtığını göstermektedir. Genel olarak ise uçucu kül + kırmızı çamur karışımlarının tümü, yalnızca uçucu kül kullanılan karışımlara kıyasla daha yüksek dayanım değerleri vermiştir.

Şekil 5.14, aynı su/bağlayıcı oranı ve toplam bağlayıcı dozajı altında (ör.,  $a_w = \%20$ ,  $W_T/W_b = 1,6$ , %C-UK=80, %KÇ=20, dozaj  $\approx 255$  kg/m<sup>3</sup>) zeminler arası karşılaştırmayı sunmaktadır. Bu koşullarda elde edilen serbest basınç dayanımı ( $q_u$ ) değerleri C zemininde 2140 kPa, B zemininde 1700 kPa ve A zemininde 1325 kPa olup, sıralama C>B>A şeklindedir. Bu durum, aynı bağlayıcı koşullarında bile zeminlerin dane boyu dağılımı ve

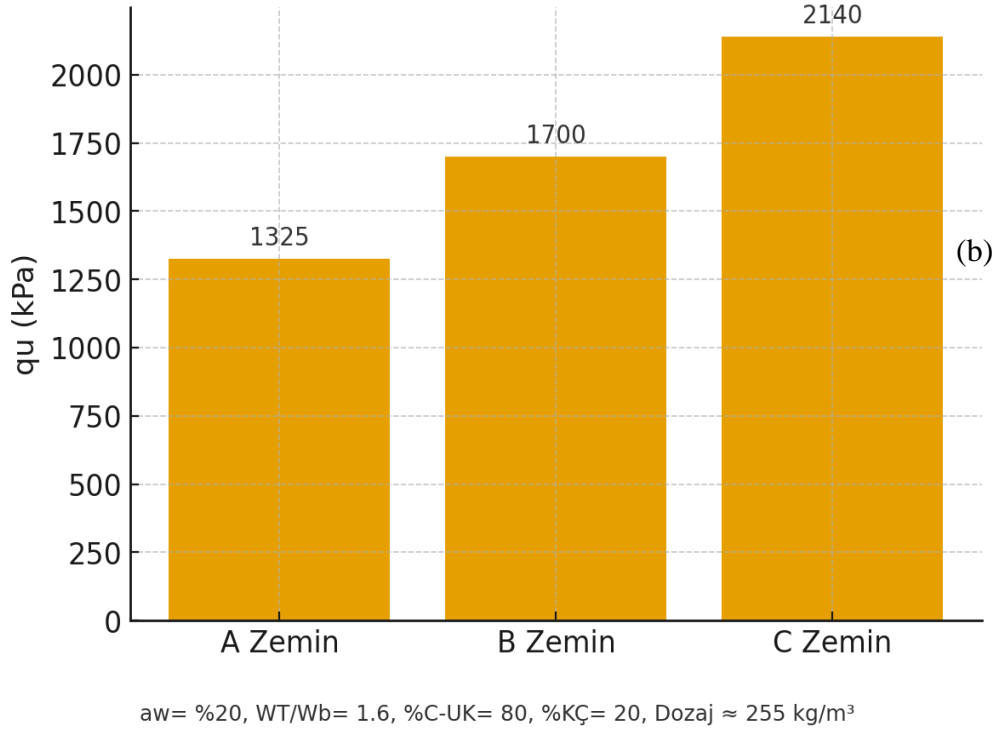
ince tane içeriğinin boşluk yapılarını farklı biçimde düzenlediğini; C zemininin daha sürekli/yoğun bir matris oluşturabildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, aşırı ince tanelerin veya yüksek su/bağlayıcı oranlarının matris sürekliliğini zayıflatabileceği, önceki değerlendirmeler ve literatürle uyumludur (Kitazume vd., 2013a).



Şekil 5.13. Bağlayıcı içeriğinin ( $a_w = 10\%$ ) dayanıma etkisi



Şekil 5.14. Zeminlerin hacimsel bileşimi ve serbest basınç dayanımı. (a) Zemin bileşimi (A, B, C zeminleri için hacimsel oranlar) (b) Serbest basınç dayanımı değerleri ( $q_u$ )

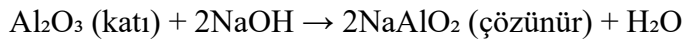
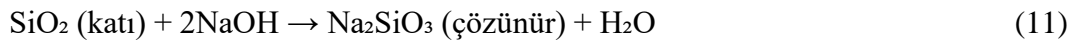


**Şekil 5.14.** Zeminlerin hacimsel bileşimi ve serbest basınç dayanımı. (a) Zemin bileşimi (A, B, C zeminleri için hacimsel oranlar) (b) Serbest basınç dayanımı değerleri (q<sub>u</sub>)

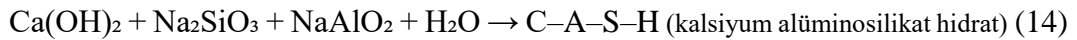
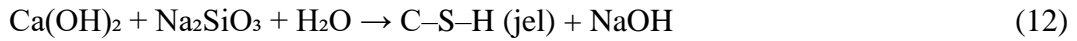
#### Kimyasal Etki:

UK ile KÇ birlikte kullanıldığında sistem, yalnız UK'ye göre daha kuvvetli bir bağlayıcı ağ geliştirir; bunun kimyasal nedeni KÇ'nin yüksek Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve özellikle alkali (Na<sub>2</sub>O) içeriğinin hem çözünmeyi hızlandırması hem de puzolanik/alkali-aktive fazların oluşumunu teşvik etmesidir. Yüksek pH altında UK ve KÇ cam fazlarından silikat ve alüminat türleri hızlıca çözeltiye geçer; UK'nin hidrasyonundan açığa çıkan Ca(OH)<sub>2</sub> ile reaksiyona girerek C-S-H'nin yanında C-A-H ve C-A-S-H benzeri kalsiyum alüminosilikat hidratları oluşur. Bu hibrit jel ağları (C-S-H + C-A-S-H) daha çapraz bağlı ve yoğun bir mikro yapı sağlayarak boşlukları doldurur, portlandit tüketimiyle poroziteyi düşürür ve erken-orta yaş dayanımı yalnız UK sistemlerine kıyasla belirgin biçimde artırır. Aşağıdaki tepkimeler bu mekanizmayı özetlemektedir.

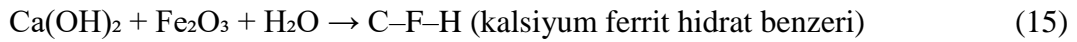
#### Alkali Aktivasyon – Çözünme



#### Puzolanik Reaksiyonlar – C-S-H / C-A-H / C-A-S-H Oluşumu



Demir Oksit İçeren Fazlar

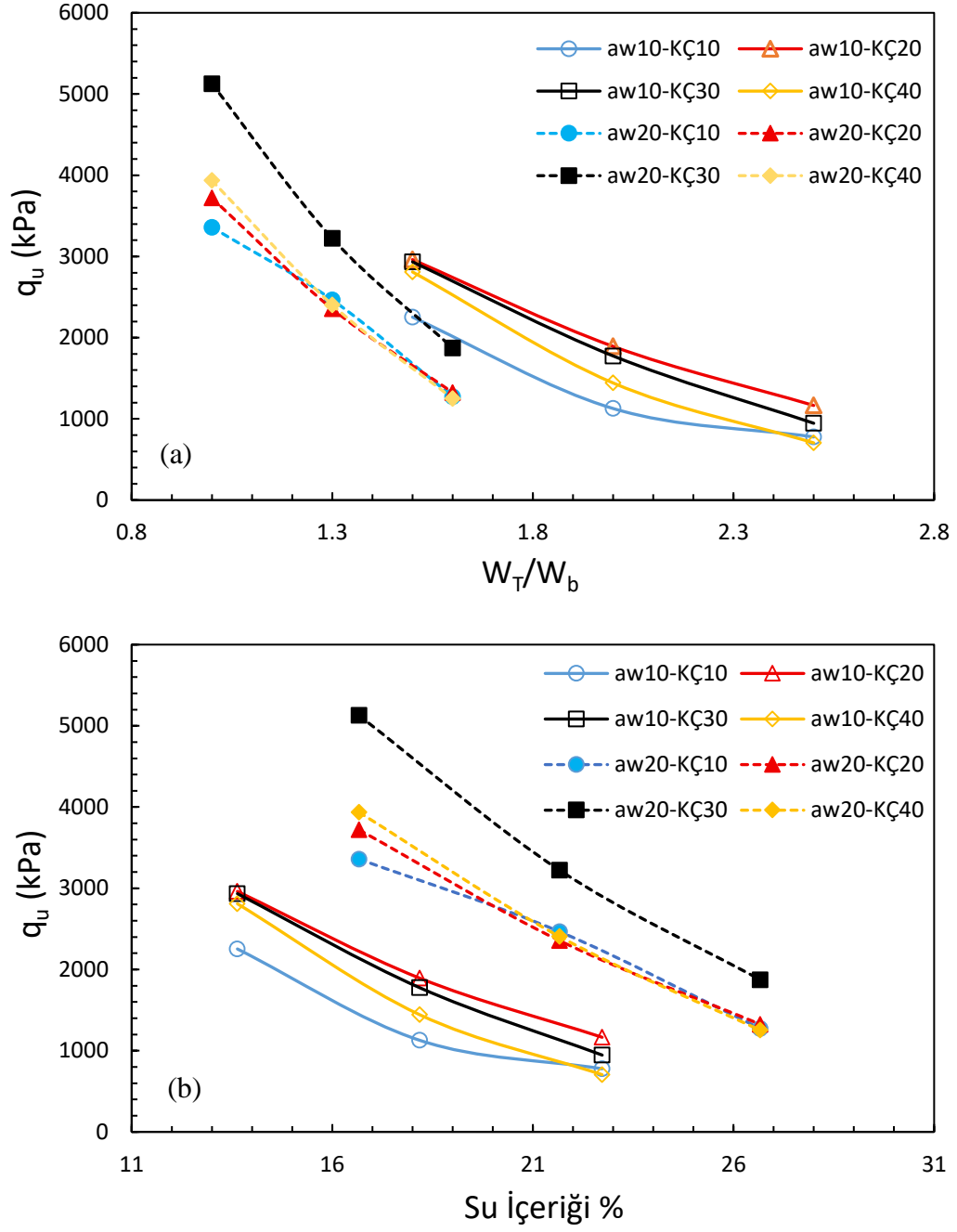


Karşılaştırma ve Sonuç: Yalnız UK sistemlerinde baskın faz C-S-H olup CH fazlası kalma eğilimindedir; UK + KÇ kombinasyonunda ise alkali aktivasyon, daha fazla silikat/alüminatın mobilize olmasını sağlar ve CH tüketilerek C-A-S-H zengin, daha yoğun bir jel ağı elde edilir. Bu sinerji; daha düşük porozite, daha iyi iyon bağlama, daha stabil mikro yapı ve enjeksiyon sonrası erken/orta yaşta daha yüksek dayanım olarak saha performansına yansır. Bununla birlikte sülfat ve sodyum içeriğinin aşırı olması etrenjit/genleşme veya uzun vadeli alkali duyarlılık risklerini arttırabileceğinden,  $W_T/W_b$  ve kimyasal denge (Ca/Si, Al/Si, Na/Al oranları) dikkatle kontrol edilmelidir.

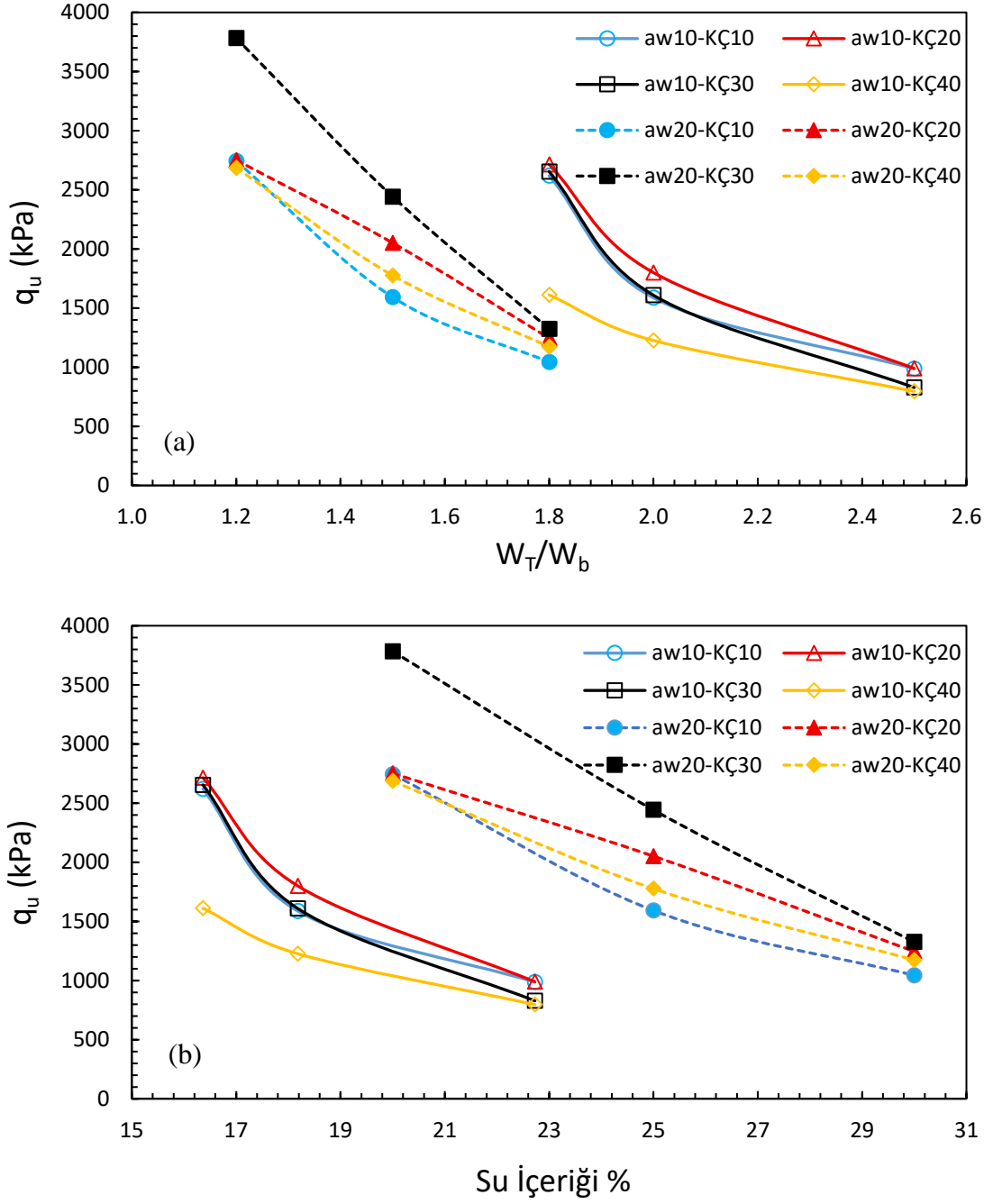
*Suyun etkisi:*

Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de görüldüğü üzere, su içeriğinin artışı tüm zeminlerde serbest basınç dayanımı ( $q_u$ ) değerlerinde belirgin bir azalmaya yol açmıştır. Düşük su içeriklerinde ( $\approx 13-17\%$ ) A ve B zeminlerinde dayanım 2500–4000 kPa seviyelerine ulaşırken, C zemini yaklaşık 5000 kPa değerlerine erişmiştir. Ancak su içeriği arttıkça tüm karışımlarda  $q_u$  değerleri kademeli olarak düşmüş ve yüksek su içeriklerinde ( $\geq 25-30\%$ ) 1000–1500 kPa aralığına gerilemiştir. Bu sonuçlar literatürde rapor edilen porozite/bağlayıcı hacmi ( $\eta/C_{iv}$ ) ilişkisi ile uyumludur (Kang vd., 2023b; Vergara vd., 2025b; Zhang vd., 2014). Artan su, bağlayıcı matrisini seyreltmekte, poroziteyi yükseltmekte ve hidrasyon ürünlerinin sürekliliğini zayıflatmaktadır.

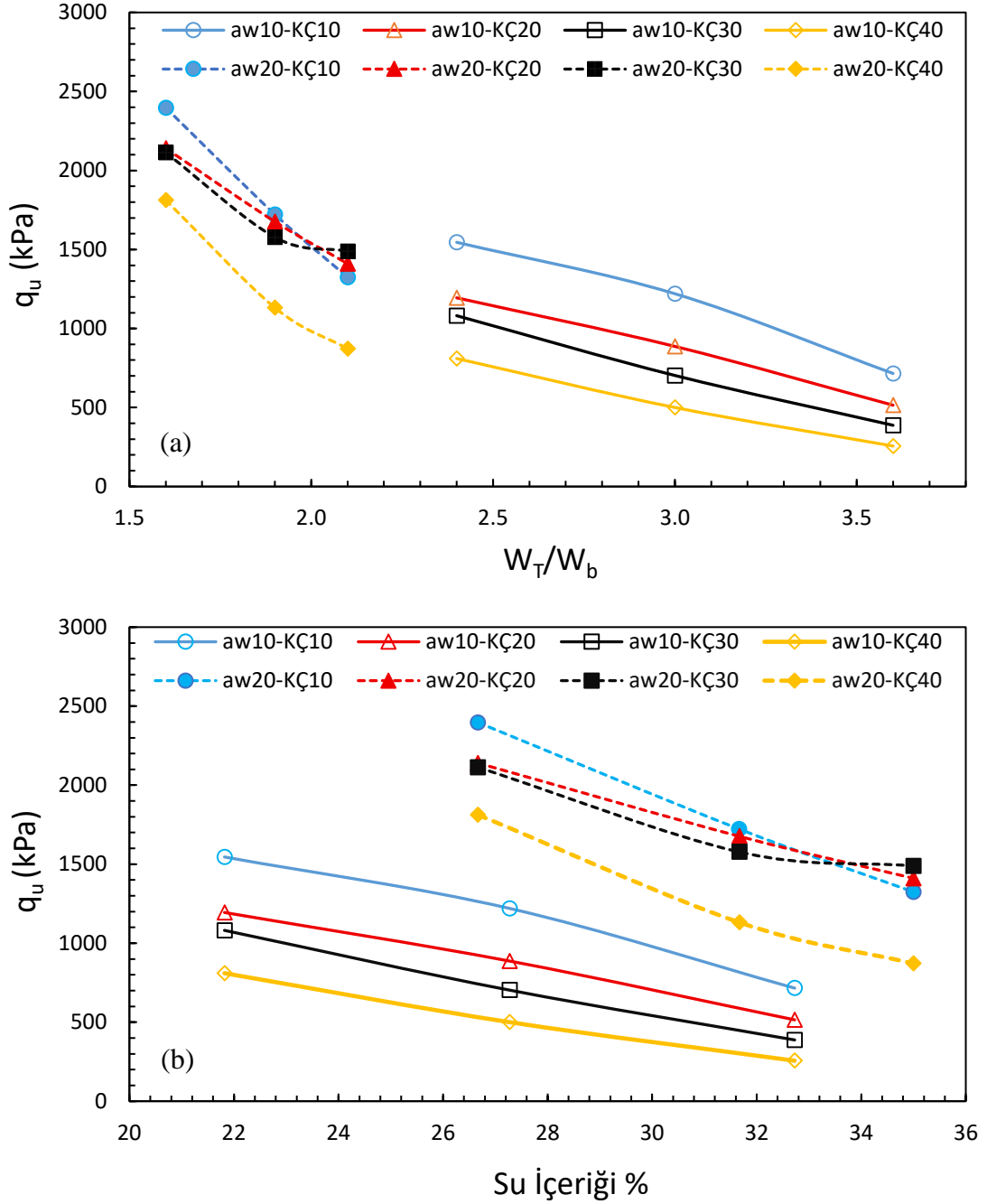
Özellikle %20 bağlayıcı içeriğinde kırmızı çamur ikameli karışımlar düşük  $W_T/W_b$  oranlarında yüksek dayanım değerleri üretmiş, ancak artan su içeriğiyle birlikte bu üstünlük giderek azalmıştır. Bu eğilim, düşük  $W_T/W_b$  oranlarında daha yoğun ve dayanıklı, yüksek  $W_T/W_b$  oranlarında ise zayıf ve süreksiz bir matrisin oluştuğunu belirten çalışmalarda da vurgulanmıştır (White vd., 2005b).



Şekil 5.15. A zemininde kırmızı çamur ve uçucu kül katkı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları: (a)  $W_T/W_b$  oranına göre, (b) su içeriğine göre.



Şekil 5.16. B zemininde kırmızı çamur ve uçucu kül katkıları numunelerin 28 günlük UCS dayanımları: (a)  $W_T/W_b$  oranına göre, (b) su içeriğine göre.



Şekil 5.17. C zemininde kırmızı çamur ve uçucu kül katkıli numunelerin 28 günlük UCS dayanımları: (a)  $W_T/W_b$  oranına göre, (b) su içeriğine göre.

#### İnce tane oranının etkisi:

Şekil 5.16’te görüldüğü üzere, kırmızı çamur oranının %10–%20 seviyelerine kadar artırılması, iyileştirilen zeminlerde serbest basınç dayanımında ( $q_u$ ) belirgin bir artış sağlamıştır. Bunun nedeni, ince tane oranındaki artışın kum taneleri arasındaki boşlukları daha etkin şekilde doldurarak matrisin yoğunluğunu artırmasıdır. Ayrıca kırmızı çamur, uçucu külü tamamlayıcı şekilde davranarak C–A–H ve C–F–H jel ürünlerinin oluşumunu

desteklemekte ve bağlayıcı sürekliliğini güçlendirmektedir. Bunun yanında uçucu külün kırmızı çamura göre daha ince taneli olması nedeniyle daha fazla suya ihtiyaç duyması, yüksek su/bağlayıcı oranlarında dayanımı sınırlamaktadır. Dolayısıyla uçucu külün belirli bir oranda kırmızı çamur ile ikame edilmesi, karışımın su ihtiyacını azaltmakta ve optimum dayanım değerlerini ortaya çıkarmaktadır. Ancak %20'nin üzerindeki ikame oranlarında fazla ince taneler, su tutma kapasitesini artırarak ve mikrogözenek oluşumunu hızlandırarak matrisin sürekliliğini zayıflatmış, dayanım değerlerinde düşüşe yol açmıştır. Bu eğilim, literatürde de rapor edilmiştir (Kitazume vd., 2013a; White vd., 2005b).

*UK ve UK+KÇ ile iyileştirmenin karşılaştırılması:*

Şekil 5.18'da görüldüğü üzere, kırmızı çamur (KÇ) ve uçucu külün (UK) birlikte kullanılması, yalnızca UK içeren karışımlara kıyasla zemin dayanımında belirgin bir artış sağlamıştır.

A serisi için (Çizelge 5.8, Şekil 5.18), en yüksek dayanım artışı %C-UK=80 ve %KÇ=20 ikamesinde elde edilmiştir (A2-4 numunesi,  $\% \Delta q_u = 1,96$ ). Bu durum yaklaşık %96 oranında bir iyileşmeye karşılık gelmektedir.

B serisi sonuçlarında (Çizelge 5.9, Şekil 5.19), benzer bir eğilim gözlenmiş olup, en yüksek artış %C-UK=70 ve %KÇ=30 ikamesinde (B2-19 numunesi,  $\% \Delta q_u = 1,38$ ) elde edilmiştir.

C serisi için (Çizelge 5.10, Şekil 5.20), en iyi performans %C-UK=90 ve %KÇ=10 ikamesinde (C2-1 numunesi,  $\% \Delta q_u = 1,18$ ) gözlenmiştir. Bu oranlar, optimum KÇ katkısının genellikle %20–30 civarında olduğunu göstermektedir.

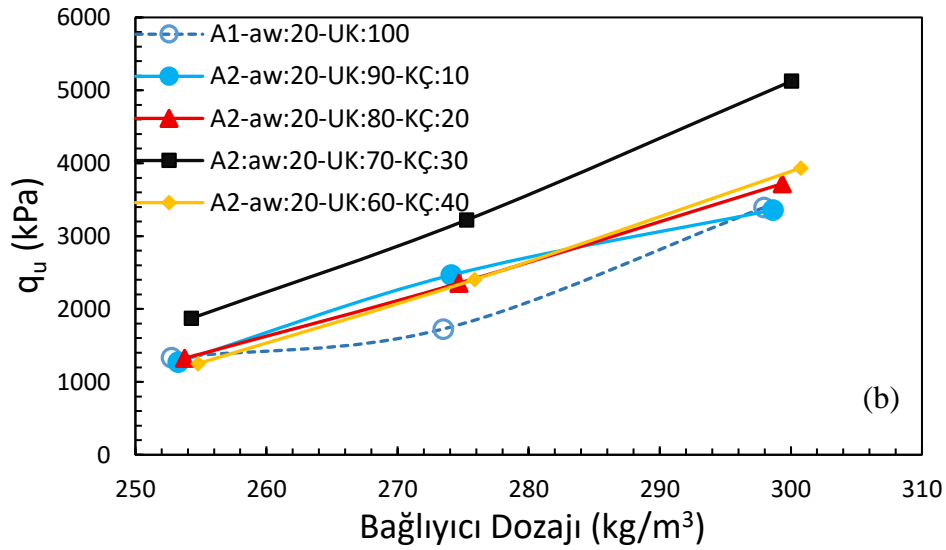
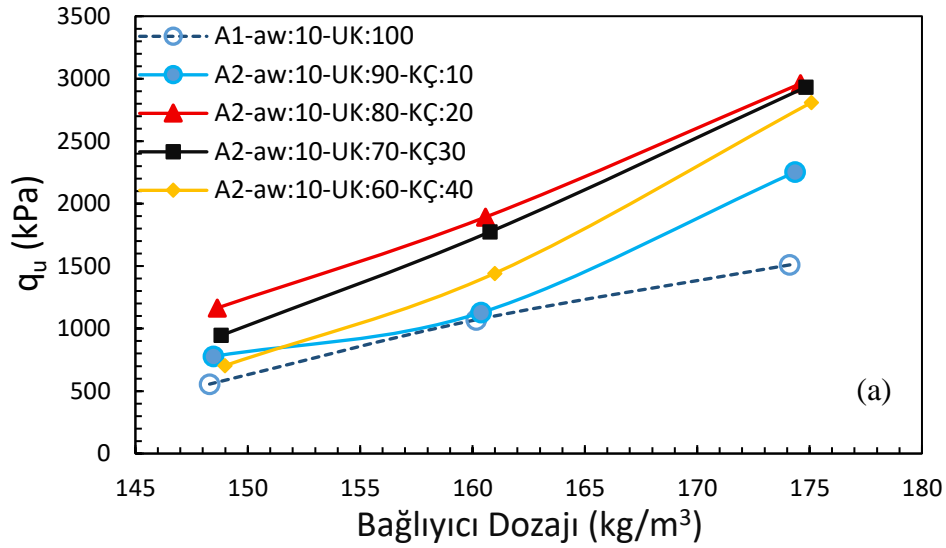
Bu iyileşme yalnız tane boyutu ile açıklanamaz; malzemelerin kimyasal bileşimleri belirleyici rol oynamaktadır. KÇ'nin yüksek  $Al_2O_3$  ve  $Fe_2O_3$  içeriği (~%14 ve ~%24) ile UK'nin yüksek CaO ve  $SiO_2$  içeriği birlikte olduğunda, hidrasyon sürecinde C–S–H, C–A–H ve C–F–H türü jellerin eşzamanlı oluşumu teşvik edilmekte, bu da daha yoğun ve sürekli bir matris yapısına yol açmaktadır.

Ayrıca, KÇ'nin ince taneli yapısı düşük  $W_T/W_b$  oranlarında bağlayıcı reaksiyonlarını verimli hâle getirmekte ve fazla su gereksinimini azaltmaktadır. Böylece optimum ikame oranlarında (%20–30 KÇ) puzolanik reaksiyonlar en etkin biçimde çalışmakta, bu durum Şekil 5.18'da da görülen dayanım artışlarını desteklemektedir.

Bu bulgular, yüksek CaO içeren UK ile reaktif oksit yönünden zengin KÇ'nin birlikte kullanımının dayanımı belirgin şekilde artırdığını bildiren önceki araştırmalarla da uyumludur (Kitazume vd., 2013a; White vd., 2005b).

**Çizelge 5.8.** A serisine ait dayanım sonuçları – uçucu kül (UK) ve uçucu kül + kırmızı çamur (UK+KÇ) kullanımının karşılaştırılması

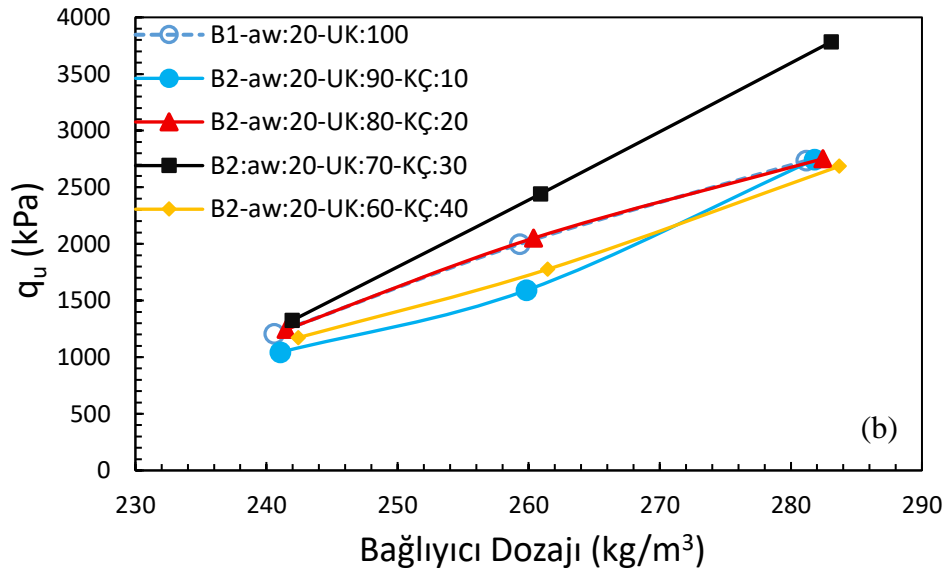
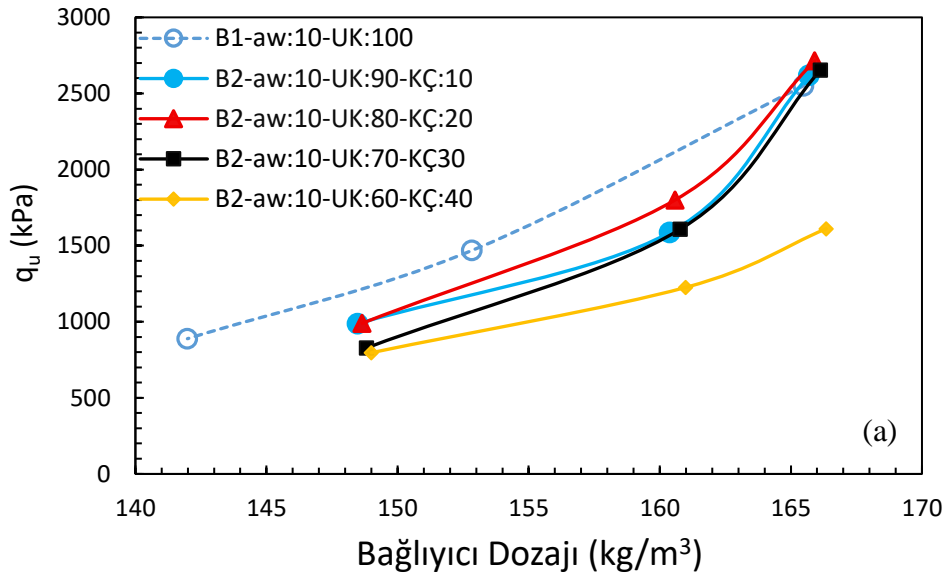
Numune no	$a_w$ (%)	WT / Wb	% C-UK	% KÇ	$q_u$ (kpa)	$\epsilon_{max}$ (mm)	su içeriği %	DOZAJ (kg/m <sup>3</sup> )	% $\Delta$ ( $q_u$ )
A1-1	10	1,5	100	0	1510,0	1,4	13,6	174,1	—
A2-1	10	1,5	90	10	2252,8	1,13	13,6	174,4	1,49
A2-4	10	1,5	80	20	2961,2	1,57	13,6	174,6	1,96
A2-7	10	1,5	70	30	2933,2	1,35	13,6	174,8	1,94
A2-10	10	1,5	60	40	2809,8	1,51	13,6	175,1	1,86
A1-8	20	1,3	100	0	1726,9	2,0	21,7	273,5	—
A2-14	20	1,3	90	10	2465,2	1,72	21,7	274,1	1,43
A2-17	20	1,3	80	20	2355,0	1,79	21,7	274,7	1,36
A2-20	20	1,3	70	30	3222,2	2,04	21,7	275,3	1,87
A2-23	20	1,3	60	40	2404,9	1,98	21,7	275,9	1,39



**Şekil 5.18.** Uçucu kül ve uçucu kül + kırmızı çamur katkısının UCS dayanımı üzerindeki etkisinin karşılaştırılması (a:  $a_w = 10\%$ , b:  $a_w = 20\%$ )

**Çizelge 5.9.** B serisine ait dayanım sonuçları – uçucu kül (UK) ve uçucu kül + kırmızı çamur (UK+KÇ) kullanımının karşılaştırılması

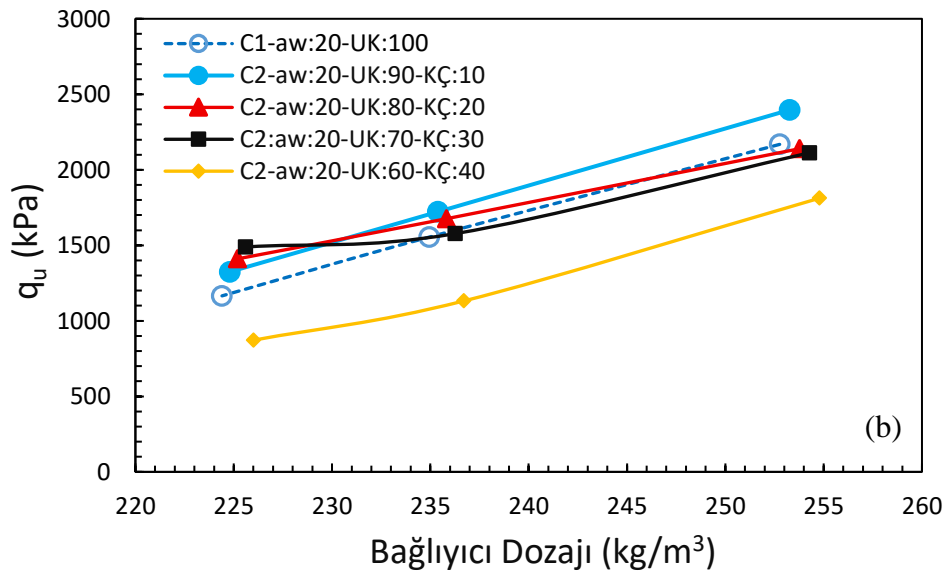
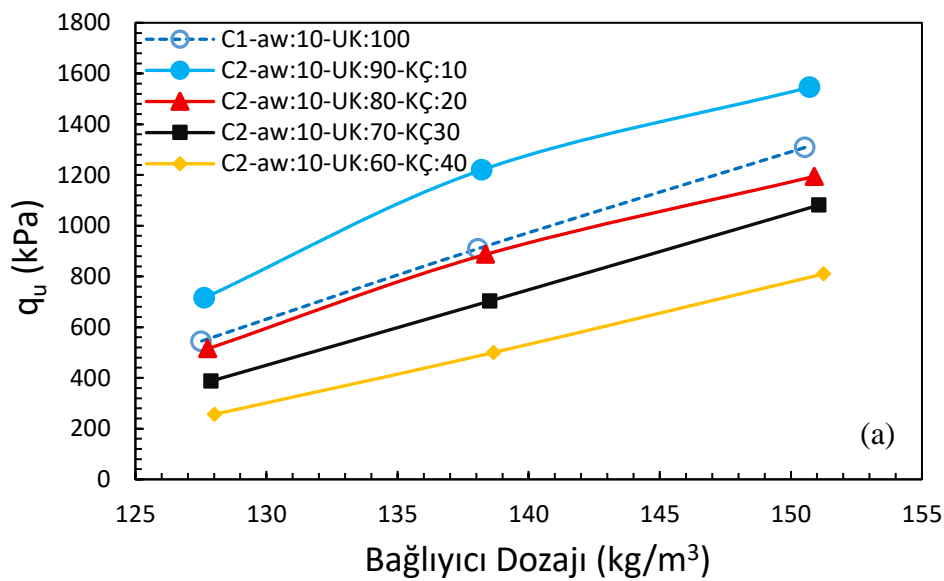
Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	% C-UK	% KÇ	% NS	$q_u$ (kpa)	$\epsilon_{max}$ (mm)	Su İçeriği %	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	% $\Delta$ ( $q_u$ )
B1-1	10	1,8	100	0	0	2550,2	1,7	16,4	165,5	—
B2-1	10	1,8	90	10	0	2619,1	1,43	16,4	165,7	1,03
B2-4	10	1,8	80	20	0	2714,3	1,43	16,4	165,9	1,06
B2-7	10	1,8	70	30	0	2654,1	1,50	16,4	166,1	1,04
B2-10	10	1,8	60	40	0	1611,0	1,19	16,4	166,3	0,63
B1-8	20	1,2	100	0	0	2734,6	2,05	20,0	281,2	—
B2-13	20	1,2	90	10	0	2744,4	1,66	20,0	281,8	1,00
B2-16	20	1,2	80	20	0	2751,6	1,56	20,0	282,4	1,01
B2-19	20	1,2	70	30	0	3783,6	1,92	20,0	283,1	1,38
B2-22	20	1,2	60	40	0	2686,2	1,56	20,0	283,7	0,98



**Şekil 5.19.** Uçucu kül ve uçucu kül + kırmızı çamur katkısının UCS dayanımı üzerindeki etkisinin karşılaştırılması (a:  $a_w = 10\%$ , b:  $a_w = 20\%$ )

**Çizelge 5.10.** C serisine ait dayanım sonuçları – uçucu kül (UK) ve uçucu kül + kırmızı çamur (UK+KÇ) kullanımının karşılaştırılması

Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	% C-UK	% KÇ	%N S	$q_u$ (kpa)	$\epsilon_{max}$ (mm)	su içeriği (%)	DOZAJ (kg/m <sup>3</sup> )	% $\Delta$ ( $q_u$ )
C1-1	10	2,4	100	0,0	0,0	1308,3	1,36	21,8	150,5	–
C2-1	10	2,4	90	10	0	1545,5	1,25	21,82	150,71	1,18
C2-4	10	2,4	80	20	0	1194,3	1,32	21,82	150,89	0,91
C2-7	10	2,4	70	30	0	1081,2	1,65	21,82	151,07	0,83
C2-10	10	2,4	60	40	0	809,9	1,57	21,82	151,25	0,62
C1-10	20	1,9	100	0,0	0,0	1554,8	2,34	31,7	234,9	–
C2-14	20	1,9	90	10	0	1722,0	1,83	31,67	235,38	1,11
C2-17	20	1,9	80	20	0	1676,4	2,06	31,67	235,82	1,08
C2-20	20	1,9	70	30	0	1577,4	1,88	31,67	236,26	1,01
C2-23	20	1,9	60	40	0	1131,8	2,00	31,67	236,70	0,73



**Şekil 5.20.** Uçucu kül ve uçucu kül + kırmızı çamur katkısının UCS dayanımı üzerindeki etkisinin karşılaştırılması (a:  $a_w = 10\%$ , b:  $a_w = 20\%$ )

### 5.2.3. Uçucu kül ve nano silika enjeksiyonuyla iyileştirme

Uçucu kül ve nano silika katkısıyla iyileştirilen A3 (%5 kil + %95 kum) ve C3 (%35 kil + %65 kum) zeminlerine ait serbest basınç deney sonuçları Çizelge 5.11–5.12 arasında sunulmuştur. Ayrıca, serbest basınç deneyi sonuçlarına ait gerilme–birim deformasyon eğrileri EK-3 olarak eklenmiştir. Dayanım değerlerinin bağlayıcı oranı ( $a_w$ ), toplam su/bağlayıcı oranı ( $W_T/W_b$ ) ve zemindeki ince tane miktarına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. %10 bağlayıcı oranında A3 zemini için  $W_T/W_b = 1,5$  oranında 1527,5 kPa, C3 zemini için  $W_T/W_b = 2,4$  oranında 1758,4 kPa maksimum dayanım değerlerine ulaşılmıştır. Bağlayıcı oranının %20'ye yükseltilmesiyle özellikle C3 zeminde 1586,2 kPa ( $W_T/W_b = 1,9$ ) değerlerine ulaşılırken, A3 zeminde de 1743,5 kPa ( $W_T/W_b = 1,9$ ) dayanım elde edilmiştir. Bununla birlikte,  $W_T/W_b$  oranının artması dayanımı önemli ölçüde azaltmış, örneğin A3 zeminde  $W_T/W_b = 4,0$  olduğunda dayanım 306,4 kPa'a, C3 zeminde ise  $W_T/W_b = 2,4$ 'te 655,9 kPa'a kadar düşmüştür. Bu sonuçlar, nano silikanın düşük oranlarda dahi uçucu kül ile bağlayıcı reaksiyonları hızlandırarak erken yaşta dayanım kazancı sağladığını, ancak su/bağlayıcı oranının kritik düzeyin üzerine çıkması halinde matriksin zayıflamasına yol açtığını göstermektedir. Genel olarak, bağlayıcı oranı ( $a_w$ ),  $W_T/W_b$  oranı ve ince tane yüzdesi, uçucu kül–nano silika katkılı enjeksiyonlarda dayanımı kontrol eden en temel parametreler olmuştur.

**Çizelge 5.11.** A3 zemininde nano silika ve uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları

Araştırma Alanı	Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	% C-UK	%NS	Su İçeriği (%)	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	$q_u$ (kPa)	$\epsilon_{max}$ (mm)
A Zemin	A3-1	10	1,5	99,5	0,5	13,6	174,1	1363,3	1,06
	A3-2	10	2,0	99,5	0,5	18,2	160,1	599,9	1,56
	A3-3	10	2,5	99,5	0,5	22,7	148,3	319,1	1,55
	A3-4	10	1,5	99	1	13,6	174,0	1527,5	1,37
	A3-5	10	2,0	99	1	18,2	160,1	631,0	1,44
	A3-6	10	2,5	99	1	22,7	148,2	331,0	1,66
	A3-7	10	1,5	98,5	1,5	13,6	174,0	1356,7	1,32
	A3-8	10	2,0	98,5	1,5	18,2	160,0	523,2	1,50
	A3-9	10	2,5	98,5	1,5	22,7	148,2	282,5	1,52
	A3-10	10	1,5	98	2	13,6	173,9	1353,7	1,31
	A3-11	10	2,0	98	2	18,2	160,0	515,6	1,82
	A3-12	10	2,5	98	2	22,7	148,1	268,4	1,77
	A3-13	20	1,3	99,5	0,5	21,7	273,4	1044,0	1,45
	A3-14	20	1,6	99,5	0,5	26,7	252,6	613,0	1,47
	A3-15	20	1,9	99,5	0,5	31,7	234,8	390,7	1,55
	A3-16	20	1,3	99	1	21,7	273,2	1743,5	2,25
	A3-17	20	1,6	99	1	26,7	252,5	602,5	1,66
	A3-18	20	1,9	99	1	31,7	234,7	390,3	1,37
	A3-19	20	1,3	98,5	1,5	21,7	273,1	965,9	1,68
	A3-20	20	1,6	98,5	1,5	26,7	252,4	593,8	2,00
	A3-21	20	1,9	98,5	1,5	31,7	234,6	384,1	1,48
	A3-22	20	1,3	98	2	21,7	273,0	999,8	1,71
	A3-23	20	1,6	98	2	26,7	252,3	560,3	1,99
	A3-24	20	1,9	98	2	31,7	234,5	306,4	1,89

Çizelge 5.12. C3 zemininde nano silika ve uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları

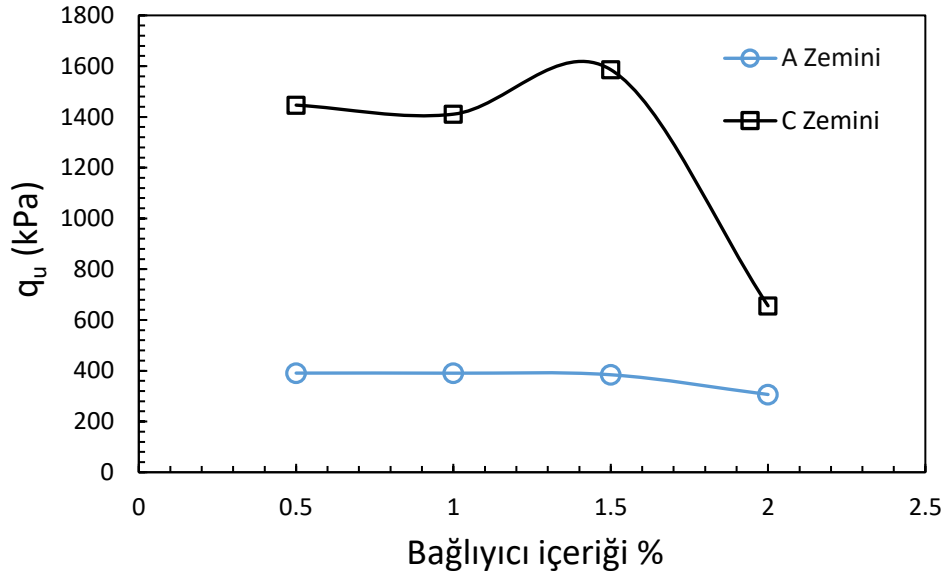
Araştırma Alanı	Numune no	$a_w$ (%)	WT / Wb	% C-UK	%NS	Su İçeriği %	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	qu (kPa)	$\epsilon_{max}$ (mm)
C Zemin	C3-1	10	2,4	99,5	0,5	21,8	150,5	1602,9	1,32
	C3-2	10	3,0	99,5	0,5	27,3	138,0	1238,1	2,61
	C3-3	10	3,6	99,5	0,5	32,7	127,5	745,2	2,42
	C3-4	10	2,4	99	1	21,8	150,5	1758,4	1,24
	C3-5	10	3,0	99	1	27,3	138,0	1281,3	2,16
	C3-6	10	3,6	99	1	32,7	127,4	743,1	2,63
	C3-7	10	2,4	98,5	1,5	21,8	150,4	1693,8	1,57
	C3-8	10	3,0	98,5	1,5	27,3	138,0	1235,8	2,51
	C3-9	10	3,6	98,5	1,5	32,7	127,4	674,4	2,31
	C3-10	10	2,4	98	2	21,8	150,4	1675,5	1,41
	C3-11	10	3,0	98	2	27,3	137,9	1027,0	1,92
	C3-12	10	3,6	98	2	32,7	127,4	691,7	2,08
	C3-13	20	1,9	99,5	0,5	31,7	234,8	1446,4	2,04
	C3-14	20	2,1	99,5	0,5	35,0	224,3	1098,5	2,04
	C3-15	20	2,4	99,5	0,5	40,0	210,2	685,5	2,57
	C3-16	20	1,9	99	1	31,7	234,7	1410,8	1,92
	C3-17	20	2,1	99	1	35,0	224,2	1047,6	2,18
	C3-18	20	2,4	99	1	40,0	210,1	732,9	2,61
	C3-19	20	1,9	98,5	1,5	31,7	234,6	1586,2	1,65
	C3-20	20	2,1	98,5	1,5	35,0	224,1	1264,3	2,25
	C3-21	20	2,4	98,5	1,5	40,0	210,0	885,0	2,11
	C3-22	20	1,9	98	2	31,7	234,5	1240,4	1,68
	C3-23	20	2,1	98	2	35,0	224,0	1115,5	2,10
	C3-24	20	2,4	98	2	40,0	209,9	655,9	2,10

#### Bağlayıcı miktarının etkisi:

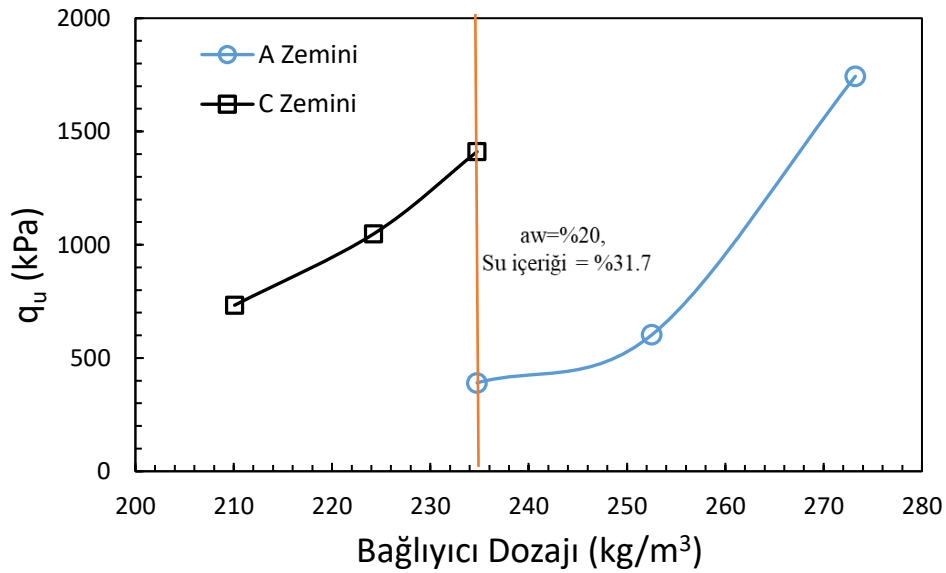
A ve C zeminlerinde uçucu kül ve nano silika katkılarıyla elde edilen dayanım sonuçları incelendiğinde, en belirgin artışın C zeminde gerçekleştiği görülmektedir. Özellikle bağlayıcı içeriğinin %1,5 seviyesinde C zemini yaklaşık 1600 kPa değerine ulaşarak en yüksek dayanımı sergilemiştir (Şekil 5.22). Buna karşılık A zemini, bağlayıcı içeriği %0,5–2,0 aralığında sabit veya azalan değerler göstermiş ve maksimum yaklaşık 400 kPa civarında kalmıştır. Bağlayıcı dozajı incelendiğinde de benzer bir eğilim gözlenmiş, A zemini 174–273 kg/m<sup>3</sup> dozaj aralığında 400 kPa'dan 1700 kPa'a yükselirken, C zemini 210–235 kg/m<sup>3</sup> dozaj aralığında 700 kPa'dan 1400 kPa'a ulaşmıştır (Şekil 5.23). Bu bulgular, bağlayıcı içeriği ve dozajı arasındaki doğrudan bağı doğrulamakta ve optimum dayanımın zemin tipine göre farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.

C zemininin yüksek ince tane oranı (%35 kil), kum taneleri arasındaki boşlukları etkin şekilde doldurarak bağlayıcı ürünlerinin (C-S-H, C-A-H jelleri) daha yoğun bir matris oluşturmasına imkân tanımaktadır. Bu nedenle C zemini, her bağlayıcı içeriğinde A zeminine göre daha yüksek dayanım sergilemiştir. Literatürde de (Topolnicki, 2004b) ince tane oranının artışının enjeksiyon kolonlarının mukavemetini belirgin ölçüde artırdığı,

özellikle kil oranı yüksek zeminlerde bağlayıcı reaksiyonlarının daha etkin gerçekleştiği vurgulanmaktadır. Dolayısıyla, en uygun bağlayıcı miktarının belirlenmesinde yalnızca bağlayıcı içeriği ve dozajı değil, aynı zamanda zeminin tane boyu dağılımı ve ince tane oranı da dikkate alınmalıdır.



Şekil 5.21. Bağlayıcı içeriğinin dayanıma etkisi



Şekil 5.22. Bağlayıcı dozajının dayanıma etkisi

### *Kimyasal Etki:*

UK ile Nano Silika (NS) birlikte kullanıldığında, NS'nin yüksek özgül yüzey alanı ve reaktivitesi sayesinde UK'nin hidrasyonu/puzolanik tepkimeleri hızlanır ve daha yoğun, rafine bir C-S-H ağı oluşur. NS, UK hidrasyonundan açığa çıkan  $\text{Ca(OH)}_2$ 'yi hızla tüketerek ikincil C-S-H üretir; bu sayede portlandit azalır, porozite ve bağlantılı geçirgenlik düşer, mikroyapıda kapiler boşluklar daha küçük jel gözeneklerine dönüşür. Ayrıca NS nano ölçekli çekirdeklenme merkezleri sağlayarak C-S-H'nin daha erken ve daha homojen çökmesine olanak tanır; bu etki kinetiği hızlandıran fiziksel bir 'çekirdek oluşturma' mekanizması olup, doğrudan bir stekiyometrik denklemle ifade edilmez. Netice olarak UK + NS sistemleri, yalnız UK'ye kıyasla erken-orta yaşta daha yüksek dayanım, daha iyi boyutsal stabilite ve daha düşük bleeding eğilimi gösterir; ancak NS'nin su talebini arttırabilen doğası nedeniyle  $W_T/W_b$ , dağıtıcı/akışkanlaştırıcı dozu ve karıştırma enerjisi dikkatle optimize edilmelidir.

Temel Puzolanik Tepkime (NS ile CH Tüketimi)

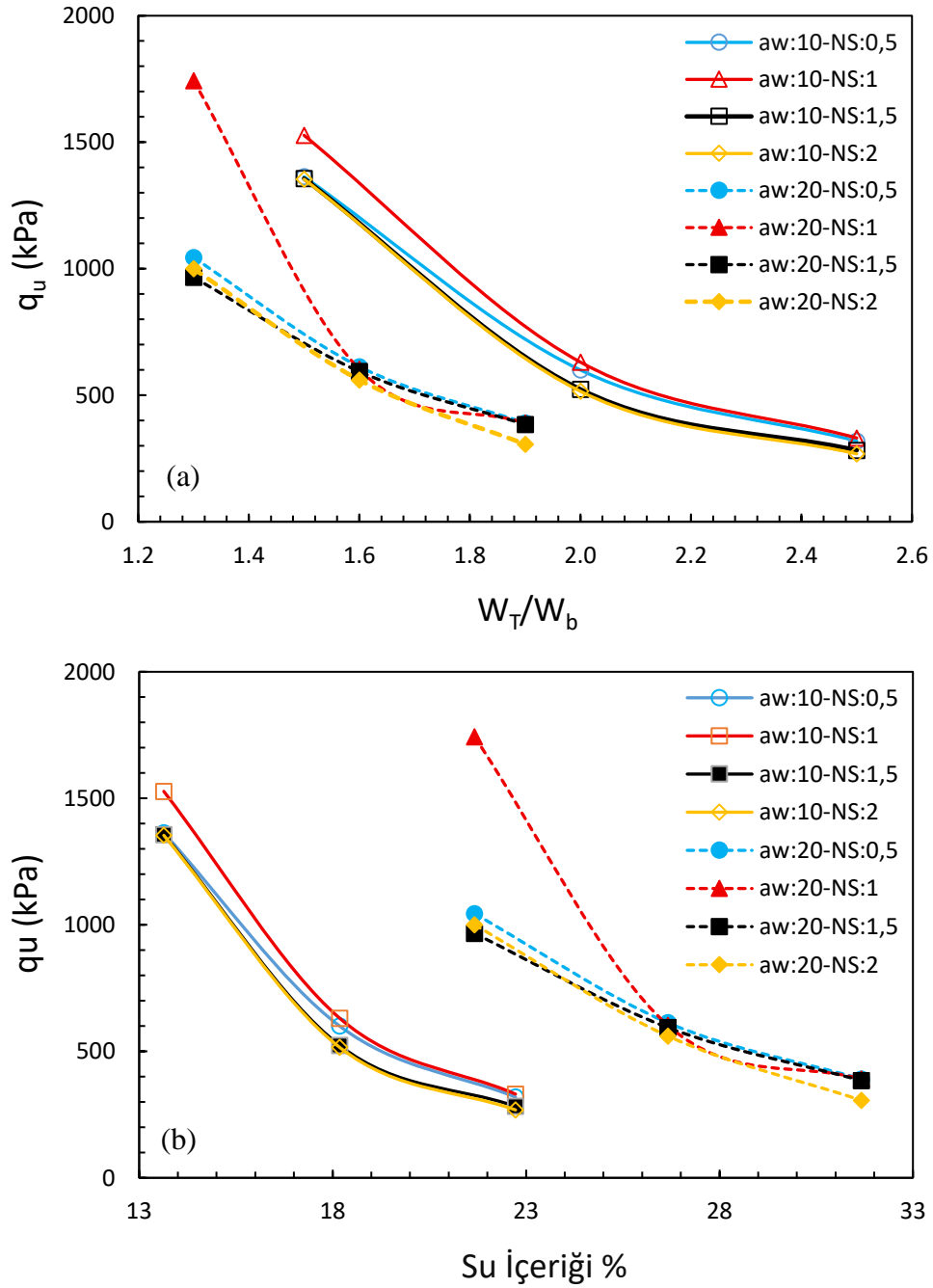


### *Suyun etkisi:*

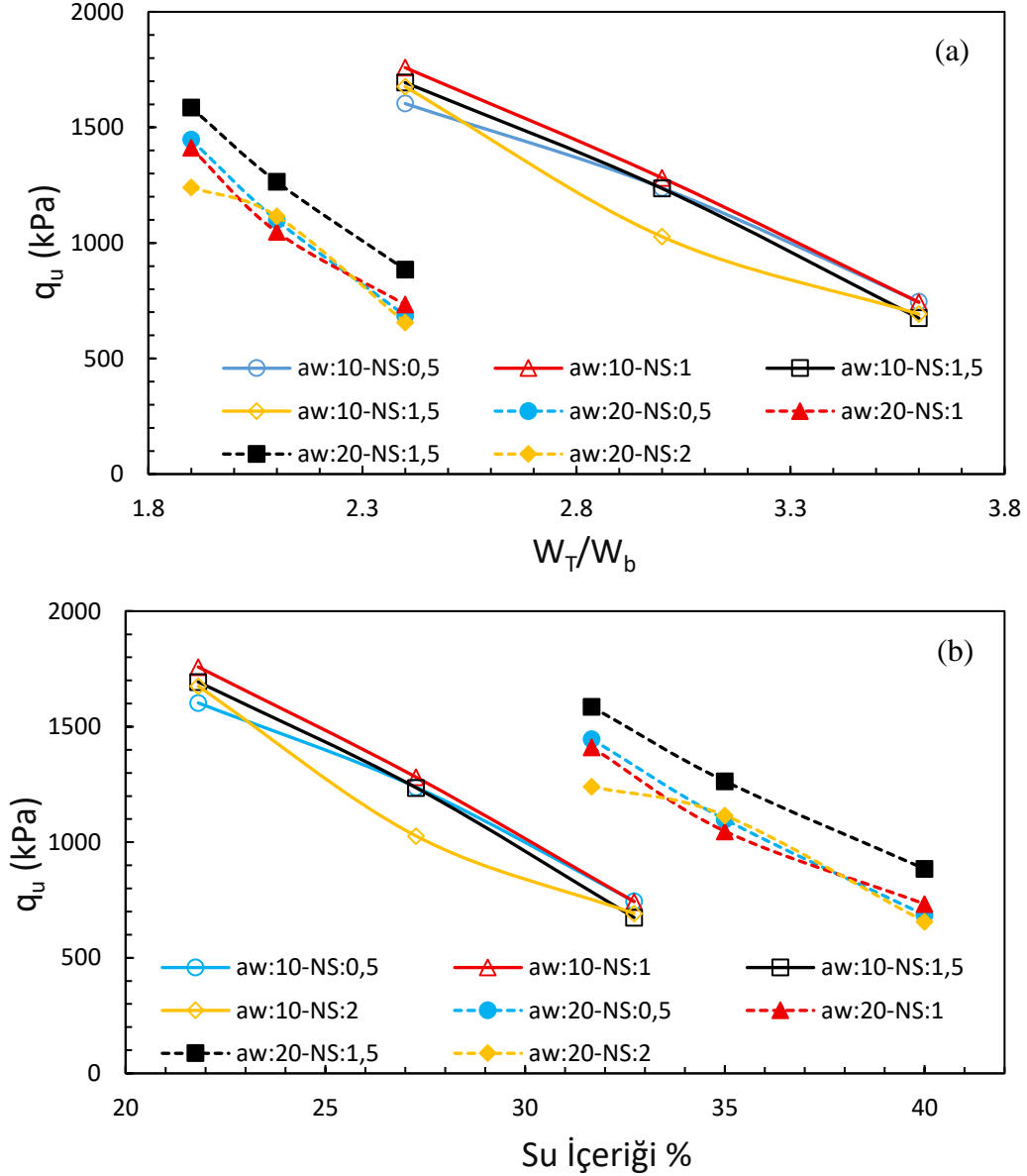
Zemin-enjeksiyon karışımında bulunan su, bağlayıcı tanelerinin hidrasyon reaksiyonları için temel bir bileşen olmakla birlikte miktarının fazlalığı ya da azlığı dayanımı doğrudan etkilemektedir. A3 ve C3 zeminlerinde yapılan deneyler, su/bağlayıcı oranının ( $W_T/W_b$ ) serbest basınç dayanımı ( $q_u$ ) üzerindeki kritik rolünü açıkça ortaya koymuştur. Her iki zeminde de  $W_T/W_b$  oranındaki artış,  $q_u$  değerlerinde belirgin bir düşüşe neden olmuş; örneğin C zemini için %20 bağlayıcı + %1 nano silika oranında  $W_T/W_b = 1,3$  koşulunda yaklaşık 1750 kPa olan dayanım,  $W_T/W_b = 2,0$  seviyesinde 600 kPa'ın altına gerilemiştir. Benzer şekilde A zemini için de  $W_T/W_b = 1,5$  civarında 1350–1500 kPa değerlerine ulaşılırken, oran 2,4 seviyelerine çıktığında dayanım 300–400 kPa düzeylerine düşmüştür (Şekil 5.23–5.24).

Bu davranış, literatürde sıkça vurgulanan porozite/bağlayıcı hacmi ( $\eta/C_{iv}$ ) ilişkisi ile uyumludur (Kang vd., 2023b; Zhang vd., 2014; Zhao vd., 2020).  $W_T/W_b$  oranının artması poroziteyi yükseltirken, bağlayıcı hacmini seyrelterek matrisi zayıflatmakta ve serbest suyun fazlalığı mikro yapıda süreksizliklere yol açmaktadır. Buna karşılık, düşük  $W_T/W_b$  ( $\approx 1,0-1,5$ ) ve orta-yüksek bağlayıcı oranı (%20  $a_w$ ) kombinasyonları optimum performansı sağlamış, hidrasyon ürünlerinin (C-S-H, C-A-H) sürekliliği ve yoğunluğu artarak dayanımı maksimuma taşımıştır. Bu kapsamda, uçucu külün puzolanik aktivitesi

ve nano silikanın yüksek özgül yüzey alanı sayesinde hızlanan çekirdeklenme–jel oluşum mekanizması dayanım gelişimini güçlendirmiştir. Ancak özellikle kil oranı yüksek olan C zemini, su tutma kapasitesi nedeniyle yüksek  $W_T/W_b$  koşullarında bağlayıcının etkinliğini sınırlamış ve dayanım düşüşü daha keskin olmuştur. Sonuç olarak, elde edilen bulgular  $\eta/C_{iv}$  endeksi ile uyumlu olup, düşük boşluk–yüksek bağlayıcı kombinasyonlarının dayanımı en üst düzeye çıkardığını, aşırı suyun ise matrisi zayıflatan temel unsur olduğunu göstermiştir.



Şekil 5.23. A zemininde nano silika ve uçucu kül katkıli numunelerin 28 günlük UCS dayanımları: (a)  $W_T/W_b$  oranına göre, (b) su içeriğine göre.



Şekil 5.24. C zemininde nano silika ve uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları: (a)  $W_T/W_b$  oranına göre, (b) su içeriğine göre.

#### İnce tane oranının etkisi:

Şekil 5.22’de görüldüğü üzere, karışımdaki nano silika oranının %0,5–%1,5 aralığında artırılması, A ve C zeminlerinde serbest basınç dayanımını ( $q_u$ ) belirgin biçimde yükseltmiştir. Bunun temel nedeni, nano silikanın çok yüksek özgül yüzeyi ve puzolanik etkinliği sayesinde çekirdeklenme noktaları oluşturarak C-S-H jelinin hızla ve homojen biçimde gelişmesini sağlaması, ayrıca mikro boşlukları doldurup matrisi yoğunlaştırmasıdır. Bu etki, uçucu külün sağladığı reaktif bileşenleri tamamlayıcı nitelikte olup bağlayıcı sürekliliğini güçlendirir. Ancak %1,5–%2,0 üzerindeki nano silika içeriklerinde, artan ince tanelerin su ihtiyacını ve karışım viskozitesini yükseltmesi,

aglomerasyon eğilimi ve mikrogözenek oluşumu nedeniyle bağlayıcı matrisin sürekliliği zayıflamış ve  $q_u$  değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Dolayısıyla, nano silikanın belirli bir oranda (yaklaşık %1–%1,5) kullanılması, karışımın su/bağlayıcı oranı düşük tutulduğunda optimum dayanım değerlerini ortaya çıkarmakta; aşırı nano silika ve yüksek  $W_T/W_b$  durumlarında ise dayanım sınırlanmaktadır (Terashi, 1997; Topolnicki, 2004b).

*UK ve UK+NS ile iyileştirmenin karşılaştırılması:*

Şekil 5.25–5.26 ve bunlara karşılık gelen Çizelge 5.13–5.14’te görüldüğü gibi, C sınıfı uçucu külün (UK) tek başına kullanılması ile, UK’nin bir kısmının düşük oranlı nano silika (NS, %0,5–2) ile ikame edildiği karışımların performansı karşılaştırıldığında seri ve su muhtevasına bağlı farklılıklar ortaya çıkmaktadır.

A serisi (Çizelge 5.13, Şekil 5.25):

- $a_w = \%10$  için NS ilavesinin etkisi sınırlıdır;  $\% \Delta q_u \approx 0,90–1,01$  aralığındadır (çoğunlukla  $\approx 1$  veya biraz altı).
- $a_w = \%20$  için genel eğilim azalmadır;  $\% \Delta q_u \approx 0,56–0,60$  değerlerindedir. Bununla birlikte tekil bir karışımda (A3-16)  $\% \Delta q_u = 1,71$  ile artış gözlenmiştir.

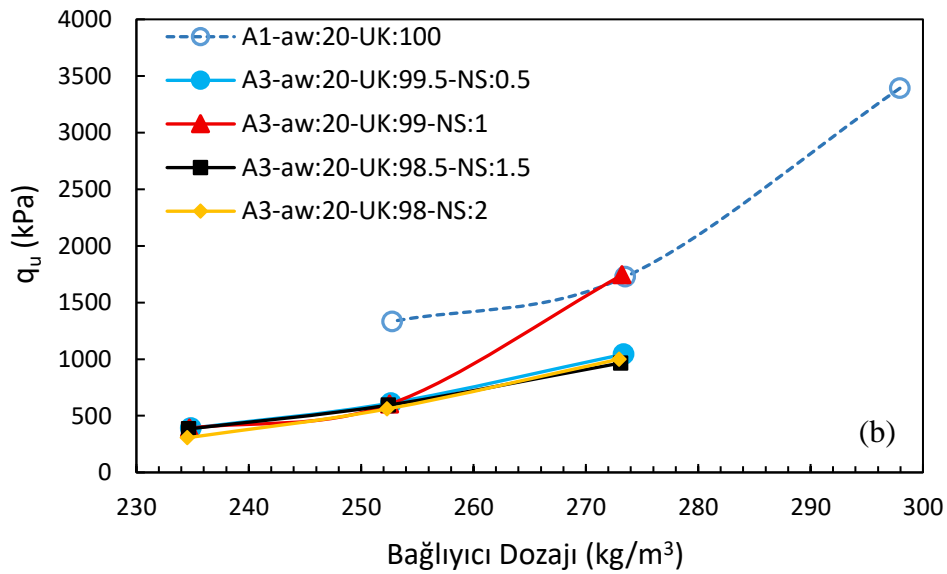
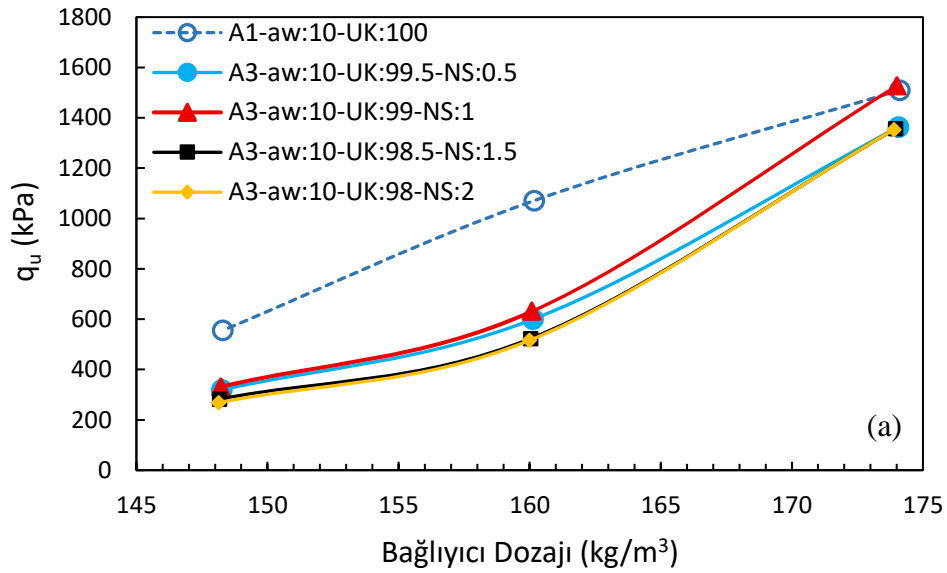
C serisi (Çizelge 5.14, Şekil 5.26):

- $a_w = \%10$  için NS ikamesi artış sağlamıştır;  $\% \Delta q_u \approx 1,23–1,34$  (yaklaşık %23–34 iyileşme).
- $a_w = \%20$  için dayanım azalmıştır;  $\% \Delta q_u \approx 0,57–0,73$  (yaklaşık %27–43 düşüş), yalnızca bir karışımda  $\% \Delta q_u \approx 0,91$  civarı değer elde edilmiştir.

Bu bulgular, genel olarak  $a_w = \%10$  altında C serisinde NS’nin sınırlı bir kazanım sağlayabildiğini;  $a_w = \%20$  koşullarında ise NS’nin çoğunlukla olumsuz etki yaptığını göstermektedir. Bunun başlıca nedeni, çalışmada kullanılan sıvı NS’nin düşük oranlarının ilave C–S–H oluşumunu belirgin şekilde arttıracak seviyede olmaması ve sıvı fazın karışıma getirdiği seyreltici etki ile bağlayıcı derişiminin düşmesidir. Bu nedenle, mevcut deney koşullarında UK’nin tek başına kullanımı özellikle yüksek su muhtevasında daha tutarlı performans vermiş, NS katkısının faydası ise seri ve  $a_w$ ’a duyarlı olarak sınırlı kalmıştır.

**Çizelge 5.13.** A serisine ait dayanım sonuçları – uçucu kül (UK) ve uçucu kül + nano silika (UK+NS) kullanımının karşılaştırılması

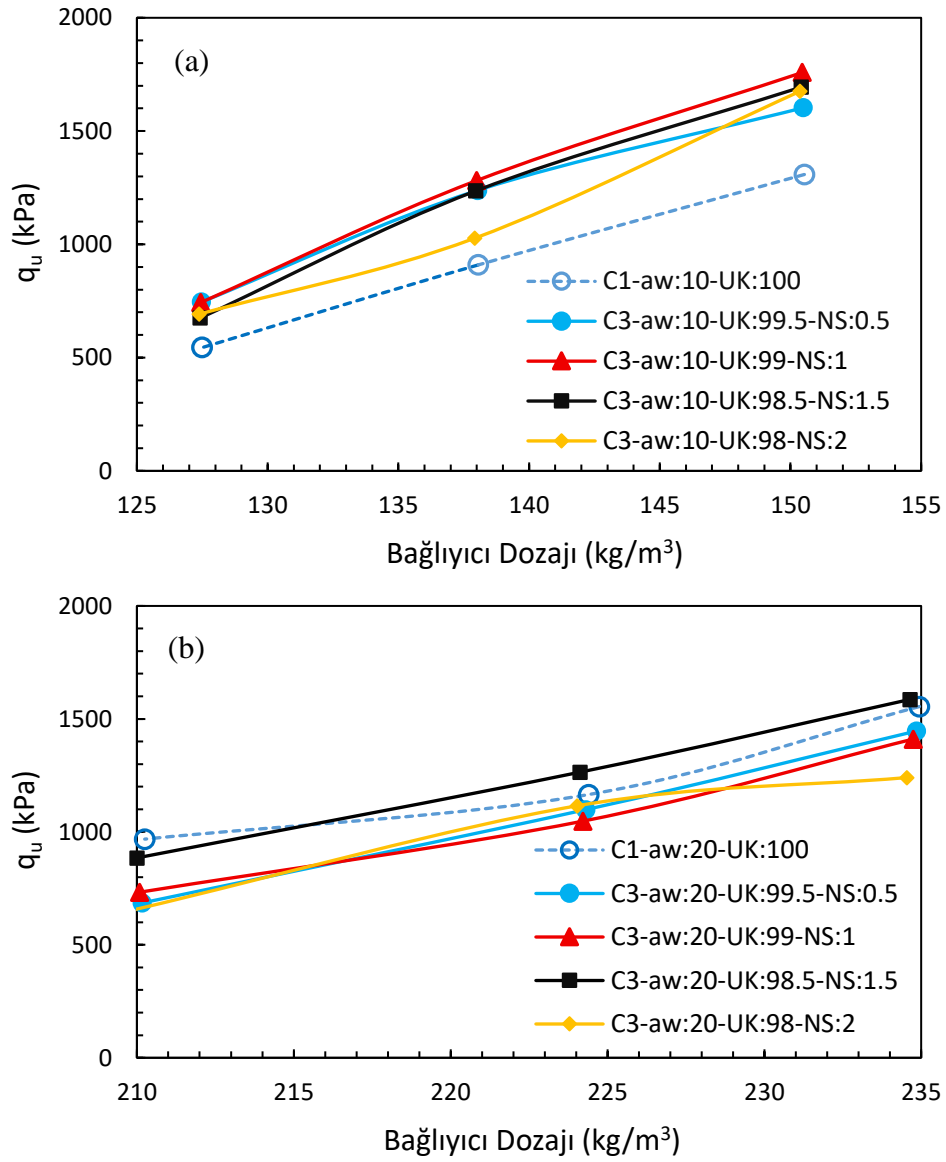
Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	% C-UK	%N S	$q_u$ (kpa)	$\epsilon_{max}$ (mm)	su içeriği %	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	% $\Delta$ ( $q_u$ )
A1-1	10	1,5	100	0	1510,0	1,4	13,6	174,1	–
A3-1	10	1,5	99,5	0,5	1363,3	1,06	13,6	174,1	0,90
A3-4	10	1,5	99	1	1527,5	1,37	13,6	174,0	1,01
A3-7	10	1,5	98,5	1,5	1356,7	1,32	13,6	174,0	0,90
A3-10	10	1,5	98	2	1353,7	1,31	13,6	173,9	0,90
A1-8	20	1,3	100	0	1726,9	2,0	21,7	273,5	–
A3-13	20	1,3	99,5	0,5	1044,0	1,45	21,7	273,4	0,60
A3-16	20	1,3	99	1	1743,5	2,25	21,7	273,2	1,01
A3-19	20	1,3	98,5	1,5	965,9	1,68	21,7	273,1	0,56
A3-22	20	1,3	98	2	999,8	1,71	21,7	273,0	0,58



**Şekil 5.25.** Uçucu kül ve nano silika + kırmızı çamur katkısının UCS dayanımı üzerindeki etkisinin karşılaştırılması: a)  $a_w = 10$ , b)  $a_w = 20$

**Çizelge 5.14.** A serisine ait dayanım sonuçları – uçucu kül (UK) ve uçucu kül + nano silika (UK+NS) kullanımının karşılaştırılması

Numune no	$a_w$ (%)	WT / Wb	% C-UK	%NS	$q_u$ (kpa)	$\epsilon_{max}$ (mm)	su içeriği %	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	% $\Delta$ ( $q_u$ )
C1-1	10	2,4	100	0,0	1308,3	1,36	21,8	150,5	–
C3-1	10	2,4	99,5	0,5	1602,9	1,32	21,8	150,5	1,23
C3-4	10	2,4	99	1	1758,4	1,24	21,8	150,5	1,34
C3-7	10	2,4	98,5	1,5	1693,8	1,57	21,8	150,4	1,29
C3-10	10	2,4	98	2	1675,5	1,41	21,8	150,4	1,28
C1-10	20	1,9	100	0,0	1554,8	2,34	31,7	234,9	–
C3-13	20	1,9	99,5	0,5	1446,4	2,04	31,67	234,85	0,67
C3-16	20	1,9	99	1	1410,8	1,92	31,67	234,75	0,65
C3-19	20	1,9	98,5	1,5	1586,2	1,65	31,67	234,65	0,73
C3-22	20	1,9	98	2	1240,4	1,68	31,67	234,55	0,57



**Şekil 5.26.** Uçucu kül ve nano silika + kırmızı çamur katkısının UCS dayanımı üzerindeki etkisinin karşılaştırılması: a)  $a_w = 10\%$ , b)  $a_w = 20\%$

#### 5.2.4. Uçucu kül, kırmızı çamur ve nano silika enjeksiyonuyla iyileştirme

Çizelge 5.15 ve Çizelge 5.16’de sunulan sonuçlar, uçucu kül (UK), kırmızı çamur (KÇ) ve nano silikanın (NS) birlikte kullanımının A4 ve C4 serilerinde farklı etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Ayrıca, serbest basınç deneyi sonuçlarına ait gerilme–birim deformasyon eğrileri EK-4 olarak eklenmiştir. A zemininde (Çizelge 5.15) %20 bağlayıcı dozunda, %10 KÇ ve %1 NS içeren karışım  $W_T/W_b = 1,3$  koşulunda 4297 kPa ile maksimum değere ulaşmış, bu değer yalnızca UK+NS kullanılan karışımlara kıyasla yaklaşık iki kat daha yüksek çıkmıştır. Ancak KÇ oranı %20–30’a yükseltildiğinde dayanım değerleri 3845–3255 kPa seviyelerine gerilemiş, ayrıca NS oranının %1,5’e çıkarılması dayanımları düşürmüştür. Bu sonuçlar, A zemininde optimum katkının yaklaşık %10 KÇ + %1 NS olduğunu ortaya koymaktadır. C zemininde (Çizelge 5.16) ise aynı katkılar daha sınırlı etki göstermiştir. %20 bağlayıcı dozunda ve  $W_T/W_b = 1,9$  koşullarında %20 KÇ ve %1 NS kombinasyonu ile yaklaşık 1850 kPa değerine ulaşılmış, fakat KÇ oranının %10–30 arasında değişmesi dayanımı önemli ölçüde etkilememiştir. Ayrıca NS oranının %1,5–2 seviyelerine çıkarılması, C zemininde dayanımları 1000–1500 kPa aralığına düşürerek etkinliğin azaldığını göstermiştir.

Genel olarak, Çizelge 5.15–5.16 sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, A zemini KÇ ve NS katkısına çok daha güçlü tepki vererek yüksek dayanım değerleri üretmiş, C zemini ise daha sınırlı kazanımlar sergilemiştir. Bu farklılık, A zemininde KÇ’nin içerdiği  $Fe_2O_3$  ve  $Al_2O_3$  bileşenlerinin UK ile sinerjik etki göstererek C–A–H ve C–F–H jellerinin oluşumunu desteklemesine, C zemininde ise yüksek plastisite ve su/bağlayıcı oranının katkılarının etkinliğini sınırlamasına bağlanabilir.

**Çizelge 5.15.** A zemininde UK, KÇ ve NS katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları

Araştırma Alanı	Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	% C-UK	% KÇ	%NS	Su İçeriği (%)	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	$q_u$ (kPa)	$\epsilon_{max}$ (mm)
A Zemin	A4-1	10	1,5	89	10	1	13,6	174,3	2844,2	1,15
	A4-2	10	1,5	79	20	1	13,6	174,5	2985,9	1,26
	A4-3	10	1,5	69	30	1	13,6	174,7	2961,7	1,38
	A4-4	10	1,5	89,5	10	1,5	13,6	175,8	2194,6	1,19
	A4-5	10	1,5	78,5	20	1,5	13,6	174,4	2046,7	1,32
	A4-6	10	1,5	68,5	30	1,5	13,6	174,7	1874,3	1,32
	A4-7	20	1,3	89	10	1	21,7	273,8	4297,3	1,47
	A4-8	20	1,3	79	20	1	21,7	274,4	3845,4	1,39
	A4-9	20	1,3	69	30	1	21,7	275,0	3254,5	1,85
	A4-10	20	1,3	89,5	10	1,5	21,6	276,1	3304,7	1,90
	A4-11	20	1,3	78,5	20	1,5	21,7	274,3	2529,2	1,37
	A4-12	20	1,3	68,5	30	1,5	21,7	274,9	2323,6	1,79

**Çizelge 5.16.** C zemininde UK, KÇ ve NS katkılı numunelerin 28 günlük UCS dayanımları

Araştırma Alanı	Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	% C-UK	% KÇ	%NS	Su İçeriği %	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	$q_u$ (kPa)	$e_{max}$ (mm)	
C Zemin	C4-1	10	2,4	89	10	1	21,8	150,6	1663,8	1,9	
	C4-2	10	2,4	79	20	1	21,8	150,6	1794,6	2,0	
	C4-3	10	2,4	69	30	1	21,8	150,8	1755,3	1,9	
	C4-4	10	2,4	89,5	10	1,5	21,8	150,8	1353,8	2,1	
	C4-5	10	2,4	78,5	20	1,5	21,8	151,0	1489,0	2,0	
	C4-6	10	2,4	68,5	30	1,5	21,8	150,9	1432,1	2,0	
	C4-7	20	1,9	1,9	89	10	1	31,7	235,2	1837,0	1,5
	C4-8	20	1,9	1,9	79	20	1	31,7	235,1	1829,6	1,9
	C4-9	20	1,9	1,9	69	30	1	31,7	235,6	1850,6	1,6
	C4-10	20	1,9	1,9	89,5	10	1,5	31,7	235,5	1332,0	1,5
	C4-11	20	1,9	1,9	78,5	20	1,5	31,7	236,1	1010,8	1,5
	C4-12	20	1,9	1,9	68,5	30	1,5	31,7	236,0	1008,6	1,9

Genel olarak A ve C zeminlerinde yapılan deneyler, uçucu külün (UK) tek başına kullanılması, kırmızı çamur (KÇ) ile kısmen ikame edilmesi ve nano silikanın (NS) farklı kombinasyonlarda ilave edilmesiyle elde edilen dayanım davranışlarının farklı mekanizmalarla şekillendiğini ortaya koymuştur. Literatürde de belirtildiği üzere (Kitazume vd., 2013a), tek başına UK kullanımı belirli bir dayanım artışı sağlasa da bu artış sınırlı kalmakta, UK ile birlikte yalnızca NS'nin kullanıldığı karışımlarda ise (UK+NS) dayanımda anlamlı bir iyileşme görülmemektedir. Buna karşılık, UK'nin kısmen KÇ ile ikame edilmesi dayanımı belirgin ölçüde yükseltmiştir. Bunun kimyasal gerekçesi, KÇ'nin içerdiği alkali bileşenlerin (özellikle Na<sub>2</sub>O) yüksek pH ortamı oluşturarak UK ve KÇ cam fazlarından silika/alüminatın çözünmesini hızlandırması; çözülmüş türlerin UK hidratasyonundan açığa çıkan Ca(OH)<sub>2</sub> ile puzolanik olarak tepkimeye girip C–A–H ve C–F–H gibi fazları üretmesi ve matristeki CH'nin tüketilmesi ile porozitenin azalmasıdır (Liu et al., 2021; Xiao et al., 2019). Üçlü bağlayıcı sistemlerde (UK+KÇ+NS) ise NS'nin yüksek reaktivitesi ve çekirdeklenme etkisi devreye girerek açığa çıkan Ca(OH)<sub>2</sub>'yi hızla tüketir ve ilave C–S–H üretir; KÇ kaynaklı Al ve (alkali varlığında) Si ile C–A–S–H zengin, daha çapraz bağlı ve yoğun bir jel ağı oluşur. Bu sinerjik ağ (C–S–H + C–A–S–H + C–A–H/ C–F–H) mikro yapıyı sıkılaştırır, boşluk sürekliliğini kırar ve dayanım kazanımını tekil sistemlere kıyasla daha belirgin kılar. En yüksek değerlerin üçlü sistemlerde elde edilmesi, bu kimyasal sinerjiyi doğrudan teyit etmektedir.

Çizelge 5.17 (A zemini) ve Çizelge 5.18 (C zemini) açıkça göstermektedir ki, uçucu kül (UK), kırmızı çamur (KÇ) ve nano silika (NS) birlikte üçlü bir sistem olarak kullanıldığında, UK'nin tek başına ya da iki bileşenli karışımlara göre daha yüksek dayanım değerleri elde edilmektedir. A zemini için, yalnızca UK içeren A1 numunelerinde

dayanım %10 bağlayıcıda yaklaşık 1509 kPa, %20 bağlayıcıda ise 1726 kPa'dır. UK'nin bir kısmının KÇ ile ikame edildiği A2 serisinde dayanım, %10 bağlayıcıda 2250–2960 kPa (yani  $\% \Delta \approx 1,49-1,96$ ), %20 bağlayıcıda ise 2465–3222 kPa aralığına ( $\% \Delta \approx 1,35-1,87$ ) yükselmiştir. En yüksek değerler üçlü sistem olan A4'te (UK'nin %10'u KÇ ile ikame + %1 NS) görülmüş; %20 bağlayıcı ve  $W_T/W_b = 1,3$  koşulunda dayanım 4297 kPa'a,  $\% \Delta \approx 2,49$ 'a (yaklaşık %149 artış) ulaşmıştır. A3 satırları (UK+NS) ise NS'nin tek başına sınırlı etkisini ortaya koymaktadır; %10 bağlayıcıda  $\% \Delta(q_u)$  çoğunlukla 0,90–1,01, %20 bağlayıcıda 0,60–1,01 aralığındadır.

**Çizelge 5.17.** A zemini için UK, KÇ ve NS kombinasyonlarında tek eksenli basınç dayanımı ( $q_u$ ), maksimum birim şekil değiştirme ( $\epsilon_{max}$ ), su içeriği ve dozaj değerleri ile UK'ye göre görece değişim ( $\% \Delta q_u$ )

Numune no	$a_w$ (%)	$W_T/W_b$	% C-UK	% KÇ	% N S	$q_u$ (kpa)	$\epsilon_{max}$ (mm)	su içeriği (%)	DOZAJ (kg/m <sup>3</sup> )	$\% \Delta (q_u)$
A1-1	10	1,5	100	0	0	1510,0	1,4	13,6	174,1	-
A2-1	10	1,5	90	10	0	2252,8	1,13	13,6	174,4	1,49
A2-4	10	1,5	80	20	0	2961,2	1,57	13,6	174,6	1,96
A2-7	10	1,5	70	30	0	2933,2	1,35	13,6	174,8	1,94
A2-10	10	1,5	60	40	0	2809,8	1,51	13,6	175,1	1,86
A3-1	10	1,5	99,5	0	0,5	1363,3	1,06	13,6	174,1	0,90
A3-4	10	1,5	99	0	1	1527,5	1,37	13,6	174,0	1,01
A3-7	10	1,5	98,5	0	1,5	1356,7	1,32	13,6	174,0	0,90
A3-10	10	1,5	98	0	2	1353,7	1,31	13,6	173,9	0,90
A4-1	10	1,5	89	10	1	2844,2	1,15	13,6	174,3	1,88
A4-2	10	1,5	79	20	1	2985,9	1,26	13,6	174,5	1,98
A4-3	10	1,5	69	30	1	2961,7	1,38	13,6	174,7	1,96
A4-4	10	1,5	89,5	10	1,5	2194,6	1,19	13,6	175,8	1,45
A4-5	10	1,5	78,5	20	1,5	2046,7	1,32	13,6	174,4	1,36
A4-6	10	1,5	68,5	30	1,5	1874,3	1,32	13,6	174,7	1,24
A1-8	20	1,3	100	0	0	1726,9	2,0	21,7	273,5	-
A2-14	20	1,3	90	10	0	2465,2	1,72	21,7	274,1	1,43
A2-17	20	1,3	80	20	0	2355,0	1,79	21,7	274,7	1,36
A2-20	20	1,3	70	30	0	3222,2	2,04	21,7	275,3	1,87
A2-23	20	1,3	60	40	0	2404,9	1,98	21,7	275,9	1,39
A3-13	20	1,3	99,5	0	0,5	1044,0	1,45	21,7	273,4	0,60
A3-16	20	1,3	99	0	1	1743,5	2,25	21,7	273,2	1,01
A3-19	20	1,3	98,5	0	1,5	965,9	1,68	21,7	273,1	0,56
A3-22	20	1,3	98	0	2	999,8	1,71	21,7	273,0	0,58
A4-7	20	1,3	89	10	1	4297,3	1,47	21,7	273,8	2,49
A4-8	20	1,3	79	20	1	3845,4	1,39	21,7	274,4	2,23
A4-9	20	1,3	69	30	1	3254,5	1,85	21,7	275,0	1,88
A4-10	20	1,3	89,5	10	1,5	3304,7	1,90	21,6	276,1	1,91
A4-11	20	1,3	78,5	20	1,5	2529,2	1,37	21,7	274,3	1,46
A4-12	20	1,3	68,5	30	1,5	2323,6	1,79	21,7	274,9	1,35

Benzer eğilim C zemini için Çizelge 5.18’de görülür: İkili karışımlar olan C2 (UK+KÇ) ve C3 (UK+NS) orta düzeyde veya değişken artışlar üretirken (C3, %10 bağlayıcıda  $\% \Delta \approx 1,23-1,34$ ; C2, %10 bağlayıcıda  $\% \Delta \approx 0,62-1,18$ ), üçlü sistem C4 bu zeminde %10 bağlayıcıda en yüksek iyileştirmeleri sağlar (ör. C4-2: 1795 kPa,  $\% \Delta \approx 1,37$ ). %20 bağlayıcıda artışlar  $\approx 1,18$  düzeyinde kalır (ör. C4-7: 1837 kPa). Her iki tabloda da son sütun  $\% \Delta (q_u)$ , en büyük göreceli kazanımların UK+KÇ+NS üçlü bileşiminde elde edildiğini açıkça göstermektedir.

**Çizelge 5.18.** C zemini için UK, KÇ ve NS kombinasyonlarında tek eksenli basınç dayanımı ( $q_u$ ), maksimum birim şekil değiştirme ( $\epsilon_{max}$ ), su içeriği ve dozaj değerleri ile UK’ye göre görece değişim ( $\% \Delta q_u$ )

Numune no	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	% C-UK	% KÇ	%NS	$q_u$ (kpa)	$\epsilon_{max}$ (mm)	su içeriği %	DOZAJ (kg/m <sup>3</sup> )	$\% \Delta (q_u)$
C1-1	10	2,4	100	0,0	0,0	1308,3	1,36	21,8	150,5	-
C2-1	10	2,4	90	10	0	1545,5	1,25	21,82	150,71	1,18
C2-4	10	2,4	80	20	0	1194,3	1,32	21,82	150,89	0,91
C2-7	10	2,4	70	30	0	1081,2	1,65	21,82	151,07	0,83
C2-10	10	2,4	60	40	0	809,9	1,57	21,82	151,25	0,62
C3-1	10	2,4	99,5	0	0,5	1602,9	1,32	21,8	150,5	1,23
C3-4	10	2,4	99	0	1	1758,4	1,24	21,8	150,5	1,34
C3-7	10	2,4	98,5	0	1,5	1693,8	1,57	21,8	150,4	1,29
C3-10	10	2,4	98	0	2	1675,5	1,41	21,8	150,4	1,28
C4-1	10	2,4	89	10	1	1663,8	1,85	21,8	150,6	1,27
C4-2	10	2,4	79	20	1	1794,6	2,02	21,8	150,6	1,37
C4-3	10	2,4	69	30	1	1755,3	1,87	21,8	150,8	1,34
C4-4	10	2,4	89,5	10	1,5	1353,8	2,14	21,8	150,8	1,03
C4-5	10	2,4	78,5	20	1,5	1489,0	1,99	21,8	151,0	1,14
C4-6	10	2,4	68,5	30	1,5	1432,1	1,97	21,8	150,9	1,09
C1-10	20	1,9	100	0,0	0,0	1554,8	2,34	31,7	234,9	-
C2-14	20	1,9	90	10	0	1722,0	1,83	31,67	235,38	1,11
C2-17	20	1,9	80	20	0	1676,4	2,06	31,67	235,82	1,08
C2-20	20	1,9	70	30	0	1577,4	1,88	31,67	236,26	1,01
C2-23	20	1,9	60	40	0	1131,8	2,00	31,67	236,70	0,73
C3-13	20	1,9	99,5	0	0,5	1446,4	2,04	31,67	234,85	0,93
C3-16	20	1,9	99	0	1	1410,8	1,92	31,67	234,75	0,91
C3-19	20	1,9	98,5	0	1,5	1586,2	1,65	31,67	234,65	1,02
C3-22	20	1,9	98	0	2	1240,4	1,68	31,67	234,55	0,80
C4-7	20	1,9	89	10	1	1837,0	1,45	31,67	235,18	1,18
C4-8	20	1,9	79	20	1	1829,6	1,89	31,67	235,08	1,18
C4-9	20	1,9	69	30	1	1850,6	1,58	31,67	235,62	1,19
C4-10	20	1,9	89,5	10	1,5	1332,0	1,52	31,67	235,52	0,86
C4-11	20	1,9	78,5	20	1,5	1010,8	1,53	31,67	236,06	0,65
C4-12	20	1,9	68,5	30	1,5	1008,6	1,87	31,67	235,96	0,65

Bu üstünlüğün kimyasal gerekçesi şudur: KÇ’deki alkali oksitler—özellikle  $Na_2O$ —ortamın pH’ını yükselterek UK ve KÇ’nin cam fazlarından Si/Al çözünmesini hızlandırır; çözünen türler UK hidrasyonundan oluşan  $Ca(OH)_2$  ile puzolanik reaksiyona girerek C–A–H ve C–F–H fazlarını oluşturur, matristen CH tüketilir ve porozite azalır. NS

eklendiğinde yüksek özgül yüzeyi ve hızlı reaktivitesi sayesinde nükleasyon etkisiyle  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  hızla tüketilir ve daha fazla C–S–H oluşur; KÇ kaynaklı Al (ve alkalilerin varlığında Si) ile daha çapraz bağlı, yoğun bir C–A–S–H jeli meydana gelir. Bu eş-etkili ağ (C–S–H + C–A–S–H + C–A–H/C–F–H) mikro yapıyı sıkılaştırır, boşluk sürekliliğini kırar ve tek bileşenli veya ikili sistemlere kıyasla dayanımı belirgin biçimde artırır. Bu mekanizma; UK'nin tek başına sınırlı artış sağladığını, NS'nin tek başına belirgin bir iyileştirme getirmediğini, buna karşın uygun üçlü kombinasyonların puzolanik reaksiyonları hızlandırarak dayanımı net şekilde yükselttiğini bildiren çalışmalarla uyumludur (Li vd., 2017; Liu vd., 2021; Xiao vd., 2019). Dolayısıyla, A ve C zeminlerinde genel eğilim, yalnızca UK'nin sınırlı etki göstermesi, UK+NS kombinasyonunun ek bir katkı sağlamaması, ancak UK+KÇ ile dayanımın yükselmesi ve en yüksek değerlerin UK+KÇ+NS üçlü bağlayıcı sistemlerinde ortaya çıkması şeklindedir. Özellikle A zemini, KÇ ve NS katkılarına daha güçlü tepki vererek çok yüksek dayanımlar sergilerken, C zemini daha sınırlı artışlar göstermiştir. Bu bulgular, bağlayıcı kombinasyonlarının etkinliğinin zemin tipine, ince tane oranına ve su/bağlayıcı oranına bağlı olarak değiştiğini, optimum performansın ise UK+KÇ+NS kombinasyonlarında sağlandığını göstermektedir (Li vd., 2017; White vd., 2005b).

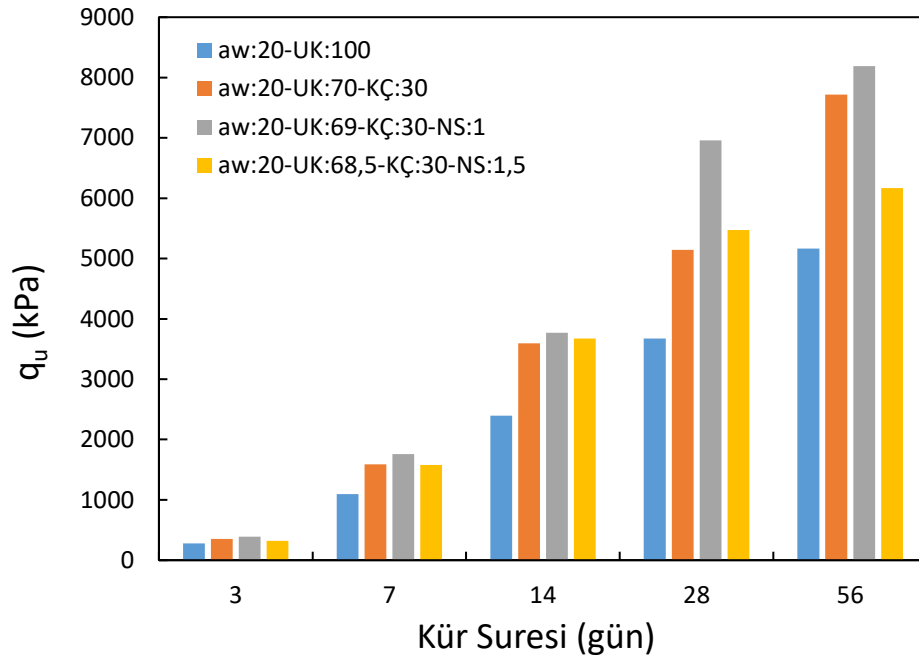
### 5.2.5. Kür süresinin etkisi

Çizelge 5.19 ve Şekil 5.27'da görüldüğü üzere, UK+KÇ+NS enjeksiyonuyla iyileştirilen zeminlerde kür süresinin uzatılması tüm karışımlar için dayanım artışı sağlamış ancak kazanım oranı kullanılan katkı türüne göre farklılık göstermiştir. Ayrıca, serbest basınç deneyi sonuçlarına ait gerilme–birim deformasyon eğrileri EK-5 olarak eklenmiştir. Sadece uçucu kül içeren numunelerde ( $a_w = 20\%$ , UK:100)  $q_u$  değerleri 3 günde 281 kPa iken 56 günde 5167 kPa'a ulaşmıştır. Kırmızı çamur ilavesi (%30 KÇ) ile aynı kür süresinde dayanım 7718 kPa'a çıkmış, bu da KÇ'nin  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içerikleri sayesinde puzolanik reaksiyonları hızlandırarak C–A–H ve C–F–H jellerinin oluşumunu desteklediğini göstermektedir. Nano silika katkısı ile birlikte (UK:69% + KÇ:30% + NS:1%) elde edilen değerler 56 günde 8189 kPa ile en yüksek seviyeye ulaşmış, bu da NS'nin yüksek özgül yüzey alanı sayesinde C–S–H jelinin çekirdekleşmesini hızlandırarak matrisin daha yoğun hale gelmesini sağladığını ortaya koymuştur. Ancak NS oranının %1,5'e çıkarılması dayanım değerlerini sınırlamış (56 günde 6167 kPa), bu durum optimum nano katkı dozunun aşılmasıyla çökme ve işlenebilirlik problemlerinin homojenliği bozduğunu göstermektedir. Ayrıca 14–28 gün aralığında tüm katkı

kombinasyonlarında belirgin artışlar gözlenmiş, bu da puzolanik reaksiyonların bu sürede hızlandığını ve 28 günün ötesinde de artış eğiliminin devam ettiğini ortaya koymuştur. Bulgular, uzun kür sürelerinin özellikle UK+KÇ+NS kombinasyonlarında belirgin dayanım kazanımları sağladığını, optimum etkinin %20 bağlayıcı, %30 KÇ ve %1 NS koşullarında ortaya çıktığını ve aşırı NS dozajlarının performansı sınırladığını göstermektedir. Bu eğilim, uzun kür sürelerinin puzolanik reaksiyonlarla dayanımı artırdığını (Zhao vd., 2020), kırmızı çamur katkısının  $\text{Ca(OH)}_2$  tüketimini hızlandırarak mikro yapıyı güçlendirdiğini (He vd., 2021) ve optimum nano silika dozajının aşılmasının işlenebilirlik sorunları nedeniyle performansı düşürdüğünü rapor eden literatürle uyumludur (Kumar vd., 2022).

**Çizelge 5.19.** UK, KÇ ve NS katkılı A5 karışımlarının farklı kür sürelerinde UCS dayanımları

Araştırma Alanı	Numune no	kür süresi	$a_w$ (%)	$W_T / W_b$	% C-UK	KÇ %	NS %	Su İçeriği %	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	$q_u$ (kPa)	$\epsilon_{max}$ (mm)
A Zemin	A5-1	3	20	1,0	100	0	0	16,7	297,9	280,7	1,43
	A5-2	7	20	1,0	100	0	0	16,7	297,9	1092,8	1,09
	A5-3	14	20	1,0	100	0	0	16,7	297,9	2393,5	1,26
	A5-4	28	20	1,0	100	0	0	16,7	297,9	3675,4	1,39
	A5-5	56	20	1,0	100	0	0	16,7	297,9	5167,2	1,51
	A5-6	3	20	1,0	70	30	0	16,7	300,1	353,2	2,71
	A5-7	7	20	1,0	70	30	0	16,7	300,1	1590,2	1,68
	A5-8	14	20	1,0	70	30	0	16,7	300,1	3596,2	1,74
	A5-9	28	20	1,0	70	30	0	16,7	300,1	5144,7	1,74
	A5-10	56	20	1,0	70	30	0	16,7	300,1	7718,3	1,79
	A5-11	3	20	1,0	69	30	1	16,7	299,7	387,9	2,19
	A5-12	7	20	1,0	69	30	1	16,7	299,7	1756,7	1,63
	A5-13	14	20	1,0	69	30	1	16,7	299,7	3770,2	1,44
	A5-14	28	20	1,0	69	30	1	16,7	299,7	6958,0	1,67
	A5-15	56	20	1,0	69	30	1	16,7	299,7	8189,8	1,54
	A5-16	3	20	1,0	68,5	30	1,5	16,7	299,6	319,3	2,86
	A5-17	7	20	1,0	68,5	30	1,5	16,7	299,6	1578,6	1,43
	A5-18	14	20	1,0	68,5	30	1,5	16,7	299,6	3675,4	1,44
	A5-19	28	20	1,0	68,5	30	1,5	16,7	299,6	5472,9	1,61
	A5-20	56	20	1,0	68,5	30	1,5	16,7	299,6	6167,2	1,69

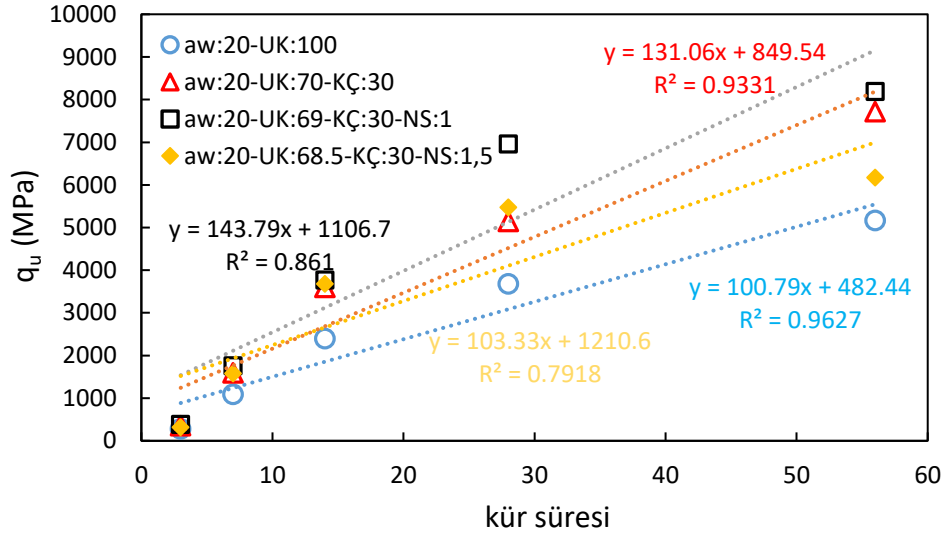


Şekil 5.27. Zemin A karışımlarında UK, KÇ ve NS katkılarının kür süresine göre UCS dayanımları

Şekil 5.28, farklı katkı kombinasyonlarına sahip numunelerin kür süresine bağlı olarak serbest basınç dayanımındaki ( $q_u$ ) değişimi göstermektedir. Tüm karışımlarda kür süresi uzadıkça dayanım artmış, ancak bu artış oranı katkı türüne göre farklılık göstermiştir.

En yüksek korelasyon katsayısı ( $R^2 = 0,9627$ ) yalnızca uçucu kül içeren karışımda ( $a_w:20-UK:100$ ) elde edilmiştir. Kırmızı çamur ilavesi ( $a_w:20-UK:70-KÇ:30$ ) dayanım artışını hızlandırmış,  $Fe_2O_3$  ve  $Al_2O_3$  içeriklerinin puzolanik reaksiyonları desteklediği görülmüştür.

Nano silika katkılı karışımlar ( $a_w:20-UK:69-KÇ:30-NS:1$  ve  $NS:1,5$ ) erken yaşlarda dayanımı artırsa da, NS oranının %1,5'e çıkarılmasıyla eğim ve  $R^2$  değerleri azalmıştır. Bu durum, aşırı NS dozajının işlenebilirlik ve homojenliği olumsuz etkilediğini göstermektedir. Sonuç olarak, şekil 5.28'deki doğrusal eğriler uzun kür sürelerinin puzolanik reaksiyonları güçlendirdiğini, en uygun etkinin %20 bağlayıcı, %30 KÇ ve %1 NS oranlarında elde edildiğini ortaya koymaktadır.

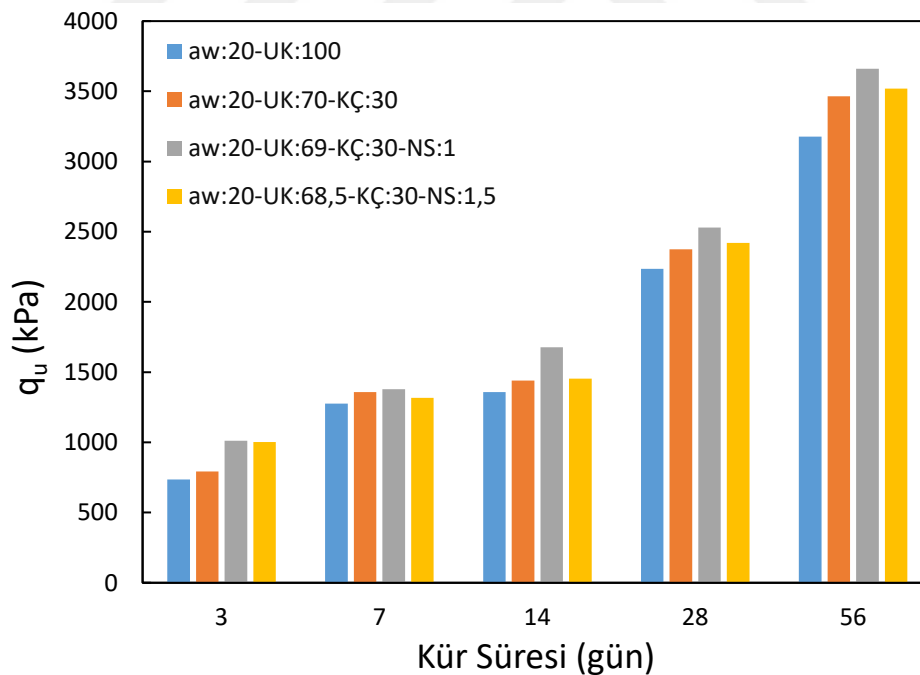


Şekil 5.28. A zemin için farklı katkı kombinasyonlarında kür süresine bağlı serbest basınç dayanımı ( $q_u$ ) değişimi

Çizelge 5.20 ve Şekil 5.29’de sunulan C5 serisi sonuçları, kür süresinin uzamasının C zemininde de dayanımı belirgin şekilde artırdığını ortaya koymaktadır. Yalnızca uçucu kül içeren karışımlarda 3 günde 735 kPa olan  $q_u$  değeri 56 günde 3177 kPa’a çıkarken, kırmızı çamur katkısı (%30 KÇ) ile bu değer 3465 kPa’a yükselmiştir. Nano silika katkısı (%1 NS) ile birleşen UK+KÇ karışımlarında 56 günlük kür sonunda 3662 kPa elde edilmiş, bu da NS’nin erken yaşlarda sınırlı fakat ilerleyen kürlerde C–S–H jel oluşumunu hızlandırarak dayanım kazanımlarını desteklediğini göstermektedir. Ancak NS oranının %1,5’e çıkarılması performansı sınırlamış ve 56 gün sonunda 3519 kPa’da kalmıştır; bu durum optimum nano katkı dozunun aşılması halinde çökme ve homojenlik sorunlarının dayanımı düşürdüğünü teyit etmektedir. Genel olarak 14 güne kadar dayanım artışlarının sınırlı kaldığı, 28 günden itibaren hızlandığı ve 56 gün sonunda maksimum değerlere ulaşıldığı görülmüştür. Bu eğilim, puzolanik reaksiyonların ilerleyen kürlerde hızlanarak  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  tüketimini artırması ve kırmızı çamur içeriğindeki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  bileşenlerinin C–A–H ve C–F–H jel oluşumunu desteklemesiyle açıklanabilir. Bulgular, uzun kür sürelerinin C zemininde UK+KÇ+NS kombinasyonları için kritik olduğunu ve optimum koşulların %20 bağlayıcı, %30 KÇ ve %1 NS katkısı ile sağlandığını, daha yüksek NS dozlarının ise dayanım üzerinde sınırlayıcı etkiler gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, uzun kür sürelerinin dayanım kazanımlarını artırdığını ve optimum nano katkı dozunun aşılması gerektiğini bildiren literatürle uyumludur (He vd., 2021; Kumar vd., 2022; Zhao vd., 2020).

Çizelge 5.20. UK, KÇ ve NS katkılı C5 karışımlarının farklı kür sürelerinde UCS dayanımları

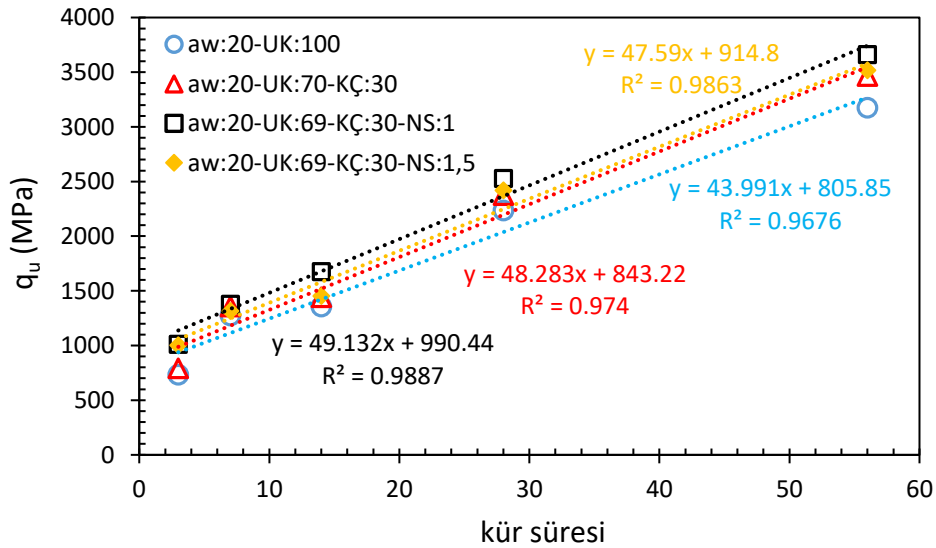
Araştırma Alanı	Numune no	kür süresi	$a_w$ (%)	$W_T/W_b$	C-UK %	KÇ %	NS %	Su İçeriği %	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	$q_u$ (kPa)	$\epsilon_{max}$ (mm)
C Zemin	C5-1	3	20	1,6	100	0	0	26,7	252,8	735,0	1,86
	C5-2	7	20	1,6	100	0	0	26,7	252,8	1275,2	1,44
	C5-3	14	20	1,6	100	0	0	26,7	252,8	1357,1	1,25
	C5-4	28	20	1,6	100	0	0	26,7	252,8	2235,8	1,96
	C5-5	56	20	1,6	100	0	0	26,7	252,8	3177,0	1,45
	C5-6	3	20	1,6	70	30	0	26,7	254,3	791,9	1,74
	C5-7	7	20	1,6	70	30	0	26,7	254,3	1357,1	1,25
	C5-8	14	20	1,6	70	30	0	26,7	254,3	1441,2	1,38
	C5-9	28	20	1,6	70	30	0	26,7	254,3	2375,5	1,42
	C5-10	56	20	1,6	70	30	0	26,7	254,3	3464,9	0,83
	C5-11	3	20	1,6	69	30	1	26,7	254,0	1012,3	1,56
	C5-12	7	20	1,6	69	30	1	26,7	254,0	1377,6	1,27
	C5-13	14	20	1,6	69	30	1	26,7	254,0	1677,4	1,20
	C5-14	28	20	1,6	69	30	1	26,7	254,0	2529,4	1,77
	C5-15	56	20	1,6	69	30	1	26,7	254,0	3661,7	1,19
	C5-16	3	20	1,6	68,5	30	1,5	26,7	253,9	1001,8	1,74
	C5-17	7	20	1,6	68,5	30	1,5	26,7	253,9	1317,5	1,69
	C5-18	14	20	1,6	68,5	30	1,5	26,7	253,9	1454,3	1,20
	C5-19	28	20	1,6	68,5	30	1,5	26,7	253,9	2421,1	1,73
	C5-20	56	20	1,6	68,5	30	1,5	26,7	253,9	3518,9	1,37



Şekil 5.29. Zemin C karışımlarında UK, KÇ ve NS katkılarının kür süresine göre UCS dayanımları

Şekil 5.30'da görüldüğü gibi, kür süresinin uzaması C zemininde de dayanımı belirgin biçimde artırmıştır. Tüm karışımlar doğrusal artış eğilimi göstermiş olup yüksek  $R^2$  değerleri, dayanım–kür süresi ilişkisinin güçlü olduğunu kanıtlamaktadır.

Yalnızca uçucu kül içeren karışımda dayanım artışı sınırlı kalırken, kırmızı çamur (%30 KÇ) ilavesi artışı hızlandırmıştır. Nano silika katkısı (%1 NS) dayanımı bir miktar artırmış, ancak oran %1,5'e çıkarıldığında eğim azalmış ve işlenebilirlik sorunları nedeniyle dayanım sınırlanmıştır. Genel olarak, uzun kür sürelerinin puzolanik reaksiyonları güçlendirdiği, en yüksek etkinin %20 bağlayıcı, %30 KÇ ve %1 NS oranlarında elde edildiği belirlenmiştir.



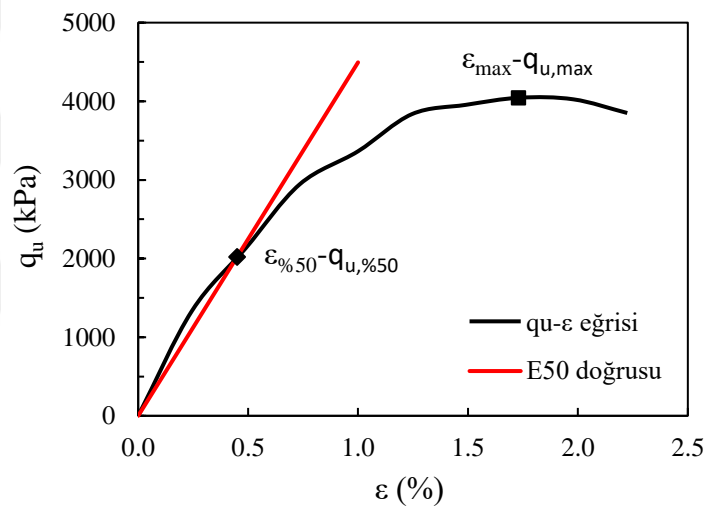
Şekil 5.30. C Zemin için farklı katkı kombinasyonlarında kür süresine bağlı serbest basınç dayanımı ( $q_u$ ) değişimi

Çizelge 5.19–5.20 ve Şekil 5.27–5.30'de görüldüğü üzere, kür süresinin uzatılması her iki zeminde de dayanımı artırmış ancak A ve C zeminleri arasında belirgin farklılıklar ortaya çıkmıştır. A zemininde yalnızca uçucu kül kullanılan numunelerde 3 günde 281 kPa olan  $q_u$  değeri 56 günde 5167 kPa'a ulaşmış, kırmızı çamur (%30 KÇ) ve %1 NS ilavesiyle bu değer 8189 kPa'a kadar çıkmıştır. Buna karşılık C zemininde yalnızca uçucu kül katkılı karışımlarda 3 günde 735 kPa'dan 56 günde 3177 kPa'a yükselme gözlenmiş, kırmızı çamur ve %1 NS katkısı ile maksimum 3662 kPa elde edilmiştir. Bu karşılaştırma, A zemininde KÇ ve NS katkılarının daha güçlü bir sinerji oluşturarak puzolanik reaksiyonları hızlandırdığını ve uzun kür sürelerinde çok daha yüksek dayanımlar sağladığını, C zemininde ise benzer katkıların etkisinin sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır. Ayrıca A zemininde 28–56 gün arasında keskin artışlar gözlenirken, C zemininde artış eğilimi daha sınırlı olmuştur. Her iki zeminde de NS oranının %1,5'e çıkarılması dayanımı düşürmüştü, bu sonuç optimum nano katkı dozunun aşılması gerektiğini rapor eden literatürle (He vd., 2021; Kumar vd., 2022; Zhao vd., 2020) uyumludur. Genel olarak A zemini uzun kür

sürelerinde katkılara daha duyarlı davranarak yüksek dayanım kazanımları sağlamış, C zemini ise daha düşük seviyelerde kalmıştır.

### 5.3. Elastisite Modülü

Zemin iyileştirme çalışmalarında, stabilizasyon sonrası zeminin dayanımı taşıma gücünü etkilerken, zemin ortamındaki deformasyonların (oturma) belirlenmesi için iyileştirilmiş zeminin elastisite modülünü bilmek gerekmektedir. İyileştirilmiş numunelerin elastisite modülleri, sekant modülü ( $E_{50}$ ) olarak hesaplanmıştır.  $E_{50}$ , gerilme-birim deformasyon grafiğinde başlangıç noktası ile maksimum gerilmenin %50'sine karşılık gelen noktayı birleştiren doğrunun eğimidir (Şekil 5.31).



Şekil 5.31.  $E_{50}$  sekant modülünün belirlenmesi

Literatürde elastisite modülünün genellikle serbest basınç dayanımı ( $q_u$ ) ile orantılı olduğu ve farklı araştırmalarda  $E_{50}$ 'nin  $25q_u$  ile  $70q_u$  arasında değerler aldığı belirtilmektedir. Bu çalışmada ise uçucu kül, kırmızı çamur ve nano silika katkıları ile iyileştirilen A, B ve C zeminlerinde elde edilen elastisite modülü değerleri literatürde verilen aralığın üzerinde gerçekleşmiş ve yaklaşık  $45q_u$  ile  $130q_u$  arasında bulunmuştur. Bu sonuç, kullanılan bağlayıcıların ve katkı malzemelerinin puzolanik reaksiyonları sayesinde zeminin rijitlik ve deformasyon özelliklerinde önemli bir iyileşme sağladığını göstermektedir.

### 5.3.1. Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirme

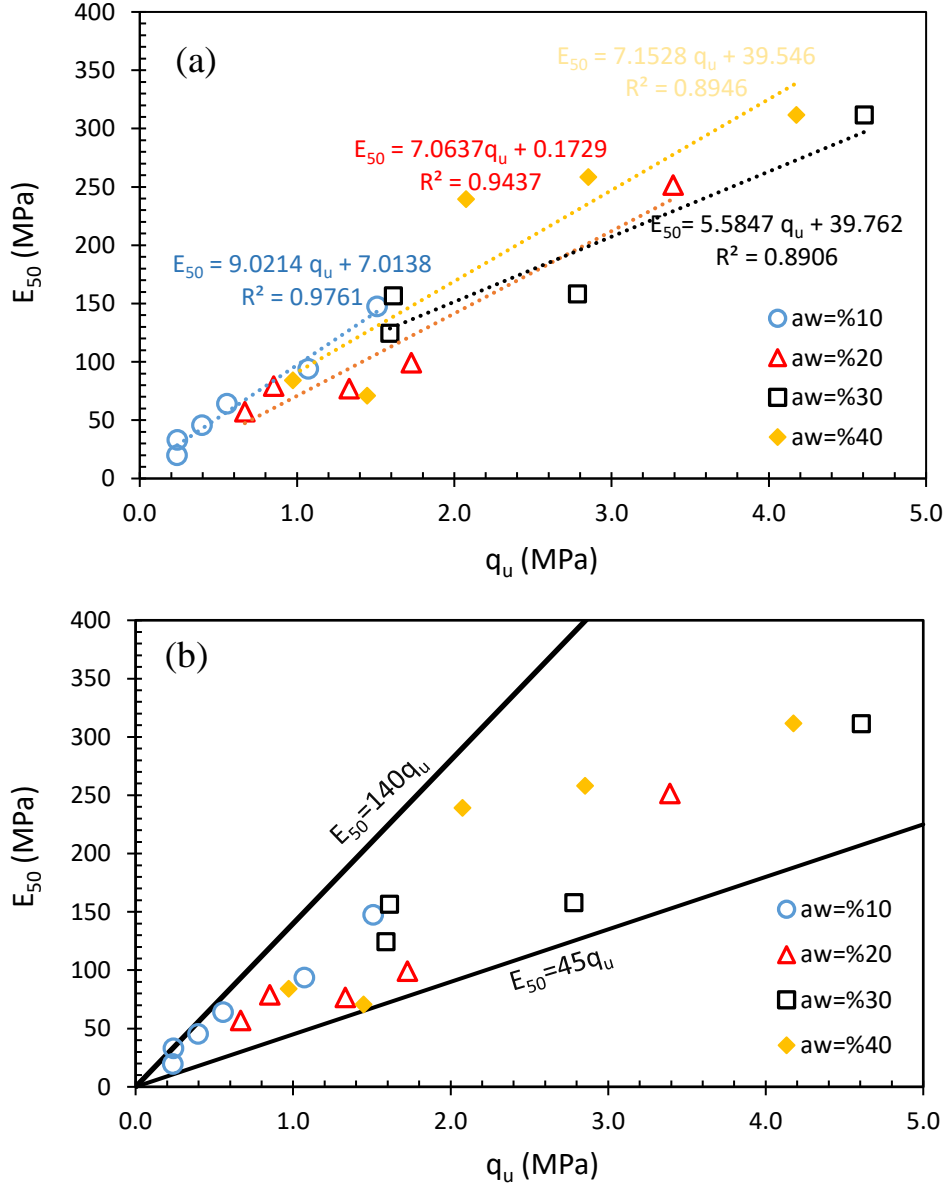
A zemininde %100 UK katkılı numunelerin 28 günlük deney sonuçları incelendiğinde, elastisite modülünün  $45q_u$  ile  $140q_u$  sınırları arasında dağıldığı, ancak değerlerin büyük çoğunluğunun  $60-130q_u$  bandında yoğunlaştığı görülmektedir. Regresyon analizleri ( $R^2 \approx 0,89-0,94$ ), elastisite modülü ile tek eksenli basınç dayanımı arasında güçlü ve doğrusal bir ilişki bulunduğunu ortaya koymuş, eğimlerin yaklaşık  $5,6-7,2$  arasında değişmesi UK'nin bağlayıcı olarak zemin rijitliğini etkin bir şekilde artırdığını göstermiştir.

Literatürde iyileştirilmiş zeminler için genellikle  $25-70q_u$  aralığı rapor edilmesine rağmen (Baker, 1981; Bruce, 1986; Terashi, 1997), çalışmamızda elde edilen sonuçlar bu aralığın üstünde kalmış, fakat daha geniş sınırlar olan  $35-180q_u$  ve  $50-150q_u$  aralıklarıyla (Federal Highway Administration, 2013a; Kitazume vd., 2013b; Terashi, 1997; Topolnicki, 2004b) uyum göstermiştir.

Bu durum öncelikle kullanılan malzemenin cinsiyle ilişkilidir; C sınıfı uçucu külün yüksek CaO içeriği sayesinde su ile etkileşime girerek C-S-H ve C-A-H jel ürünleri oluşturması, zemin taneleri arasındaki bağları kuvvetlendirmiş, boşlukları doldurmuş ve rijitliği artırmıştır. Karışım oranlarının %10'dan %40'a çıkmasıyla hem dayanım hem elastisite modülü belirgin biçimde artmış, daha yüksek bağlayıcı dozajı daha yoğun ve süreklilik arz eden bir matris oluşturarak elastik davranışı güçlendirmiştir.

Bu gelişim malzeme yoğunluğundaki artışla da desteklenmiştir; kuru birim hacim ağırlığı daha yüksek olan karışımların daha düşük boşluk oranı sayesinde daha rijit davrandığı, böylece  $E_{50}/q_u$  oranlarının literatürdeki ortalamaların üzerine çıktığı gözlenmiştir. UK'nin özgül yüzey alanı nano-silika kadar yüksek olmamakla birlikte, yeterli su tutma kapasitesi sayesinde 28 günlük kür süresince puzolanik reaksiyonların devam etmesi rijitlikte önemli bir artış sağlamış, özellikle  $a_w = \%40$  seviyesinde gözlenen yüksek  $E_{50}$  değerleri suyun bağlayıcı-hammadde etkileşimlerini hızlandırdığına işaret etmiştir.

Dolayısıyla bu çalışmada elde edilen değerlerin literatürde verilen alt sınırların üzerinde çıkması; malzeme bileşimi, bağlayıcı oranı, yoğunluk ve su koşullarının ortak etkisiyle açıklanabilmekte ve A zemini için 28 günlük kürde tasarıma esas değer olarak  $E_{50} \approx (60-130) q_u$  aralığının temsil edici olduğu, ortalama  $100q_u$  değerinin ise güvenli ve gerçekçi bir tasarım parametresi olarak önerilebileceği sonucuna varılmıştır (Şekil 5.32).

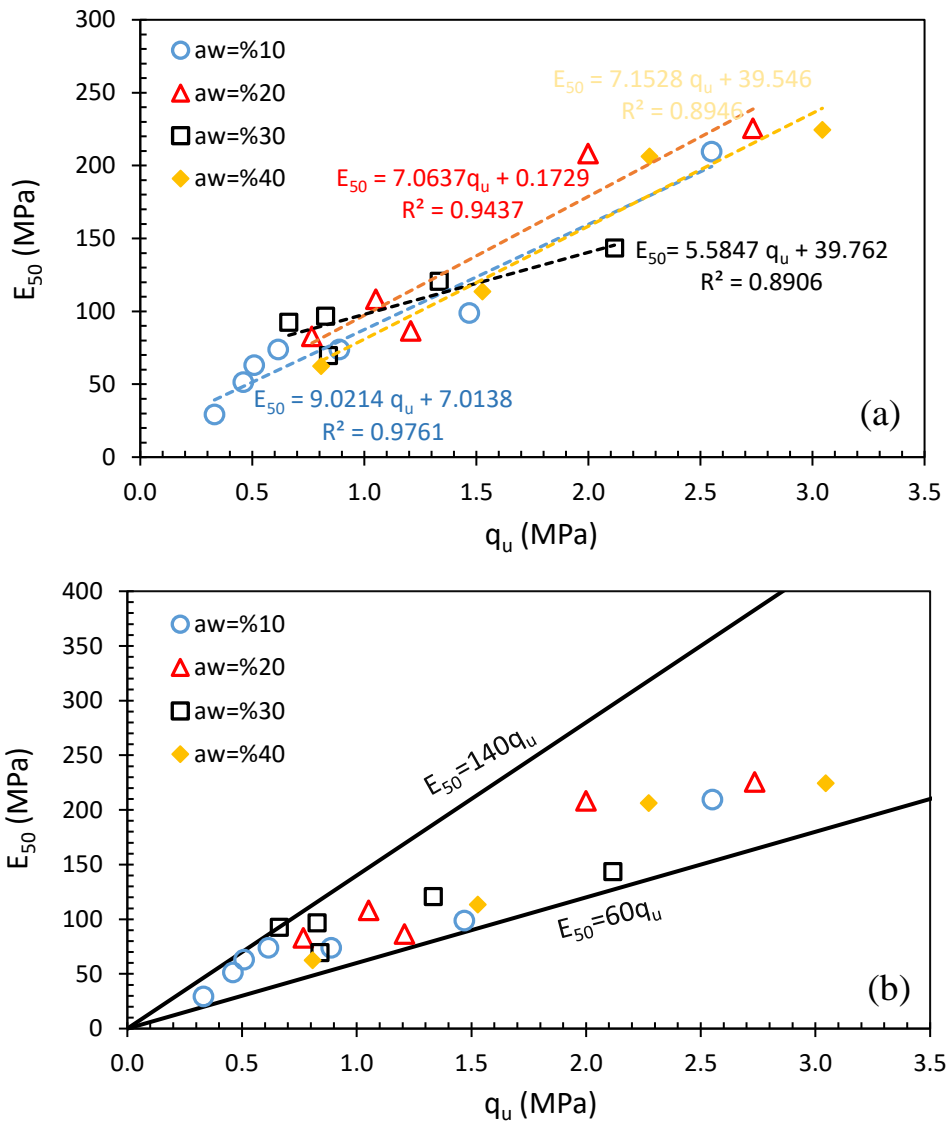


Şekil 5.32. A zemin için %100 UK katkılı numunelerin 28 günlük  $E_{50}$  değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b)  $q_u$ - $E_{50}$  ilişkisi

B zemininde %100 UK katkılı, 28 günlük numunelerin elastisite modülü–dayanım ilişkisi Şekil 5.33’te verilmiştir. Şekil 5.33(a)’da görülen regresyon eğrileri ( $R^2 \approx 0,89$ – $0,97$ ),  $E_{50}$  ile  $q_u$  arasında güçlü ve doğrusal bir ilişki bulunduğunu göstermekte olup, eğimlerin 5,5–7,1 aralığında değişmesi UK’nin etkin bir rijitlik artırıcı olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 5.33(b)’de yer alan kıyas sınırları ( $E_{50} = 60q_u$  ve  $E_{50} = 140q_u$ ) incelendiğinde, verilerin büyük çoğunluğunun  $60$ – $130q_u$  bandında yer aldığı ve yalnızca birkaç noktanın alt veya üst sınırlara yakınsadığı görülmektedir.

Bu değerler, literatürde rapor edilen  $25$ – $70q_u$  aralığından daha yüksek olmakla birlikte (Baker, 1981; Bruce, 1986; Terashi, 1997), Topolnicki tarafından verilen daha

geniş 35–180 $q_u$  veya 50–150 $q_u$  aralıklarıyla uyumludur. Sonuçların A zeminine kıyasla biraz daha geniş bir aralıkta dağılması, B zemininin yaklaşık %15 kil içeriğiyle ilişkilidir. Kil minerallerinin yüksek özgül yüzey alanı ve su tutma kapasitesi, bağlayıcı reaksiyonlarının daha etkin gerçekleşmesine olanak sağlamış; C sınıfı UK'nin yüksek CaO içeriğiyle birleşerek C–S–H ve C–A–H jel oluşumunu hızlandırmış ve matrisin sürekliliğini güçlendirmiştir. Ayrıca bağlayıcı oranı arttıkça yoğunluk artışı ve boşluk oranındaki azalma ile rijitlikte belirgin bir artış sağlanmış; yüksek  $aw$  koşullarında reaksiyonların ilerlemesi için gerekli suyun mevcudiyeti rijitlik gelişimini desteklemiştir. Dolayısıyla Şekil 5.33'te görülen 60–130 $q_u$  bandı, B zemini için 28 günlük kür koşullarında temsil edici bir aralık olarak değerlendirilebilir ve ortalama ~90–100 $q_u$  değeri güvenli bir tasarım parametresi olarak önerilebilir.



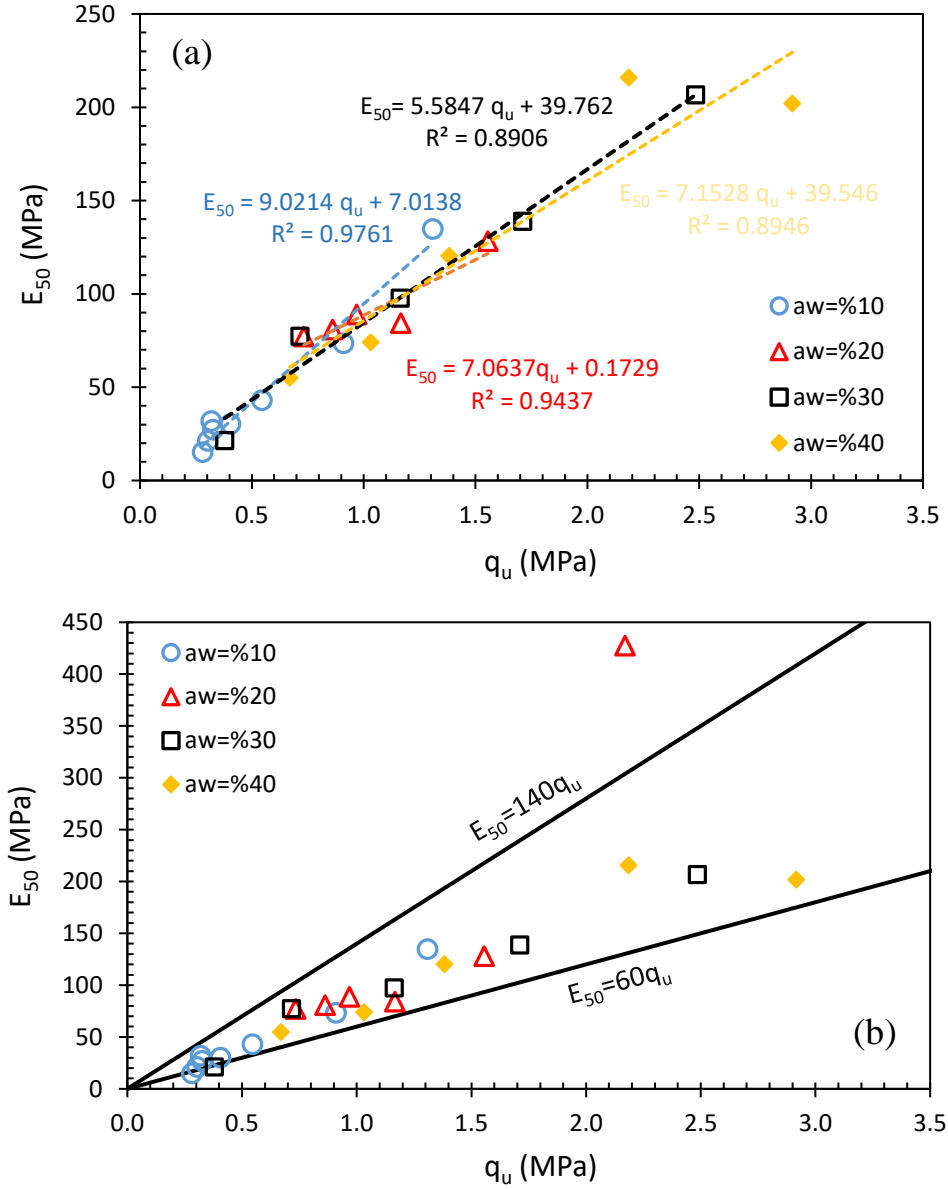
Şekil 5.33. B zemini için %100 UK katkılı numunelerin 28 günlük  $E_{50}$  değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b)  $q_u$ - $E_{50}$  ilişkisi

C zemininde %100 UK katkılı numunelerin 28 günlük deney sonuçları Şekil 5.34'te verilmiştir. Şekil 5.34(a)'da yer alan regresyon analizleri ( $R^2 \approx 0,89-0,94$ ),  $E_{50}$  ile  $q_u$  arasında güçlü ve doğrusal bir ilişki bulunduğunu ortaya koymuş; eğimlerin yaklaşık 5,6–7,1 aralığında seyretmesi, uçucu külün rijitlik artırıcı etkisini doğrulamıştır. Şekil 5.34(b)'de gösterilen karşılaştırma sınırları ( $E_{50} = 60q_u$  ve  $E_{50} = 140q_u$ ) dikkate alındığında, verilerin büyük çoğunluğunun yine 60–130 $q_u$  bandında yer aldığı, ancak birkaç noktanın üst sınıra yakınsadığı görülmektedir.

Literatürde iyileştirilmiş zeminler için rapor edilen 25–70 $q_u$  aralığına kıyasla (Baker, 1981; Bruce, 1986; Terashi, 1997), bu çalışmada elde edilen değerler daha yüksek olmakla birlikte, FHWA, Kitazume & Terashi ve Topolnicki tarafından bildirilen daha geniş 35–180 $q_u$  veya 50–150 $q_u$  aralıklarıyla uyumludur. Bu durum, C zemininin mineralojik özellikleri ve kullanılan bağlayıcının kimyasal bileşimiyle yakından ilişkilidir. Zemindeki ince fraksiyonların yüksek su tutma kapasitesi ve belirli miktardaki kil içeriği, uçucu külün CaO oranı ile birleşerek C–S–H ve C–A–H jel oluşumunu hızlandırmış, boşlukları doldurmuş ve matrisin sürekliliğini artırarak rijitliği yükseltmiştir.

Ayrıca, bağlayıcı oranının artmasıyla birlikte hem  $q_u$  hem de  $E_{50}$  değerlerinde belirgin artışlar meydana gelmiş; kuru birim hacim ağırlığının yükselmesi ve boşluk oranının azalması sonucu elastisite modülü değerleri literatürdeki ortalama değerlerin üzerine çıkmıştır. Yüksek  $a_w$  koşullarında suyun reaktif fazların ilerlemesine olanak tanınması, rijitlik artışını desteklemiş; özellikle  $a_w = \%20$  ve  $\%30$  serilerinde doğrusal artış eğilimi daha belirgin şekilde gözlenmiştir.

Sonuç olarak, C zemini için elde edilen değerler, A ve B zeminlerinde olduğu gibi çoğunlukla 60–130 $q_u$  bandında toplanmış olup, 28 günlük kür koşullarında  $E_{50} \approx 100q_u$  değerinin güvenli ve temsil edici bir tasarım parametresi olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.



Şekil 5.34. C zeminini için %100 UK katkılı numunelerin 28 günlük  $E_{50}$  değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b)  $q_u$ - $E_{50}$  ilişkisi

A, B ve C zeminlerinde %100 UK katkılı numunelerin 28 günlük deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde elastisite modülü değerlerinin genel olarak  $60-130q_u$  bandında toplandığı, ancak zeminlerin mineralojik bileşimi ve ince fraksiyon miktarına bağlı olarak farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir. A zemininde daha kumlu bir yapının hâkim olması nedeniyle değerler bu bandın içinde daha homojen dağılmış ve rijitlik artışları esas olarak bağlayıcı oranındaki yükselmelerden kaynaklanmıştır. B zemininde yaklaşık %15 kil içeriğinin bulunması sayesinde özgül yüzey alanı ve su tutma kapasitesi artmış, bu durum bağlayıcı reaksiyonlarını hızlandırarak daha etkin bir jel oluşumu sağlamış ve sonuçların biraz daha geniş bir aralıkta ( $45-135q_u$ ) dağılmasına neden

olmuştur. C zemininde ise kil oranının ve mineralojik özelliklerin daha belirgin olması nedeniyle özellikle orta bağlayıcı oranlarında rijitlik artışı daha güçlü gözlenmiş, bazı değerler üst sınıra yaklaşarak  $140q_u$  seviyelerine ulaşmıştır. Üç zemin için yapılan regresyon analizleri ( $R^2 \approx 0,89-0,97$ )  $E_{50}$  ile  $q_u$  arasında güçlü ve doğrusal bir ilişki bulunduğunu ortaya koyarken, elde edilen değerlerin literatürde sıkça rapor edilen  $25-70q_u$  aralığından yüksek fakat  $35-180q_u$  ve  $50-150q_u$  aralıklarıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, A zemininde artışlar daha çok bağlayıcı dozajıyla açıklanabilirken, B zemininde kil oranının etkisi belirleyici olmuş, C zemininde ise mineralojik yapı ve su tutma kapasitesi sayesinde rijitlik gelişimi daha da güçlenmiş, bu nedenle üç zemin için de 28 günlük kür koşullarında  $E_{50} \approx 100q_u$  değerinin güvenli ve temsil edici bir tasarım parametresi olarak önerilebileceği söylenebilir.

### 5.3.2. Uçucu kül ve kırmızı çamur enjeksiyonuyla iyileştirme

A zemininde KÇ + UK katkılı numunelerin 28 günlük deney sonuçları Şekil 5.35'te verilmiştir. Şekil 5.35(a)'da görülen regresyon eğrileri ( $R^2 = 0,96-0,99$ ), elastisite modülü ( $E_{50}$ ) ile tek eksenli basınç dayanımı ( $q_u$ ) arasında oldukça güçlü bir doğrusal ilişki bulunduğunu göstermektedir. Grafik üzerindeki renkli semboller farklı karışım oranlarını temsil etmekte olup, aw10 serilerinde (örneğin aw10-KÇ10, aw10-KÇ20, aw10-KÇ30 ve aw10-KÇ40) verilerin düşük  $q_u$  değerlerinde daha sıkı bir dağılım sergilediği, buna karşılık aw20 serilerinde (aw20-KÇ10, aw20-KÇ20 vb.) dayanımın artmasıyla birlikte  $E_{50}$  değerlerinin daha geniş bir aralığa yayıldığı görülmektedir.

Eğimlerin 51-141 arasında değişmesi, KÇ ve UK'nin birlikte kullanıldığında zemin rijitliğini belirgin şekilde artırdığını göstermektedir. Özellikle aw10-KÇ10 karışımında (mavi elmas işaretleri) elde edilen  $R^2 = 0,9994$  değeri, seriler arasındaki en yüksek korelasyonu yansıtarak katkı malzemelerinin homojen bir etki oluşturduğunu göstermiştir. Benzer biçimde, aw10-KÇ40 karışımında gözlenen dik eğim ( $\sim 136q_u$ ) yüksek bağlayıcı dozajının elastisite modülüne doğrudan katkısını kanıtlamaktadır.

Şekil 5.35(b)'de yer alan karşılaştırma sınırları ( $E_{50} = 50q_u$  ve  $E_{50} = 130q_u$ ) dikkate alındığında, tüm verilerin bu bandın içinde kaldığı, ancak özellikle aw20-KÇ20 ve aw20-KÇ30 serilerinin üst sınıra yakınsadığı görülmektedir. Bu durum, yüksek su muhtevasının bağlayıcı reaksiyonlarının ilerlemesine olanak tanıyarak rijitliği artırdığını göstermektedir.

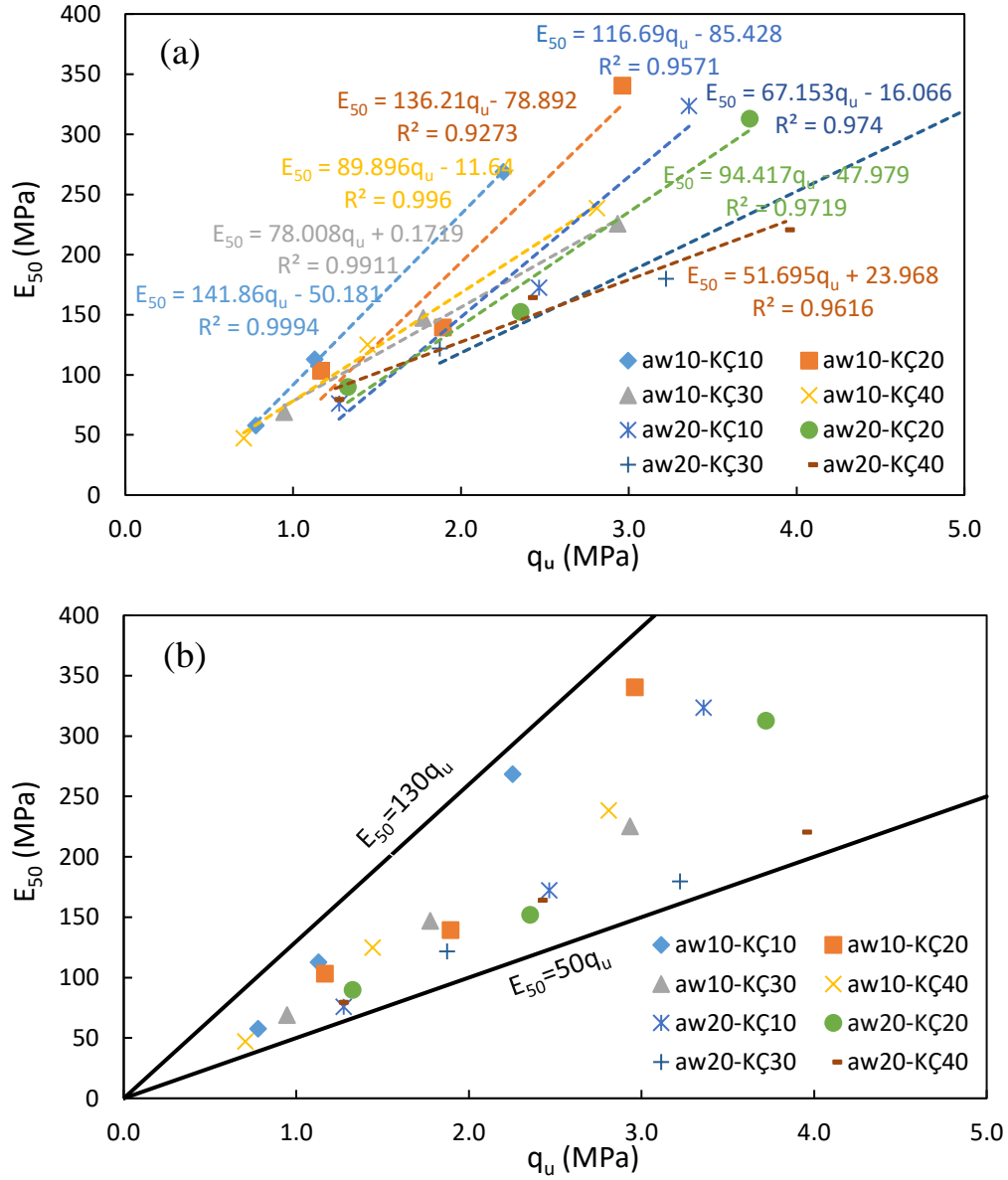
Elde edilen değerler, literatürde rapor edilen  $25-70q_u$  aralığından belirgin şekilde daha yüksek olmakla birlikte (Baker, 1981; Bruce, 1986; Terashi, 1997), daha geniş aralıklar veren çalışmalarla uyumludur (Federal Highway Administration, 2013a;

Kitazume vd., 2013b; Topolnicki, 2004b). Sayısal olarak karşılaştırıldığında, bu çalışmadaki  $E_{50}/q_u \approx 50-130$  oranı, literatürdeki alt bant değerlerinin yaklaşık iki katına çıkmakta, ancak geniş aralıklı saha gözlemleriyle örtüşmektedir. Özellikle iyileştirilmiş kil zeminlerde rapor edilen ortalama  $\sim 100q_u$  değerleriyle benzer sonuçlar elde edilmiştir (Kitazume ve Terashi, 2013).

Bu farklılığın temel nedeni, kırmızı çamurun (KÇ) yüksek  $Fe_2O_3$  ve  $Al_2O_3$  içeriğinin uçucu kül (UK) ile CaO kaynaklı puzolanik reaksiyonları desteklemesidir. Bu bileşimin etkisiyle C-S-H, C-A-H ve C-F-H jel ürünleri daha hızlı ve yoğun şekilde oluşmuş, zemin taneleri arasındaki boşlukları doldurarak matrisin sürekliliğini güçlendirmiştir. Ayrıca bağlayıcı oranının artmasıyla kuru birim hacim ağırlığının yükselmesi ve boşluk oranının azalması, rijitlik değerlerini literatürün üst sınırlarına taşımıştır.

Özellikle  $aw = \%20-\%30$  seviyelerinde yeterli suyun bulunması, KÇ'nin yüksek özgül yüzey alanı sayesinde bağlayıcı reaksiyonlarının daha etkin ilerlemesini sağlamış ve rijitlik gelişimini hızlandırmıştır. Böylece Şekil 5.35'teki veriler, literatürdeki saha değerleriyle tutarlı sonuçlar sunmaktadır (Federal Highway Administration, 2013a; Kitazume vd., 2013b; Topolnicki, 2004b).

Sonuç olarak, bu çalışmada A zemini için KÇ + UK katkısıyla elde edilen  $E_{50}$  değerlerinin literatürde verilen alt sınırların üzerinde yer alması; katkı malzemelerinin sinerjik etkisi, uygun karışım oranları ve yeterli su koşullarının birleşik sonucu olarak değerlendirilmekte olup, 28 günlük kür sonunda  $E_{50} \approx 100q_u$  değerinin güvenilir ve temsil edici bir tasarım parametresi olduğu sonucuna varılmıştır.

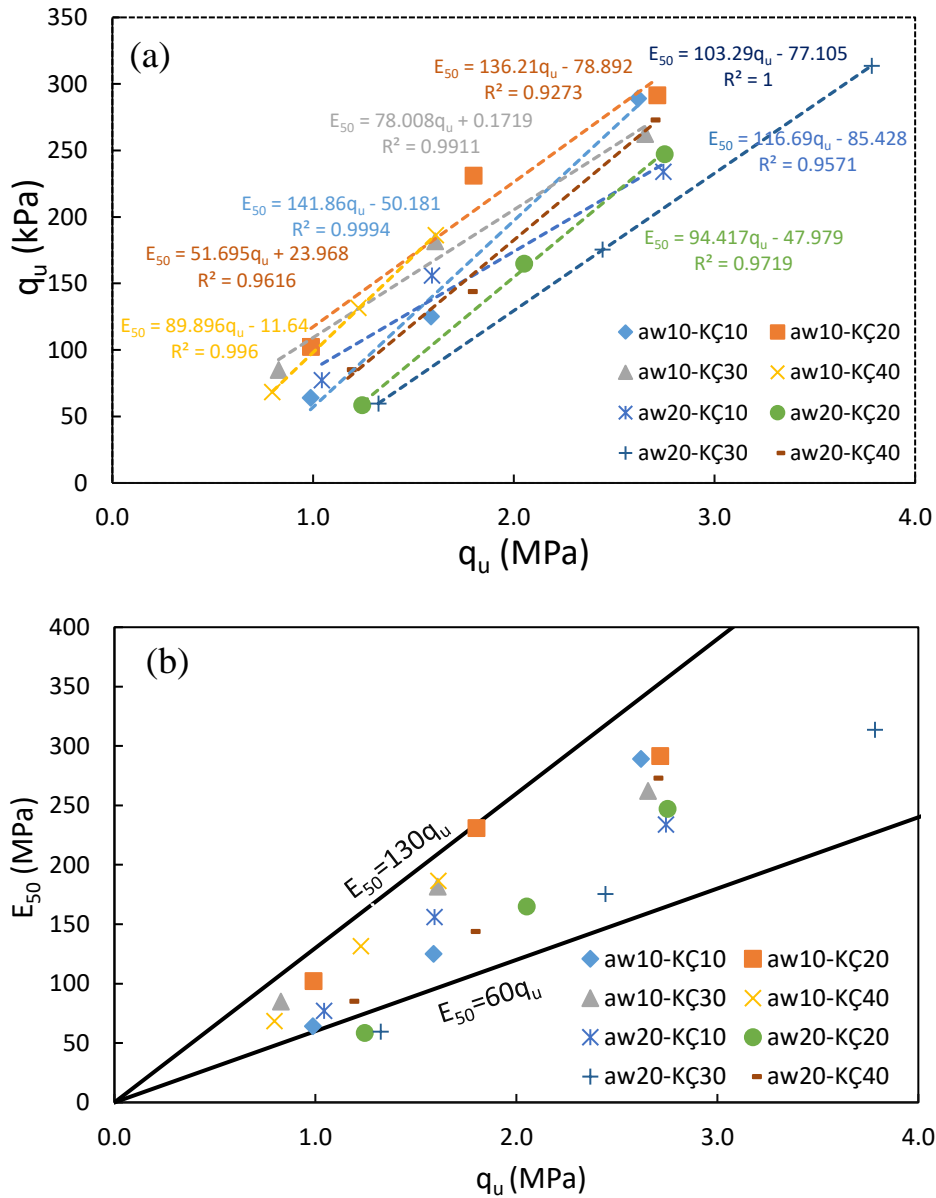


Şekil 5.35. A zemin için KÇ + UK katkılı numunelerin 28 günlük  $E_{50}$  değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b)  $q_u$ - $E_{50}$  ilişkisi

B zemininde KÇ + UK katkılı numunelerin 28 günlük deney sonuçları Şekil 5.36'da verilmiştir. Şekil 5.36(a)'da yer alan regresyon analizleri ( $R^2 = 0,96-1,00$ ), elastisite modülü ( $E_{50}$ ) ile tek eksenli basınç dayanımı ( $q_u$ ) arasında oldukça güçlü ve doğrusal bir ilişki bulunduğunu göstermektedir. Grafik üzerindeki farklı renk ve semboller karışım oranlarını temsil etmekte olup, aw10 serilerinde (örneğin aw10-KÇ10, aw10-KÇ20, aw10-KÇ30, aw10-KÇ40) verilerin daha düşük  $q_u$  değerlerinde yoğunlaştığı, buna karşın aw20 serilerinde (aw20-KÇ10, aw20-KÇ20, aw20-KÇ30, aw20-KÇ40) dayanımın artmasıyla  $E_{50}$  değerlerinin daha geniş bir aralıkta dağıldığı gözlenmiştir.

Eğimlerin 52–116 arasında değişmesi, katkı oranlarının rijitlik gelişiminde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle aw10–KÇ10 karışımında (mavi elmas işaretleri) elde edilen  $R^2 \approx 0,9994$  değeri, verilerin neredeyse tam bir doğrusal uyum sergilediğini ortaya koyarken, aw20–KÇ20 karışımında gözlenen yüksek eğim ( $\sim 103q_u$ ) bağlayıcı dozajının rijitlik artışı üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir.

Şekil 5.36(b)'de yer alan sınır çizgileri ( $E_{50} = 60q_u$  ve  $E_{50} = 130q_u$ ) incelendiğinde, verilerin büyük çoğunluğunun bu bandın içinde yer aldığı, yalnızca birkaç noktanın üst sınıra yakınsadığı görülmektedir. Bu durum, özellikle yüksek su muhtevasına sahip numunelerde (aw20 serileri) bağlayıcı reaksiyonlarının daha hızlı ilerlediğini ve elastisite modülünün artış eğiliminde olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.36. B zemini için KÇ + UK katkılı numunelerin 28 günlük  $E_{50}$  değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b)  $q_u$ - $E_{50}$  ilişkisi

B zemininde elde edilen değerler, literatürde verilen 25–70 $q_u$  aralığından belirgin şekilde daha yüksek bulunmuştur (Baker, 1981; Bruce, 1986; Terashi, 1997). Ancak sonuçlar, daha geniş aralıklar rapor eden çalışmalarla uyumludur (Federal Highway Administration, 2013a; Kitazume vd., 2013b; Topolnicki, 2004b). Bu eğilim, A zeminiyle benzer olmakla birlikte, B zemininin yaklaşık %15 kil içeriği nedeniyle daha geniş bir dağılım göstermiştir. Kil minerallerinin yüksek özgül yüzey alanı ve su tutma kapasitesi, bağlayıcı reaksiyonlarının daha etkin gerçekleşmesine olanak sağlamış; C–S–H, C–A–H ve C–F–H jel ürünlerinin oluşumunu hızlandırarak zemin matrisinin sürekliliğini güçlendirmiştir.

Sonuç olarak, B zemini için KÇ + UK katkılı karışımlarda 28 günlük kür koşullarında  $E_{50}$  değerlerinin güvenle 60–130 $q_u$  bandı içinde temsil edilebileceği ve ortalama ~100 $q_u$  değerinin tasarım parametresi olarak önerilebileceği söylenebilir.

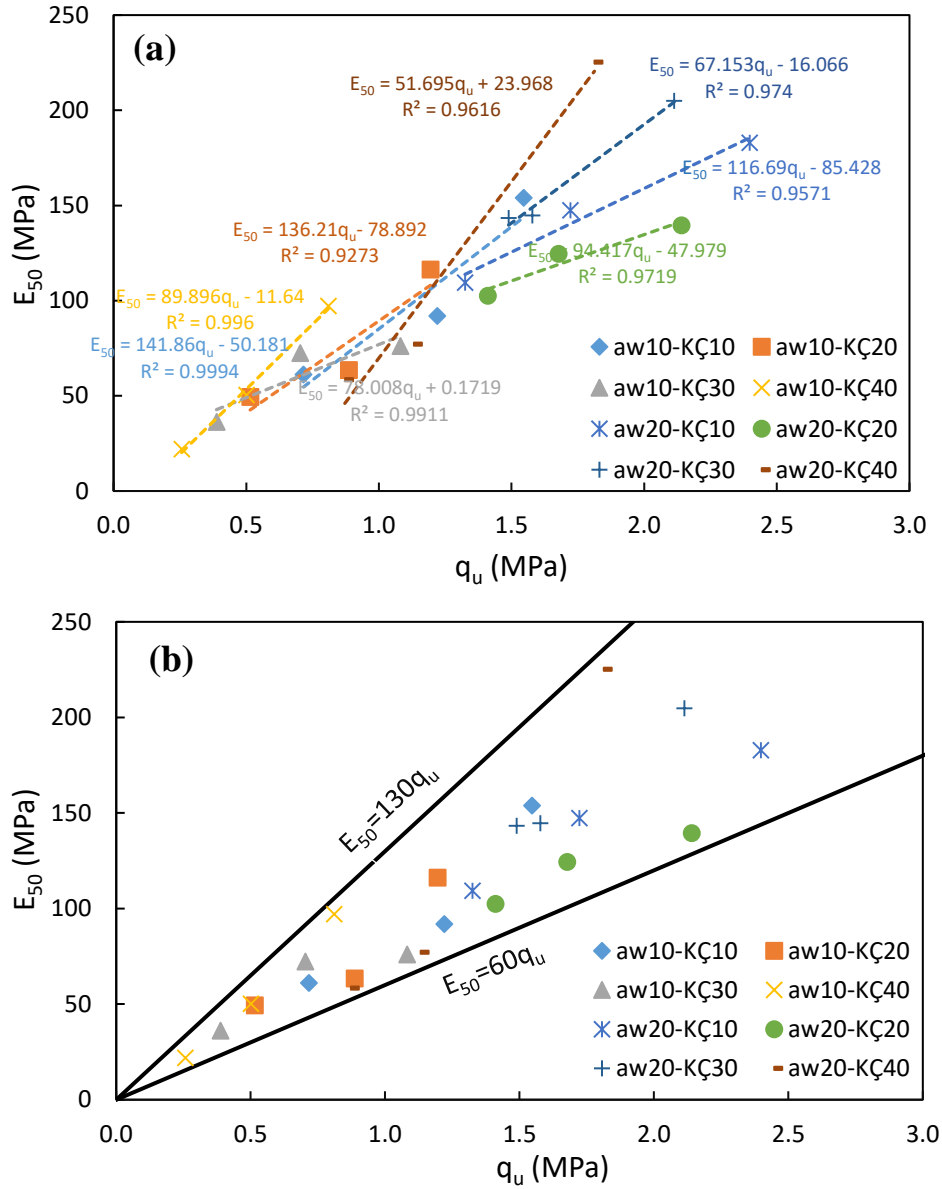
C zemininde KÇ + UK katkılı numunelerin 28 günlük deney sonuçları Şekil 5.37’de sunulmuştur. Şekil 5.37(a)’da yer alan regresyon analizleri ( $R^2 \approx 0,96-0,97$ ), elastisite modülü ( $E_{50}$ ) ile tek eksenli basınç dayanımı ( $q_u$ ) arasında güçlü bir doğrusal ilişki bulunduğunu göstermektedir. Grafik üzerinde görülen farklı sembol ve renkler, karışım oranlarını temsil etmektedir. aw20 serilerinde (örneğin aw20–KÇ10, aw20–KÇ20, aw20–KÇ30 ve aw20–KÇ40) verilerin  $q_u$  artışıyla birlikte düzenli olarak yükseldiği, buna karşılık düşük bağlayıcı oranlarında (örneğin aw10–KÇ10, aw10–KÇ20 vb.) eğimlerin daha sınırlı kaldığı gözlenmiştir.

Eğimlerin 51–117 arasında değişmesi, katkı oranlarının rijitlik artışındaki belirleyici rolünü açık biçimde ortaya koymaktadır. Özellikle aw20–KÇ20 karışımında (yeşil daire sembolleri) elde edilen  $R^2 \approx 0,972$  değeri, verilerin güçlü bir korelasyon içinde olduğunu ve homojen bir reaksiyon gelişimi sergilediğini göstermektedir. Ayrıca aw20–KÇ30 karışımında gözlenen daha dik eğim (~117 $q_u$ ), yüksek bağlayıcı dozajının elastisite modülüne doğrudan katkısını yansıtmaktadır.

Şekil 5.37(b)’de gösterilen karşılaştırma sınırları ( $E_{50} = 60q_u$  ve  $E_{50} = 130q_u$ ) dikkate alındığında, verilerin büyük kısmının bu bandın içinde kaldığı, yalnızca birkaç noktanın üst sınıra yakınsadığı görülmektedir. Bu durum, yüksek su içeriğine sahip numunelerde bağlayıcı reaksiyonlarının daha etkin ilerlediğini ve rijitlikte hızlı bir artış sağlandığını göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, literatürde rapor edilen 25–70 $q_u$  aralığından belirgin şekilde daha yüksek bulunmuştur (Baker, 1981; Bruce, 1986; Terashi, 1997). Ancak, daha geniş aralıklar rapor eden çalışmalarla uyum içindedir (Federal Highway Administration, 2013a;

Kitazume vd., 2013b; Topolnicki, 2004b). Özellikle FHWA ve Kitazume & Terashi (2013) tarafından bildirilen  $35-180q_u$  ve  $50-150q_u$  sınırları, bu çalışmadaki bulgularla tam bir paralellik göstermektedir.



**Şekil 5.37.** C zeminini için KÇ + UK katkılı numunelerin 28 günlük  $E_{50}$  değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b)  $q_u-E_{50}$  ilişkisi

C zemininde ince fraksiyonların oranının ve mineralojik çeşitliliğin diğer zeminlere göre daha yüksek olması, özgül yüzey alanını ve su tutma kapasitesini artırmıştır. Bu özellik, uçucu kül ile kırmızı çamur arasındaki sinerjiyi güçlendirerek CaO temelli puzolanik reaksiyonların daha etkin gerçekleşmesine olanak tanımış ve sonuçta C-S-H, C-A-H ve C-F-H jel ürünlerinin daha yoğun şekilde oluşmasını sağlamıştır. Bu nedenle

özellikle orta bağlayıcı oranlarında (örneğin KÇ20–KÇ30) rijitlik artışı daha belirgin hale gelmiş, sonuçlar literatürde bildirilen üst sınırlara yaklaşmıştır.

Sonuç olarak, C zemini için KÇ + UK katkısıyla elde edilen değerlerin büyük çoğunluğu 60–130 $q_u$  aralığında yoğunlaşmış olup, ortalama  $\sim 100q_u$  seviyesi 28 günlük kür koşullarında güvenilir ve temsil edici bir tasarım parametresi olarak önerilebilir.

A, B ve C zeminlerinde KÇ + UK katkılı numunelerin 28 günlük sonuçları karşılaştırıldığında elastisite modülü değerlerinin tüm zeminlerde genel olarak 60–130 $q_u$  bandında yoğunlaştığı, ancak zeminlerin mineralojik özelliklerine bağlı olarak bazı farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir. A zemininde artışlar daha çok bağlayıcı oranıyla açıklanırken, B zemininde yaklaşık %15 kil içeriği bağlayıcı reaksiyonlarını hızlandırarak sonuçların daha geniş aralıkta dağılmasına yol açmış, C zemininde ise ince fraksiyon ve su tutma kapasitesinin yüksekliği katkıların sinerjik etkisini artırarak rijitlik değerlerini literatürdeki üst sınırlara yaklaştırmıştır. Buna göre üç zemin için de KÇ + UK katkısı altında 28 günlük kür koşullarında  $E_{50} \approx 100q_u$  değeri güvenilir ve temsil edici bir tasarım parametresi olarak önerilebilir.

### 5.3.3. Uçucu kül ve nano silika enjeksiyonuyla iyileştirme

A zemininde NS + UK katkılı numunelerin 28 günlük deney sonuçları Şekil 5.38'de sunulmuştur. Şekil 5.38(a)'da yer alan regresyon analizleri ( $R^2 = 0,87-0,97$ ), elastisite modülü ( $E_{50}$ ) ile tek eksenli basınç dayanımı ( $q_u$ ) arasında güçlü bir doğrusal ilişki bulunduğunu göstermektedir. Grafik üzerindeki farklı renkler ve semboller, nano silika (NS) ve uçucu kül (UK) katkı oranlarının değişimini temsil etmektedir. aw10 serilerinde (örneğin aw10–NS:0,5, aw10–NS:1, aw10–NS:1,5, aw10–NS:2) verilerin düşük  $q_u$  değerlerinde yoğunlaştığı ve rijitlik eğrilerinin birbirine yakın seyrettiği, buna karşılık aw20 serilerinde (aw20–NS:0,5, aw20–NS:1, aw20–NS:1,5, aw20–NS:2)  $E_{50}$  değerlerinin daha yüksek seviyelere ulaştığı ve veri dağılımının daha geniş bir bant oluşturduğu görülmektedir.

Eğimlerin 51–117 arasında değişmesi, katkı oranlarının rijitlik gelişimi üzerindeki belirleyici etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle aw10–NS:1 karışımında (turuncu kare semboller) elde edilen eğim ( $\sim 136q_u$ ) ve  $R^2 = 0,93$  değeri, orta düzeyde NS katkısının optimum etki yarattığını göstermektedir. Buna karşılık aw20–NS:2 karışımında (yeşil daire sembolleri) gözlenen daha düşük eğim ( $\sim 94q_u$ ) ve artan veri saçılımı, yüksek nano silika

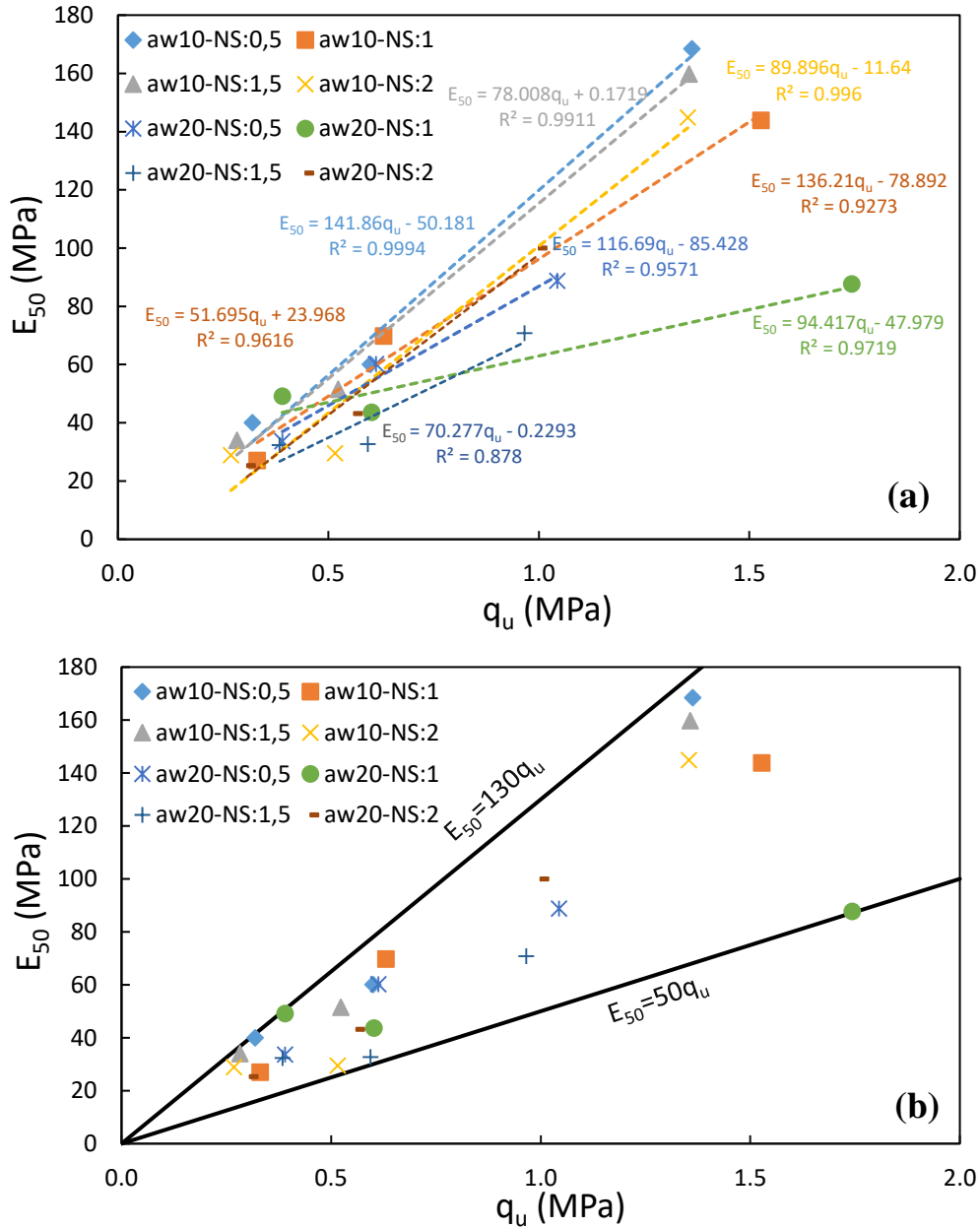
dozajının aglomerasyon eğilimi ve suyun viskozitesinin artması nedeniyle homojen reaksiyon oluşumunu sınırladığını düşündürmektedir.

Şekil 5.38(b)'deki sınır çizgileri ( $E_{50} = 50q_u$  ve  $E_{50} = 130q_u$ ) incelendiğinde, sonuçların büyük kısmının bu bandın içinde kaldığı ve yalnızca bazı aw20 serilerinin üst sınıra yakınsadığı görülmektedir. Bu durum, yüksek su muhtevasının (aw = %20) bağlayıcı reaksiyonlarını destekleyerek nano silika ve uçucu kül arasındaki sinerjiyi güçlendirdiğini göstermektedir.

Elde edilen değerler, literatürde iyileştirilmiş zeminler için yaygın olarak bildirilen 25–70 $q_u$  aralığından daha yüksek bulunmuştur (Baker, 1981; Bruce, 1986; Terashi, 1997). Ancak, daha geniş sınırlar rapor eden çalışmalarla uyumludur (Federal Highway Administration, 2013a; Topolnicki, 2004b). Nano silikanın yüksek özgül yüzey alanı ve kimyasal reaktivitesi sayesinde  $Ca(OH)_2$  ile hızla reaksiyona girerek yoğun C–S–H jel oluşumuna yol açması, uçucu külün puzolanik etkisiyle birleştiğinde matrisin sürekliliğini ve dolayısıyla elastisite modülünü önemli ölçüde artırmıştır.

Özellikle düşük NS dozajlarında (%0,5–1) belirgin iyileşmeler gözlenmiş, ancak yüksek dozajlarda (%1,5–2) aglomerasyon eğilimi ve optimum su içeriğinin aşılması nedeniyle rijitlik artışı sınırlı kalmıştır. Ayrıca aw = %20 koşullarında reaksiyonların ilerlemesi için yeterli suyun bulunması katkıların sinerjik etkisini güçlendirmiş, buna karşılık düşük aw değerlerinde kısmi reaksiyon sınırlamaları ortaya çıkmıştır.

Sonuç olarak, A zemininde NS + UK katkısıyla elde edilen elastisite modülü değerlerinin büyük çoğunluğu 60–120 $q_u$  bandında yoğunlaşmış olup, ortalama ~90–100 $q_u$  seviyesinin 28 günlük kür koşullarında güvenilir bir tasarım parametresi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.38. A zemin için NS + UK katkılı numunelerin 28 günlük  $E_{50}$  değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b)  $q_u$ - $E_{50}$  ilişkisi

C zemininde NS + UK katkılı numunelerin 28 günlük deney sonuçları Şekil 5.39'da verilmiştir. Şekil 5.39(a)'da yer alan regresyon analizleri ( $R^2 = 0,87-0,97$ ), elastisite modülü ( $E_{50}$ ) ile tek eksenli basınç dayanımı ( $q_u$ ) arasında güçlü bir doğrusal ilişki bulunduğunu göstermektedir. Grafik üzerindeki farklı renk ve semboller, nano silika (NS) ve uçucu kül (UK) oranlarını temsil etmektedir.  $a_w$  %10 serilerinde (örneğin aw10-NS:0,5, aw10-NS:1, aw10-NS:1,5, aw10-NS:2) veriler daha düşük  $q_u$  değerlerinde kümelenmiş olup, eğrilerin birbirine yakın ve paralel seyrettiği görülmektedir. Buna karşılık aw20 serilerinde (aw20-NS:0,5, aw20-NS:1, aw20-NS:1,5, aw20-NS:2) dayanımın artmasıyla

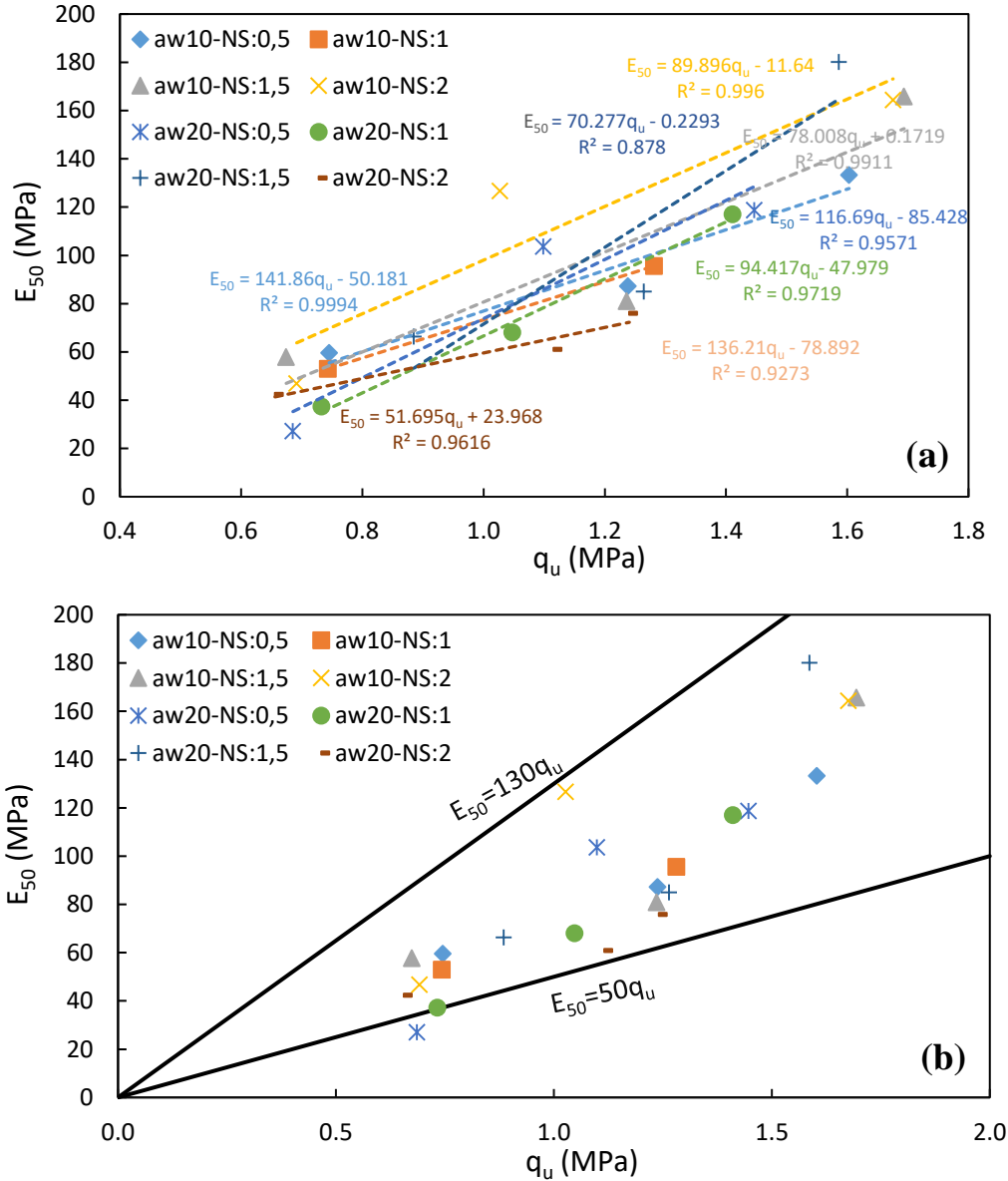
birlikte  $E_{50}$  değerleri belirgin biçimde yükselmiş, veri noktaları daha geniş bir aralığa yayılmıştır.

Eğimlerin 52–117 arasında değişmesi, katkı oranlarının rijitlik üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle  $aw_{20}$ –NS:1,5 ve  $aw_{20}$ –NS:2 karışımlarında (yeşil ve kahverengi semboller) eğimlerin diğer karışımlara göre daha düşük olmasına rağmen,  $R^2$  değerlerinin 0,95'in üzerinde olması, zemin davranışında tutarlı ve öngörülebilir bir iyileşmeyi işaret etmektedir. Buna karşılık  $aw_{10}$ –NS:1 karışımında (turuncu kare semboller) gözlenen yüksek eğim ( $\sim 136q_u$ ) ve  $R^2 \approx 0,93$  değeri, optimum katkı oranında elde edilen en etkili rijitlik artışını temsil etmektedir.

Şekil 5.39(b)'deki sınır çizgileri ( $E_{50} = 50q_u$  ve  $E_{50} = 130q_u$ ) dikkate alındığında, numunelerin büyük çoğunluğunun bu bandın içinde yer aldığı, yalnızca birkaç verinin üst sınıra yakınsadığı görülmektedir. Bu durum, özellikle yüksek su muhtevasına sahip numunelerde ( $aw = \%20$ ) bağlayıcı reaksiyonlarının daha etkin ilerlediğini ve elastisite modülünde belirgin artış sağlandığını göstermektedir.

Elde edilen değerler, literatürde iyileştirilmiş zeminler için bildirilen 25–70 $q_u$  aralığından daha yüksek bulunmuştur (Baker, 1981; Bruce, 1986; Terashi, 1997). Ancak, bu değerler daha geniş sınırlar rapor eden çalışmalara paralellik göstermektedir (Kitazume vd., 2013b; Topolnicki, 2004b). C zemininde ince fraksiyon miktarının yüksekliği, mineralojik çeşitliliğin fazla olması ve özgül yüzey alanının genişliği, nano silikanın reaktif doğasıyla birleşerek bağlayıcı etkilerin daha güçlü bir şekilde gerçekleşmesini sağlamıştır. Nano silikanın  $Ca(OH)_2$  ile hızla reaksiyona girmesi sonucu yoğun C–S–H jel oluşumu gerçekleşmiş, uçucu külün puzolanik etkisiyle birleşerek matrisin sürekliliğini artırmış ve rijitliği önemli ölçüde geliştirmiştir.

Bu sinerjik etki sayesinde özellikle orta katkı oranlarında (NS:1–1,5) elde edilen elastisite modülü değerleri literatürde rapor edilen üst sınır değerlerine yaklaşmıştır. Dolayısıyla, C zemininde NS + UK katkısıyla elde edilen elastisite modülü değerlerinin çoğunlukla 60–120 $q_u$  aralığında yoğunlaştığı ve ortalama  $\sim 90$ –100 $q_u$  seviyesinin 28 günlük kür koşullarında güvenilir bir tasarım parametresi olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

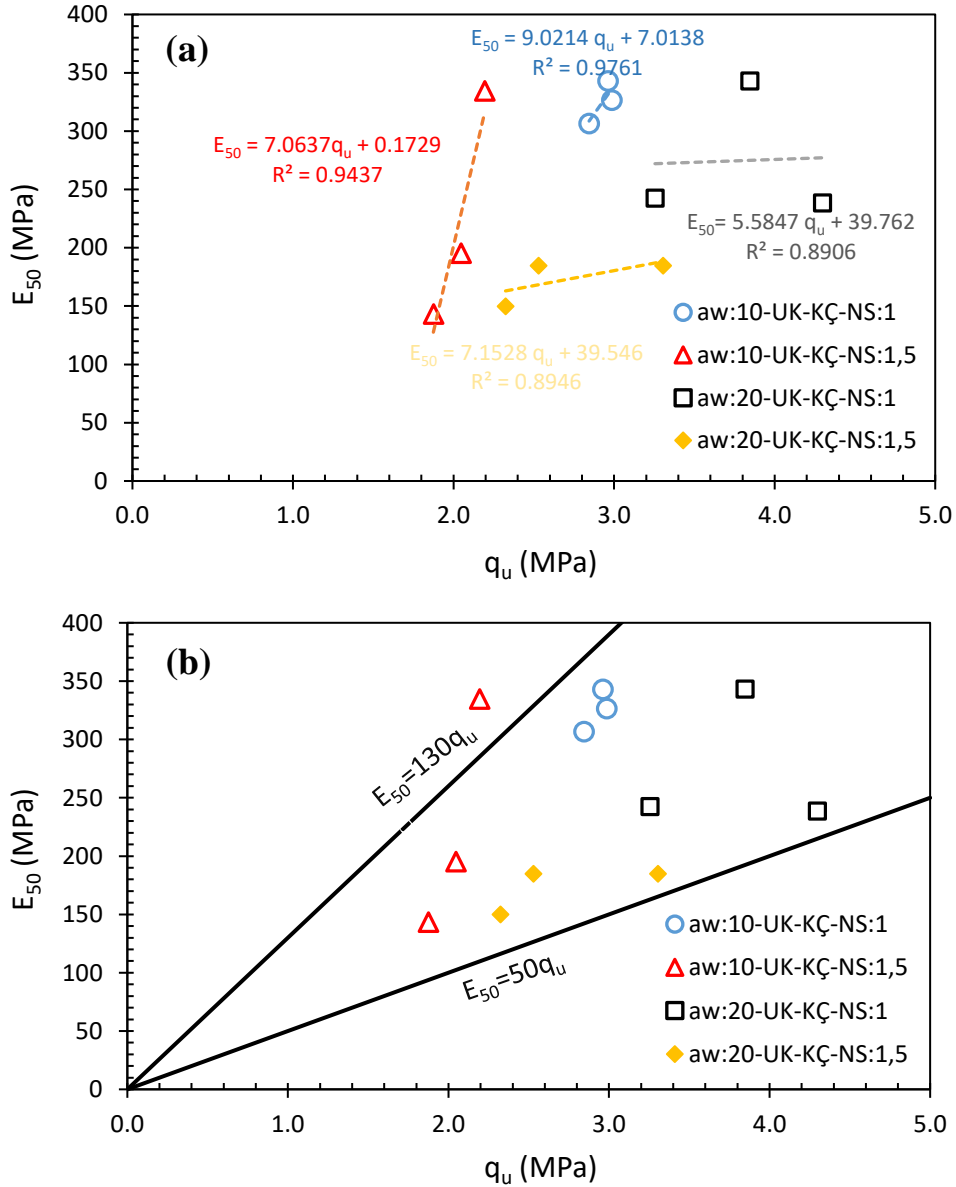


Şekil 5.39. C zemin için NS + UK katkılı numunelerin 28 günlük  $E_{50}$  değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b)  $q_u$ - $E_{50}$  ilişkisi

### 5.3.4. Uçucu kül, kırmızı çamur ve nano silika enjeksiyonuyla iyileştirme

A zemininde UK + KÇ + NS katkılı numunelerin 28 günlük sonuçları Şekil 5.40'de verilmiştir. Şekil 5.40(a)'da görülen regresyon analizleri ( $R^2 \approx 0,89-0,97$ ) elastisite modülü ile tek eksenli basınç dayanımı arasında güçlü doğrusal bir bağıntı olduğunu göstermekte, eğimlerin 5,5–9,0 arasında değişmesi çoklu katkıların rijitlik artışında sinerjik bir etki yarattığını ortaya koymaktadır. Şekil 5.40(b)'deki sınır çizgileri ( $E_{50} = 50q_u$  ve  $E_{50} = 130q_u$ ) dikkate alındığında, verilerin büyük çoğunluğunun bu bandın içinde yer aldığı, bazı değerlerin ise üst sınıra yaklaşarak yüksek rijitlik sağladığı görülmektedir.

$q_u$  değerlerinin 2,0–4,3 MPa, buna karşılık  $E_{50}$  değerlerinin 143–343 MPa arasında değiştiği, dolayısıyla  $E_{50}/q_u$  oranının çoğunlukla 60–130 bandında yoğunlaştığı belirlenmiştir. Literatürde iyileştirilmiş zeminler için rapor edilen  $25\text{--}70q_u$  değerleriyle karşılaştırıldığında (Baker, 1981), bu çalışmada elde edilen değerlerin daha yüksek olduğu; ancak FHWA (2013,) tarafından bildirilen  $35\text{--}180q_u$  ve  $50\text{--}150q_u$  aralıklarıyla uyumlu bulunduğu görülmektedir.



Şekil 5.40. A zemin için UK + KÇ + NS katkılı numunelerin 28 günlük  $E_{50}$  değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b)  $q_u$ – $E_{50}$  ilişkisi

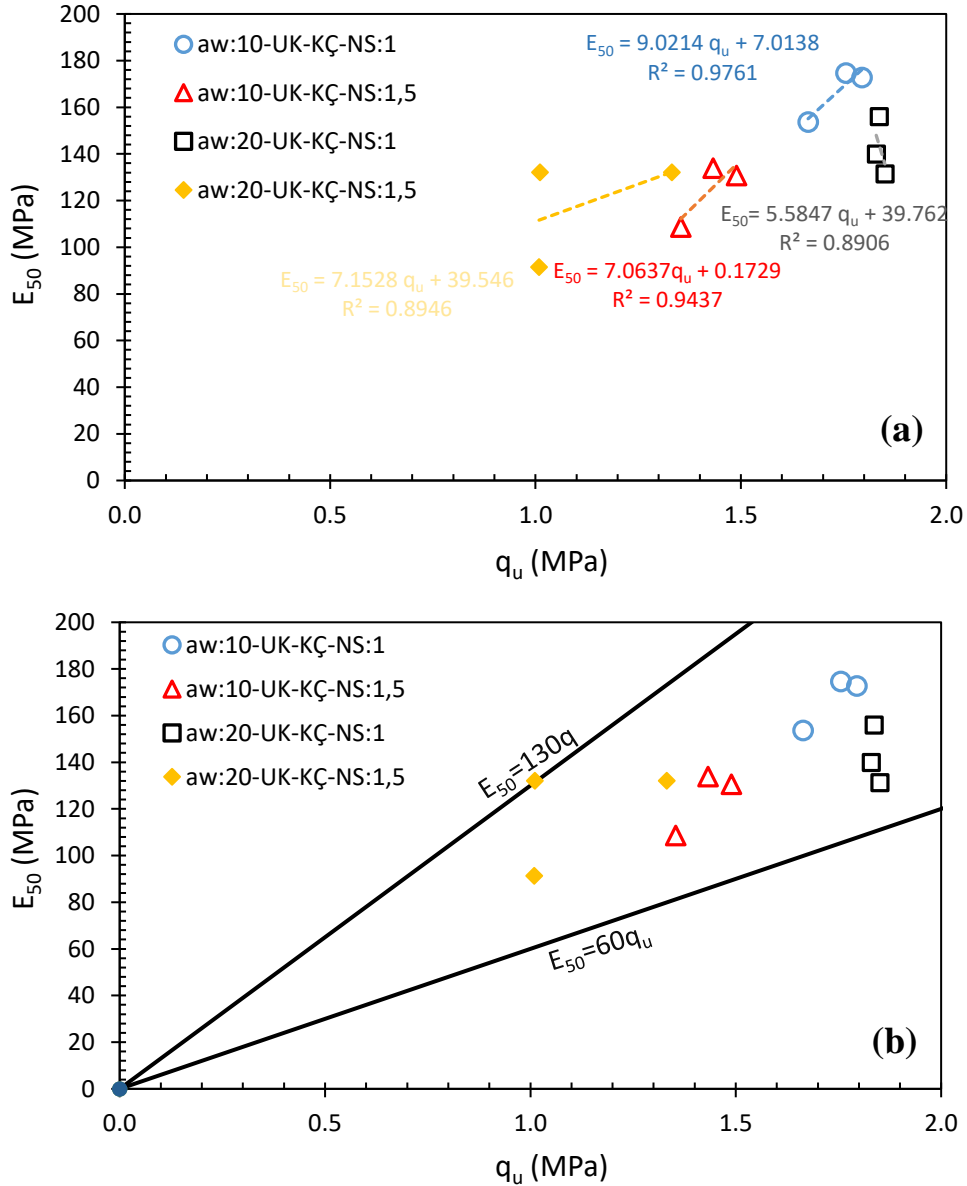
A zeminindeki bu farklılık katkıların birleşik etkisiyle açıklanabilir; uçucu külün (UK) CaO içeriği C–S–H jel oluşumunu teşvik ederken, kırmızı çamurun (KÇ)  $Fe_2O_3$  ve

$Al_2O_3$  içeriği C–A–H ve C–F–H fazlarının oluşumunu desteklemiş, nano silikanın (NS) yüksek özgül yüzey alanı ve reaktivitesi bu reaksiyonları hızlandırarak matrisin sürekliliğini güçlendirmiştir. Özellikle düşük ve orta katkı dozajlarında rijitlik artışı daha belirgin olmuş, yüksek katkı oranlarında ise aşırı ince partiküllerin aglomerasyon eğilimi ve optimum su koşullarının sınırlayıcı etkisi gözlenmiştir. Sonuç olarak, A zemini için UK + KÇ + NS katkısıyla elde edilen elastisite modülü değerlerinin 28 günlük kür koşullarında güvenle 60–130 $q_u$  bandında temsil edilebileceği ve ortalama ~100 $q_u$  seviyesinin literatürle uyumlu güvenilir bir tasarım parametresi olarak önerilebileceği sonucuna varılmıştır.

C zemininde UK + KÇ + NS katkılı numunelerin 28 günlük sonuçları Şekil 5.41’da verilmiştir. Şekil 5.41(a)’daki regresyon analizleri ( $R^2=0,89-0,97$ ) elastisite modülü ile tek eksenli basınç dayanımı arasında güçlü bir doğrusal bağıntı olduğunu göstermekte, eğimlerin 5,5–9,0 aralığında değişmesi çoklu katkıların rijitlik gelişiminde belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır. Şekil 5.41(b)’de görülen sınır çizgileri ( $E_{50}=60q_u$  ve  $E_{50}=130q_u$ ) dikkate alındığında verilerin çoğunlukla bu bandın içinde yer aldığı, özellikle düşük  $q_u$  değerlerinde bile elastisite modülünün literatürde rapor edilen minimum seviyelerin üzerinde gerçekleştiği gözlenmiştir.  $q_u$  değerlerinin 1,0–1,9 MPa,  $E_{50}$  değerlerinin ise 91–174 MPa arasında değiştiği, dolayısıyla  $E_{50}/q_u$  oranının 60–120 bandında yoğunlaştığı belirlenmiştir. Literatürde bildirilen 25–70 $q_u$  değerleriyle karşılaştırıldığında (Baker, 1981; Bruce, 1986; Terashi, 1997) bu çalışmadaki sonuçlar daha yüksek bulunmuş; ancak FHWA (2013), Kitazume ve Terashi (2013) tarafından rapor edilen 35–180 $q_u$  ve 50–150 $q_u$  aralıklarıyla uyum sağlamıştır.

Bu fark özellikle C zemininde %35 kil içeriğinin yüksek özgül yüzey alanı ve su tutma kapasitesi sayesinde bağlayıcı reaksiyonlarını daha etkin hale getirmesiyle açıklanabilir. UK’nin CaO içeriği C–S–H jel oluşumunu teşvik ederken, KÇ’nin  $Fe_2O_3$  ve  $Al_2O_3$  bileşenleri C–A–H ve C–F–H fazlarını güçlendirmiş, NS’nin nano boyutlu yüksek reaktivitesi ise bu süreçleri hızlandırarak matrisin sürekliliğini artırmıştır.

Böylece çoklu katkının sinerjik etkisiyle rijitlik değerleri literatürde rapor edilen üst bantlara yaklaşmış, 28 günlük kür koşullarında C zemini için  $E_{50} \approx 100q_u$  değerinin güvenilir ve temsil edici bir tasarım parametresi olduğu sonucuna varılmıştır.

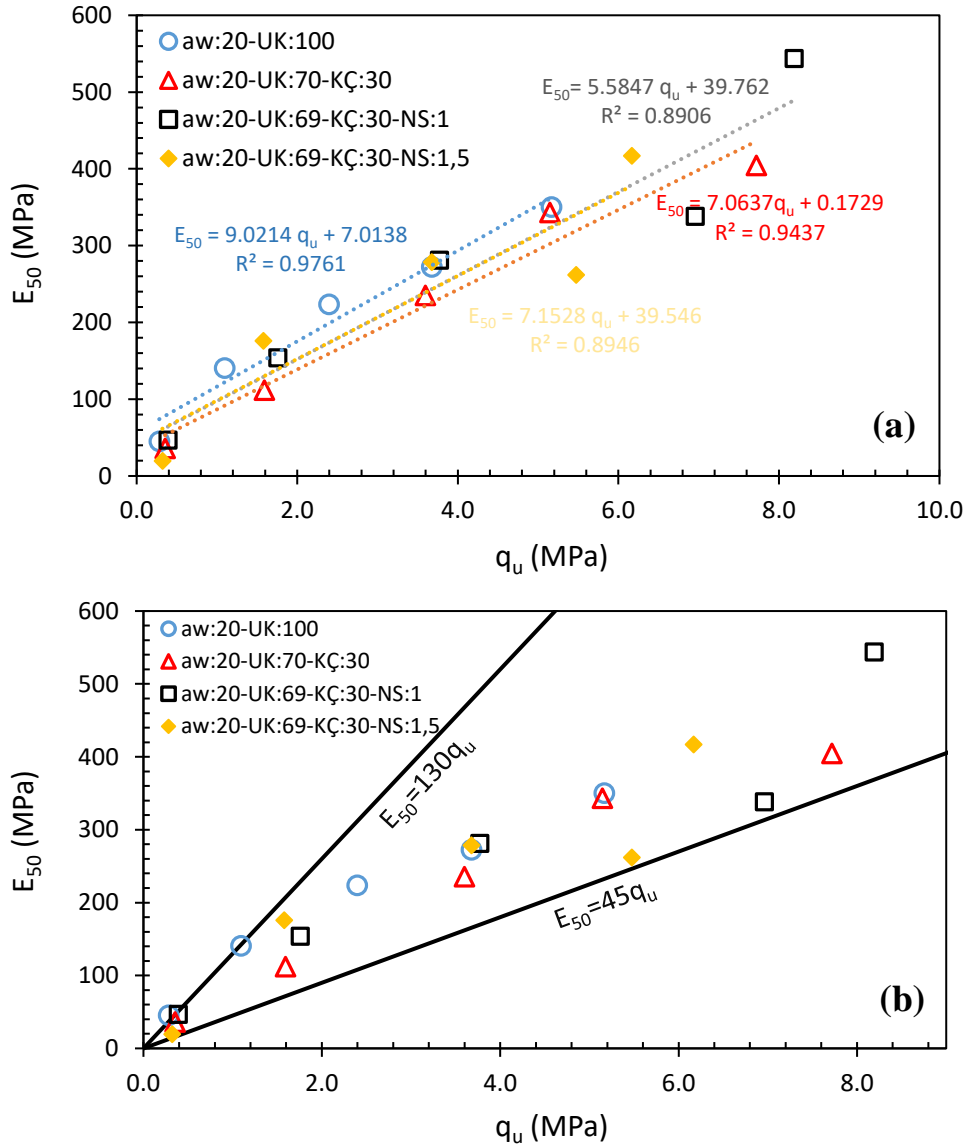


Şekil 5.41. C zemin için UK + KÇ + NS katkılı numunelerin 28 günlük  $E_{50}$  değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b)  $q_u$ - $E_{50}$  ilişkisi

### 5.3.5. Kür süresinin etkisi

A zemininde UK + KÇ + NS katkılı numunelerin farklı kür sürelerindeki (3, 7, 14, 28 ve 56 gün) sonuçları Şekil 5.42’de verilmiştir. Şekil 5.42(a)’daki regresyon analizleri ( $R^2=0,89-0,98$ ) elastisite modülü ile tek eksenli basınç dayanımı arasında güçlü bir doğrusal bağıntı olduğunu ortaya koymakta, eğimlerin 5,5–9,0 aralığında değişmesi kür süresi ilerledikçe rijitlik gelişiminin hızlandığını göstermektedir. Şekil 5.42(b)’de görülen sınır çizgileri ( $E_{50}=45q_u$  ve  $E_{50}=130q_u$ ) dikkate alındığında, 3 ve 7 günlük numunelerin alt sınıra yakın değerler ürettiği, 14 ve 28 günlük numunelerde belirgin bir artış gözlemlendiği, 56 günlük numunelerde ise elastisite modülünün üst sınıra yaklaşarak 400–550 MPa

seviyelerine ulaştığı görülmektedir. Tablo 5.30'daki veriler incelendiğinde  $q_u$  değerlerinin 0.3–8,1 MPa, buna karşılık  $E_{50}$  değerlerinin 35–543 MPa arasında değiştiği, dolayısıyla  $E_{50}/q_u$  oranının zamanla  $60q_u$ 'dan  $130q_u$  bandına doğru geliştiği belirlenmiştir. Literatürde kısa süreli kürlerde 25–70 $q_u$  aralığı yaygın olarak rapor edilmesine rağmen (Baker, 1981; Bruce, 1986; Terashi, 1997), bu çalışmada özellikle 28 ve 56 gün sonrasında elde edilen değerler daha yüksek bulunmuş ve Topolnicki tarafından bildirilen 35–180 $q_u$  ve 50–150 $q_u$  aralıklarıyla uyum göstermiştir.

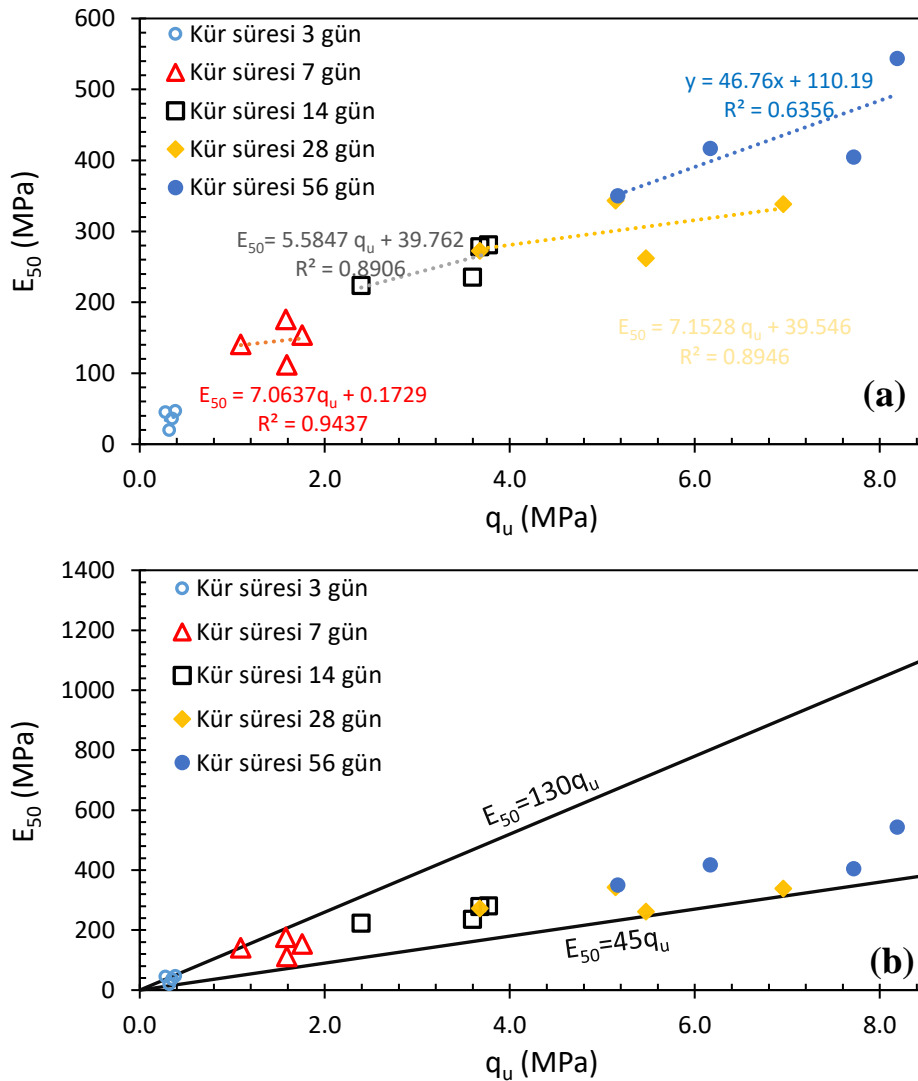


Şekil 5.42. A zemin için UK + KÇ + NS katkılı numunelerin 3, 7, 14, 28 ve 56 günlük kürlerdeki  $E_{50}$  değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b)  $q_u$ - $E_{50}$  ilişkisi

Elde edilen sonuçlar, kür süresi ilerledikçe puzolanik reaksiyonların daha etkin gerçekleşmesiyle açıklanabilir; UK'nin CaO içeriği C-S-H jel oluşumunu hızlandırırken,

KÇ'nin  $Fe_2O_3$  ve  $Al_2O_3$  bileşenleri C–A–H ve C–F–H fazlarının gelişimine katkı sağlamış, NS'nin yüksek özgül yüzey alanı reaksiyonları katalize ederek matrisin sürekliliğini güçlendirmiştir. Böylece çoklu katkının sinerjik etkisi, özellikle 56 gün sonunda, elastisite modülünü literatürdeki üst bantlara yaklaştırmıştır. Sonuç olarak, A zemininde UK + KÇ + NS katkısıyla  $E_{50}$  değerlerinin kür süresi ile sürekli arttığı ve 28 günlük ortalama  $\sim 100q_u$  seviyesinin güvenilir, 56 günlük ortalama ise  $\sim 120\text{--}130q_u$  seviyelerinin üst sınır tasarım parametresi olarak önerilebileceği belirlenmiştir.

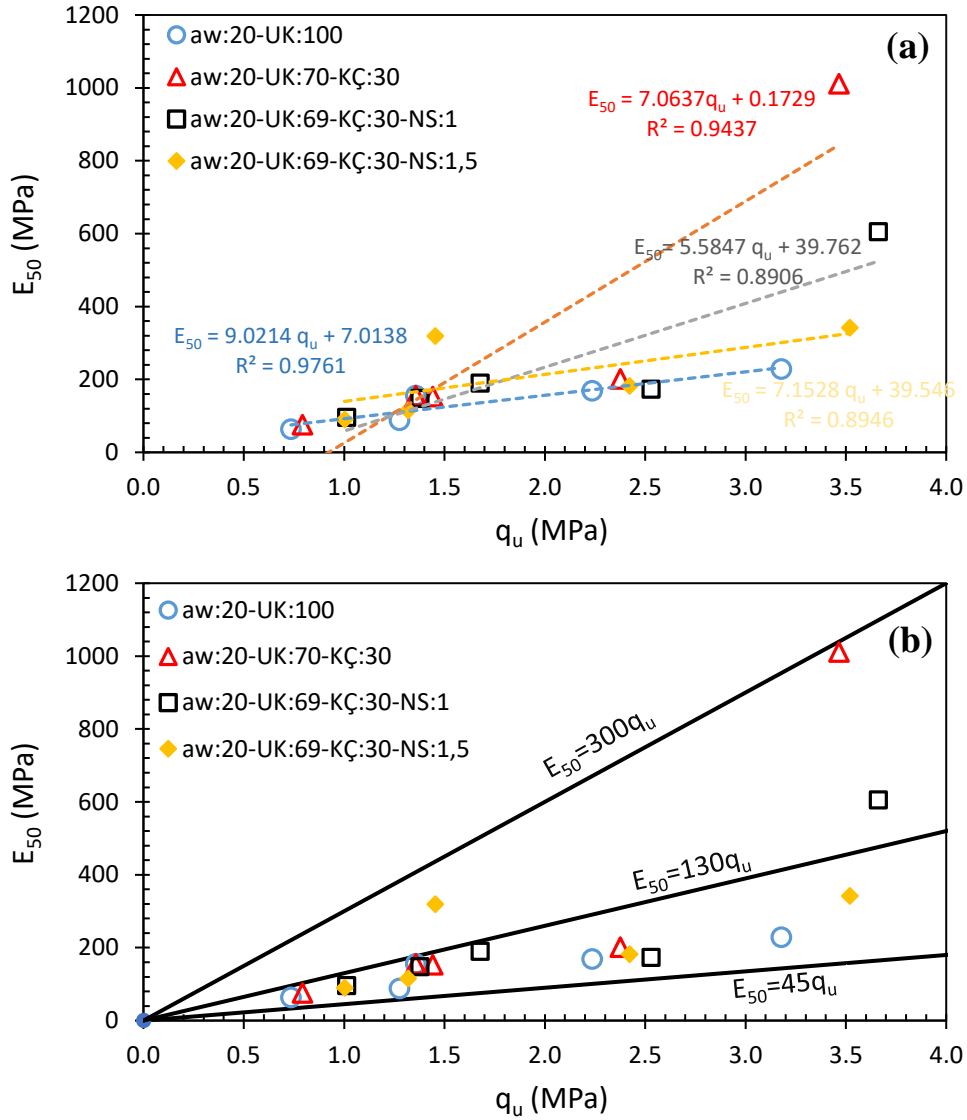
Şekil 5.42, A zemini için UK+KÇ+NS katkılı numunelere ait ve Şekil 5.43'ta sunulan bulguların aynısını yalnızca farklı bir görselleştirme düzeniyle göstermekte; burada (a) regresyon denklemleri ve (b)  $q_u$ – $E_{50}$  ilişkisi aynı eğilimleri açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 5.43. A zemin için UK + KÇ + NS katkılı numunelerin 3, 7, 14, 28 ve 56 günlük kürlerdeki  $E_{50}$  değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b)  $q_u$ – $E_{50}$  ilişkisi

C zemininde UK + KÇ + NS katkılı numunelerin farklı kür sürelerindeki (3, 7, 14, 28 ve 56 gün) sonuçları Şekil 5.44'de verilmiştir. Şekil 5.44(a)'daki regresyon analizleri ( $R^2=0,89-0,97$ ) elastisite modülü ile tek eksenli basınç dayanımı arasında güçlü bir doğrusal bağıntı bulunduğunu göstermekte, eğimlerin 5,5–9,0 aralığında değişmesi kür süresinin ilerlemesiyle rijitlik artışının belirginleştiğini ortaya koymaktadır. Şekil 5.44(b)'de yer alan sınır çizgileri incelendiğinde 3–7 günlük numunelerin genellikle alt sınıra ( $\approx 45q_u$ ) yakın değerlere sahip olduğu, 14 ve 28 günlük numunelerde elastisite modülünün orta banda ( $\approx 100q_u$ ) doğru yükseldiği, 56 günlük numunelerde ise sonuçların üst sınıra ( $\approx 130-150q_u$ ) ve bazı durumlarda bunun da üzerine çıktığı görülmektedir. Tablo verileri incelendiğinde  $q_u$  değerlerinin 1,0–3,5 MPa,  $E_{50}$  değerlerinin ise 90–605 MPa arasında değiştiği, dolayısıyla  $E_{50}/q_u$  oranının kür süresine bağlı olarak 60–300 $q_u$  aralığında dağıldığı belirlenmiştir. Literatürde kısa süreli kürlerde 25–70 $q_u$  değerleri rapor edilmiş olmasına rağmen (Baker, 1981), bu çalışmada özellikle 28 ve 56 günlük kürlerde elde edilen değerler daha yüksek bulunmuş ve (Kitazume vd., 2013b; Topolnicki, 2004b) tarafından bildirilen 35–180 $q_u$  ve 50–150 $q_u$  aralıklarıyla uyum sağlamıştır. Bu durum, C zemininde %35 kil içeriğinin yüksek özgül yüzey alanı ve su tutma kapasitesi sayesinde bağlayıcı reaksiyonlarını hızlandırması ve çoklu katkıların sinerjik etkisi ile açıklanabilir. UK'nin CaO içeriği C–S–H jel oluşumunu desteklerken, KÇ'nin Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mineralleri C–A–H ve C–F–H fazlarının gelişimine katkı sağlamış, NS'nin yüksek reaktivitesi bu süreçleri hızlandırarak matrisin sürekliliğini güçlendirmiştir. Sonuç olarak, C zemini için UK + KÇ + NS katkılı numunelerde kür süresi arttıkça elastisite modülünün sürekli yükseldiği, 28 günlük ortalama değerlerin tasarım için güvenilir ( $\sim 100q_u$ ), 56 günlük değerlerin ise üst sınır ( $\sim 130-150q_u$ ) parametresi olarak önerilebileceği sonucuna varılmıştır.

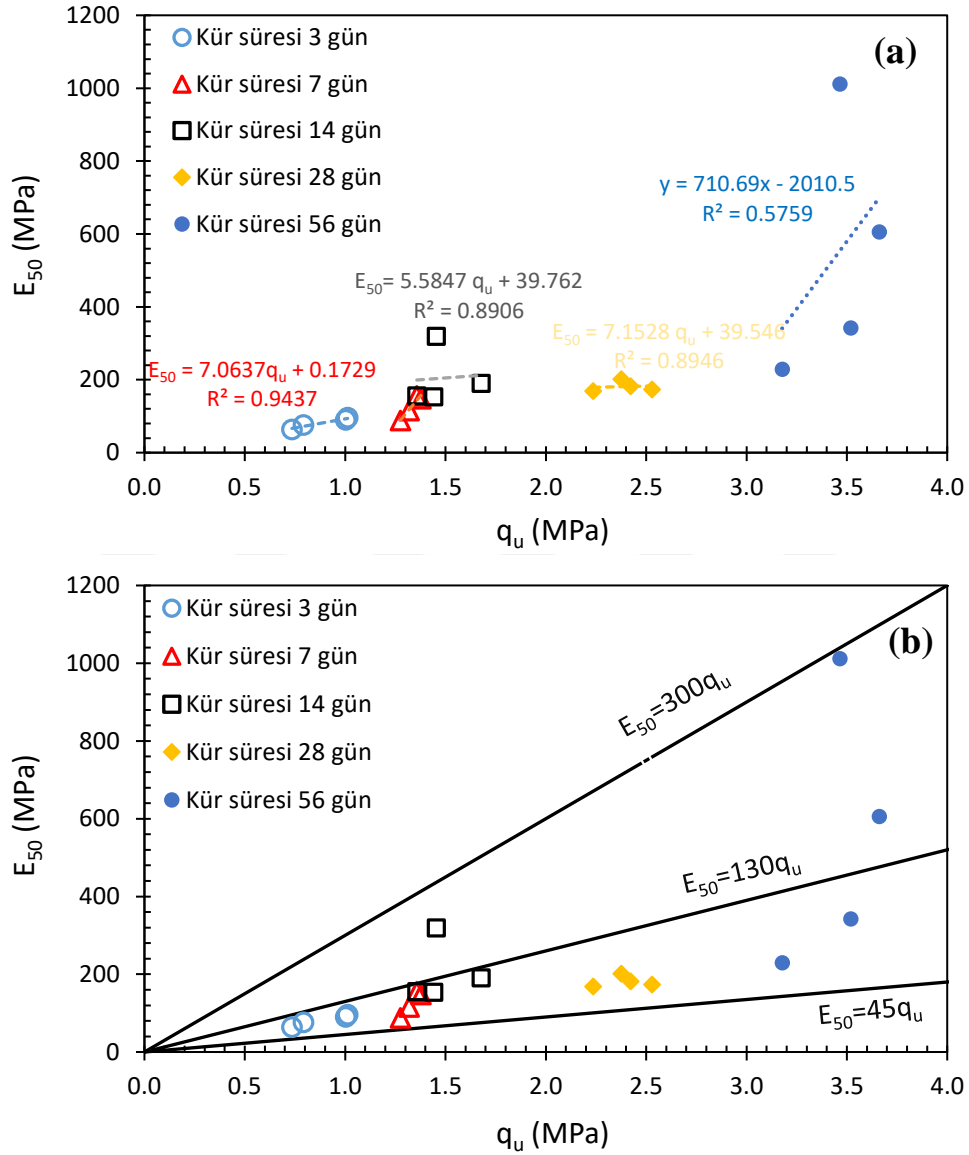
Şekil 5.44, C zemini için UK+KÇ+NS katkılı numunelere ait ve Şekil 5.45'ta sunulan bulguların aynısını yalnızca farklı bir görselleştirme düzeniyle göstermekte; burada (a) regresyon denklemleri ve (b)  $q_u-E_{50}$  ilişkisi aynı eğilimleri açıkça ortaya koymaktadır.



**Şekil 5.44.** C zemin için UK + KÇ + NS katkılı numunelerin 3, 7, 14, 28 ve 56 günlük kürlerdeki  $E_{50}$  değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b)  $q_u$ - $E_{50}$  ilişkisi

UK + KÇ + NS katkılı numunelerde kür süresinin etkisi A ve C zeminleri arasında karşılaştırıldığında, her iki zeminde de elastisite modülünün zamanla düzenli olarak arttığı görülmektedir. A zemininde (kum ağırlıklı, düşük kil içerikli) değerler daha sınırlı bir bantta toplanmış ve 28 günlük kürde  $\sim 100q_u$  seviyelerine, 56 günlük kürde ise üst sınıra ( $\sim 120$ – $130q_u$ ) yaklaşmıştır. Buna karşılık C zemininde (%35 kil içerikli) sonuçlar daha geniş bir aralıkta dağılmış, yüksek özgül yüzey alanı ve su tutma kapasitesinin etkisiyle bağlayıcı reaksiyonları daha etkin gerçekleşmiş ve özellikle 56 günlük kürde elastisite modülü değerleri  $150q_u$ 'ya kadar ulaşmıştır. Literatürde rapor edilen  $25$ – $70q_u$  değerleri (Bruce, 1986; Terashi, 1997) dikkate alındığında her iki zeminde de değerlerin daha yüksek olduğu, ancak Kitazume ve Terashi tarafından bildirilen  $35$ – $180q_u$  ve  $50$ – $150q_u$

aralıklarıyla uyumlu olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, kür süresi uzadıkça her iki zeminde de rijitlik artışı net bir şekilde ortaya çıkmış; A zemini için 28 günlük ortalama  $\sim 100q_u$  güvenilir bir tasarım parametresi olurken, C zemini için 56 günlük ortalama değerlerin üst sınır ( $\sim 130-150q_u$ ) parametresi olarak dikkate alınabileceği sonucuna varılmıştır.



**Şekil 5.45.** C zemin için UK + KÇ + NS katkılı numunelerin 3, 7, 14, 28 ve 56 günlük kürlerdeki  $E_{50}$  değerleri: (a) regresyon denklemleri, (b)  $q_u-E_{50}$  ilişkisi

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1. Sonuçlar

Bu araştırmanın deneysel programı ve bulguları, birbiriyle bağlantılı iki ana eksen üzerine kurgulanmıştır. İlk eksen, farklı bağlayıcı sistemlerle (uçucu kül, kırmızı çamur ve nona silika) hazırlanan enjeksiyon karışımlarının taze haldeki işlenebilirlik ve stabilite performansının belirlenmesine ayrılmıştır. Bu kapsamda, Marsh hunisi deneyi ile enjeksiyon karışımların pompalanabilirliğinin bir göstergesi olan akış süreleri ölçülmüş, çökelme (sedimentasyon) deneyi ile ise karışımın zamanla ayrışma (bleeding) eğilimi ve homojenlik stabilitesi değerlendirilmiştir.

İkinci ana eksen ise, zemin-enjeksiyon karışımlarının katılmış haldeki mekanik özelliklerini belirlemeye yöneliktir. Bu kapsamda, Serbest Basınç Dayanımı (UCS) ve Elastisite Modülü ( $E_{50}$ ) özellikleri belirlenmiştir. Mekanik performansın kapsamlı bir şekilde irdelenebilmesi için, ince tane içeriği kademeli olarak artan üç farklı kumlu zemin (A, B ve C) kullanılmıştır. A zemini (%90,98 kum, %9,02 kil+silt) kum-dominant, B zemini (%81,46 kum, %18,54 kil+silt) geçiş karakterli, C zemini (%62,24 kum, %37,76 kil+silt) ise ince taneli fraksiyonun belirgin şekilde baskın olduğu bir yapı sergilemektedir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemine göre A zemini SP-SC, B ve C zeminleri ise SC olarak sınıflandırılmıştır. Zeminlerdeki ince taneler (kil+silt) orta-yüksek plastisite ( $LL \approx \%56,5$ ,  $PI \approx \%27,0$ ) özellik göstermiştir.

İyileştirilmiş zeminlerin mekanik özelliklerin belirlenmesine yönelik deneysel program, etkileri sistematik bir şekilde ortaya koymak amacıyla beş aşamalı olarak tasarlanmıştır:

- Aşama 1'de, yalnızca C sınıfı uçucu külün (UK) bağlayıcı olarak kullanıldığı A, B ve C zeminlerinde, bağlayıcı içeriği ( $a_w$ ), bağlayıcı dozajı, karışımın su muhtevası ve toplam su/bağlayıcı oranlarının ( $W_T/W_b$ ) etkisi incelenmiş ve her bir zemin için kür sonrası UCS değerleri değerlendirilmiştir.
- Aşama 2'de, UK'ye kırmızı çamurun (KÇ) ikili bir katkı malzemesi olarak eklendiği sistemler test edilmiş ve bu kombinasyonun UCS üzerindeki etkisi, yalnızca UK kullanılan karışımlarla karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur.
- Aşama 3'te, alternatif bir ikili sistem olarak UK + nano silika (NS) kombinasyonunun etkinliği araştırılmıştır. Bu aşamada, A zeminine benzer davranış gösterdiği ve pratik sınırlamalar nedeniyle B zemini değerlendirme dışı bırakılarak çalışmalar A ve C zeminleri üzerinde yoğunlaştırılmıştır.

- Aşama 4'te, UK, KÇ ve NS'den oluşan üçlü bir bağlayıcı sistemin uygulandığı A ve C zeminlerinde, bileşenler arasındaki olası sinerjistik etkiler UCS performansı açısından kapsamlı bir şekilde test edilmiştir.
- Aşama 5'te, önceki aşamalardan seçilen optimal karışımlar sabitlenerek, kür süresinin (3, 7, 14, 28 ve 56 gün) dayanım gelişimi ve mukavemet davranışı üzerindeki kritik etkisi incelenmiştir.

Tüm bu UCS deneylerini takiben, gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden yararlanılarak zeminlerin deformasyon karakterini yansıtan bir diğer önemli parametre olan elastisite modülü ( $E_{50}$ ) hesaplanmış ve dayanım-rijitlik ilişkisi irdelenmiştir. Bu kapsamlı metodoloji, çimentosuz bağlayıcı sistemlerin zemin iyileştirmedeki potansiyelini ve performans sınırlarını ortaya koymayı amaçlamıştır.

### 6.1.1. Enjeksiyon akma süresi

Marsh hunisi deneyleri, geliştirilen çimentosuz enjeksiyon karışımlarının akışkanlık davranışının, sahada yaygın kabul gören parametrelerle uyum içinde olduğunu ortaya koymuştur. Genel eğilim, su/bağlayıcı oranı ( $W_T/W_b$ ) arttıkça akma süresinin belirgin biçimde düştüğü ve  $W_T/W_b \geq 2,0$  değerlerinde akışın doyuma ulaşarak 27-30 saniye bandında sabitlendiği yönündedir. Bu plato değeri, saha uygulamaları için hedeflenen  $\leq 50-60$  saniye aralığının oldukça altında kalarak, karışımların yüksek pompalanabilirlik potansiyelini işaret etmektedir.

Performans, geleneksel çimento enjeksiyonları ile doğrudan kıyaslanabilir düzeydedir. Örneğin, sadece uçucu kül (UK) kullanılan karışımda,  $W_T/W_b=1$ 'de ölçülen 104 saniye gibi yüksek bir değer, pratikte kabul edilebilir sınırların üzerindedir. Ancak, bu oranın  $W_T/W=1,2$ 'ye çıkarılmasıyla süre 49 saniye'ye düşmüş ve tipik bir çimento enjeksiyonunun akış sürelerine ( $\sim 40-55$  saniye) yaklaşmıştır. Bu durum, çimentosuz sistemlerin de uygun karışım oranlarıyla, geleneksel yöntemlerle rekabet edebilecek işlenebilirliğe sahip olduğunu göstermiştir.

Asıl kritik bulgu, düşük su/bağlayıcı oranlarında ( $W_T/W_b \approx 1$ ) katkı malzemelerinin sağladığı sinerjik iyileşmedir. Kırmızı çamurun (KÇ, %30) veya nano silikanın (NS, %1) tek başına ilavesi, akma süresini  $\sim 76$  saniyeye indirerek orta düzeyde bir iyileşme sağlarken, bu iki katkının UK:69–KÇ:30–NS:1 oranında birlikte kullanılması, süreyi 59 saniye'ye kadar düşürmüştür. Bu kombinasyon, yüksek su talebi olmadan, yalnızca fiziksel tane paketlenmesi ve kısmi dağıtıcı etki ile, düşük  $W_T/W_b$ 'de dahi hedef akış sürelerine

ulaşılabilmesine olanak tanımıştır. Sonuç olarak, optimize edilmiş çimentosuz karışımların, geleneksel çimento şerbetlerine kıyasla benzer veya daha iyi işlenebilirlik sergileyebileceği ve düşük su içeriğinde daha stabil bir taze karışım yapısı sunabileceği anlaşılmıştır.

### 6.1.2. Sedimentasyon yüzdesi

Sedimentasyon deneyi sonuçları, geliştirilen çimentosuz enjeksiyon karışımlarının kararlılık performansının, geleneksel çimento şerbetlerine kıyasla optimize edilebileceğini göstermiştir. Genel eğilim, zamanla çökelmenin arttığı ve Su/Bağlayıcı Oranı ( $W_T/W_b$ ) yükseldikçe bu eğilimin belirginleştiği yönündedir. Düşük  $W_T/W_b$  oranlarında ( $\approx 1,0$ ), karışımın yüksek akma gerilimi sayesinde çökme %1-2 gibi oldukça düşük seviyelerde sınırlı kalmıştır. Bu değer, saha uygulamalarında genellikle  $<10$  olarak hedeflenen çökme sınırının oldukça altındadır ve karışımın mükemmel stabilitesine işaret eder. Buna karşılık,  $W_T/W_b$  oranı 2,5'e yükseltildiğinde, aşırı serbest su fazının varlığı nedeniyle çökme %45-50 seviyelerine ulaşmıştır. Bu durum, yüksek su içeriğinin hem çimentosuz hem de çimentolu sistemlerde benzer şekilde stabilite kaybına yol açtığını teyit etmektedir.

Malzeme etkisi incelendiğinde, yalnızca uçucu kül (UK) içeren karışımlar, küresel tanecik yapıları sayesinde dengeli bir sedimentasyon eğrisi sergilemiştir. Kırmızı çamur (KÇ) ilavesi, yoğunluğu ve kısmen daha kaba tane yapısı nedeniyle çökme eğilimini bir miktar artırabilse de, düşük  $W_T/W_b$  koşullarındaki yüksek su tutma kapasitesi bu olumsuz etkiyi dengelenmiştir. Nano silikanın (NS, %1) etkisi ise oldukça belirgindir. Yüksek özgül yüzey alanı sayesinde karışım matrisini viskozlaştıran NS, özellikle  $W_T/W_b=1,0-1,2$  gibi optimum enjeksiyon aralığında çökme oranını %1-2 seviyelerinde tutarak, geleneksel çimento enjeksiyonlarında sıkça rastlanan ayrışma problemini önlemede etkili olmuştur.

En üstün kararlılık performansı, UK:69 – KÇ:30 – NS:1 üçlü karışımından elde edilmiştir. Bu kombinasyon, düşük-orta  $W_T/W_b$  aralığında (1,0-1,5) çökme yüzdesini %2-10 bandında sınırlayarak, hem yüksek stabilite hem de kabul edilebilir akışkanlık dengesini sağlamıştır. Bu, sahada enjeksiyon sonrası oluşacak kolonun homojenliği ve nihai mukavemeti için kritik bir avantajdır.  $W_T/W_b \geq 2,0$  gibi yüksek oranlarda ise tüm karışımların performansının birbirine yaklaştığı ve serbest su fazının belirleyici hale geldiği görülmüştür. Sonuç olarak, uygun bileşenlerle formüle edilen çimentosuz karışımların, düşük su/bağlayıcı oranlarında, çimento bazlı enjeksiyonlara eşdeğer hatta daha üstün bir kararlılık sergileyebileceği anlaşılmıştır.

### 6.1.3. Serbest basınç dayanımı

➤ *Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirme:*

C sınıfı uçucu külün (UK) tek başına bağlayıcı olarak kullanıldığı karışımlar, zemin iyileştirme için temel bir referans performans profili oluşturmuştur. Sonuçlar, UK'nin kendiliğinden çimentolanma özelliği sayesinde, Portland çimentosu kullanılmadan da önemli dayanımlar elde edilebileceğini açıkça göstermiştir.

Dayanım (UCS) üzerinde en belirleyici parametrelerin bağlayıcı içeriği ( $a_w$ ), su/bağlayıcı oranı ( $W_T/W_b$ ) ve zemin tipi olduğu gözlemlenmiştir.

*Bağlayıcı İçeriği ( $a_w$ ) ve Dozaj Etkisi:* Bağlayıcı oranı arttıkça tüm zeminlerde UCS değerleri istikrarlı bir şekilde yükselmiştir. Bağlayıcı içeriği %10'dan %40'a çıkarıldığında, A, B ve C zeminlerinde sırasıyla yaklaşık 8,6, 3,5 ve 4,0 kat dayanım artışı kaydedilmiştir. Bu durum, birim hacimdeki bağlayıcı miktarının (dozaj) artmasıyla, hidrasyon ürünlerinin (C-S-H, C-A-H) miktarının ve dolayısıyla zemin taneleri arasındaki bağların arttığını kanıtlamıştır.

*Su/Bağlayıcı Oranı ( $W_T/W_b$ ) Etkisi:*  $W_T/W_b$  oranı ile UCS arasında güçlü bir ters orantı bulunmuştur. Örneğin, A zemini için %20 bağlayıcıda  $W_T/W_b=1,0$ 'da 3392 kPa olan dayanım,  $W_T/W_b=2,3$ 'te 668 kPa'a düşerek yaklaşık %80 azalma göstermiştir. Bu davranış, literatürdeki  $\eta/C_{iv}$  (porozite/bağlayıcı hacmi) ilişkisi ile uyumludur; artan suyun bağlayıcıyı seyrelterek poroziteyi artırması ve matris sürekliliğini zayıflatması bu düşüşün temel nedenidir.

*Zemin Tipi Etkisi:* Aynı bağlayıcı koşullarında dahi zemin tipi dayanımı belirgin şekilde etkilemiştir. Genel sıralama  $C>B>A$  şeklinde olmuştur. Bu sıralama, zeminlerin ince tane oranlarıyla (A: %9,02, B: %18,54, C: %37,76) doğrudan ilişkilidir. C zeminindeki yüksek ince tane oranı, kum taneleri arasındaki boşlukları daha etkin doldurarak daha yoğun ve sürekli bir matris oluşumuna katkıda bulunmuş, bu da bağlayıcı ürünlerin daha verimli bir şekilde dağılmasını sağlayarak daha yüksek dayanıma olanak tanımıştır.

*Optimum Performans ve Kimyasal Mekanizma:* En yüksek UCS değerleri, düşük  $W_T/W_b$  ( $\approx 0,9-1,5$ ) ve yüksek bağlayıcı oranı (%30-40  $a_w$ ) kombinasyonlarında elde edilmiştir. Örneğin, A zemininde  $a_w=\%30$  ve  $W_T/W_b=0,9$ 'da 4608 kPa, B zemininde  $a_w=\%40$  ve  $W_T/W_b=0,9$ 'da 3044 kPa, C zemininde ise  $a_w=\%40$  ve  $W_T/W_b=1,1$ 'de 2916 kPa dayanıma ulaşılmıştır. Bu yüksek dayanımlar, UK'nin yüksek CaO içeriği sayesinde suyla reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum alüminat hidrat (C-A-H) gibi bağlayıcı jel fazlarını oluşturmasına bağlanmaktadır. Bu "nükleasyon" süreci, kum taneleri etrafında sağlam ve sürekli bir bağlayıcı matrisi oluşturmuştur.

*Sonuç olarak;* C sınıfı uçucu kül, tek başına kullanıldığında, özellikle uygun karışım oranları sağlandığında (düşük  $W_T/W_b$ , yüksek  $a_w$ ), zemin iyileştirme için yeterli mekanik dayanımı sağlayabilen etkili bir çimentosuz bağlayıcıdır. Performansının, zeminin tane dağılımından önemli ölçüde etkilenmesi, sahada karışım tasarımının zemin karakterizasyonuna dayandırılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

➤ *Uçucu kül (UK) ve kırmızı çamur (KÇ) enjeksiyonuyla iyileştirme:*

UK ve KÇ'nin birlikte kullanıldığı ikili sistem, yalnızca UK içeren referans karışımlara kıyasla mekanik dayanımda çarpıcı ve sistematik bir iyileşme sağlamıştır. Bu kombinasyon, çimentosuz bağlayıcıların performans sınırını önemli ölçüde yukarı taşımıştır.

*UK ile Karşılaştırmalı Performans Artışı:* KÇ ilavesi, tüm zeminlerde dayanımı (UCS) artırmakla birlikte, en yüksek görelî artış ile en yüksek mutlak dayanım değeri farklı KÇ oranlarında elde edilmiştir. Bu kritik ayırım, performans optimizasyonu için önemlidir.

- *En Yüksek Görelî Artış:* A serisinde, %20 bağlayıcı içeriğinde ( $a_w$ ) ve %20 KÇ ikamesi ile dayanım, yalnızca UK kullanılan karışıma kıyasla %96 oranında (1,96 kat) artış göstermiştir. Bu, çalışma kapsamındaki en yüksek görelî artıştır ve KÇ'nin potansiyel etkinliğini göstermesi açısından dikkat çekicidir.
- *En Yüksek Mutlak Dayanım:* Ancak, aynı A serisi ve  $a_w$ =%20 koşulunda, en yüksek mutlak dayanım değeri ( $\approx 5127$  kPa) %30 KÇ ikamesi ile elde edilmiştir. Bu, %20 KÇ'li karışıma kıyasla daha yüksek bir değerdir, ancak görelî artış oranı daha düşük kalabilir. Bu durum, %30 KÇ'nin, mevcut karışım koşullarında mutlak performansı en üst düzeye çıkaran optimum oran olduğunu göstermektedir. %20'lik oran ise, "maliyet-etkinlik" veya "birim KÇ başına en yüksek getiri" anlamında bir optimum olarak yorumlanabilir. Benzer şekilde, B serisinde %20 bağlayıcı ve %30 KÇ ikamesi ile %38'lik (1,38 kat) bir dayanım artışı kaydedilmiştir. Bu bulgular, KÇ'nin UK'nin bağlayıcı etkinliğini güçlü bir şekilde desteklediğinin açık bir göstergesidir.

*Optimum KÇ Oranları ve Sebepleri:* KÇ'nin etkinliği, zemin tipine ve toplam bağlayıcı içeriğine bağlı olarak değişiklik göstermiş ve her zemin için belirgin bir optimum ikame oranı belirlenmiştir. Bu optimumların arkasındaki sebepler şunlardır:

- *A ve B Zeminleri (Optimum: %20-30 KÇ):* Bu zeminlerdeki nispeten düşük ince tane oranları (A: %9,02, B: %18,54), KÇ'nin getirdiği ek ince tanelerin

boşlukları doldurması ve daha sıkı bir tane paketlenmesi oluşturması için ideal bir ortam sağlamıştır. Düşük  $a_w$ 'de (%10) %20 KÇ yeterli olurken, bağlayıcı içeriği arttıkça ( $a_w$ =%20) daha fazla KÇ (%30) kullanımı, kimyasal reaksiyonlar için gerekli olan  $Al_2O_3$  ve  $Fe_2O_3$  miktarını artırarak daha güçlü bir sinerjik etkiye olanak vermiştir. Bu oranların üzerine çıkıldığında ise, KÇ'nin kendi su ihtiyacı karışımın genel işlenebilirliğini olumsuz etkileyebilmiş ve dayanım artış hızı yavaşlamıştır.

- *C Zemini (Optimum: %10 KÇ):* C zemininin zaten yüksek olan ince tane içeriği (%37,76), bu zeminin davranışını belirlemiştir. %10 gibi düşük bir KÇ ikamesi, alkali aktivasyon için gerekli kimyasal tetikleyiciyi sağlarken, aynı zamanda zaten ince tane bakımından zengin olan matrise çok fazla ek yük getirmemiştir. %20'nin üzerindeki KÇ ikame oranlarında ise, aşırı ince tane konsantrasyonu, su tutma kapasitesini kritik seviyeye çıkarmış, mikrogözenek oluşumunu hızlandırmış ve sonuçta bağlayıcı matrisin sürekliliğini zayıflatarak dayanım değerlerinde düşüşe yol açmıştır.

*Tepe Dayanım Değerleri ve Karışım Koşulları:* Bu bulgularla uyumlu olarak, en yüksek mutlak dayanım değerleri aşağıdaki optimum koşullarda gözlemlenmiştir:

- A Zemini:  $a_w$ =%20,  $W_T/W_b$ =1,0, %KÇ=30 ile  $\approx 5127$  kPa (Dozaj  $\approx 300$  kg/m<sup>3</sup>)
- B Zemini:  $a_w$ =%20,  $W_T/W_b$ =1,2, %KÇ=30 ile  $\approx 3784$  kPa (Dozaj  $\approx 283$  kg/m<sup>3</sup>)
- C Zemini:  $a_w$ =%20,  $W_T/W_b$  =1,6, %KÇ=10 ile  $\approx 2397$  kPa (Dozaj  $\approx 253$  kg/m<sup>3</sup>)

*Kimyasal Sinerji ve Dayanım Artışının Mekanizması:* Elde edilen bu belirgin dayanım artışının temel nedeni, UK ve KÇ arasında gelişen kimyasal sinerjidir. KÇ'nin yüksek orandaki  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  ve özellikle alkali bileşenleri ( $Na_2O$ ), sistemde bir alkali aktivasyon sürecini tetiklemiştir. Bu süreç, hem UK hem de KÇ'nin cam fazlarındaki silikat ve alüminatların çözünürlüğünü hızlandırmıştır. Çözünen bu iyonlar, UK'nin hidratasyonu sonucu açığa çıkan kalsiyum hidroksit ( $Ca(OH)_2$  veya CH) ile reaksiyona girerek, yalnızca C-S-H'in yanı sıra Kalsiyum Alüminat Hidrat (C-A-H), Kalsiyum Alüminosilikat Hidrat (C-A-S-H) ve Kalsiyum Ferrit Hidrat benzeri (C-F-H) fazları oluşturmuştur. Bu "hibrit jel ağı", yalnızca C-S-H'den oluşan matrise kıyasla daha çapraz bağlı, yoğun ve güçlüdür. Ayrıca, CH fazlasının tüketilmesi poroziteyi azaltmış ve mikro yapıyı daha da sıkılaştırmıştır.

*Sonuç olarak;* kırmızı çamur, C sınıfı uçucu kül ile birlikte kullanıldığında, sadece fiziksel bir dolgu malzemesi olmanın ötesinde, kimyasal bir reaktif görevi görerek puzolanik reaksiyonları hızlandırmakta ve bağlayıcı kapasiteyi artırmaktadır. Ancak etkinliği, zeminin mevcut yapısıyla doğrudan ilişkilidir; ince tanece zengin zeminlerde düşük dozajlar yeterli olurken, kumlu zeminlerde daha yüksek dozajlarla maksimum sinerji sağlanabilmektedir. Bu sinerji, çimentosuz enjeksiyon karışımlarının mekanik performansını geleneksel çimento bazlı sistemler seviyesine çıkarmakta ve UK tek başına kullanıldığında ulaşılan dayanımları belirgin şekilde aşmaktadır.

➤ *Uçucu kül (UK) ve nano silika (NS) enjeksiyonuyla iyileştirme:*

Nano silikanın (NS) uçucu kül (UK) ile ikili sistem olarak kullanılması, beklenenin aksine karmaşık ve tutarsız bir performans profili sergilemiştir. NS'nin teorik olarak yüksek puzolanik reaktivitesine rağmen, pratikteki etkisi dozaj, zemin tipi ve bağlayıcı içeriği gibi parametrelere oldukça hassastır.

*Genel Eğilim ve UK ile Karşılaştırma:* Genel olarak, %0,5-2,0 aralığındaki NS ilavesi, 28 günlük kür sonunda yalnızca UK kullanılan karışımlara kıyasla beklentileri karşılayacak ölçüde tutarlı ve belirgin bir dayanım artışı sağlayamamıştır, Hatta birçok durumda, özellikle yüksek bağlayıcı içeriğinde ( $a_w = \%20$ ), dayanım değerlerinde %27-43'e varan düşüşler ( $\% \Delta q_u \approx 0,57-0,73$ ) gözlemlenmiştir. Bu durum, NS'nin tek başına güvenilir bir dayanım artırıcı olarak kullanımının risklerini ortaya koymaktadır.

*Parametrelerin Kritik Etkisi:* NS'nin performansı, test koşullarına bağlı olarak büyük farklılık göstermiştir:

- *Bağlayıcı İçeriği ( $a_w$ ) Etkisi:* NS'nin olumsuz etkisi özellikle yüksek bağlayıcı içeriğinde ( $a_w = \%20$ ) belirginleşmiştir. Buna karşılık, düşük bağlayıcı içeriğinde ( $a_w = \%10$ ) C zemininde %23-34'lük (1,23-1,34 kat) bir iyileşme kaydedilmiştir. Bu, yüksek bağlayıcılı sistemlerde NS'nin getirdiği ek sıvı fazın bağlayıcı konsantrasyonunu seyreltmesinin (seyreltici etki) olumsuz sonuçlar doğurabileceğini düşündürmektedir.
- *Zemin Tipi Etkisi:* İnce tane oranı yüksek olan C zemininde, NS'den beklenen fayda kısmen gerçekleşmiş ve düşük  $a_w$ 'de ölçülebilir artışlar sağlanmıştır. Bunun temel nedeni, C zeminindeki yüksek ince tane içeriğinin, NS partiküllerinin daha iyi dağılmasına ve aglomerasyonun önlenmesine olanak tanınması olarak yorumlanmıştır. Buna karşılık, kum-dominant A zemininde NS katkısının etkisi ya sınırlı kalmış ya da olumsuz olmuştur.

- *Dozaj ve Dispersiyon:* Çalışmada kullanılan sıvı formdaki NS'nin, özellikle düşük dozajlarda (%0,5-1,0), karışıma yeterli miktarda reaktif SiO<sub>2</sub> sağlayamaması ve aynı zamanda karışıma ilave su getirerek bağlayıcıyı seyreltmesi, beklenen C-S-H oluşum miktarını sınırlandırmıştır. Ayrıca, yüksek yüzey enerjisi nedeniyle NS partiküllerinin tam olarak dağılmaması (aglomerasyon) ve homojen bir mikro yapı oluşturamaması, performans düşüklüğünün diğer bir olası nedenidir.

*Kimyasal Mekanizma ve Pratik Sınırlamalar:* Teorik olarak NS, UK hidratasyonundan açığa çıkan Ca(OH)<sub>2</sub>'yi hızla tüketerek ek ve daha yoğun C-S-H jelinin oluşumunu sağlamalıdır. Ancak bu çalışmanın koşullarında, sıvı NS'nin getirdiği seyreltici etki, NS partiküllerinin heterojen dağılımı ve optimum dozaj penceresinin dar olması, bu olumlu kimyasal mekanizmanın pratikte tam olarak gerçekleşmesini engellemiştir. Sonuç olarak, NS'nin fiziksel ve kimyasal dezavantajları, potansiyel faydalarının önüne geçmiştir.

*Sonuç olarak;* nano silika, UK ile ikili sistemde kullanıldığında, yalnızca UK'ye kıyasla tutarlı ve güvenilir bir dayanım artışı garanti etmemektedir. Etkinliği, son derece spesifik koşullara (zemin tipi, bağlayıcı içeriği, NS dozajı, dispersiyon kalitesi) bağlıdır. Mevcut deney koşullarında, UK'nin tek başına kullanımı, özellikle yüksek su içeriğinde daha tutarlı ve öngörülebilir bir performans sunmuştur. Bu nedenle, NS'nin pratik bir bağlayıcı katkısı olarak kullanılabilmesi için karışım ve uygulama parametrelerinin çok daha sıkı bir şekilde kontrol edilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

➤ *Uçucu kül (UK), kırmızı çamur (KÇ) ve nano silika (NS) enjeksiyonuyla iyileştirme:*

UK, KÇ ve NS'den oluşan üçlü bağlayıcı sistem, bu çalışma kapsamında test edilen tüm kombinasyonlar arasında en üstün mekanik performansı sergilemiş ve bileşenler arasında belirgin bir sinerjistik etki olduğunu kanıtlamıştır. Bu sistem, yalnızca UK ve UK+KÇ karışımlarına kıyasla en yüksek mutlak dayanım değerlerine ulaşmıştır.

*UK ve UK+KÇ ile Karşılaştırmalı Üstün Performans:* Üçlü sistemin etkinliği, dayanım değerlerindeki çarpıcı artışla açıkça görülmektedir. Örneğin, A zemininde %20 bağlayıcı içeriğinde, UK+KÇ+NS (UK:79-KÇ:20-NS:1) karışımı ile elde edilen 4297 kPa'lık dayanım, yalnızca UK kullanılan karışıma kıyasla %149'luk (2,49 kat) bir artışa karşılık gelmektedir. Bu artış oranı, UK+KÇ ikili sisteminde gözlemlenen en yüksek artıştan (%96) dahi belirgin şekilde yüksektir. Benzer şekilde, C zemininde de üçlü sistem,

ikili sistemlere kıyasla en yüksek dayanım iyileştirmelerini sağlamıştır ( $\% \Delta q_u = 1,18-1,34$ ) değerleri, bu üstünlüğü sayısal olarak doğrulamaktadır.

*Optimum Karışım Oranları ve Performans:* En yüksek dayanımlar, %1 NS ve orta düzey KÇ oranlarının kombinasyonu ile elde edilmiştir. NS dozajının %1,5'e çıkarılması ise tutarlı bir şekilde performans düşüşüne neden olmuştur.

- A Zemini:

$$a_w = \%10, W_T/W_b = 1,5 \rightarrow \%79 \text{ UK} + \%20 \text{ KÇ} + \%1 \text{ NS} \approx 2986 \text{ kPa (A4-2)}$$

$$a_w = \%20, W_T/W_b = 1,3 \rightarrow \%89 \text{ UK} + \%10 \text{ KÇ} + \%1 \text{ NS} \text{ ile } \approx 4297 \text{ kPa (A4-7)}$$

- C Zemini:

$$a_w = \%10, W_T/W_b = 2,4 \rightarrow \%79 \text{ UK} + \%20 \text{ KÇ} + \%1 \text{ NS} \approx 1795 \text{ kPa (C4-2)}$$

$$a_w = \%20, W_T/W_b = 1,9 \rightarrow \%69 \text{ UK} + \%30 \text{ KÇ} + \%1 \text{ NS} \text{ ile } \approx 1851 \text{ kPa (C4-8)}$$

*Kimyasal Sinerji ve Performans Artışının Mekanizması:* Üçlü sistemdeki bu olağanüstü performans artışı, her bir bileşenin tamamlayıcı rolünün bir sonucudur:

- *KÇ'nin Alkali Aktivasyonu:* KÇ, yüksek alkali ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) içeriği sayesinde ortamın pH'ını yükselterek, hem UK hem de kendi yapısındaki cam fazlarından silikat ( $\text{SiO}_2$ ) ve alüminat ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) iyonlarının çözünürlüğünü hızlandırır. Bu, reaksiyon havuzunu zenginleştirir.
- *UK'nin Kalsiyum Kaynağı Olması:* UK'nin hidratasyonu sonucu bol miktarda açığa çıkan  $\text{Ca(OH)}_2$ , çözülmüş haldeki silikat ve alüminat iyonları ile reaksiyona girer.
- *NS'nin Katalizör ve Mikro Dolgu Etkisi:* %1'lik optimum dozajdaki NS, bu noktada iki kritik rol oynar:
  - ✓ *Hızlı Puzolanik Reaksiyon:* Yüksek reaktivitesi sayesinde açığa çıkan  $\text{Ca(OH)}_2$ 'yi anında tüketerek ek ve yoğun C-S-H jeli oluşturur.
  - ✓ *Çekirdeklenme Merkezleri:* Nano boyutu sayesinde, C-S-H ve C-A-S-H gibi bağlayıcı fazların oluşumu için çok sayıda nükleasyon noktası sağlayarak reaksiyonu homojen bir şekilde hızlandırır ve mikro yapıyı iyileştirir.

Bu eşzamanlı etkileşimlerin net sonucu, yalnızca C-S-H'den değil, aynı zamanda C-A-S-H, C-A-H ve C-F-H'den oluşan, son derece çapraz bağlı, yoğun ve hibrit bir jel ağıdır. Bu ağ, boşlukları daha etkin doldurur, poroziteyi azaltır ve matris sürekliliğini en üst düzeye çıkarır.

*NS Dozajının Kritik Önemi:* %1,5 NS dozajında gözlemlenen performans düşüşü, NS'nin getirdiği ek su ihtiyacının ve aglomerasyon eğiliminin, yarattığı olumlu etkilerin önüne geçmeye başlamasıyla açıklanır. Bu durum, üçlü sistemde dahi NS dozajının optimize edilmesinin hayati önem taşıdığını göstermektedir.

*Sonuç olarak;* UK+KÇ+NS (%1) üçlü sistemi, sinerjistik kimyasal mekanizmalar sayesinde, tek bileşenli (yalnız UK) ve ikili (UK+KÇ, UK+NS) sistemlere kıyasla çok daha üstün bir mekanik performans sunmaktadır. Bu kombinasyon, çimentosuz bağlayıcılar ile ulaşılabilen dayanım seviyelerini yeniden tanımlamakta ve yüksek performanslı, sürdürülebilir bir zemin iyileştirme çözümü olarak öne çıkmaktadır.

➤ *Kür süresinin etkisi:*

Kür süresinin uzatılması, tüm bağlayıcı sistemlerde dayanım (UCS) değerlerinde düzenli ve istikrarlı bir artışa neden olmuş, puzolanik reaksiyonların zamanla gelişen doğasını açıkça ortaya koymuştur.

*Zamanla Değişen Performans Sıralaması:* 56 günlük kür sonunda A zemininde gözlemlenen dayanım sıralaması şu şekildedir:

UK (%100): 5167 kPa

UK (%70) + KÇ (%30): 7718 kPa

UK (%68,5) + KÇ (%30) + NS (%1,5): 6167 kPa

UK (%69) + KÇ (%30) + NS (%1): 8189 kPa

Bu sıralama, UK (%69) + KÇ (%30) + NS (%1) karışımının uzun vadeli mukavemet gelişimi açısından da diğer tüm sistemlere belirgin üstünlük sağladığını göstermektedir. Özellikle %1,5 NS içeren karışımın performansının, %1 NS'li karışıma göre daha düşük kalması dikkat çekicidir.

*Puzolanik Reaksiyonların İlerleyici Doğası:* Dayanımdaki sürekli artış, puzolanik reaksiyonların 28 günden sonra da aktif şekilde devam ettiğini kanıtlamıştır. A zemininde yalnız UK kullanıldığında 3 günde 281 kPa olan dayanım, 56 günde 5167 kPa'a ulaşarak yaklaşık 18 kat artış göstermiştir. UK (%69) + KÇ (%30) + NS (%1) sisteminde ise bu artış daha da belirgin olmuş, 56 günde 8189 kPa gibi çok yüksek bir değere ulaşılmıştır.

*Optimum NS Dozajının Önemi:* Kür süresi uzadıkça NS dozajının kritik önemi daha da belirginleşmiştir. %1 NS içeren karışımlar, 56 günlük kür sonunda %1,5 NS içerenlere kıyasla her zaman daha yüksek dayanım değerleri vermiştir. Bu durum, %1,5 dozajındaki NS'nin olumsuz etkilerinin (aşırı su talebi, aglomerasyon) uzun vadede dahi telafi edilemediğini ve %1 dozajının optimum olduğunu teyit etmektedir.

*Sonuç olarak;* kür süresi, çimentosuz bağlayıcı sistemlerin nihai performansını belirleyen temel parametrelerden biridir. UK (%69) + KÇ (%30) + NS (%1) gibi yüksek reaktiviteye sahip üçlü sistemler, uzun kür sürelerinde sahip oldukları potansiyeli tam anlamıyla ortaya koyabilmekte ve 56 günde 8000 kPa'ı aşan dayanım değerleriyle geleneksel çimento performansına erişebilmektedir.

#### **6.1.4. Elastisite modülü**

Bu çalışma kapsamında incelenen tüm bağlayıcı sistemler ve zemin tipleri için, serbest basınç dayanımı ( $q_u$ ) ile elastisite modülü ( $E_{50}$ ) arasında oldukça güçlü ve doğrusal bir ilişki tespit edilmiştir. Yüksek determinasyon katsayıları ( $R^2 \approx 0,88-0,99$ ) ile karakterize edilen bu ilişki, dayanımı artıran mekanizmaların aynı zamanda zeminin rijitlik özelliklerini de benzer şekilde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır.

Elde edilen deneysel bulgulara göre, çimentosuz bağlayıcı sistemlerle iyileştirilmiş zeminlerin  $E_{50}$  değerleri büyük ölçüde  $60q_u$  ile  $130q_u$  aralığında dağılım göstermiştir. Bu aralık, geleneksel zemin iyileştirme uygulamalarında sıklıkla referans alınan  $25q_u-70q_u$  bandının önemli ölçüde üzerinde olmakla birlikte, literatürdeki daha geniş sınır değerleri ( $35q_u-180q_u$ ) ile uyum içindedir. Söz konusu yüksek rijitlik değerleri, kullanılan bağlayıcı sistemlerin zemin matrisinde etkin ve sürekli bir bağlayıcı ağ oluşturma kapasitesinin bir göstergesidir.

Bağlayıcı sistemlerin bileşimi, rijitlik üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Yalnızca uçucu kül (UK) kullanılan sistemler temel bir rijitlik sağlarken, UK+KÇ ikili sisteminde alkali aktivasyon sonucu oluşan hibrit jel ağı (C-A-S-H, C-F-H) ile rijitlik değerlerinde kayda değer bir artış gözlemlenmiştir. UK+NS ikili sisteminde ise nano silikanın etkisi tutarsız olmuş, optimum dozaj ve dispersiyon koşulları sağlanamadığında rijitlik gelişimi sınırlı kalmıştır. En yüksek  $E_{50}/q_u$  oranlarına ise UK+KÇ+NS üçlü sisteminde, özellikle %1 NS dozajında ulaşılmıştır. Bu durum, kırmızı çamurun sağladığı alkali ortam ile nano silikanın katalitik ve mikro dolgu etkilerinin sinerjistik bir şekilde birleşerek, son derece yoğun ve rijit bir bağlayıcı matris oluşturduğunu kanıtlamaktadır.

Kür süresinin artırılması, tüm sistemlerde  $E_{50}$  değerlerinde düzenli bir artışa neden olmuş, puzolanik reaksiyonların rijitlik gelişimi üzerindeki uzun vadeli etkisini doğrulamıştır. Özellikle 56 günlük kür sonrasında, üçlü bağlayıcı sistemlerde  $E_{50}$  değerlerinin  $130q_u$  sınırına yaklaştığı veya aştığı görülmüştür.

Sonuç olarak, bu çalışmada kullanılan çimentosuz bağlayıcı sistemler, iyileştirilmiş zeminlerde yalnızca yüksek mukavemet değil, aynı zamanda geleneksel değerlerin

üzerinde bir rijitlik de sağlamıştır. Tasarım aşamasında güvenli ve temsili bir parametre olarak  $E_{50} \approx 100q_u$  değerinin kullanılması önerilmektedir.

### 6.1.5. Genel değerlendirme

Bu kapsamlı deneysel çalışmanın bulguları, zayıf zeminlerin iyileştirilmesinde Portland çimentosu yerine optimize edilmiş çimentosuz bağlayıcı sistemlerin başarıyla kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle C sınıfı uçucu kül (UK), kırmızı çamur (KÇ) ve yaklaşık %1 nano silikadan (NS) oluşan üçlü bağlayıcı sistem, uygun su/bağlayıcı oranı ( $W_T/W_b \approx 0,9-1,5$ ) ve iyi dispersiyon koşullarında uygulandığında, geleneksel çimento enjeksiyonları ile rekabet edebilen, hatta onları aşan bir performans sergilemiştir.

Bu yüksek performansın temelinde, bileşenler arasındaki sinerjistik kimyasal etkileşim yatmaktadır. CaO içeriği yüksek olan UK'nin hidrasyon ürünleri, KÇ'nin sağladığı alkali aktivasyon ve NS'nin katalitik çekirdeklenme etkisi ile birleşerek, C-S-H, C-A-H ve C-A-S-H fazlarından oluşan yoğun, çapraz bağlı ve hibrit bir jel ağı oluşturmuştur. Bu yapı, hem yüksek serbest basınç dayanımı ( $q_u > 4000$  kPa) ve rijitlik ( $E_{50} \approx 100q_u$ ), hem de düşük  $W_T/W_b$  oranlarında yeterli işlenebilirlik (akma süresi  $\approx 30-50$  s) ve üstün kararlılık (çökme  $< \%10$ ) sağlamıştır.

Araştırma sonuçları, bu çimentosuz sistemlerin performansının, geleneksel çimento şerbetlerinde olduğu gibi, su/bağlayıcı oranı, bağlayıcı dozajı, zemin tipi ve kür süresi gibi parametrelerle doğrudan kontrol edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca, endüstriyel yan ürünlerin (UK, KÇ) etkin kullanımı sayesinde, uygulamanın ekonomik olarak uygun ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayan bir alternatif olduğu değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, önerilen sistemin sadece zemin enjeksiyonunda değil, yol alt temel ve kaplama tabakalarının stabilizasyonu gibi diğer geoteknik uygulamalarda da ön değerlendirmeye alınabileceği düşünülmektedir.

Ancak, geniş ölçekli saha uygulamalarına geçilmeden önce, dozajların yerel zemin koşullarına göre optimizasyonunun yapılması, uzun dönem dayanıklılık performansının araştırılması ve ilgili teknik şartnameler ile çevresel düzenlemelere uygunluğunun teyit edilmesi gerekmektedir. Bu çerçevede, önerilen çimentosuz bağlayıcı sistem, performanstan ödün vermeden inşaat sektörünün karbon ayak izini ve maliyetlerini düşürme potansiyeli taşımaktadır.

## 6.2. Öneriler

Bu çalışmanın deneysel bulgularına dayanarak, çimentosuz bağlayıcı sistemlerin sahada başarılı ve güvenilir bir şekilde uygulanabilmesi için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- *Karışım Tasarımı ve Optimizasyonu:*
  - *Optimal Bağlayıcı Sistemi:* Zemin iyileştirme için C sınıfı uçucu kül (UK) + kırmızı çamur (KÇ) + %1 nano silika (NS) üçlü karışımı temel alınmalıdır.
  - *Zemin Tipine Özgü Dozaj:* KÇ ikame oranı, zeminin granülometrisine göre optimize edilmelidir. Kum oranı yüksek (A/B tipi) zeminlerde bağlayıcı içeriği %10 ve %20 için sırasıyla %20 ve %30 KÇ ikamesi önerilirken, ince tane oranı yüksek (C tipi) zeminlerde %10 KÇ ikamesi ile sınırlandırılmalıdır.
  - *Su/Bağlayıcı Oranı Kontrolü:* Hem işlenebilirlik hem de mekanik performans için  $W_T/W_b$  oranının 0,9–1,5 aralığında titizlikle tutulması kritik öneme sahiptir.  $W_T/W_b \geq 2,0$  değerlerinden kesinlikle kaçınılmalıdır.
- *Taze Karışım Özellikleri ve İşlenebilirlik:*
  - *Saha Kabul Kriterleri:* Taze enjeksiyon karışımı için Marsh hunisi akma süresinin 30–50 saniye ve çökme yüzdesinin  $\leq 10\%$  değerlerini sağlaması hedeflenmelidir.
  - *Akışkanlığın Ayarlanması:* Bu kriterleri sağlamak için su içeriği artırılmamalı; bunun yerine uygun bir akışkanlaştırıcı veya süperplastikleştirici kimyasal katkı kullanımı değerlendirilmelidir.
- *Kür Koşulları ve Tasarım Parametreleri:*
  - *Kür Süresi:* Mekanik özelliklerin yeterince gelişmesi için en az 28 gün kür süresi uygulanmalı, kritik yapılarda bu süre 56 güne çıkarılmalıdır.
  - *Tasarımda Rijitlik:* Ön tasarım aşamasında, muhafazakâr bir tahmin için elastisite modülünün ( $E_{so}$ )  $60 \cdot q_u$  ile  $100 \cdot q_u$  arasında değişebileceği kabul edilmeli ve nihai değerler saha verileri ile kalibre edilmelidir.
- *Uygulama ve Kalite Kontrol Prosedürleri:*
  - *Homojen Karışım:* Nano silikanın (NS) aglomere olmadan homojen dağılmasını sağlamak için yüksek devirli ve yeterli süreli karıştırma işlemi şarttır. İdeal olarak, kuru bileşenler (UK, KÇ) önceden homojenize edilmeli, ardından su ve sıvı NS kademeli olarak eklenmelidir.

- *Saha Kalite Kontrolü:* Her enjeksiyon partisinin kalitesini hızlı bir şekilde doğrulamak için Marsh hunisi ve sedimentasyon testleri sahada rutin olarak uygulanmalıdır.
- *Uygulama Alanları ve Sınırlamalar:*
  - *Kullanım Önceliği:* Önerilen sistem, zayıf zeminlerin enjeksiyon yöntemiyle iyileştirilmesinde birincil olarak önerilir. Performansı doğrulandıktan sonra, yol alt temel ve kaplama tabakalarının stabilizasyonu gibi diğer uygulamalarda da ön değerlendirmeye alınabilir.
  - *Çevresel Uygunluk ve Regülasyon:* Portland çimentosunun kullanılmaması, proje maliyetleri ve karbon ayak izinin azaltılmasında önemli bir avantaj sağlar. Kırmızı çamur gibi endüstriyel yan ürünlerin kullanımından önce, yerel ve ulusal çevre mevzuatına uygunluk açısından sızıntı suyu (leaching) testleri mutlaka yapılmalı ve sonuçlar ilgili otoritelerce onaylanmalıdır.
- *Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler:*
  - *Mikroyapısal Analizler:* Bağlayıcı mekanizmalarının doğrulanması için SEM ve XRD analizleri yapılarak jel oluşumu ve hidrasyon ürünleri karakterize edilmelidir.
  - *Dayanıklılık Performansı:* Önerilen karışımların donma-çözülme, sülfat etkisi ve ıslanma-kuruma dayanımı gibi uzun vadeli dayanıklılık özellikleri araştırılmalıdır.
  - *Dinamik Davranış:* Deprem ve trafik yükleri altındaki performansını anlamak için dinamik üç eksenli ve döngüsel yükleme testleri gerçekleştirilmelidir.
  - *Saha Doğrulaması:* Laboratuvar sonuçlarını doğrulamak amacıyla pilot saha uygulamaları yapılmalı ve saha karotları üzerinde testler tekrarlanmalıdır.
  - *Çevresel Etki:* Sistemin sürdürülebilirliğini niceliksel olarak ortaya koymak için yaşam döngüsü analizi (YDA) ve uzun vadeli sızıntı testleri yapılmalıdır.

## 7. KAYNAKLAR

- Adak, D., Sarkar, M., ve Mandal, S. (2014). Effect of nano-silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 70, 453-459. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.093>
- Ahmed, S., Meng, T., ve Taha, M. (2020). Utilization of red mud for producing a high strength binder by composition optimization and nano strengthening. *Nanotechnology Reviews*, 9(1), 396-409. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0029>
- Aksu, G., ve Eskisar, T. (2023). The geomechanical properties of soils treated with nanosilica particles. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(4), 954-969. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.06.013>
- Alshawmar, F. (2024). Utilization of Nano Silica and Plantain Leaf Ash for Improving Strength Properties of Expansive Soil. *Sustainability*, 16(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/su16052157>
- ASTM International. (2015). *ASTM D6910-15: Standard Test Method for Marsh Funnel Viscosity of Drilling Fluid* (Standard Nos. D6910-15). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D6910-15>
- Baker, W. H. (1981). *Design and Performance of Deep Soil Mixing*. Institution of Civil Engineers.
- Bruce. (1986). *Deep Mixing Methods: Application and Development*. Ground Engineering.
- Bruce. (2000). *Deep Mixing Method: An International Overview of Technology, Testing, and Product*.
- Bruce, D. A. (2018). Practical considerations in deep mixing design and construction. *Proceedings of the International Conference on Grouting, Deep Mixing, and Diaphragm Walls*, 25-38.
- Chaudhary, V., Yadav, J. S., ve Dutta, R. K. (2024). The Impact of Nano-Silica and Nano-Silica-Based Compounds on Strength, Mineralogy and Morphology of Soil: A Review. *Indian Geotechnical Journal*, 54(3), 876-896. <https://doi.org/10.1007/s40098-024-00871-3>
- Chen, S., Ou, X., Jiang, J., ve Tan, Z. (2023). Experimental Study on the Curing Mechanism of Red Mud-Based Stabilized Soil Co-Modified by Nano-SiO<sub>2</sub> and Gypsum. *Materials*, 16(17), Article 17. <https://doi.org/10.3390/ma16176016>
- Croce, P. (2014). *Jet Grouting: Technology, Design and Control*. CRC Press.
- Deepak, M. S., Rohini, S., Harini, B. S., ve Ananthi, G. B. G. (2021). Influence of fly-ash on the engineering characteristics of stabilised clay soil. *Materials Today: Proceedings*, 37, 2014-2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.497>
- Doğan, N., ve Fırat, M. E. (2024). Uçucu kül, silis dumanı ve cam elyaf kullanılarak iyileştirilen kilin mühendislik performansının değerlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi*

*Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 12(4), 784-798.  
<https://doi.org/10.29109/gujsc.1393857>

Elias, V. (2006). *Ground Improvement Methods—Volume I* (No. FHWA-NHI-06-019).  
<https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/75273>

Federal Highway Administration. (2013a). *Ground Improvement Methods, Volume II: Deep Mixing Method* (No. FHWA-NHI-13-046). FHWA.

Federal Highway Administration. (2013b). *Index—Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support, October 2013—FHWA-HRT-13-046* (No. FHWA-HRT-13-046). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.  
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/13046/index.cfm>

Fırat, A. T. (2015). *Jet Grouting Yöntemi İle Temel Takviyesi* [PhD Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü]. <http://hdl.handle.net/11527/11133>

Fritsch, M., ve Kirsch, F. (2002). Deterministic and probabilistic analysis of the soil stability above jet grouting columns. *Proceedings of the ISRM International Symposium – 3rd Asian Rock Mechanics Symposium*, 437-452. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=16398202>

Gül, S. (2015). *Zemin iyileştirmesinde kullanılan yöntemlerden biri olan jet grout yöntemine ilişkin bir uygulama An application for the jet grouting method used in ground improvement.*  
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>

He, J., Gao, Y., ve Wang, S. (2021). Long-term strength development and pozzolanic reaction of red mud and fly ash based geopolymer stabilized soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(5), 04021074.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003701](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003701)

Kanat, A. (2018). *Zemin İyileştirmesinde Jet Grouting Yönteminin Farklı Parametrelerle İncelenmesi* [Master's Thesis, Selçuk University].  
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>

Kang, G., Zhou, Y., ve Zhang, M. (2023a). Porosity/cement ratio as controlling factor of UCS in stabilized soils. *Journal of Building Engineering*, 65, 105724.  
<https://doi.org/10.1016/j.job.2023.105724>

Kang, G., Zhou, Y., ve Zhang, M. (2023b). Porosity/cement ratio as controlling factor of UCS in stabilized soils. *Journal of Building Engineering*, 65, 105724.  
<https://doi.org/10.1016/j.job.2023.105724>

Kitazume, M., ve Terashi, M. (2013a). *The Deep Mixing Method*. CRC Press.

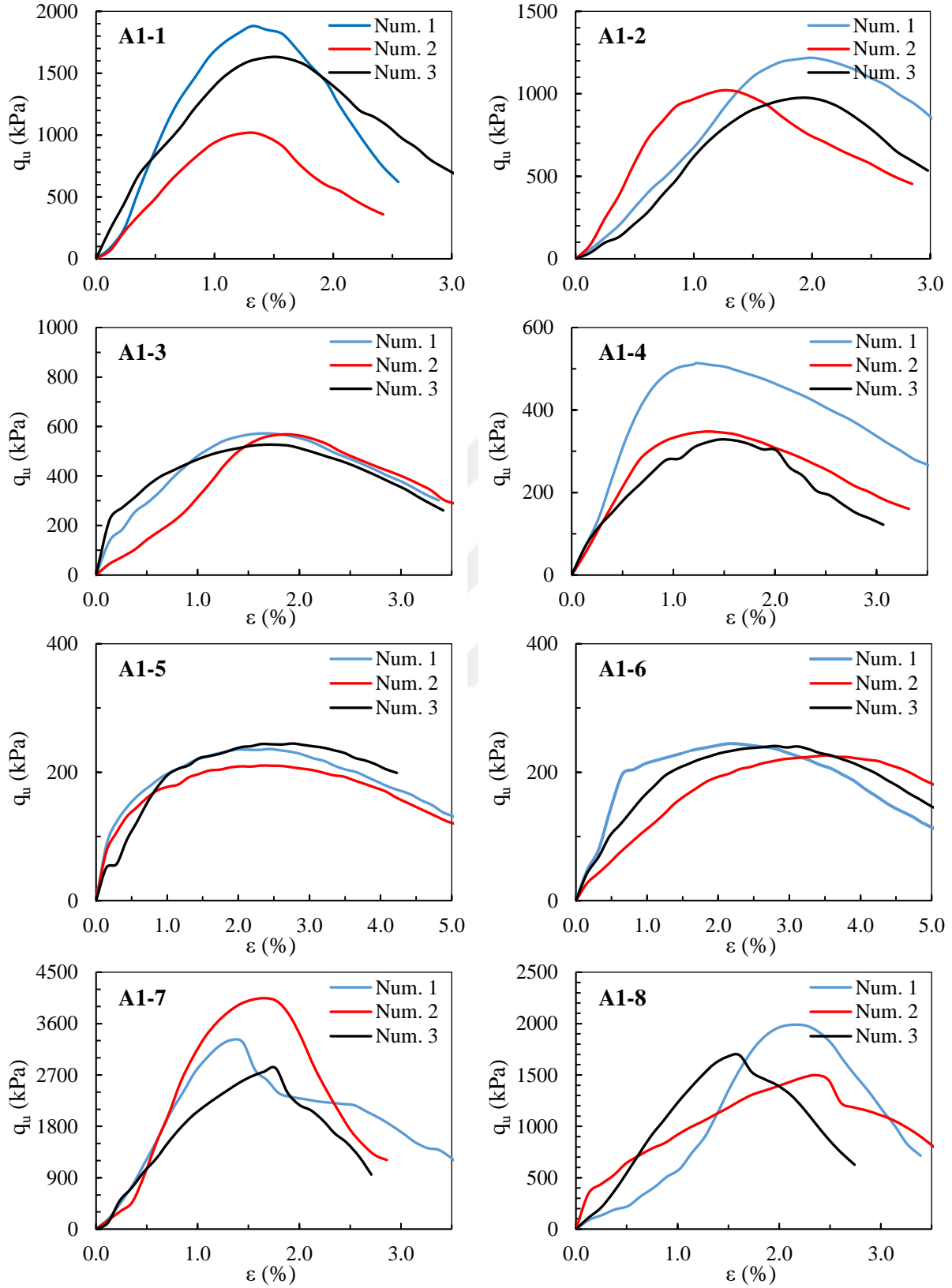
Kitazume, M., ve Terashi, M. (2013b). *The Deep Mixing Method*. CRC Press, Balkema.

- Kong, X., Wang, G., Rong, S., Liang, Y., Liu, M., ve Zhang, Y. (2023). Utilization of Fly Ash and Red Mud in Soil-Based Controlled Low Strength Materials. *Coatings*, 13(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/coatings13050893>
- Kumar, R., ve Gupta, S. (2022). Optimization of nano-silica content for enhancing strength and durability of soil–binder mixtures under different curing periods. *Soils and Foundations*, 62(4), 101122. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101122>
- Li, J., Yu, C., Chen, Y., ve Zhang, Y. (2017). Mechanical properties and microstructure of nano-silica modified soil-cement. *Soils and Foundations*, 57(4), 698-706. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.04.013>
- Li, P., Liu, X., Dong, K., ve Chen, C. (2025). Red mud and fly ash modified foamed lightweight soil reinforced by fiber for engineering applications: Strength properties and microscopic mechanism. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04368. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04368>
- Liu, R., Zhu, C., Zhang, Y., ve Yang, J. (2021). Mechanical and microstructural properties of red mud–fly ash based geopolymer stabilized soils. *Construction and Building Materials*, 271, 121559. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121559>
- Luo, D., Yufeng, D., Zhang, Ji., Chen, F., ve Song, Y. (2025). *Preparation of Geopolymers from Fly Ash and Red Mud: Properties, Microstructure and Mechanism* (SSRN Scholarly Paper No. 5142447). Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5142447>
- Mustakim, S. M., Das, S. K., Mishra, J., Aftab, A., Alomayri, T. S., Assaedi, H. S., ve Kaze, C. R. (2021). Improvement in Fresh, Mechanical and Microstructural Properties of Fly Ash- Blast Furnace Slag Based Geopolymer Concrete By Addition of Nano and Micro Silica. *Silicon*, 13(8), 2415-2428. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00593-0>
- New York State Department of Transportation. (2013). *Geotechnical Design Manual*. وئتر. <https://www.dot.ny.gov/divisions/engineering/technical-services/geotechnical-engineering-bureau/gdm>
- Rahman, I., ve Singh, P. (2022). Improvements in the Engineering Properties of Cementitious Composites Using Nano-Sized Cement and Nano-Sized Additives. *Materials*, 15(22), Article 22. <https://doi.org/10.3390/ma15228066>
- Rajaratnam, N. (1976). *Turbulent Jets*. Elsevier.
- Rivera, J. F., Orobio, A., Cristelo, N., ve Mejía de Gutiérrez, R. (2020). Fly ash-based geopolymer as A4 type soil stabiliser. *Transportation Geotechnics*, 25, 100409. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100409>
- Savaş, H., Türköz, M., Seyrek, E., ve Ünver, E. (2018). Comparison of the effect of using class C and F fly ash on the stabilization of dispersive soils. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(20), 612. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3976-6>

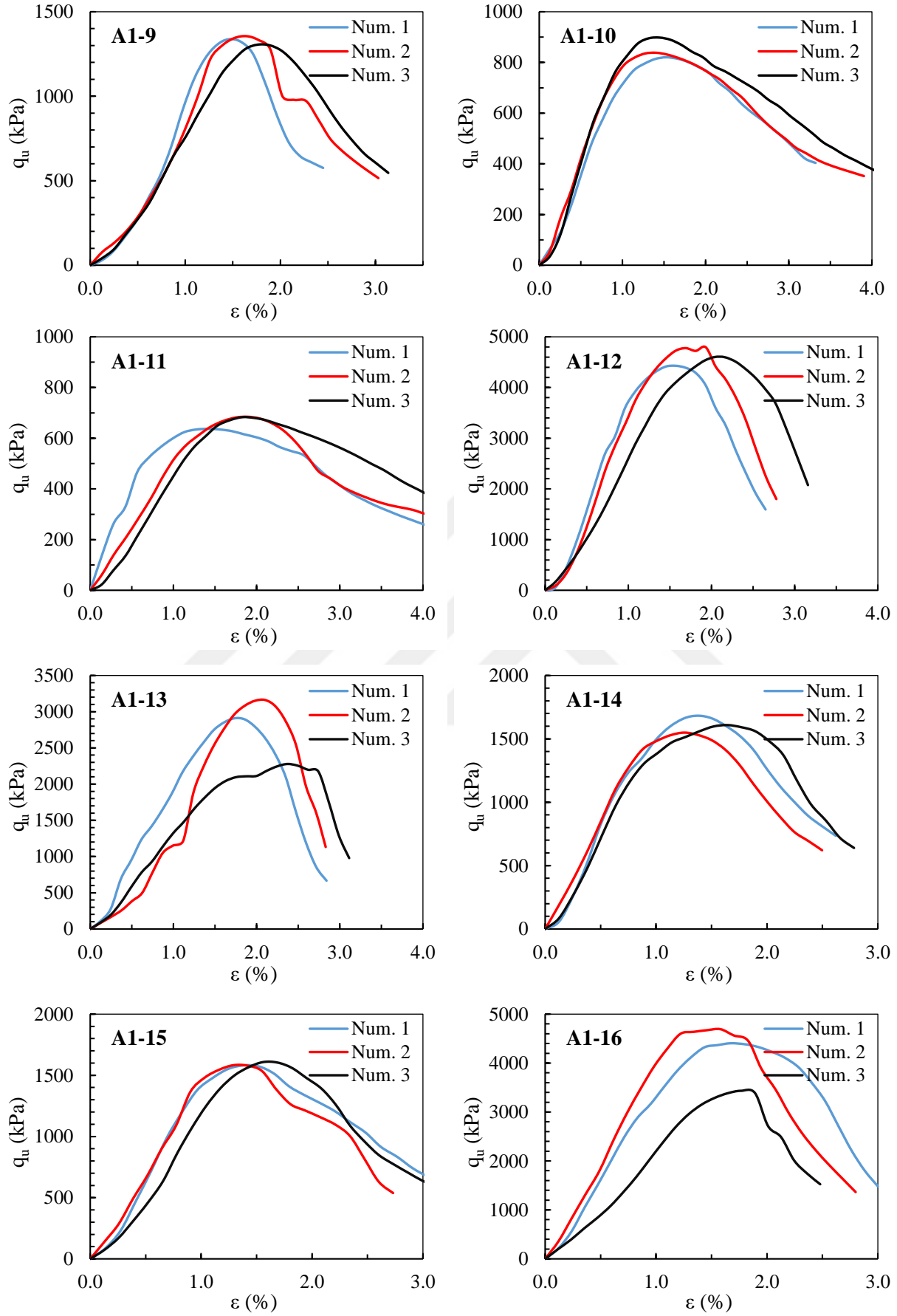
- Selvakumar, S., Kulanthaivel, P., ve Soundara, B. (2021). Influence of nano-silica and sodium silicate on the strength characteristics of clay soil. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 6(3), 46. <https://doi.org/10.1007/s41204-021-00142-z>
- Seyrek, E. (2018). Engineering behavior of clay soils stabilized with class C and class F fly ashes. *Science and Engineering of Composite Materials*, 25(2), 273-287. <https://doi.org/10.1515/secm-2016-0084>
- Shirkhanloo, S., Najafi, M., Kaushal, V., ve Rajabi, M. (2021). A Comparative Study on the Effect of Class C and Class F Fly Ashes on Geotechnical Properties of High-Plasticity Clay. *CivilEng*, 2(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/civileng2040054>
- Soğancı, A. S., Yenginar, Y., Özkan, İ., Güzel, Y., ve Özdemir, A. (2024). Waste Management of Red Mud and Fly Ash to Utilize in Road Subgrade Material. *Sustainability*, 16(7), 2987. <https://doi.org/10.3390/su16072987>
- Sridevi, G. (2019). Stabilization of Expansive Soil with Red Mud ve Lime. İçinde T. Thyagaraj (Ed.), *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics* (ss. 259-268). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-0559-7\\_29](https://doi.org/10.1007/978-981-13-0559-7_29)
- Srivastava, S., ve Roy, D. S. (2021). Study of Effect of Fly Ash and Nano Silica on Strength of Concrete Mix and Its Microstructure Analysis. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 08(07), 65-71.
- Taşçı, E. (2021). *Jet enjeksiyon yöntemi ile zemin iyileştirme ve güncel yönetmeliklerde iyileşme önerileri*. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Terashi, M. (1997). Deep Mixing Method – Brief State of the Art. *Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 4, 1-20. <https://trid.trb.org/View/500777>
- Terashi, M. (1999). *Deep mixing method—Brief state of the art*. 4. <https://trid.trb.org/View/500777>
- Topolnicki. (2004a). In-situ soil mixing Michał Topolnicki. İçinde *Ground Improvement* (3. bs). CRC Press.
- Topolnicki, M. (2004b). Deep Soil Mixing for Embankments and Structures. İçinde *Ground Improvement (3rd ed.)* (ss. 125-138). CRC Press.
- Turan, C. (2022). Geotechnical Characteristics of Fine-Grained Soils Stabilized with Fly Ash, a Review. *Sustainability*, 14(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/su142416710>
- Turan, C., Javadi, A. A., ve Vinai, R. (2022a). Effects of Class C and Class F Fly Ash on Mechanical and Microstructural Behavior of Clay Soil—A Comparative Study. *Materials*, 15(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/ma15051845>

- Turan, C., Javadi, A. A., ve Vinai, R. (2022b). Effects of Class C and Class F Fly Ash on Mechanical and Microstructural Behavior of Clay Soil—A Comparative Study. *Materials*, 15(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/ma15051845>
- Turan, C., Javadi, A. A., Vinai, R., & Beig Zali, R. (2022c). Geotechnical Characteristics of Fine-Grained Soils Stabilized with Fly Ash, a Review. *Sustainability*, 14(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/su142416710>
- Ujaczki, É., Feigl, V., Farkas, É., Vaszita, E., Gruiz, K., ve Molnár, M. (2016). Red mud as acidic sandy soil ameliorant: A microcosm incubation study. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 91(6), 1596-1606. <https://doi.org/10.1002/jctb.4898>
- Vergara, J. A. A., Consoli, N. C., ve Saldanha, R. B. (2025a). Predicting UCS and stiffness of cemented soils using porosity–water/binder index. *Materials*, 18(2), 268. <https://doi.org/10.3390/ma18020268>
- Vergara, J. A. A., Consoli, N. C., ve Saldanha, R. B. (2025b). Predicting UCS and stiffness of cemented soils using porosity–water/binder index. *Materials*, 18(2), 268. <https://doi.org/10.3390/ma18020268>
- Wang, S., Chen, Z., Jiang, H., Su, J., ve Wu, Z. (2023a). Strength performance and enhancement mechanism of silty sands stabilized with cement, red mud, and phosphogypsum. *Journal of Building Engineering*, 73, 106762. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106762>
- Wang, S., Chen, Z., Jiang, H., Su, J., ve Wu, Z. (2023b). Strength performance and enhancement mechanism of silty sands stabilized with cement, red mud, and phosphogypsum. *Journal of Building Engineering*, 73, 106762. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106762>
- Welcome to Keller. (2020). Welcome to Keller. İçinde *Keller North America*. <https://www.keller-na.com/welcome-keller>
- White, D., Harrington, D., ve Thomas, Z. (2005a). *Fly Ash Soil Stabilization for Non-Uniform Subgrade Soils* [Final Report]. Iowa State University. <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/17253>
- White, D., Harrington, D., ve Thomas, Z. (2005b). *Fly Ash Soil Stabilization for Non-Uniform Subgrade Soils* [Final Report]. Iowa State University. <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/17253>
- Xiao, H., Shen, W., He, P., ve Zhang, W. (2019). Utilization of red mud in cement-based materials: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 361, 161-178. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.088>
- Yağızatlı, E. (2012). *Jet Grout Kolonların SEM Analizi ve Etkin Parametrelerin Optimizasyonu* [Master's Thesis, Harran Üniversitesi]. [https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=O40gkIKfzA4c0iuATO88\\_Q&no=TCajkeD8riqxezqwh8HNYA&utm\\_source=chatgpt.com](https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=O40gkIKfzA4c0iuATO88_Q&no=TCajkeD8riqxezqwh8HNYA&utm_source=chatgpt.com)

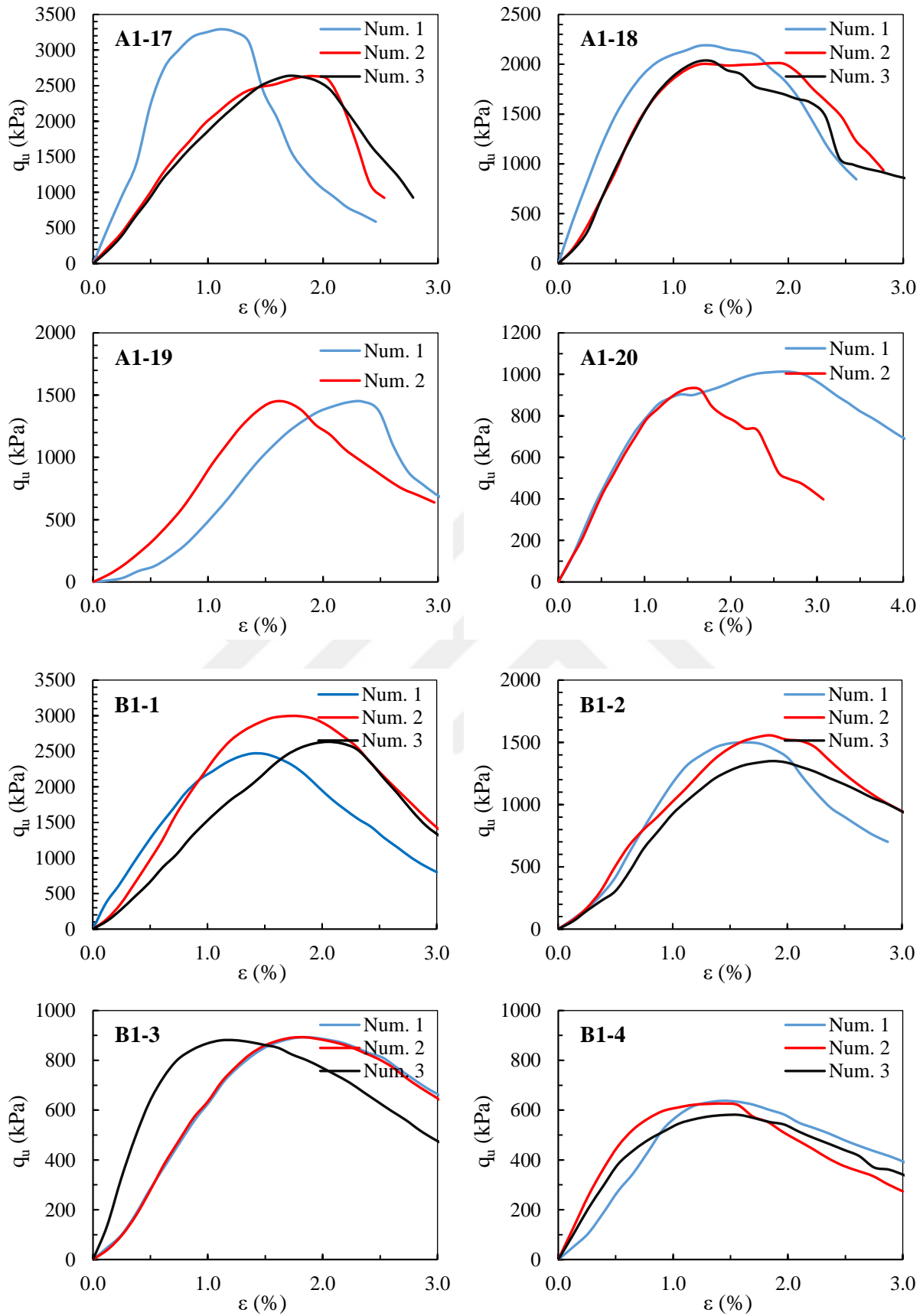
- Yazıcı, E., ve Unsever, Y. S. (2024). Investigation of Cement and Fly Ash on the Improvement of Fine Sand Soil. *Applied Sciences (2076-3417)*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/app14072908>
- Yıldız, S., Çelik, R., ve Aksoy, M. (2020). Effects of nano additives on rheology and setting behavior of soil–binder mixtures. *7th International Symposium on Ground Improvement*, 210-219.
- Zhang, M., Guo, H., El-Korchi, T., Zhang, G., ve Tao, M. (2014). Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. *Construction and Building Materials*, 61, 1468-1478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.036>
- Zhao, Y., Liu, S., ve Yang, Q. (2020). Effect of curing time on the mechanical behavior and microstructure of stabilized soils with industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 247, 118543. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118543>
- Zimar, Z., Robert, D., Zhou, A., Giustozzi, F., Setunge, S., ve Kodikara, J. (2022). Application of coal fly ash in pavement subgrade stabilisation: A review. *Journal of Environmental Management*, 312, 114926. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114926>

**EKLER****EK-1: Serbest Basınç Deneyi Sonuçları: Uçucu Kül Enjeksiyonu**

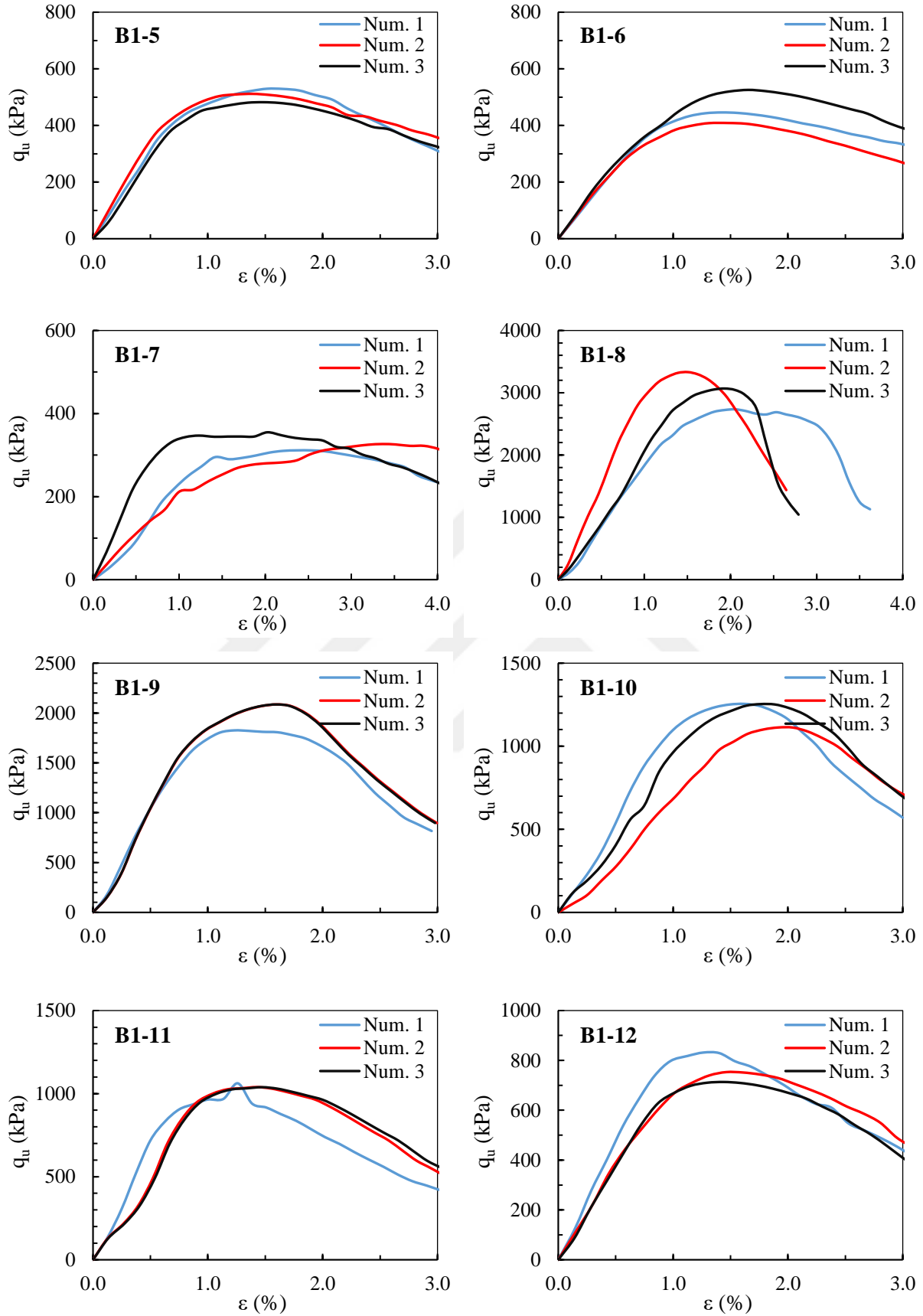
**Şekil Ek 1.1.** Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A1-1 / A1-8 tasarımları (28 gün kür süresi)



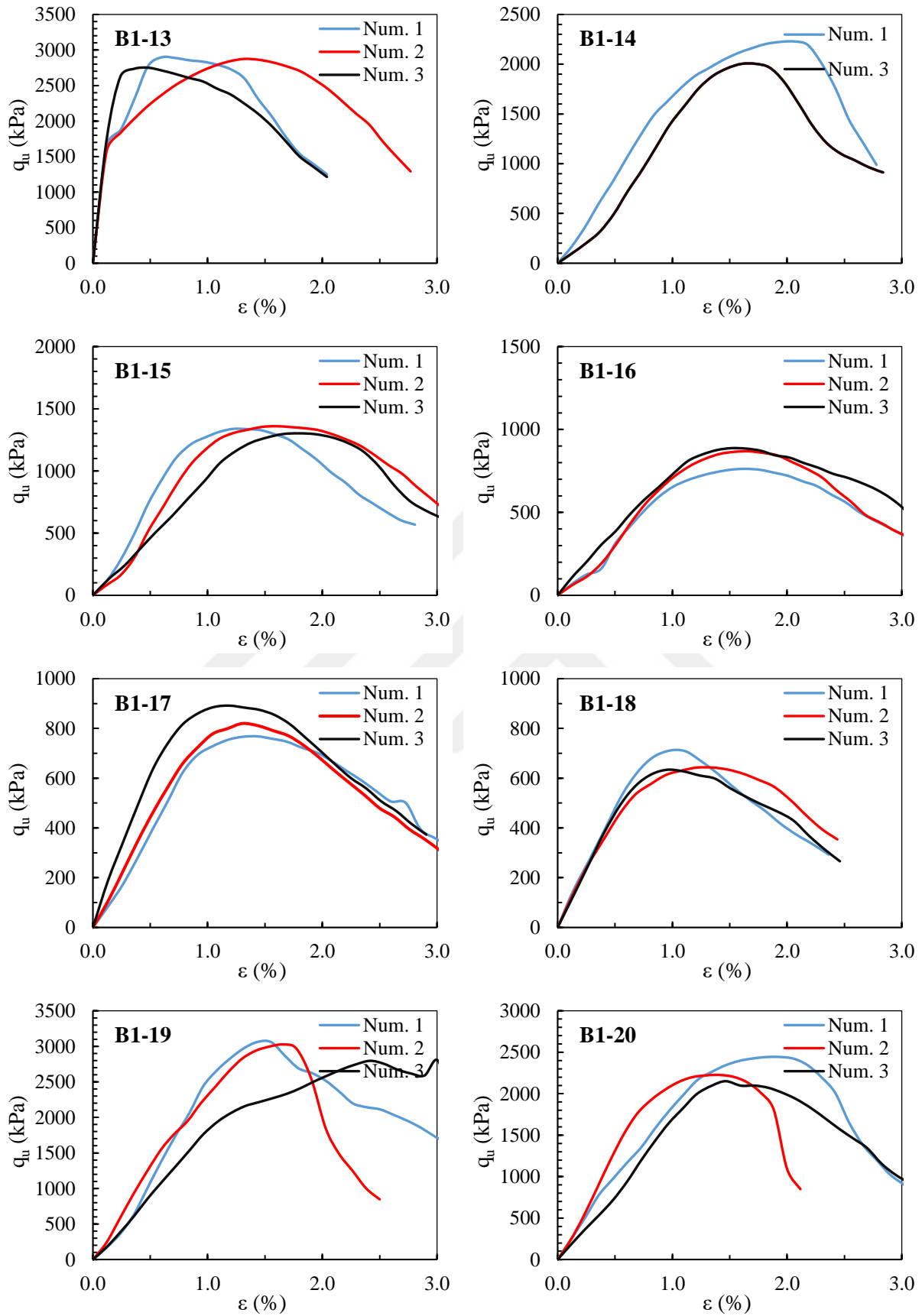
Şekil Ek 1.2. Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A1-9 / A1-16 tasarımları (28 gün kür süresi)



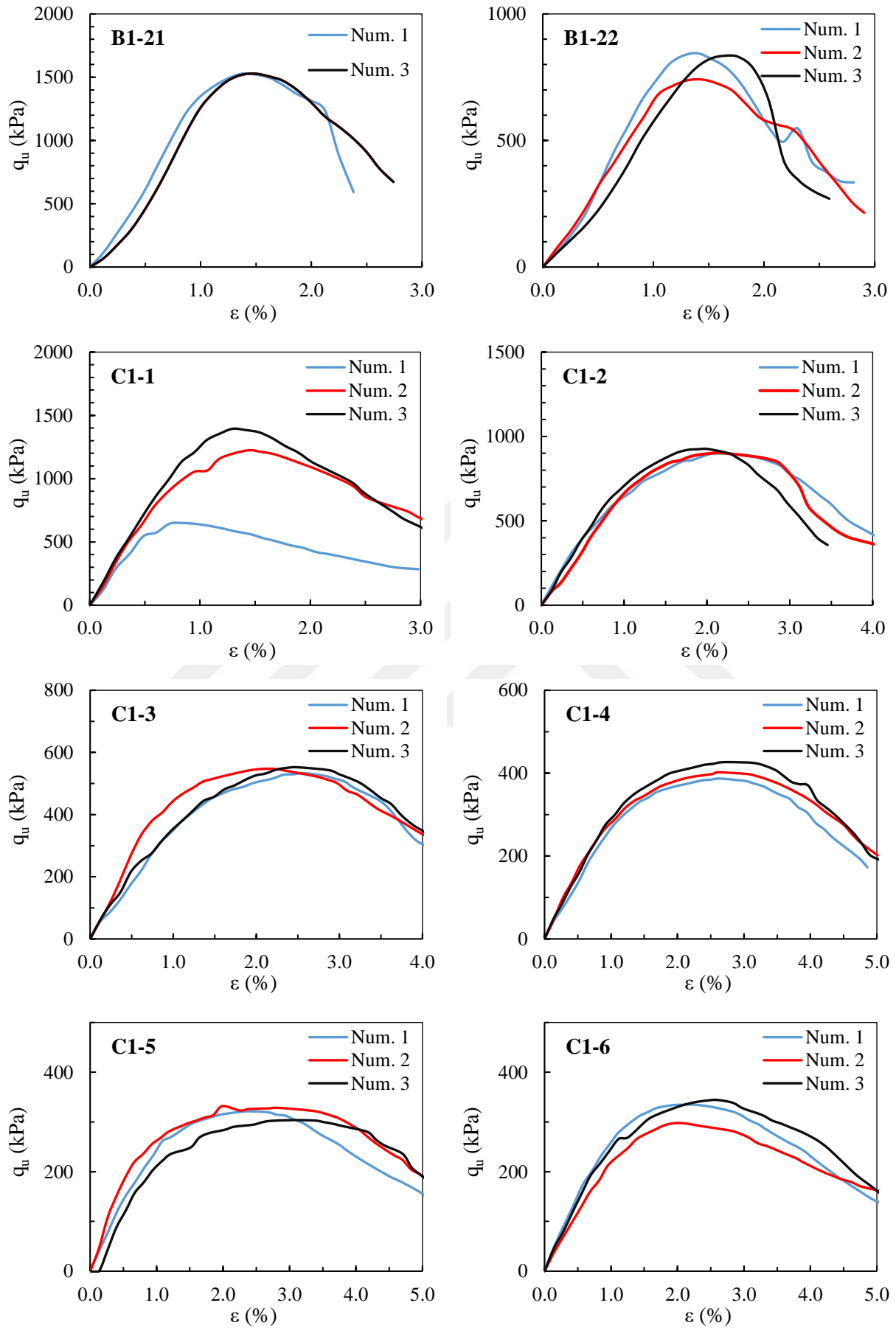
Şekil Ek 1.3. Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A1-17 / A1-20 ve B1-1 / B1-4 tasarımları (28 gün kür süresi)



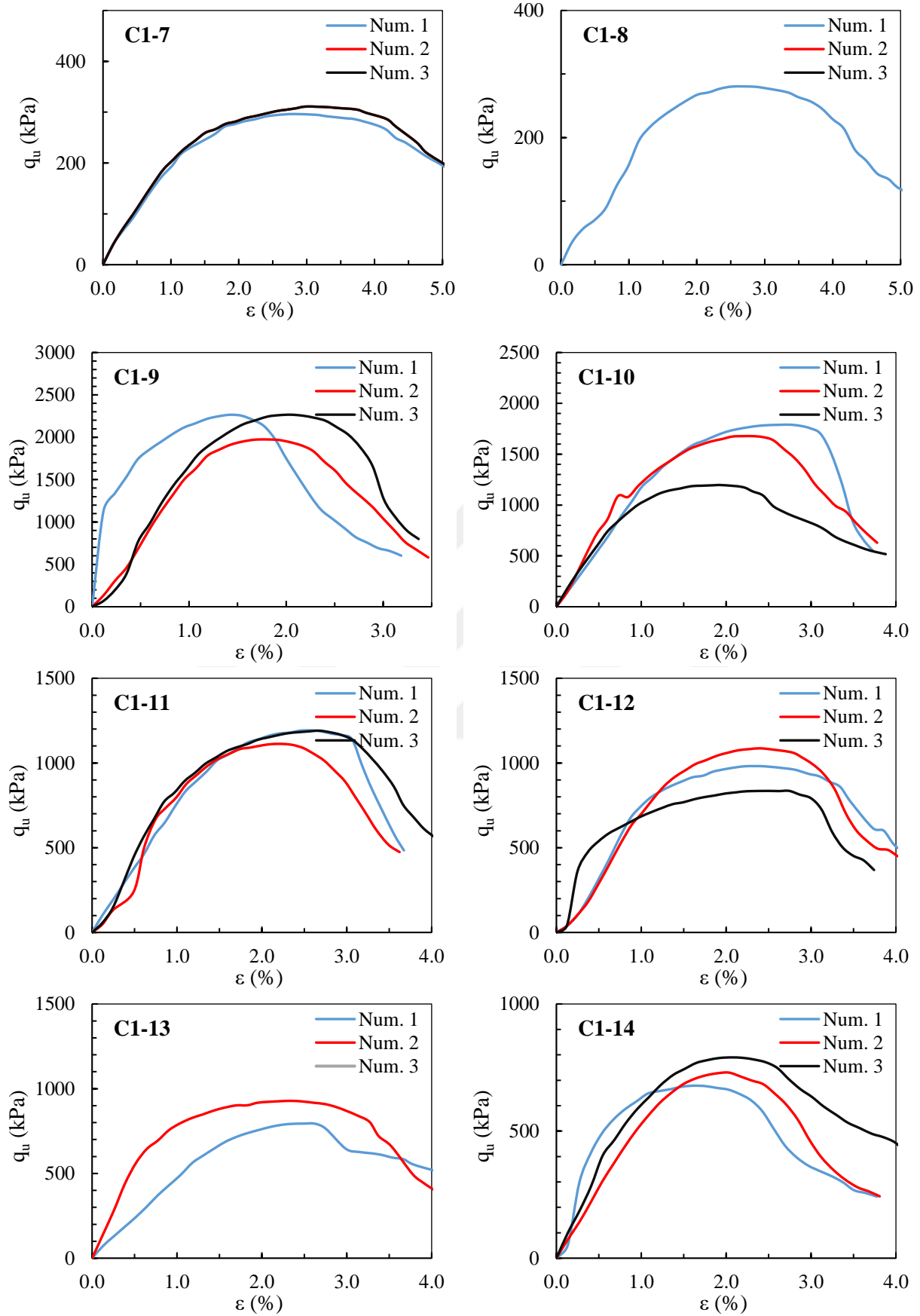
Şekil Ek 1.4. Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: B1-5 / B1-12 tasarımları (28 gün kür süresi)



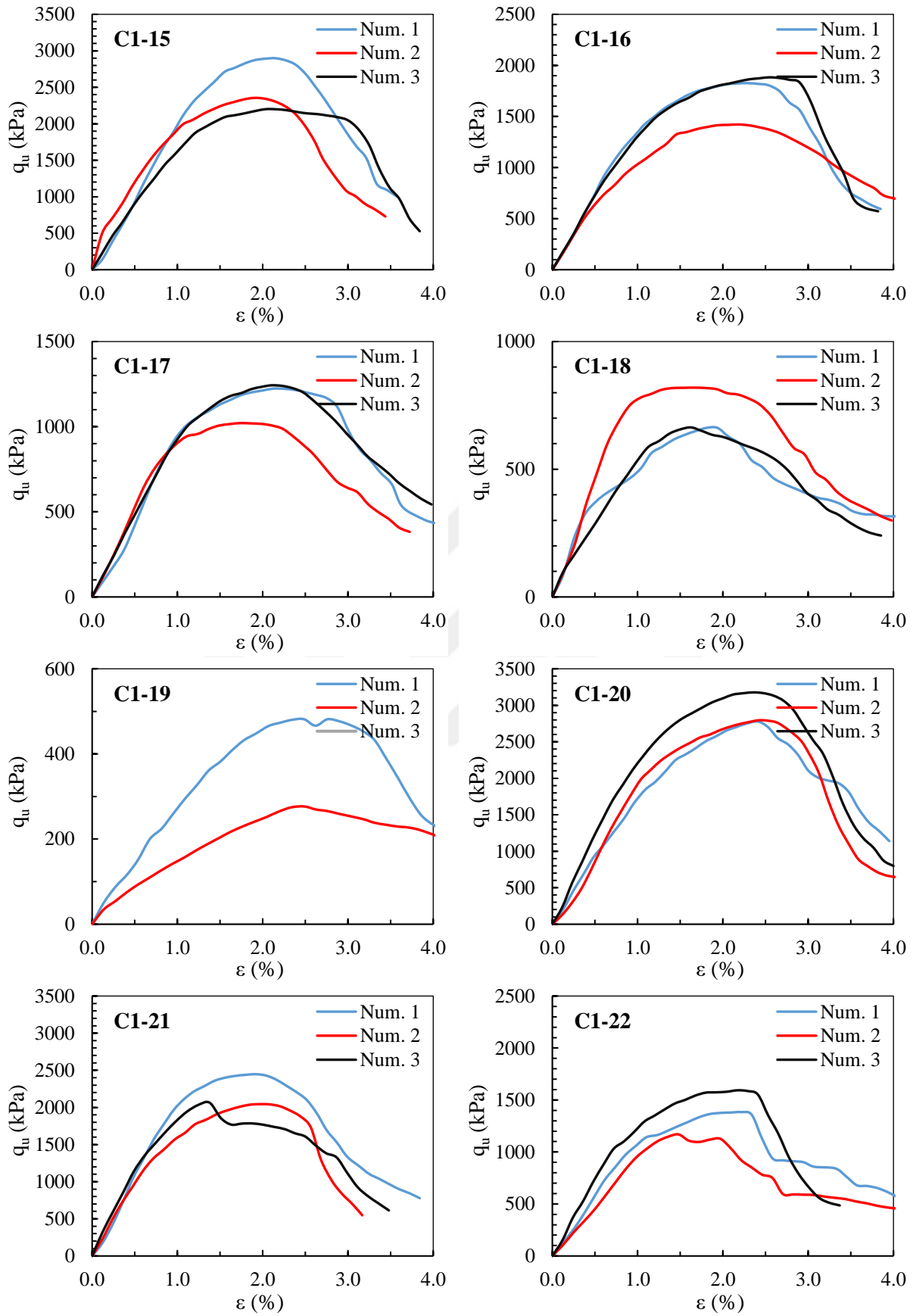
Şekil Ek 1.5. Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: B1-13 / B1-20 tasarımları (28 gün kür süresi)



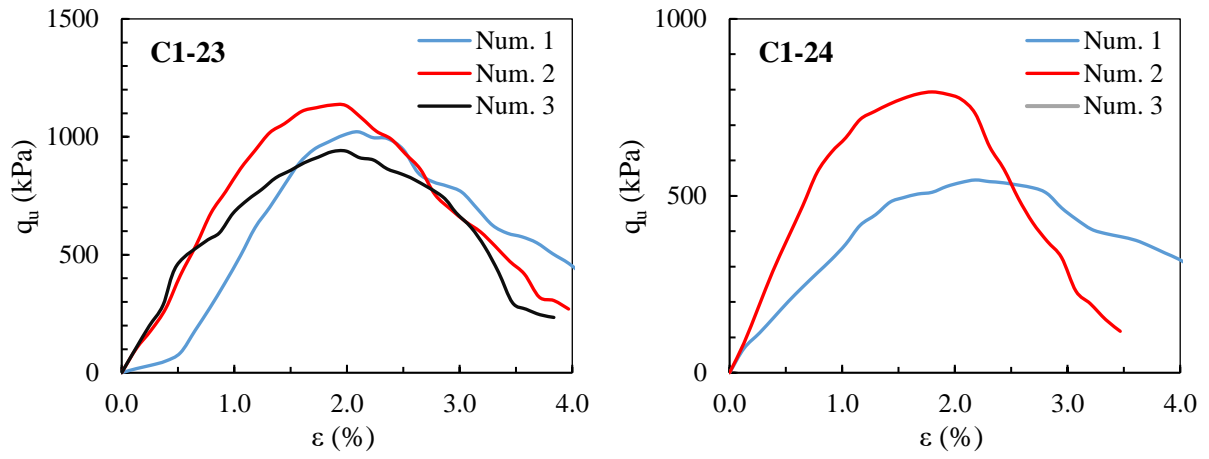
Şekil Ek 1.6. Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: B1-21 / C1-6 tasarımları (28 gün kür süresi)



Şekil Ek 1.7. Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C1-7 / C1-14 tasarımları (28 gün kür süresi)

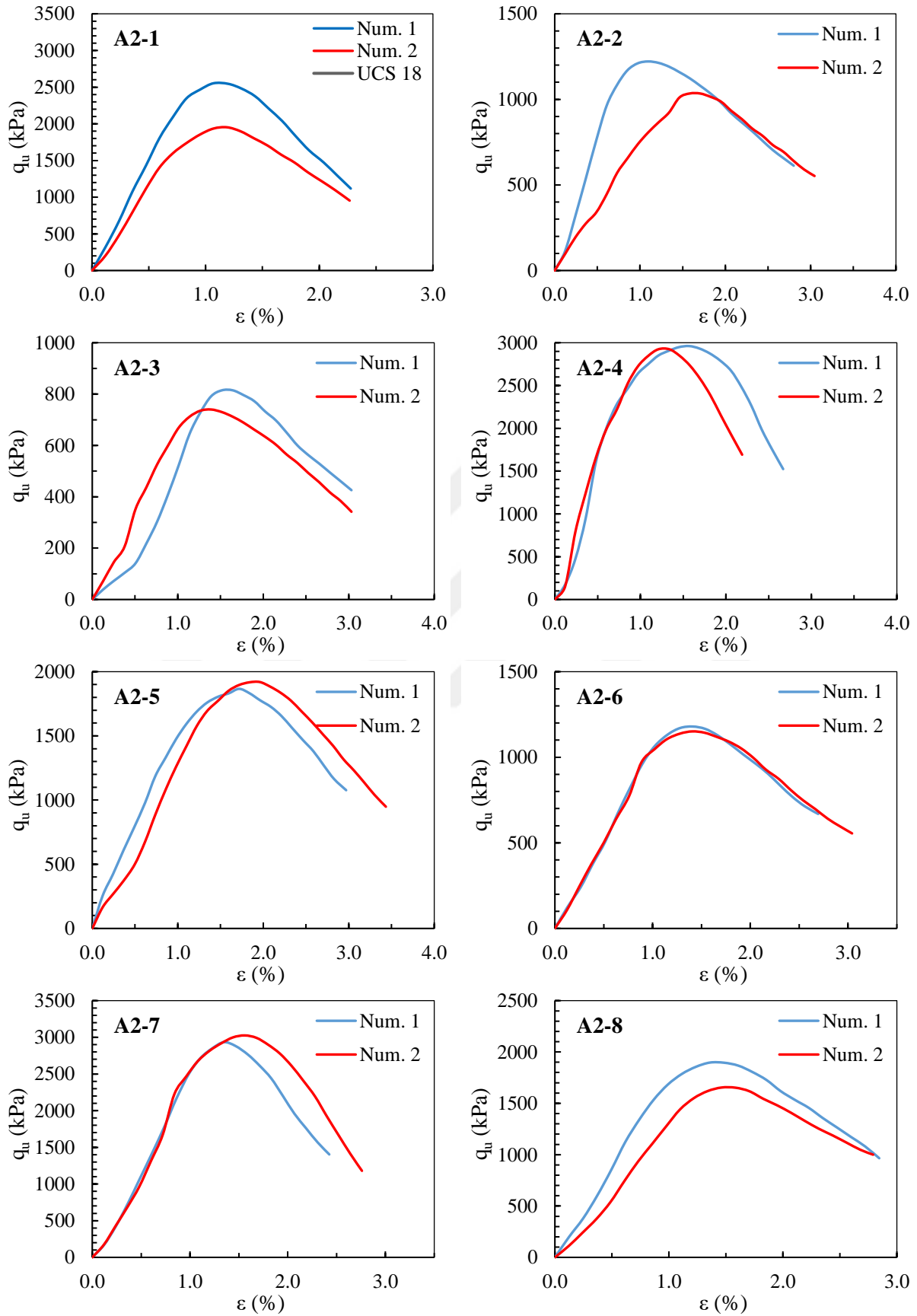


Şekil Ek 1.8. Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C1-15 / C1-22 tasarımları (28 gün kür süresi)

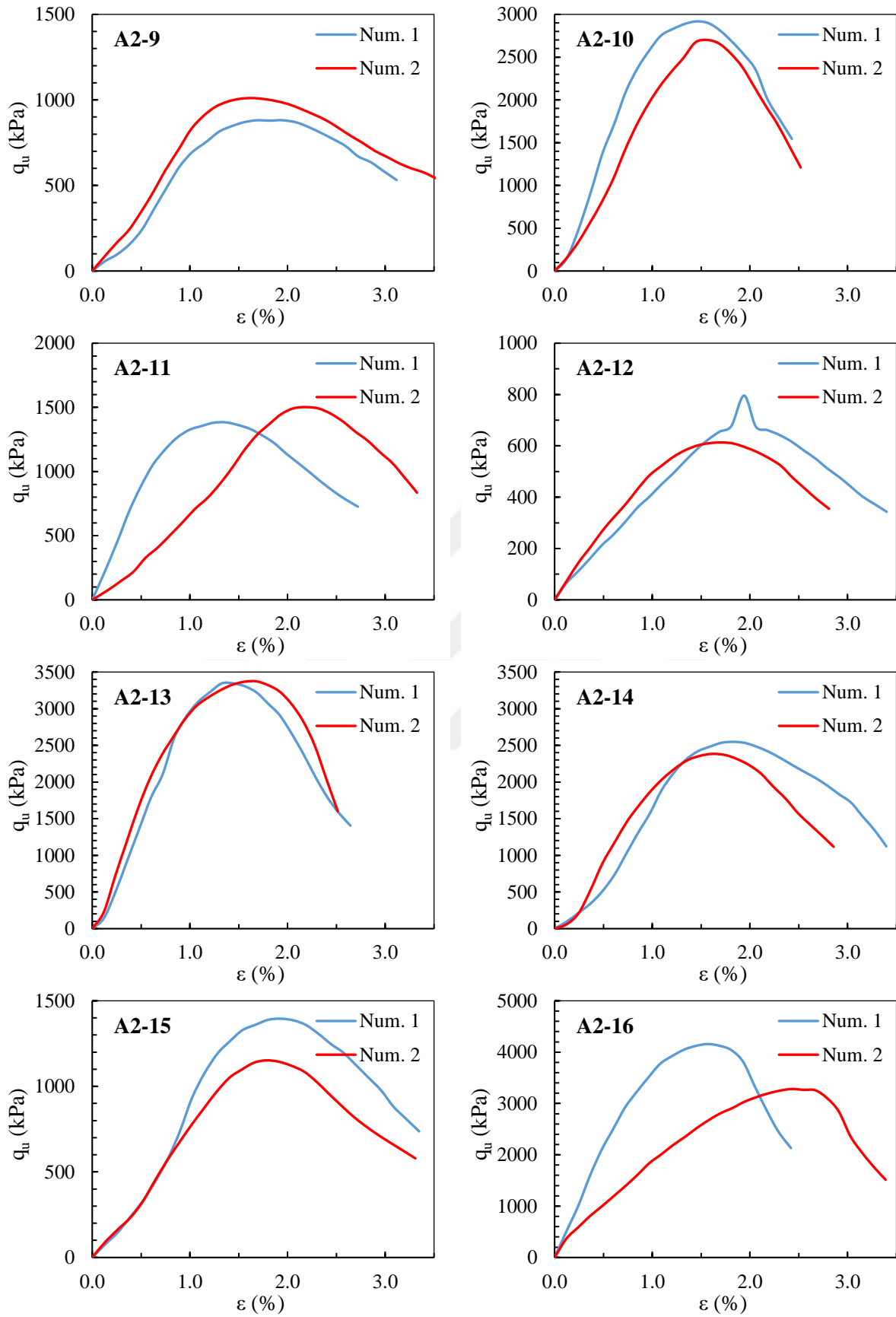


**Şekil Ek 1.9.** Uçucu kül enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C1-23 / C1-24 tasarımları (28 gün kür süresi)

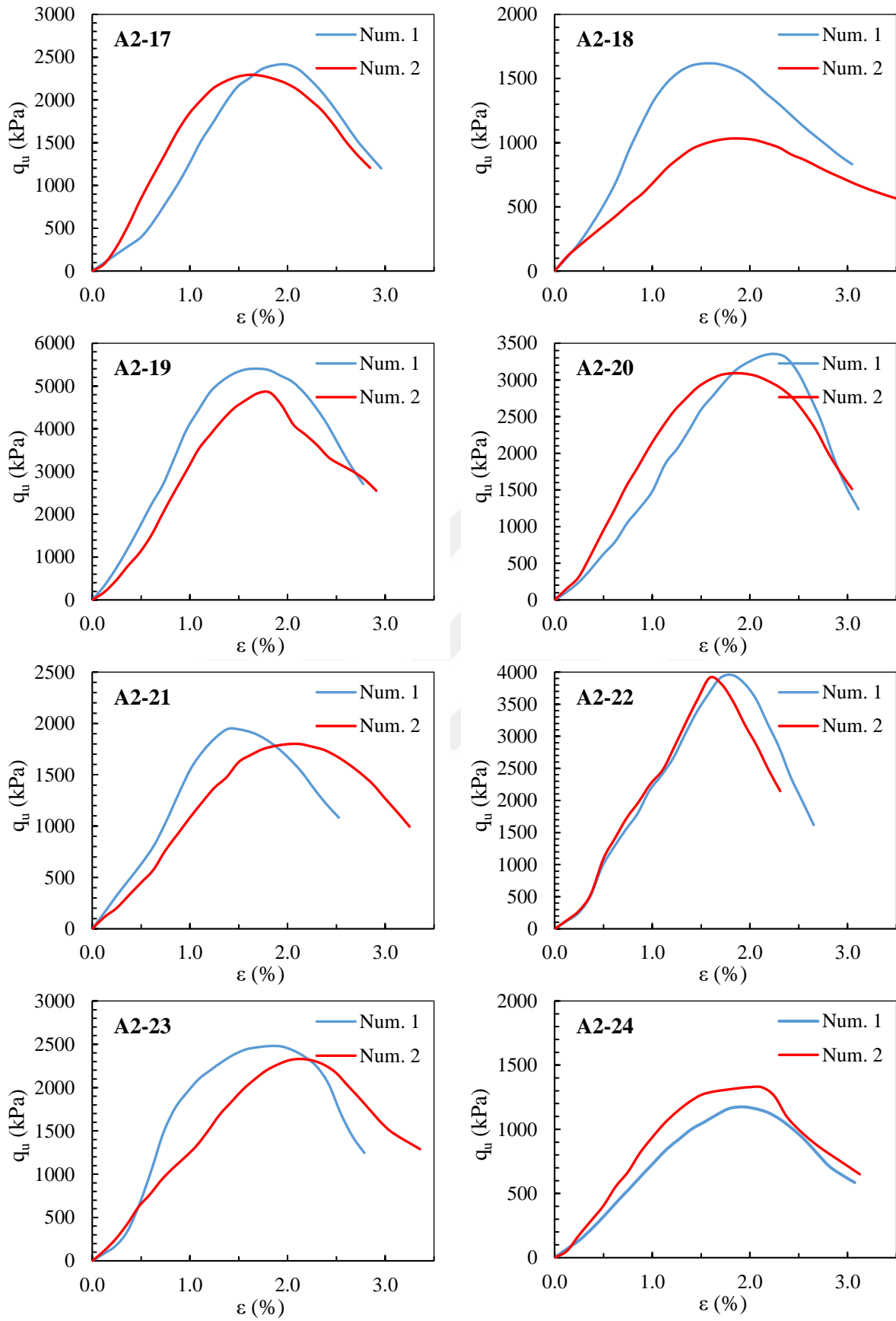
## EK-2: Serbest Basınç Deneyi Sonuçları: Uçucu kül ve Kırmızı Çamur Enjeksiyonu



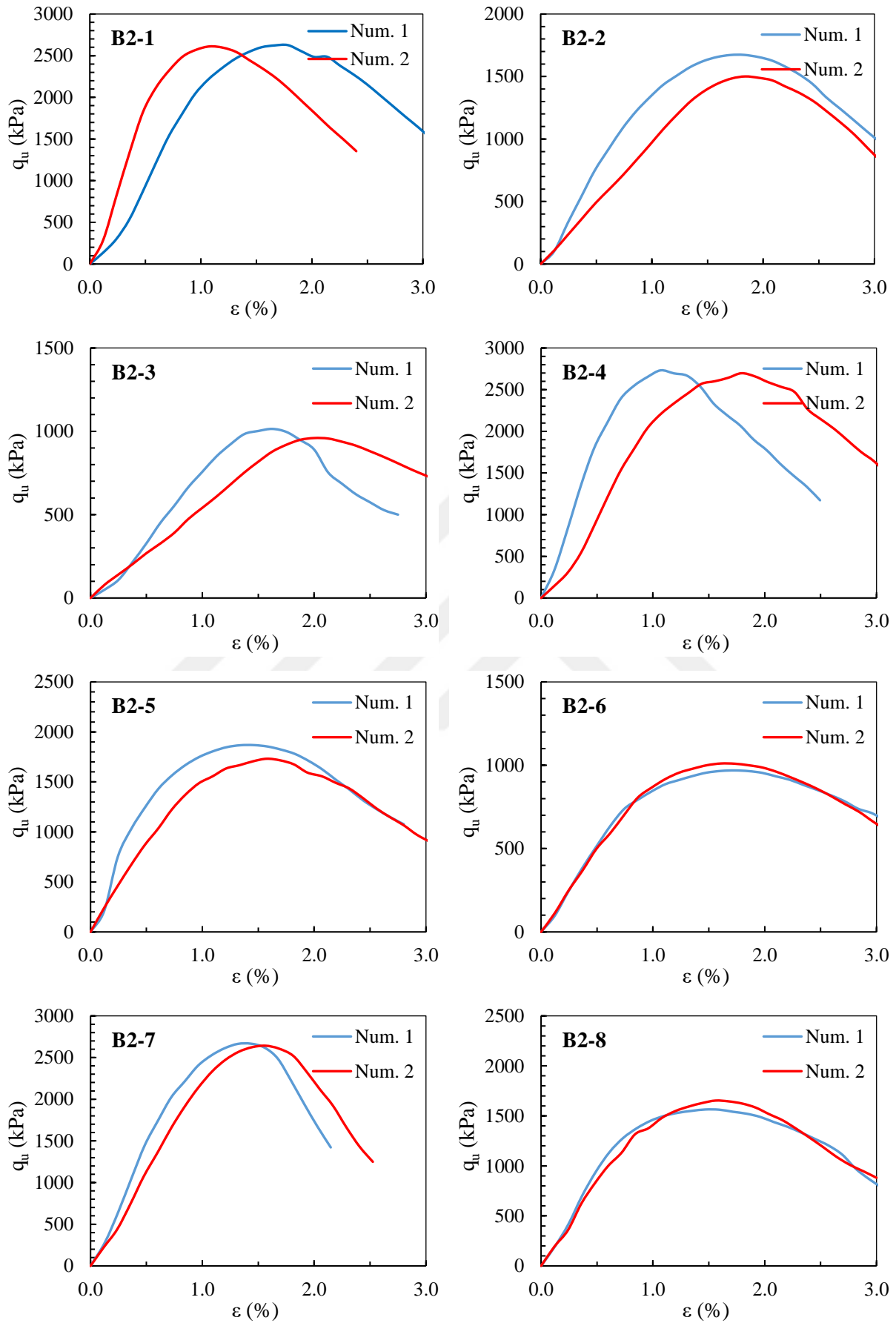
Şekil Ek 2.1. Uçucu kül ve Kırmızı Çamur enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A2-1 / A2-8 tasarımları (28 gün kür süresi)



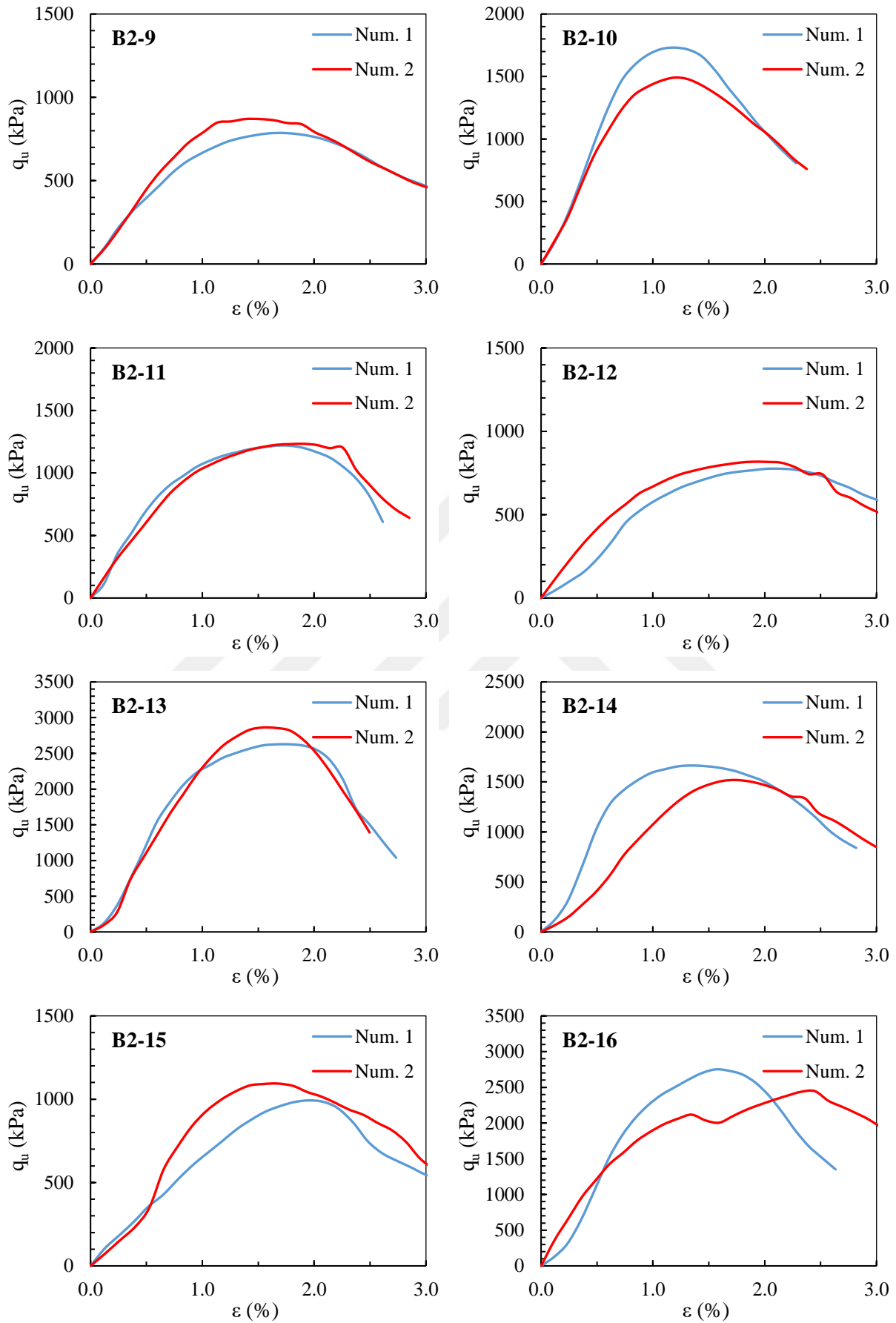
Şekil Ek 2.2. Uçucu kül ve Kırmızı Çamur enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A2-9 / A2-16 tasarımları (28 gün kür süresi)



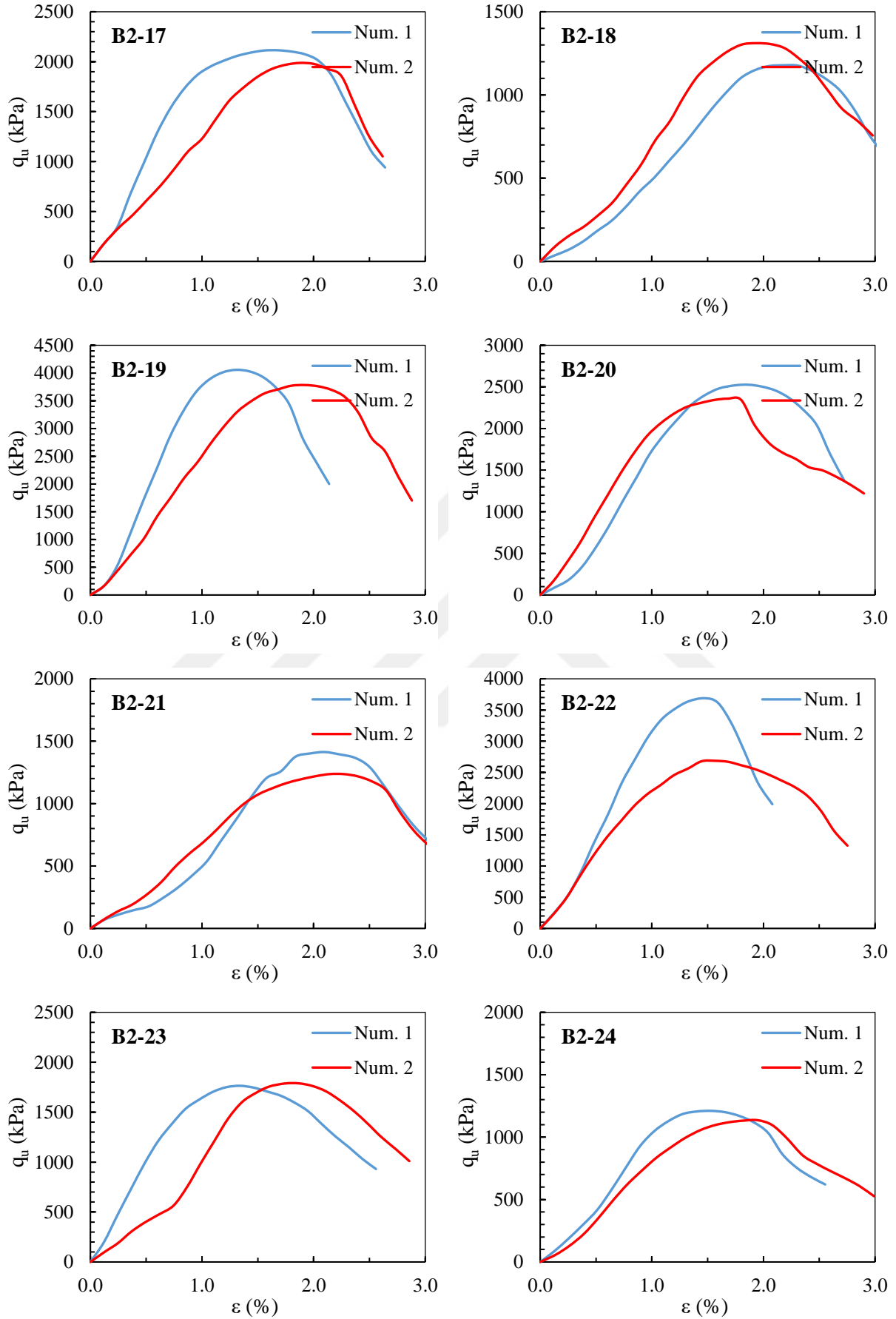
**Şekil Ek 2.3.** Uçucu kül ve Kırmızı Çamur enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A2-17 / A2-24 tasarımları (28 gün kür süresi)



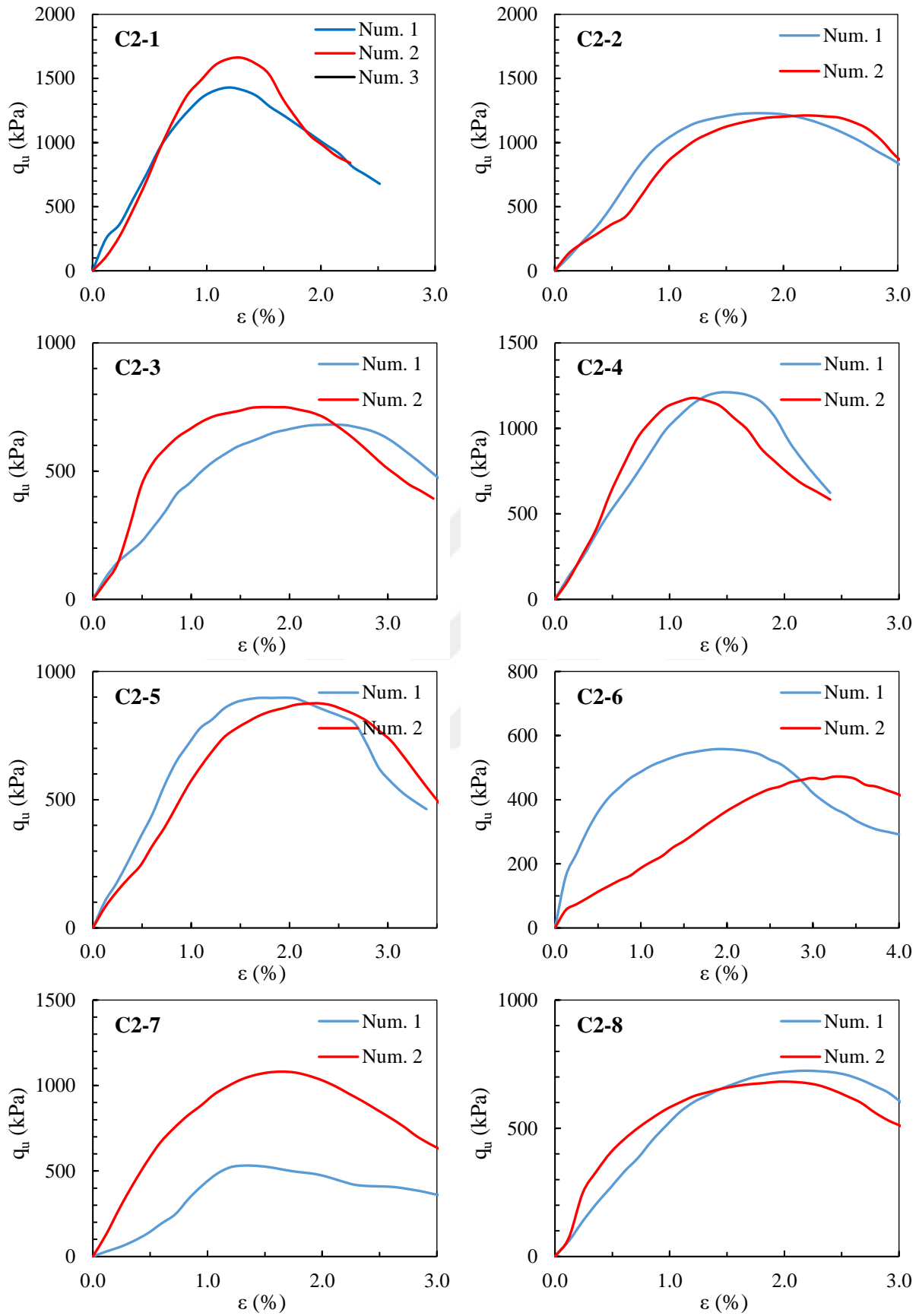
Şekil Ek 2.4. Uçucu kül ve Kırmızı Çamur enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: B2-1 / B2-8 tasarımları (28 gün kür süresi)



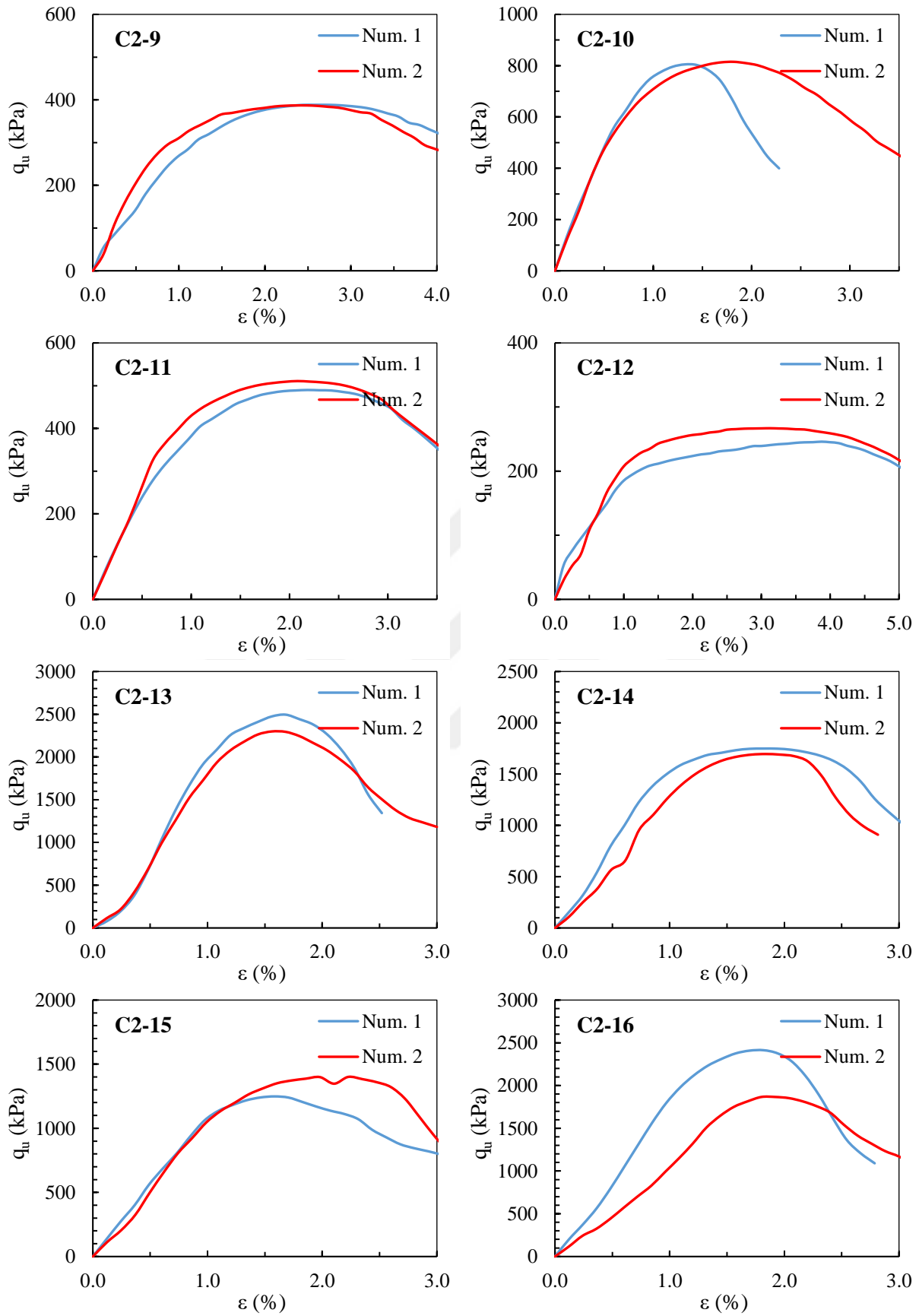
Şekil Ek 2.5. Uçucu kül ve Kırmızı Çamur enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: B2-9 / B2-16 tasarımları (28 gün kür süresi)



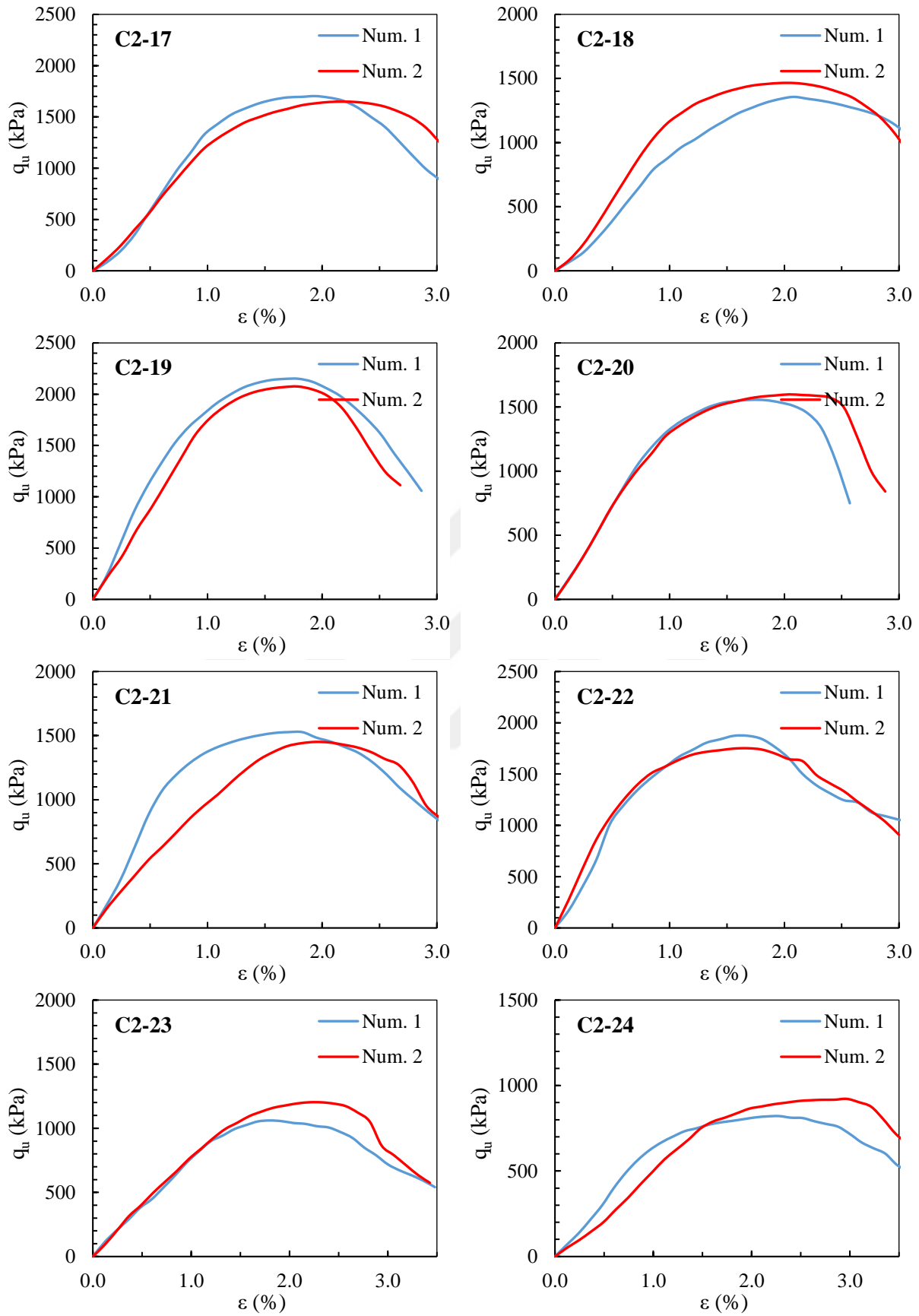
Şekil Ek 2.6. Uçucu kül ve Kırmızı Çamur enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: B2-17 / B2-24 tasarımları (28 gün kür süresi)



Şekil Ek 2.7. Uçucu kül ve Kırmızı Çamur enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C2-1 / C2-8 tasarımları (28 gün kür süresi)

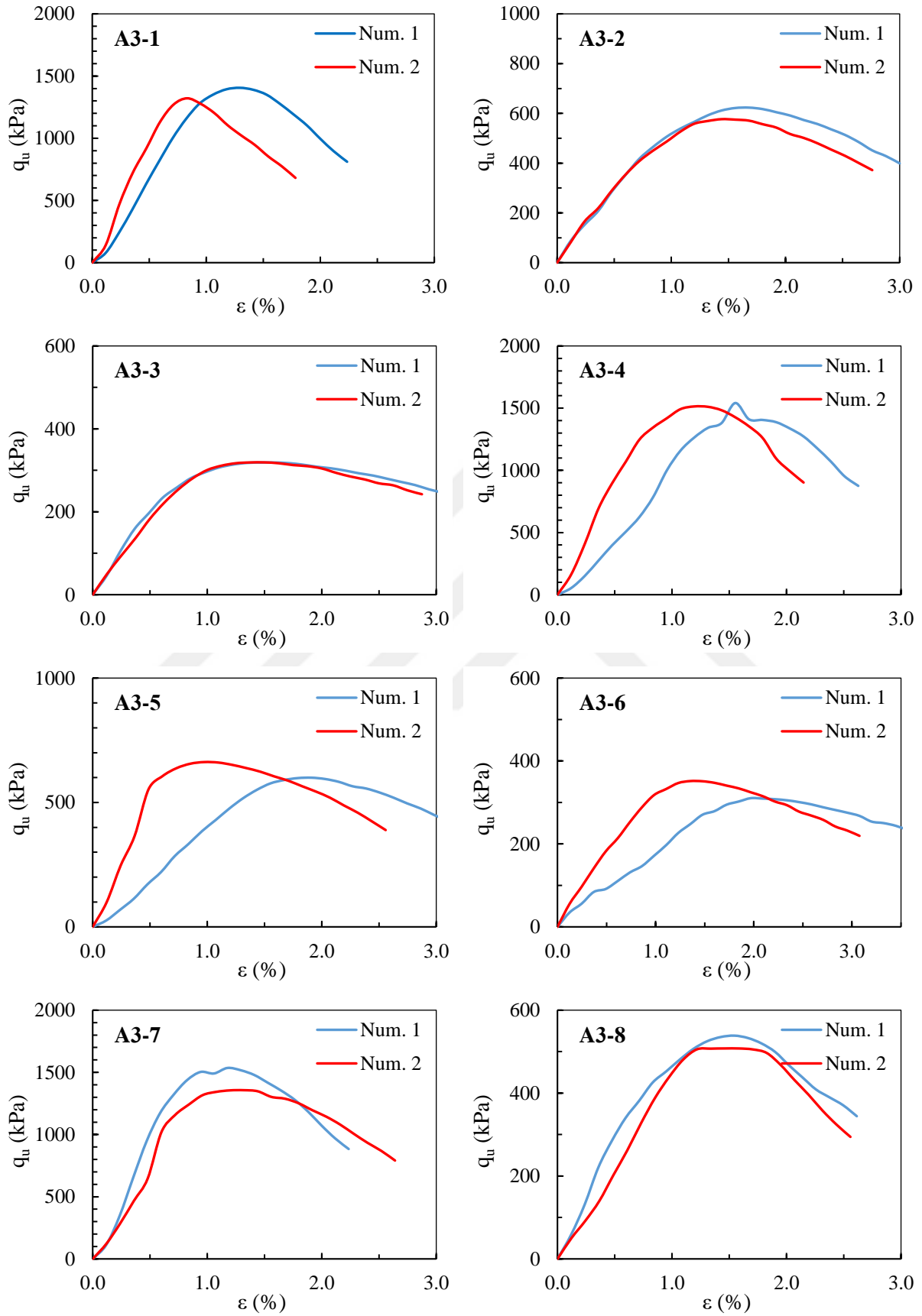


Şekil Ek 2.8. Uçucu kül ve Kırmızı Çamur enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C2-9 / C2-16 tasarımları (28 gün kür süresi)

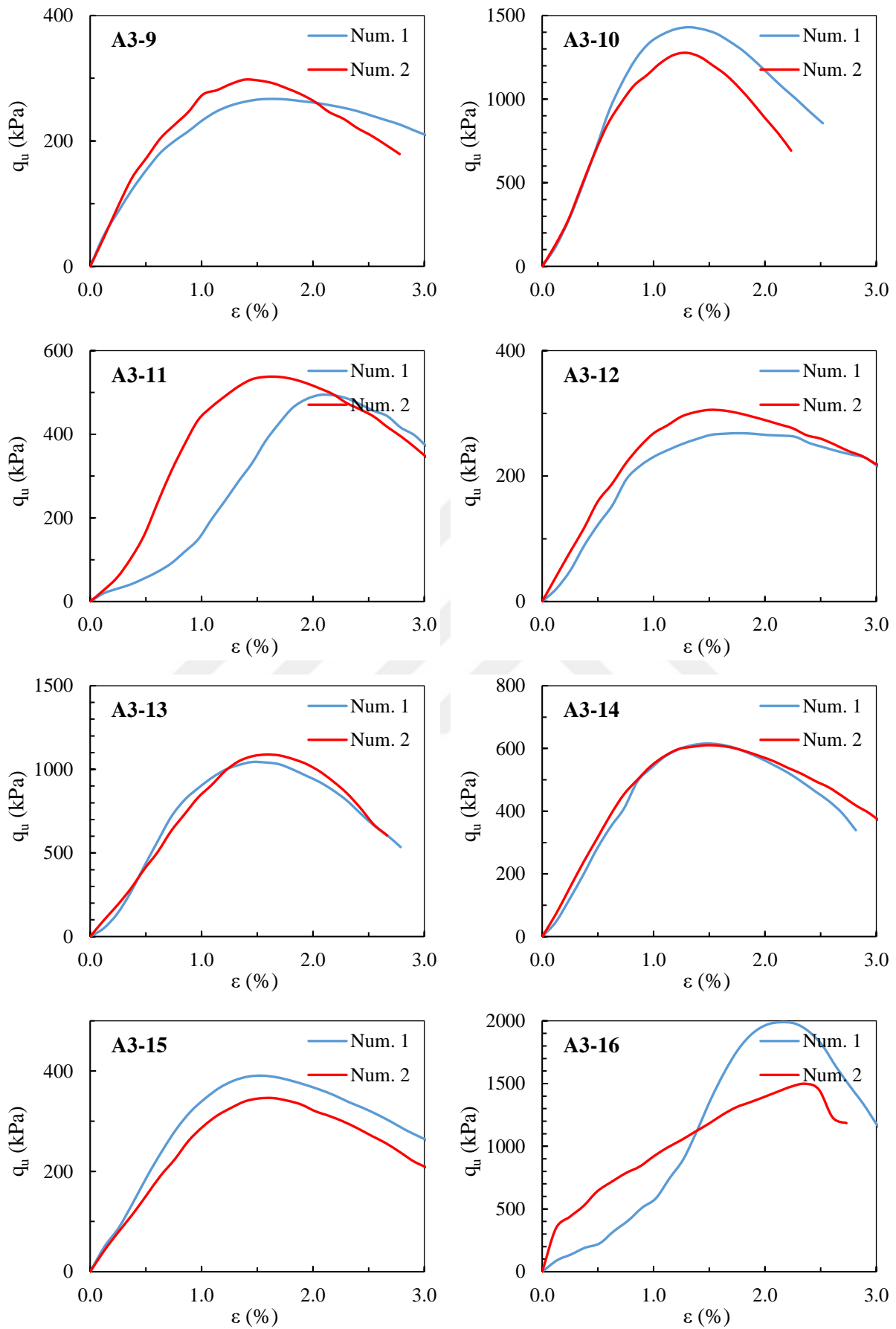


Şekil Ek 2.9. Uçucu kül ve Kırmızı Çamur enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C2-17 / C2-24 numuneleri (28 gün kür süresi)

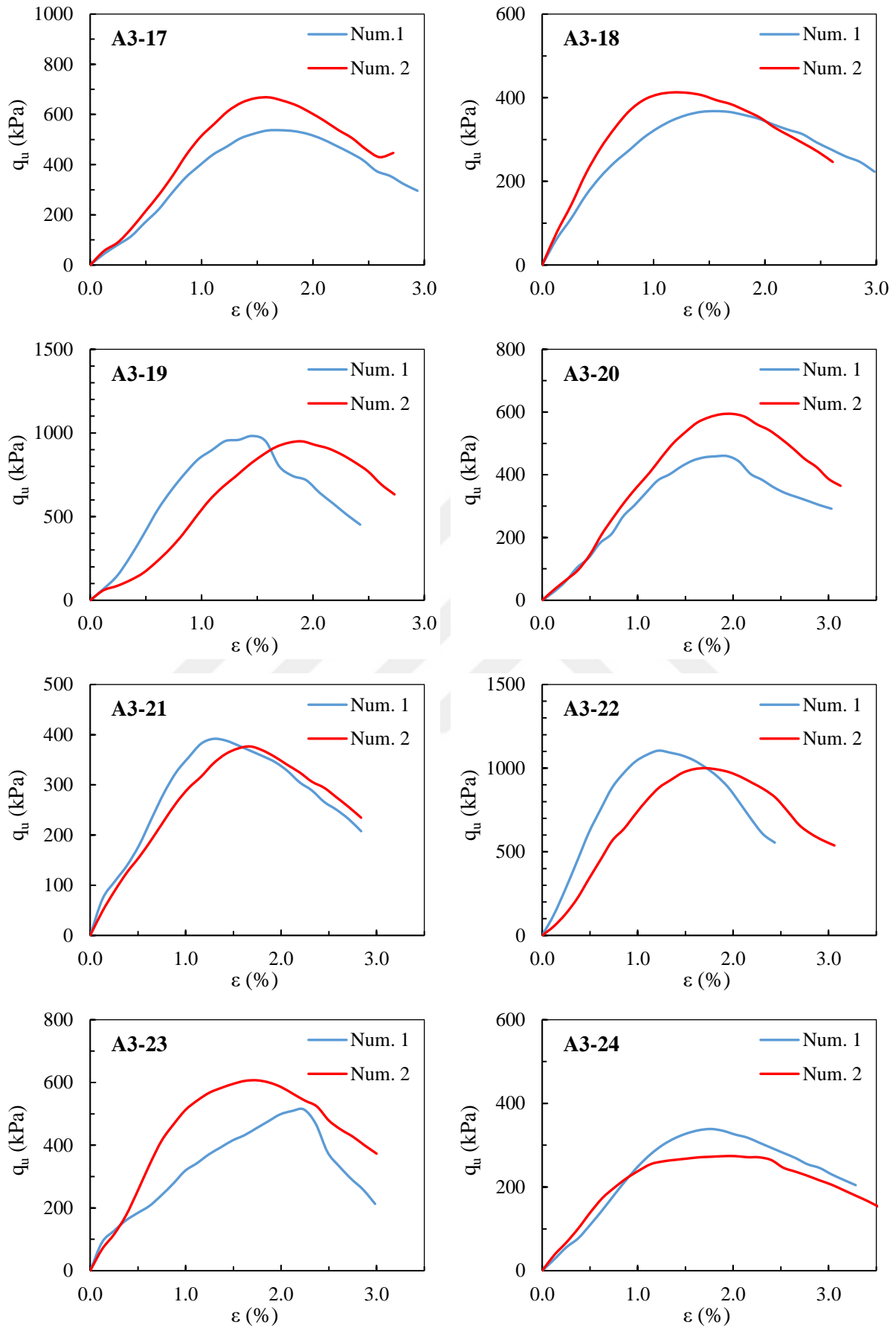
### EK-3: Serbest Basınç Deneyi Sonuçları: Uçucu kül ve Nano Silika Enjeksiyonu



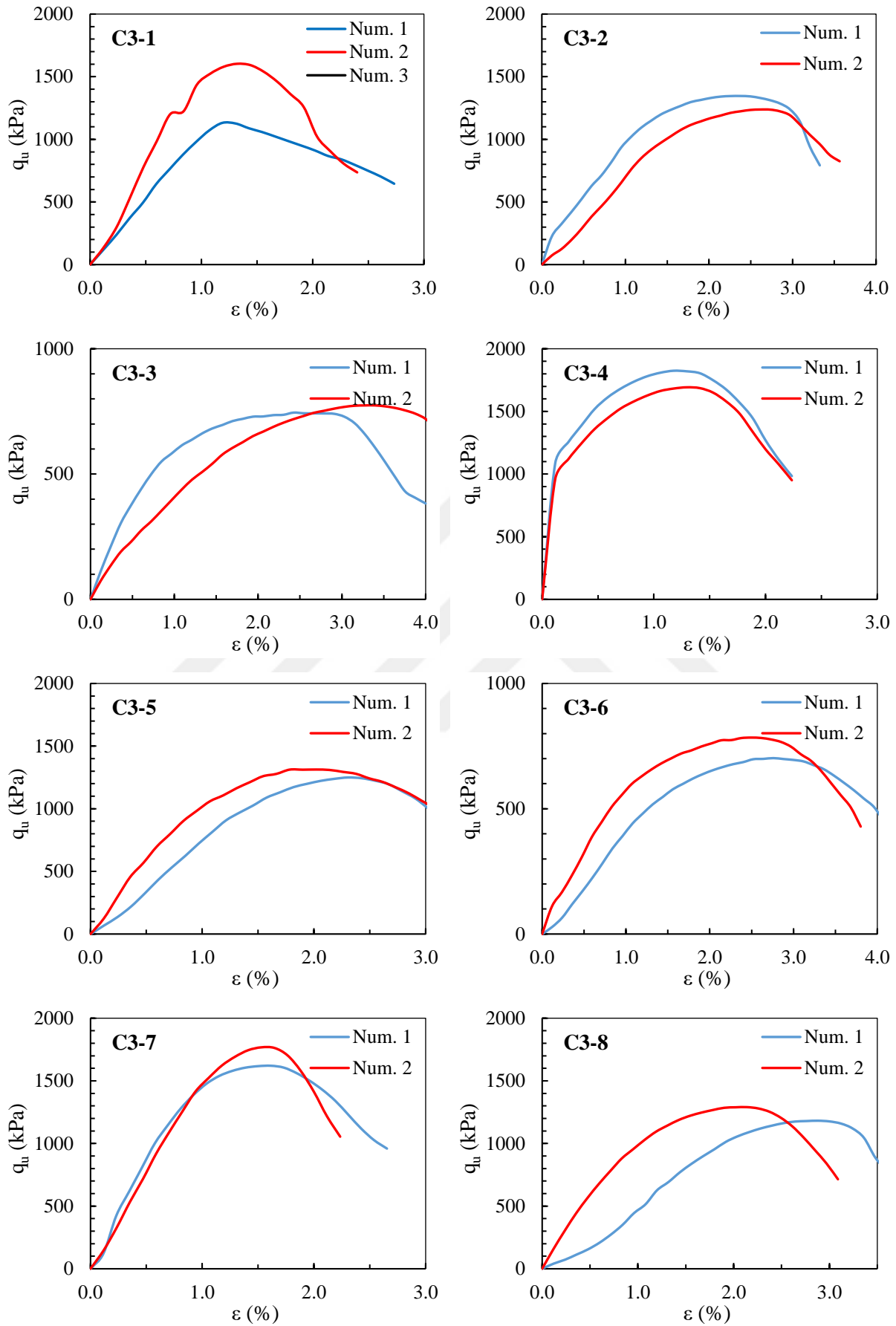
Şekil Ek 3.1. Uçucu kül ve Nano Silika enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A3-1 / A3-8 tasarımları (28 gün kür süresi)



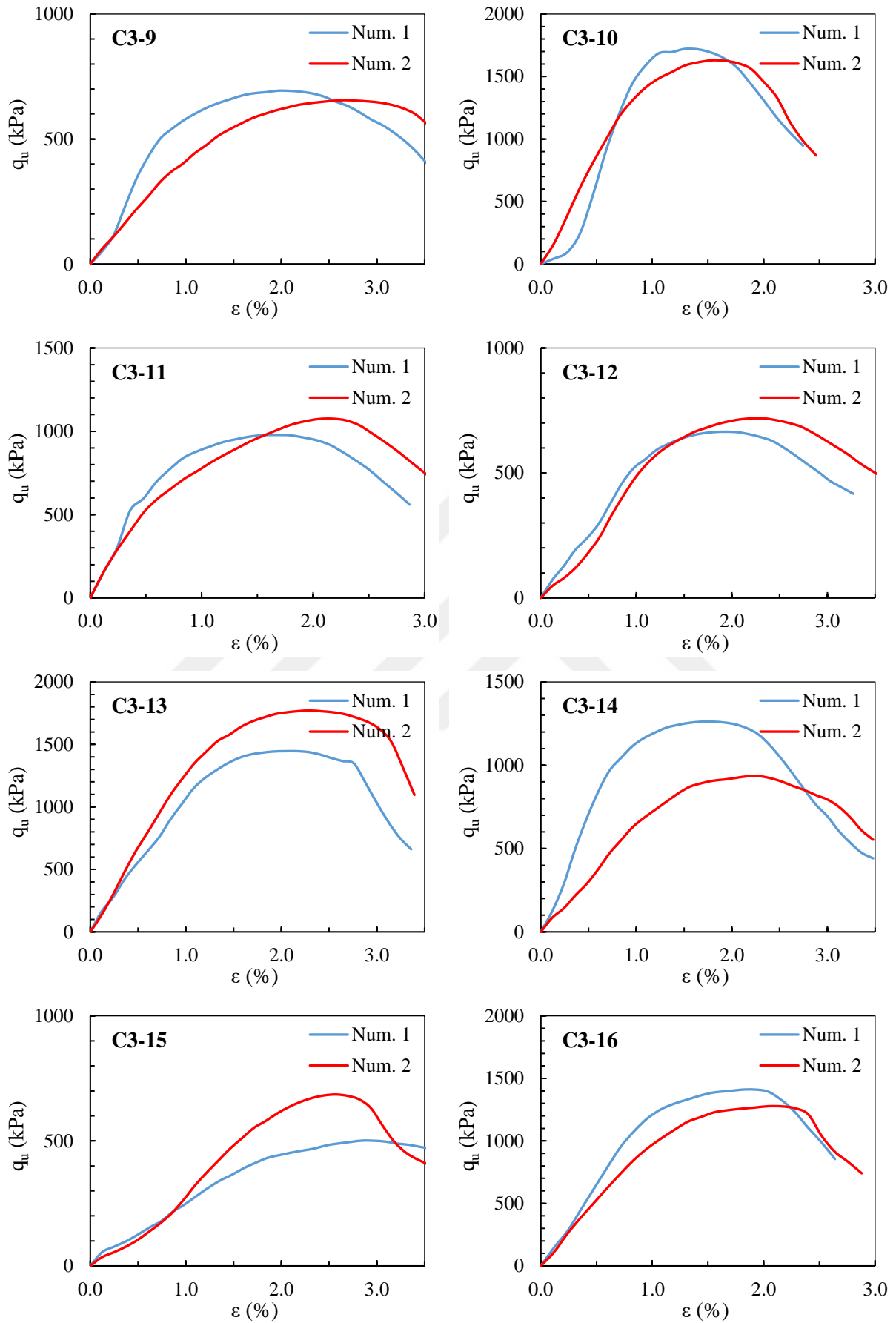
**Şekil Ek 3.2.** Uçucu kül ve Nano Silika enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A3-9 / A3-16 tasarımları (28 gün kür süresi)



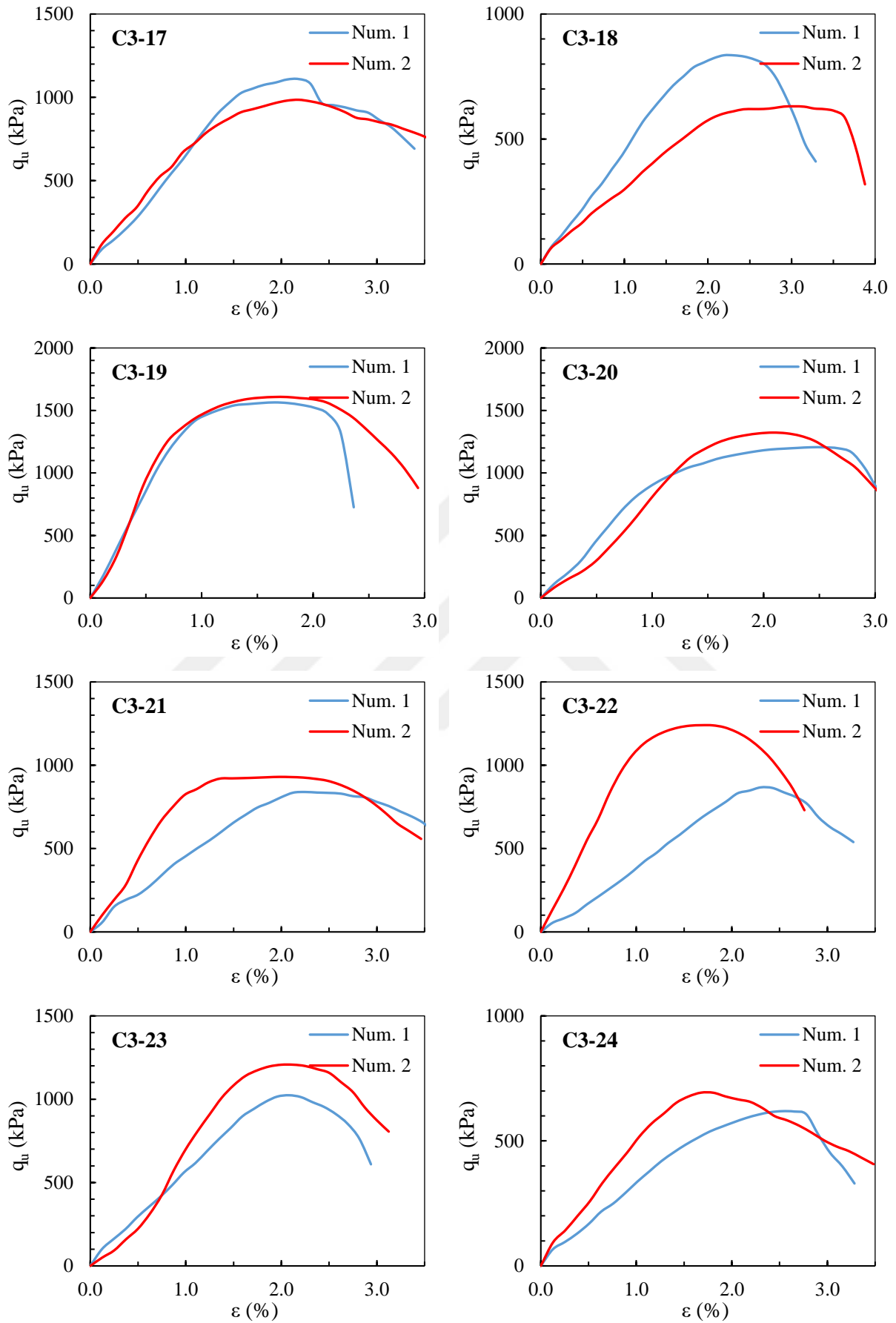
**Şekil Ek 3.3.** Uçucu kül ve Nano Silika enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A3-17 / A3-24 tasarımları (28 gün kür süresi)



**Şekil Ek 3.4.** Uçucu kül ve Nano Silika enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C3-1 / C3-8 tasarımları (28 gün kür süresi)

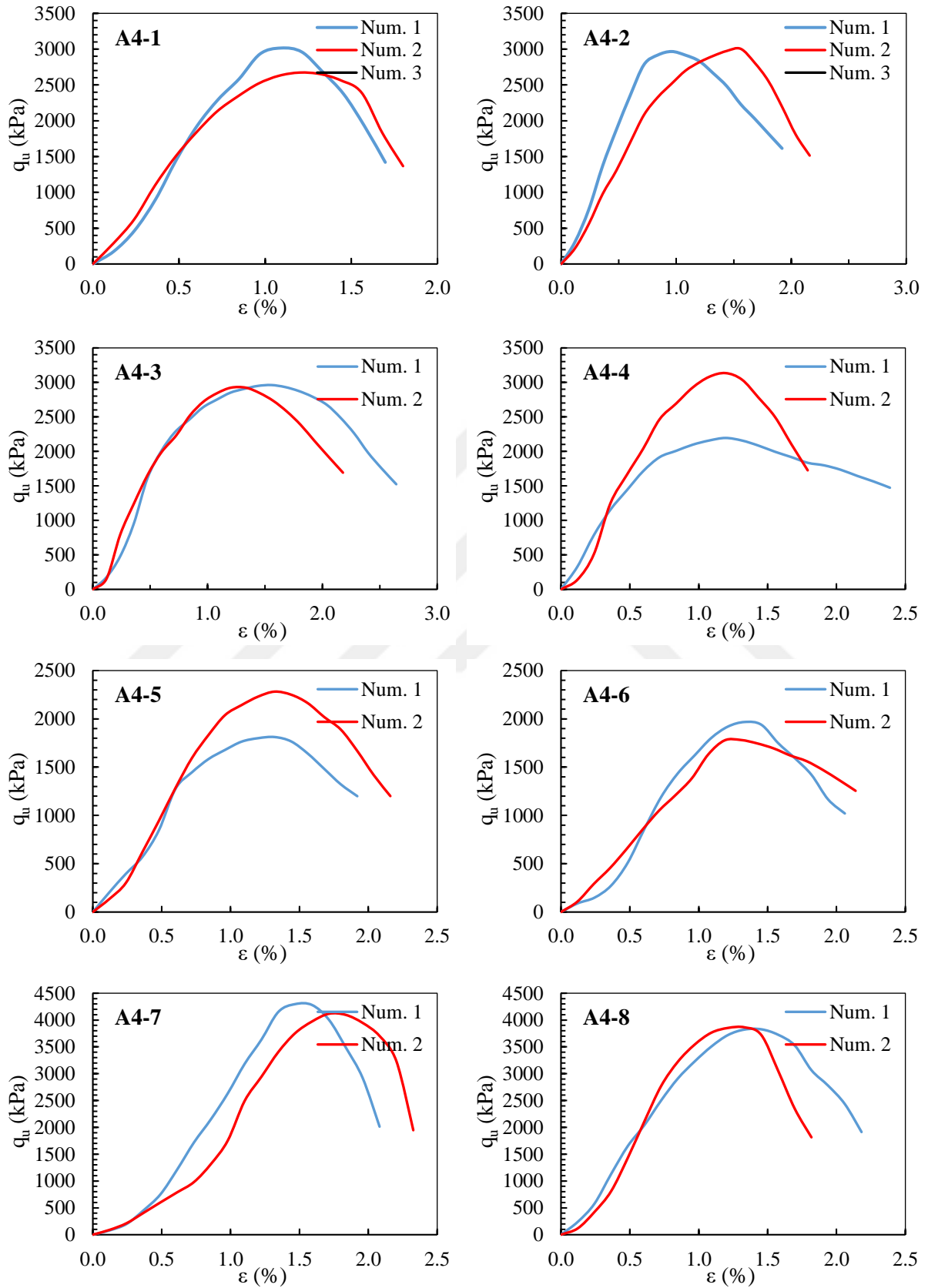


**Şekil Ek 3.5.** Uçucu kül ve Nano Silika enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C3-9 / C3-16 tasarımları (28 gün kür süresi)

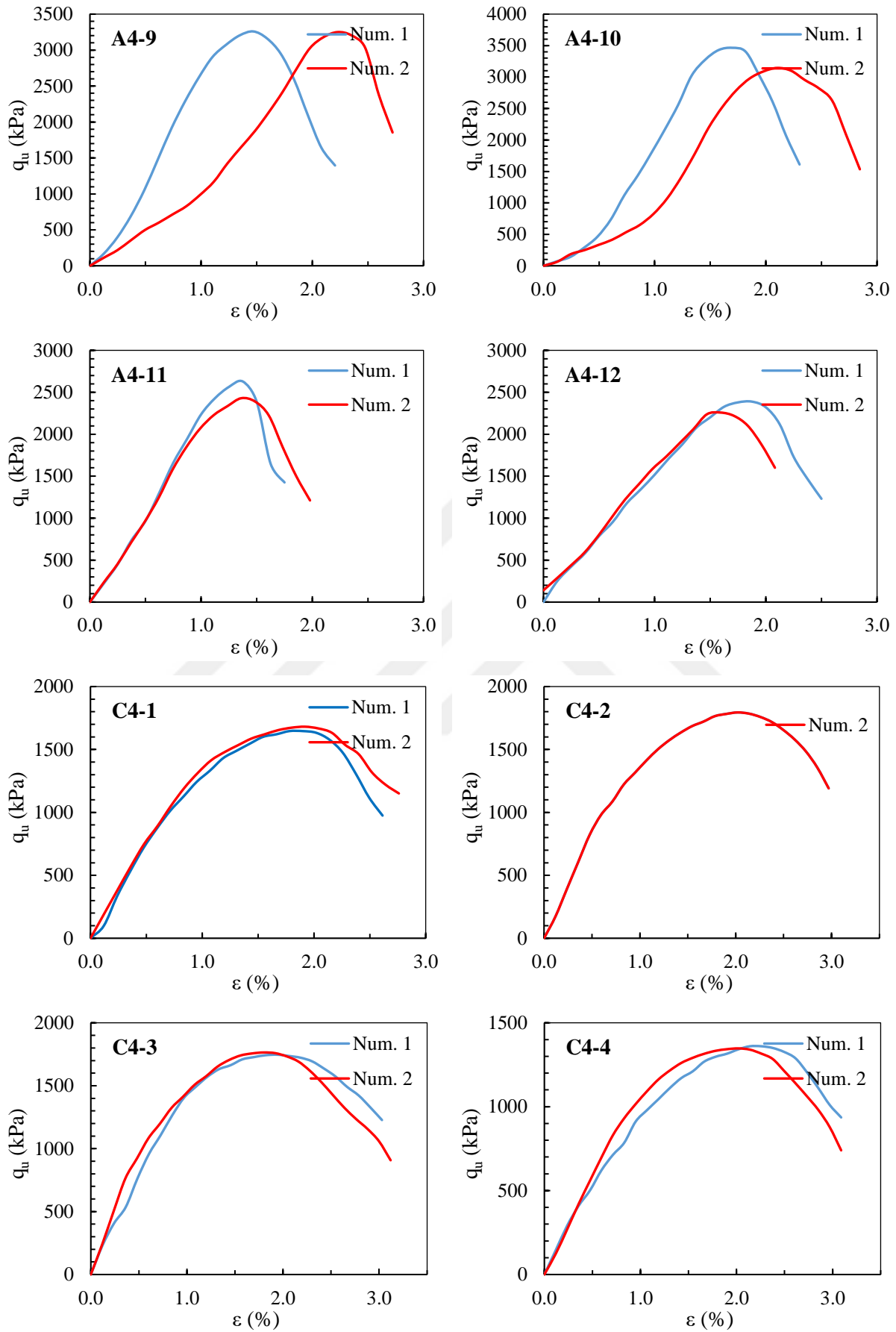


**Şekil Ek 3.6.** Uçucu kül ve Nano Silika enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C3-17 / C3-24 tasarımları (28 gün kür süresi)

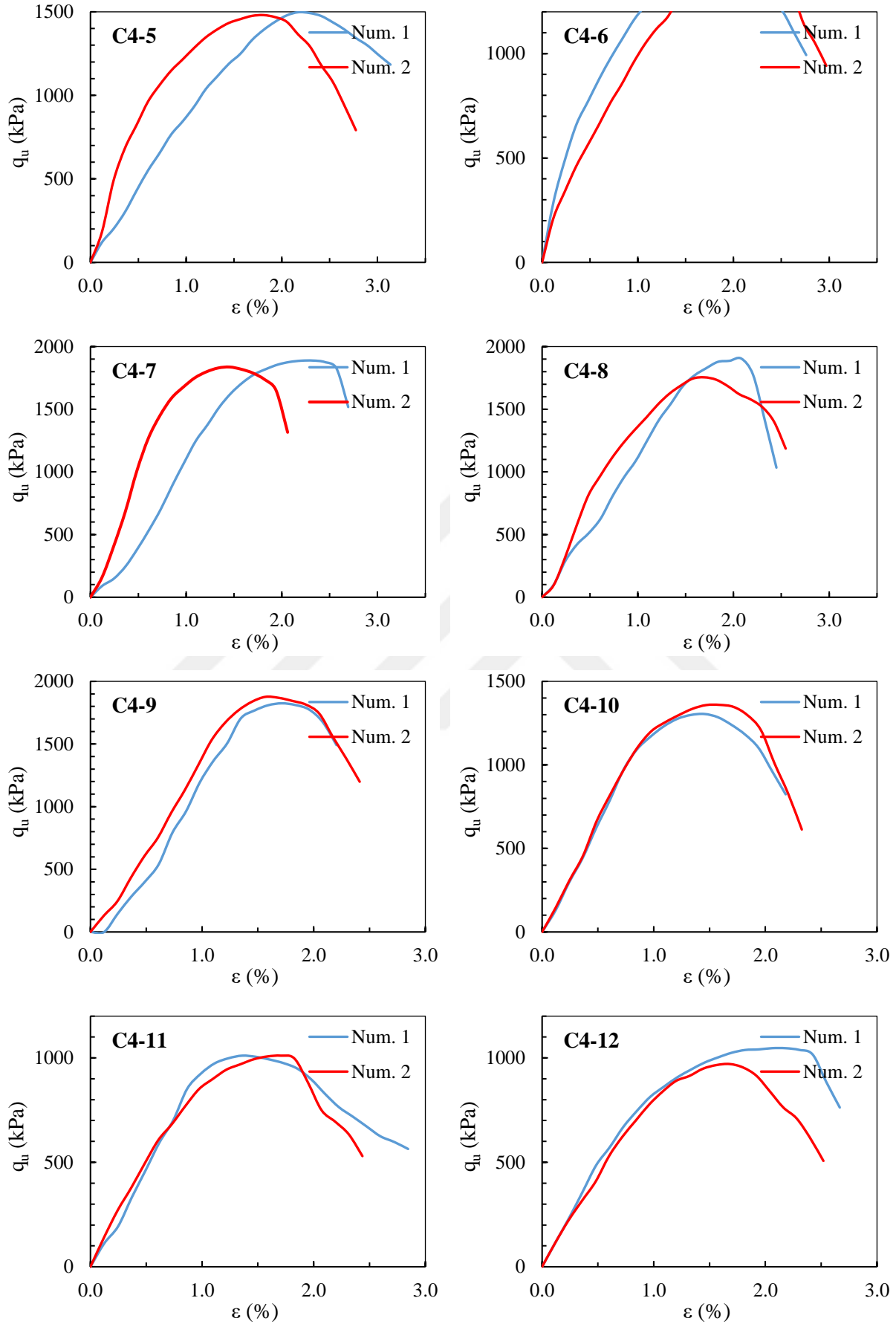
## EK-4: Serbest Basınç Deneyi Sonuçları: Uçucu Kül, Kırmızı Çamur, Nano Silika Enjeksiyonu



Şekil Ek 4.1. UK, KÇ ve NS enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A4-1 / A4-8 tasarımları (28 gün kür süresi)

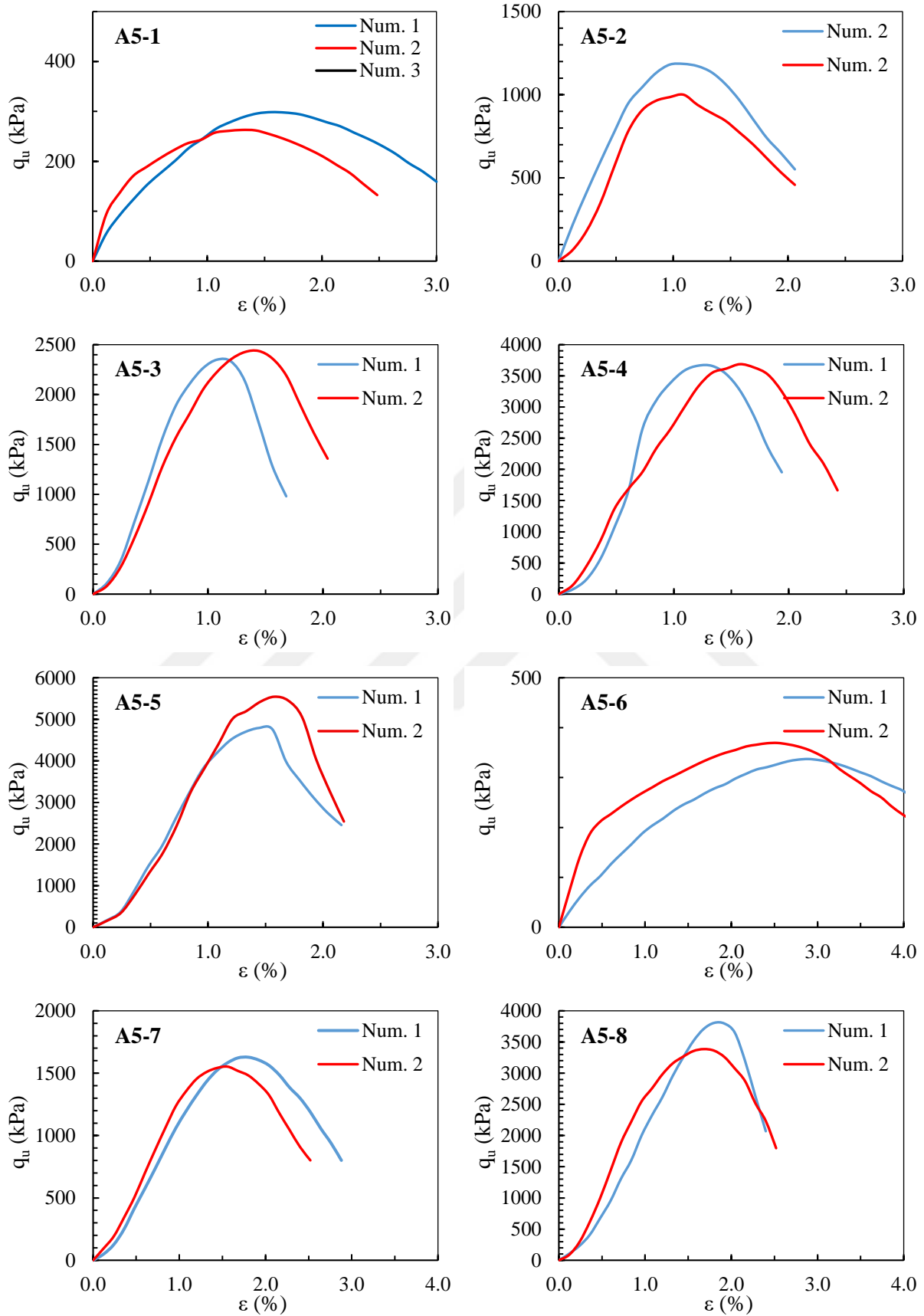


Şekil Ek 4.2. UK, KÇ ve NS enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A4-9 / C4-4 tasarımları (28 gün kür süresi)

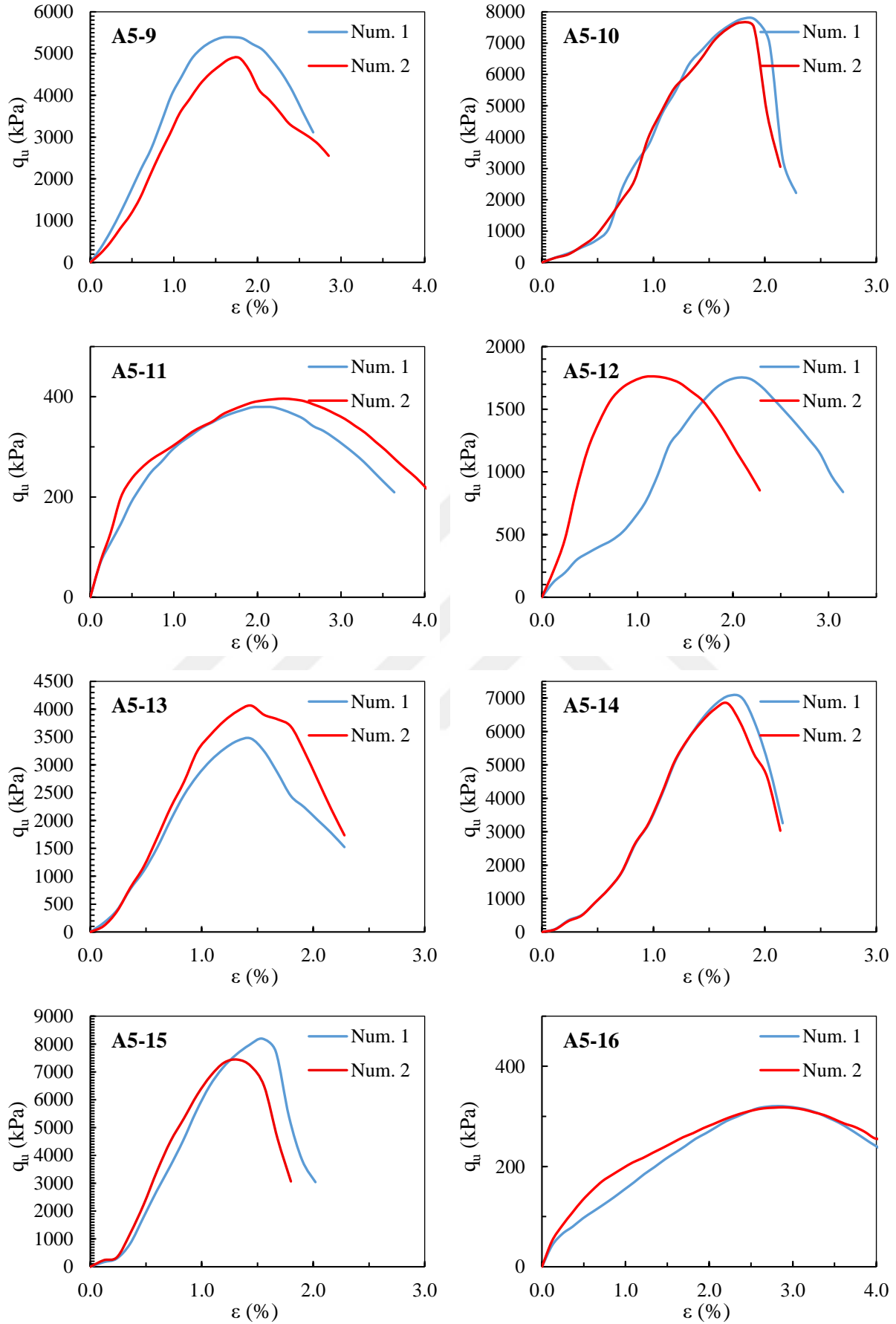


Şekil Ek 4.3. UK, KÇ ve NS enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C4-5 / C4-12 tasarımları (28 gün kür süresi)

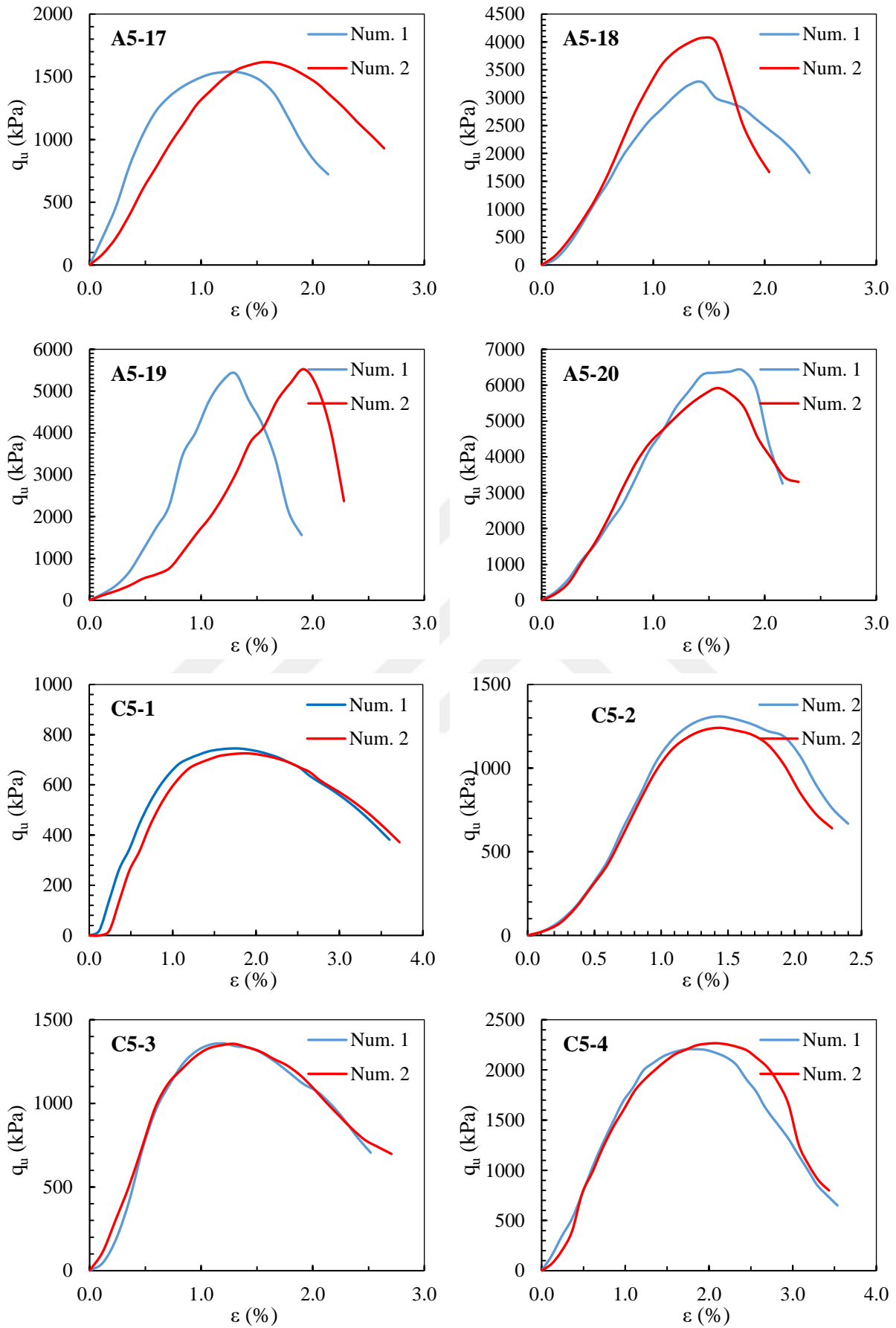
**EK-5: Serbest Basınç Deneyi Sonuçları: Kür süresinin etkisi (UK, KÇ, NS Enjeksiyonu)**



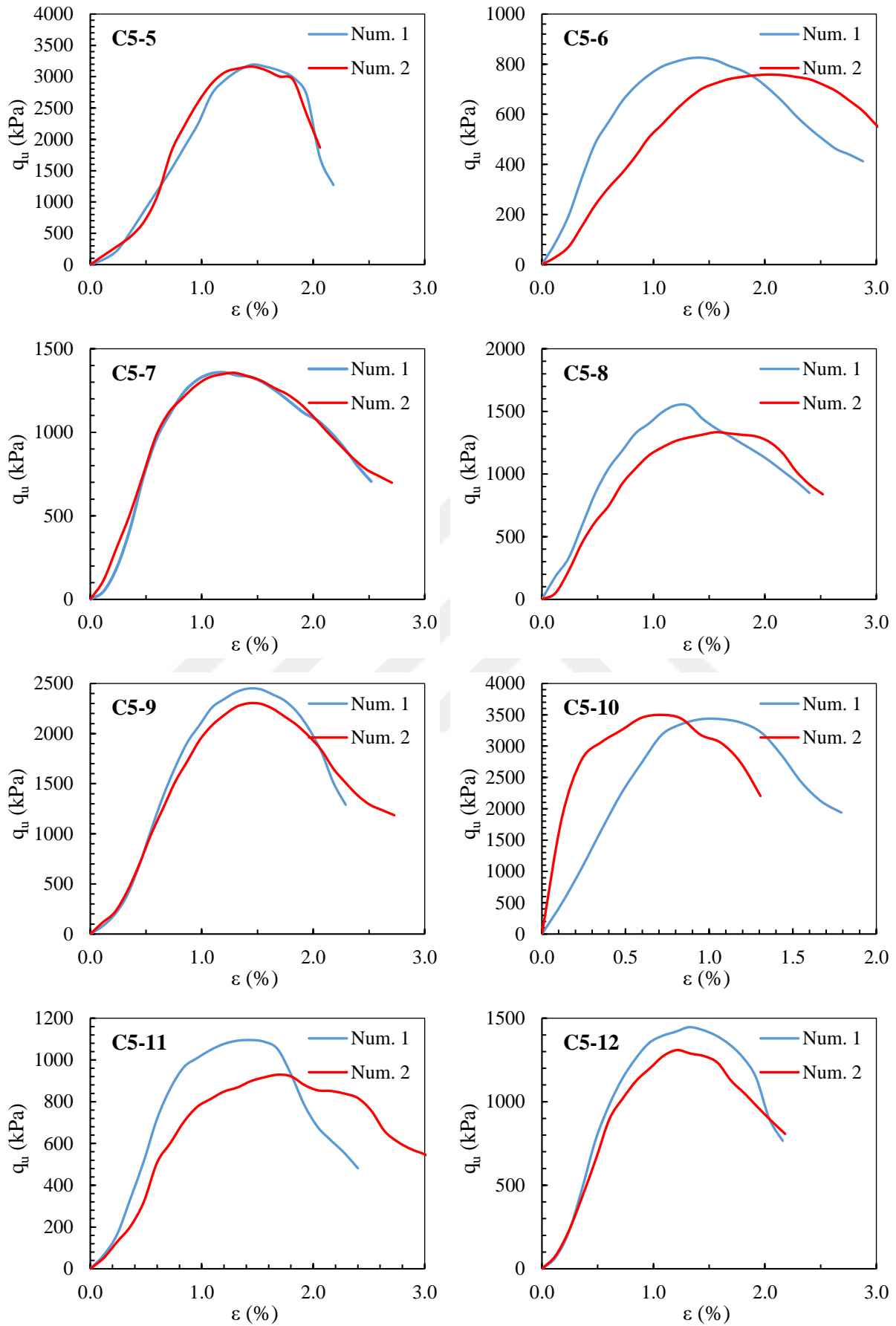
**Şekil Ek 5.1.** UK, KÇ ve NS enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A5-1 / A5-8 tasarımları



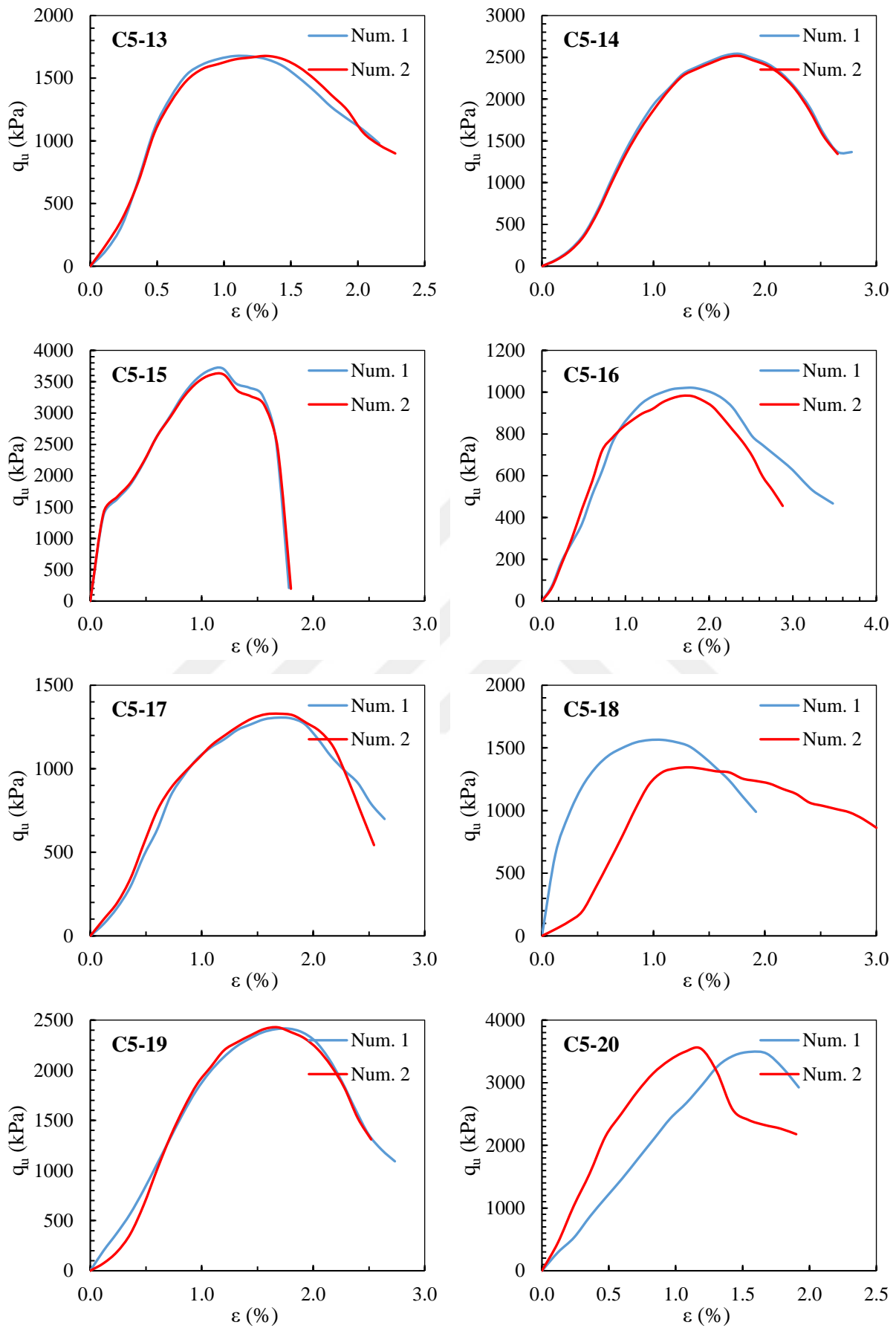
Şekil Ek 5.2. UK, KÇ ve NS enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A5-9 / A5-16 tasarımları



Şekil Ek 5.3. UK, KÇ ve NS enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: A5-17 / C5-4 tasarımları



Şekil Ek 5.4. UK, KÇ ve NS enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C5-5 / C5-12 tasarımları



Şekil Ek 5.5. UK, KÇ ve NS enjeksiyonuyla iyileştirilen numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları: C5-13 / C5-20 tasarımları