Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

ORGANİK ZEMİNLERİN DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİYLE İYİLEŞTİRİLMESİ: LABORATUVAR ARAŞTIRMASI

IMPROVEMENT OF ORGANİC SOILS BY DEEP MİXİNG METHOD: LABORATORY INVESTİGATİON

Hossein ZORIYEH ALIGHOLI[1] , İlknur BOZBEY[2]

ÖZET

Zemin Derin Karıştırma yöntemi, zemin yerinde iyileştirmesi için kullanılan bir yöntemdir. Kili ve organik zeminlerde bu yöntemle yapılan iyileştirme çalışmaları daha karmaşık bir hal almaktadır. Bu çalışma kapsamında organik zeminlerin derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların mikro yapı açısından incelenmesi için TGA ve XRF analizlerinin kullanılma yöntemleri incelenmiştir ve Türkiye genelinde yapılan bir çalışmanın sonuçları sunulmuştur. Bu amaçla Türkiye'de yapılan çalışmada ilk aşamada İstanbul'un Haliç bölgesinden elde edilen ve %12,4 organik içeriğe sahip olan organik zemin ve yüksek organik içeriğe ve düşük pH değerine sahip olan %50 Kaolin kili + %50 Leonardit karışımında elde edilen ve 5,1 pH değerine sahip olan yapay bir zemin ile çalışılmıştır. Deneylerde üç farklı çimento tipi, üç farklı bağlayıcı dozajı, üç farklı w/c oranı kullanılmıştır. 28 günlük numuneler üzerinde kimyasal özeliklerin belirlenmesi amacıyla XRF ve TGA deneyleri yaptırılmıştır. Numuneler üzerinde yapılan XRF deney sonuçları kullanılarak elde edilen SAC oranın artmasının mukavemet değerlerinin azalmasına sebep olduğu görülmüştür. TGA analiz sonuçlarında, 115°C ile 400°C arasında meydana gelen ağırlık kaybının artması mukavemet değerlerinde artışa ve 400°C ile 600°C' arasında kütle kaybının artması mukavemet değerlerinde azalmaya sebep olduğu görülmektedir.
Anahtar Kelimeler: *Zemin İyileştirme, Derin Karıştırma Yöntemi, Organik Zeminler, Mikro Yapı, TGA, XRF*

ABSTRACT

The Deep Soil Mixing method is a technique used for in-situ soil improvement. Improvement works carried out using this method in clay and organic soils become more complex. Within the scope of this study, the methods of using TGA and XRF analyses to examine the results obtained from the improvement of organic soils using the deep mixing method in terms of microstructure were investigated, and the results of a study conducted throughout Turkey were presented. For this purpose, in the study conducted in Turkey, organic soil obtained from the Haliç region of Istanbul with 12.4% organic content and an artificial soil obtained from a mixture of 50% kaolin clay + 50% leonardite with high organic content and low pH value (pH 5.1) were used in the first stage. Three different cement types, three different binder dosages, and three different w/c ratios were used in the experiments. XRF and TGA experiments were performed on 28-day-old samples to determine their chemical properties. The XRF experiment results obtained from the samples showed that an increase in the SAC ratio caused a decrease in strength values. The TGA analysis results showed that the increase in weight loss between 115°C and 400°C caused an increase in strength values, while the increase in mass loss between 400°C and 600°C caused a decrease in strength values.
Keywords: *Soil Improvement, Deep Mixing Method, Organic Soils, Microstructure, TGA, XRF*

[1] Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Okan Üniversitesi, hossein.zoriyeh@okan.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Prof. Dr, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa, ibozbey@iuc.edu.tr

1. GİRİŞ

Derin karıştırma yöntemi, çeşitli bağlayıcılar kullanılarak zeminin yerinde iyileştirilmesi işlemidir. Bu yöntemde amaç zeminlerin sıkışabilirliğini azaltmak ve mukavemetini artırmaktır. Derin karıştırma ile elde edilen iyileştirilmiş zemin özellikleri; tabii zeminin ve bağlayıcının özelliklerine, kür süresine ve yükleme durumuna bağlıdır. Derin karıştırma yöntemi, 1970'lerde Japonya'da derin katkı stabilizasyonu olarak geliştirilmiştir ve İsveç'te aynı dönemde geliştirilen kireç kazıklarıyla prensipte aynı teknolojiye sahiptir (Bruce vd., 2013). Derin karıştırma yönteminde, yumuşak zeminin sıkıştırma olmaksızın katkı maddesi ile yerinde stabilize edilir (Bruce vd., 2013). Bu yöntemde çimento, kireç veya uçucu kül gibi farklı katkı maddeleri zemine enjekte edilir. Bu kolonların özellikleri, zemin çeşidi ve özellikleri, katkı maddesinin türü ve miktarı, kürlenme koşulları, yükleme koşulları, karışım koşulları ve yapım süreci gibi birçok faktöre bağlıdır (Porbaha vd., 1998; Kitazume ve Maruyama, 2005; Kitazume ve Terashi, 2012). Organik zeminler su içeriği, porozite, organik içerik ve kıvam limitleri özeliklerine bakımından çok yüksek değerlere sahip olan zeminlerdir (Kumar, 2018). Bu özelliklerin bir araya gelmesiyle, geoteknik bakımından kayma mukavemeti ve oturmalar gibi özelikler açısından sorun yaratabilecek özelliklere sahiptirler. Diğer taraftan organik zemin içeriğinde bulunan hümik asidin stabilizasyon sonrası mukavemet gelişimi için gerekli olan hidratasyon reaksiyonları engelleme eğilimi göz önüne alındığında organik zeminlerin stabilizasyonu inorganik zeminlerden daha zorlayıcıdır (Kamon vd., 1989; Axelsson vd., 2002). TGA (Termogravimetrik Analiz) ve XRF (X-ray Fluorescence) gibi gelişmiş analiz yöntemleri, stabilizasyon sırasında oluşan hidratasyon ürünlerinin miktarını ve dağılımını belirleyerek zemin ve bağlayıcı etkileşiminin mikroyapısal düzeyde değerlendirilmesine olanak sağlar. Bu sayede, bağlayıcıların etkinliği, mikro bağlanma ağları ve oluşan C-S-H, etringit ve diğer hidratasyon ürünlerinin dağılımı ile mukavemet gelişimine olan etkileri değerlendirile bilir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. Organik Zeminlerde DSM

Zeminin kayma mukavemeti, nem içeriği ve kuru birim hacım ağırlığı ile azalırken hacım yoğunluğu ve parçacıklar arası bağlanma ile artar (Stibbe ve Terpstra, 1982). Araştırmacılar organik zeminleri incelendikleri zaman, organik maddenin yüzdesinin artması maksimum kuru birim hacım ağırlığının azalmasına ve optimum nem oranının ise artmasına sebep olduğunu bulmuşlardır (Arman, 1969; Holtz ve Krizek, 1970; Schmidt, 1965). Diğer taraftan organik maddenin etkisi, hacım yoğunluğunu azaltmak ve nem tutmayı arttırmaktır, her ikisi de zeminin kayma mukavemetini azaltır. Organik madde, agregalar içindeki parçacıklar arası bağları artırabilse de zeminin kayma mukavemetini artırmak için yeterli olmayabileceğini bildirilmiştir (Greenland, 1965). Ohu vd. (2009), yaptıkları çalışmada üç farklı zemin-organik madde karışımı için, organik madde düzeylerinin artmasıyla su tutma oranı ve kıvam limitlerinin önemli ölçüde artığını ve kayma mukavemetinin önemli ölçüde azaldığını beyan etmiştir (Ohu vd., 2009). Bu faktörlerin bu şekilde değişmesi zeminin serbest basınç mukavemetini olumsuz etkilediği bilinmektedir. Zemin kayma mukavemeti ile organik içerik arasındaki ilişki, organik maddenin kaynağına bağlı olabilir ve turbadan gelen organik maddenin zemin mukavemetini azaltmaktadır (Ohu vd., 1985). Chen ve Wang (2006), tarafından değişik organik içeriğe sahip olan dört farklı numune üzerine yapılan deneylerde, organik içeriğin artmasıyla, çimentoyla iyileştirmeyi hızlandırmak için gerekli olan hızlandırıcı maddesinin miktarı artış göstermiştir (Chen ve Wang, 2006). Tang vd.

(2011), tarafından iki çeşit organik zemin üzerinde yapılan derin karıştırma yöntemiyle elde edilen iyileştirme XRD ve SEM görüntüsü yardımıyla analiz edilmiştir. Yapılan deneyler ve analizler sonucunda organik maddelerin çeşidi ve miktarının iyileştirmenin seviyesini direkt olarak etkilendiğini gözlemlemişlerdir (Tang vd., 2011). Organik zeminlerin stabilizasyonu sırasında, kalsiyum hidroksit hümik asitlerle reaksiyona girerek zemindeki parçacıkları kaplayan çözünmez parçaları oluşturur. Axelsson vd. (2002), farklı katkı maddelerinin oluşturduğu ısı miktarının ve oluşma fazlarının farklılıkları olduğunu göstermiştir (Axelsson vd., 2002). TGA ve XRF gibi kimyasal analizleri kullanarak yapılan iyileştirmenin kimyasal ve mikro yapı boyutları incelenebilir, hidratasyon oranı, hidratasyon sonucunda oluşması gereken yapıların varlığını ve mukavemet değerleri ile olan ilişkilerini sorgulaya biliriz.

2.2. TGA ANALİZİ

Termogravimetrik analiz (TGA), ısıtma sırasında oluşan kütle değişimleri üzerinden buharlaşma, dehidratasyon ve ayrışma süreçlerinin değerlendirilmesini sağlar. Serbest suyun uzaklaşması yaklaşık 100–120°C aralığında gerçekleşirken (Al-Sibahy ve Edwards, 2012), C-S-H'ye bağlı suyun ayrışması farklı çalışmalarda 105–440°C (El-Jazairi ve Illston, 1977), 115–150°C (Bhatty ve Miller, 2004; Peethamparan vd., 2009) ve 150–400°C (Formosa vd., 2011) aralıklarıyla ilişkilendirilmiştir. Kalsiyum hidroksitin ($Ca(OH)_2$) dehidroksilasyonu 400–600°C aralığında kütle kaybına neden olurken (Al-Sibahy ve Edwards, 2012), 600–825°C aralığındaki kayıplar kalsitin dekarbonasyonuyla açıklanmaktadır (Taylor, 1997).

Çimentoyla stabilize edilmiş kaolinit üzerinde yapılan çalışmada, kür süresiyle C-S-H ve $Ca(OH)_2$ miktarlarının arttığı ve TGA ile belirlenen hidratasyon ürünleri ile dayanım kazanımı arasında %80'in üzerinde korelasyon bulunduğu bildirilmiştir (Tabet vd., 2018). Kireçle iyileştirilmiş zeminlerde de TGA, hidratasyon süreçlerinin ve mikroyapısal değişimlerin değerlendirilmesinde kullanılmıştır (Bandipally vd., 2018). Alkali aktif cürufla stabilize edilen killi zeminlerde ise TGA bulguları, sülfat etkisine karşı daha kararlı reaksiyon ürünlerinin oluşumunu ve Portland çimentosuyla hazırlanan karışımlara göre daha yüksek dayanıklılığı desteklemiştir (Jiang vd., 2018).

Mineral katkılı çimentoların hidratasyon derecesini belirlemek amacıyla geliştirilen TGA temelli bir yaklaşımda, katkıların etkinliğini dikkate alan "eşdeğer bağlayıcı kütlesi" kavramı kullanılmıştır. Yüksek katkı oranlarının erken yaşta hidratasyonu yavaşlattığı, ancak bu etkinin ilerleyen sürelerde azaldığı gösterilmiştir (Deboucha vd., 2017). Deniz suyu etkisindeki zemin–çimento kolonlarında ise TGA ile özellikle 400–500°C aralığındaki $Ca(OH)_2$ kayıpları izlenerek hidratasyon ve sülfat etkisine bağlı bozunma süreçleri, uzun vadeli dayanım değişimleriyle birlikte değerlendirilmiştir (Pham vd., 2018).

Metakaolin ve çimentoyla iyileştirilen sıkıştırılmış zeminlerde TGA sonuçları, hidratasyon ürünlerinin gelişimi ve parçacıklar arası bağların güçlenmesiyle mukavemet artışı arasındaki ilişkiyi desteklemiştir (Wu vd., 2016). Portland çimentosu ve silika dumanıyla stabilize edilen fibrik turbalarda da TGA bulguları, C-S-H ve diğer reaksiyon ürünlerinin gelişimiyle birlikte mikroyapısal bağlanmanın ve mekanik performansın iyileştiğini göstermiştir (Ahmad vd., 2023).

Bu çalışmalar, TGA'nın hidratasyon ürünlerinin gelişimini, bozunma süreçlerini ve katkı maddelerinin etkinliğini değerlendirmede önemli bir araç olduğunu ortaya koymaktadır. Mekanik deneylerle birlikte kullanıldığında TGA, kimyasal süreçlerle mukavemet kazanımı arasında ilişki kurulmasına ve zemin stabilizasyonunun performansının daha kapsamlı biçimde yorumlanmasına katkı sağlamaktadır.

2.3. X-Işını Floresans Spektrometresi Deneyi (XRF)

X-ışını floresansı (XRF), numunenin X ışınlarıyla uyarılması sonucunda yayılan karakteristik ışınımın ölçülmesine dayanan ve kimyasal bileşimin belirlenmesinde kullanılan analitik bir yöntemdir. Zeminlerin geokimyasal karakterizasyonunda çeşitli elementlerin yüksek doğrulukla belirlenmesine olanak sağlamaktadır (Okada ve Shimoda, 1980).

CBR PLUS katkısıyla stabilize edilen yumuşak killerde, XRF ile belirlenen kimyasal bileşim serbest basınç dayanımı ve CBR değerleriyle birlikte değerlendirilmiş; Ca ve Si içerikleri, hidratasyon ürünlerinin gelişimi ve mukavemet artışıyla ilişkilendirilmiştir (Mousavi ve Karamvand, 2017). Kaolinitli killerin iyileştirilmesine yönelik başka bir çalışmada, silis ve kalsiyum içeren katkıların puzolanik reaksiyonları desteklediği; kimyasal ve mineralojik analiz bulgularının, C-S-H ve C-A-S-H oluşumuyla ilişkili dayanım artışlarını açıklamaya katkı sağladığı bildirilmiştir (Niroumand vd., 2023).

Mikro ve nano bentonitle iyileştirilen killi kumlarda XRF, katkıların SiO_2, Al_2O_3 ve CaO içeriklerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Kimyasal bileşim, mikroyapısal bulgular ve mekanik deneyler birlikte değerlendirildiğinde, nano bentonitin mikro bentonite göre daha yüksek iyileştirme etkinliği gösterdiği belirtilmiştir (Cheraghalikhani vd., 2023). Nijerya'dan alınan iki zemin üzerinde yapılan araştırmada ise yüksek silis içeriği daha yüksek CBR değerleriyle, alümina ve alkali içerikleri ise plastikite ve nem duyarlılığıyla ilişkilendirilmiştir. Bu bulgular, XRF sonuçlarının geoteknik deneylerle birlikte yorumlanmasının önemini göstermektedir (Idiata vd., 2025).

Derin karıştırmayla iyileştirilen zeminlerin kalite kontrolünde taşınabilir XRF kullanımını inceleyen bir çalışmada, 50–150 kg/m³ çimento dozajı ve su/çimento oranı 1 olan kaolin karışımları değerlendirilmiştir. Ca, Si ve S içeriklerine ilişkin ölçümler, mukavemet deneyleri ve SEM bulgularıyla birlikte yorumlanmış; taşınabilir XRF'nin sahada hızlı ve tamamlayıcı bir kalite kontrol aracı olarak kullanılabileceği ortaya konmuştur (Sindete vd., 2024).

Literatür bulguları, XRF ve TGA'nın zemin stabilizasyonunun değerlendirilmesinde birbirini tamamladığını göstermektedir. XRF, zemin ve bağlayıcının elementel bileşimini belirlerken; TGA, hidratasyon ürünleriyle ilişkili kütle değişimlerinin ve bozunma süreçlerinin yorumlanmasını sağlamaktadır. Bu yöntemlerin mekanik deneylerle birlikte kullanılması, kimyasal süreçlerle mukavemet gelişimi arasında ilişki kurulmasını desteklemektedir. Sonraki bölümde, her iki yöntemin birlikte kullanıldığı ve Türkiye'de yürütülen bir deneysel çalışma incelenmektedir.

3. TÜRKİYE'DE YAPILMIŞ ÖRNEK ÇALIŞMA

Deneylerin yapılması planlanan düşük organik yüzdesine sahip olan zemin Haliç bölgesinden ve bir otoyol projesinden "CH" yanı yüksek plastisiteli kil temin edilmiştir. Yapay zemin için seçilen karışım %50 Chinafill kili + %50 Leonardit olarak seçilmiştir. Saf Leonardit için pH değeri 4,59'dur ve %50 Chinafill ile kullanıldığında, karışım için pH değeri 5,10 olarak ölçülmüştür. Her zemin için hazırlanan karışımlar CEM I, CEM II, ve CEM III çimento tipleri, kullanılan dozaj (250, 350, 500 kg/m3) ve kullanılan w/c (1,2,3) miktarlarının değişmesiyle toplam da 10 numune içeren 27 set numune hazırlanmıştır. Toplam olarak her iki zemin için hazırlanan numune 540 adettir. Haliç kili için numuneler

%60 ve yapay zemin için %70 doğal su muhtevasında hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar kalıplandıktan sonra 7, 14; 28, 90 gün ve bir sene sürelerinde kürlendikten sonra, mekanik ve kimyasal olarak iki ana başlık altında, mekanik deneyler kapsamında "Serbest Basınç Deney" ve kimyasala deneyler kısmında, "XRF" ve "TGA" deneyleri tabi tutulmuştur (Zoriyeh Aligholi ve Bozbey, 2025). Elde edilen değerleri mekanik özellikler ile ilişkili etmek üzere SAC oranı özgün bir parametre olarak kullanılabilir. Bağlayıcıdaki kükürt trioksit (SO3), alüminyum oksit (Al2O3) ve kalsiyum oksit (CaO) içerik oranı ve stabilizasyon etkisiyle ilişkisi SAC oran ile açıklığa kavuşturulmuştur (Hayashi ve Satoshi, 2005):

$$\textbf{SAC Oranı} = (\mathbf{SO_3 + Al_2O_3})/\mathbf{CaO} \quad (1)$$

Tablo 1. Haliç Kili ve Yapay Zemin Fiziksel Özelikleri (Zoriyeh Aligholi ve Bozbey., 2025)

	Doğal Su Muhtevası, (%w)	Likit Limit, (%LL)	Plastik Limit, (%Pl)	Plastisite İndisi, (%Ip)	Likidite İndisi, (IL)	pH	Organik Yüzdesi, (%)	Kum Oranı, (%)	Silt Oranı, (%)	Kil Oranı, (%)	USCS Zemin Sınıfı
Haliç Kili	60	57,1	30,15	26,95	1,11	8,5	12,36	1,93	37,15	60,92	CH
Yapay Zemin	70	66,5	48,4	18,4	1,19	5,1	50	15,3	44	40	OH

Tablo 2. Haliç Kili ve Yapay Zemin için Kimyasal Analiz Sonuçları (Zoriyeh Aligholi ve Bozbey., 2025)

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	TiO_2	SO_3	CaO
Birim	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Haliç Kili	57,6	21,9	9,45	3,03	2,19	1,34	1,26	0,96	0,96
Yapay Zemin	62,1	28,6	4,71	1,53	0	0,07	0,6	1,19	0,35

3.1. X-Işını Floresans Spektrometresi Deneyi (XRF)

Saf zeminler ve iyileştirilmiş zeminlerin 28 günlük numuneleri üzerinde toplamda 65 adet XRF deneyi yapılmıştır. Elde edilen değerleri mekanik özellikler ile ilişkili etmek üzere çeşitli parametreler denenmiş bunlardan SAC oranı özgün bir parametre olarak seçilmiştir. Zeminlerin kimyasal durumlarının mukavemetleri üzerinde olan etkisini araştırmak amacıyla ODTÜ Merkezi laboratuvarları tarafından Haliç kili, yapay zemin ve tüm 28 günlük numuneler üzerinde yapılan XRF deney sonuçları kullanılarak elde edilen SAC Oranı limit değerleri Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. SAC Oranı Limit Değerleri (Zoriyeh Aligholi ve Bozbey., 2025)

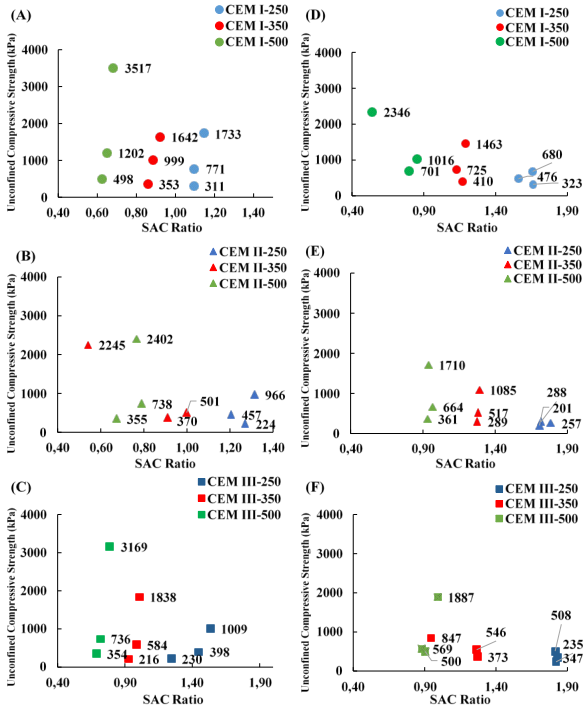
								Haliç Kili	Yapay Zemin
İyileştirme Öncesi		CEM I	CEM II	CEM III	Haliç Kili	Yapay Zemin	İyileştirme Sonrası	Maximum SAC	1,73	1,83
	SAC Ratio	0,12	0,15	0,18	23,91	85,85		Minimum SAC	0,62	0,54

3.1.1. SAC Oranın Mukavemet Değerlerine Etkisi

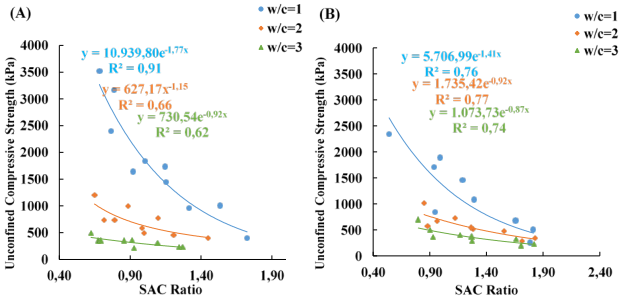
Haliç kili ve yapay zemin için SAC oranı ve 28 günlük numunelerin mukavemetleriyle olan ilişkisi Şekil 1'de sunulmuştur. Her numune seti için bakıldığı zaman, her iki zeminde kullanılan çimento miktarının artması saf zemin için hesaplanan SAC oranın azalmasına sebep olmuştur. Bunun nedeni formülde çimentodan gelen CaO'nun paydada olmasıdır. w/c Oranın SAC Oranına üzerinde olan etkisini incelemek amacıyla her çimento tipi ve dozajları için farklı grafikler incelenmiştir ve sonuç olarak, w/c oranları ile SAC değerleri değişmekle birlikte, bu değişimin sınırlı olduğu söylenebilir.
Şekil 2'de görüldüğü gibi SAC oranının artması tüm gruplarda mukavemet değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Haliç kilinde w/c oranının artması SAC oranının ulaşabileceği maksimum değerde azalmaya sebep olmuştur, bu eğilim yapay zeminde gözükmemektedir. Haliç kili ve yapay zemin arasındaki SAC oranı farkına bakıldığı zaman, iyileştirme öncesi zeminin SAC oranı miktarı, iyileştirme sonrası elde edilebilecek mukavemet değerlerine doğrudan etki ettiği ispat edilmiştir. Bu tür bir ilişkinin bulunmuş olması bu çalışmanın özgün sonuçlarından birisidir.

Tablo 4. TGA Analiz Sonuçları (Zoriyeh Aligholi ve Bozbey., 2025)

	Ağırlık kaybı (%)							
	115°C-145°C		145°C-400°C		400°C-600°C		600°C-825°C	
Haliç Kili	0.14		2.12		4.38		1.25	
Yapay Zemin	0.22		3.13		9.56		1.72	
	İyileşme sonrası ağırlık kaybı (%)							
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Haliç Kili	1.49	0.42	4.16	2.46	4.95	3.54	8.43	2.64
Yapay Zemin	1.84	0.58	5.02	2.08	7.70	5.43	7.02	5.14



Şekil 1. SAC Oranı ve Serbest Basınç Mukavemet İlişkisi A) Haliç Kilinde CEM I; B) Haliç Kilinde CEM II; C) Haliç Kilinde CEM III; D) Yapay Zeminde CEM I; E) Yapay Zeminde CEM II; F) Yapay Zeminde CEM III (Zoriyeh Aligholi ve Bozbey., 2025)



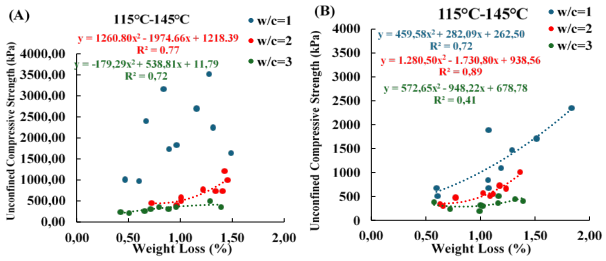
Şekil 2. SAC Oranı ile 28 Günlük Mukavemet Değerleri İlişkisi A) Haliç Kili; B) Yapay Zeminin (Zoriyeh Aligholi ve Bozbey., 2025)

3.2. Termal Gravimetrik Analiz (TGA)

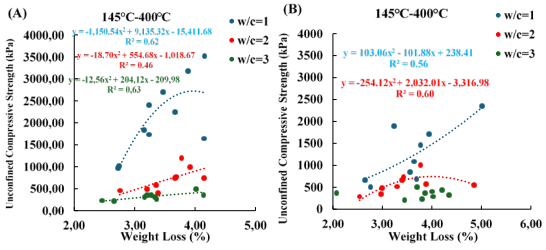
Literatürdeki bu açıklamalar ve yapılan TGA analizleri sonuçları göz önüne alınarak 115°C ile 145°C ve 145°C ile 400°C aralıklarındaki kayıplar ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

3.2.1. CSH (Kalsiyum Silikat Hidrat) Fazları

Kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) fazları, mukavemet kazanımından sorumlu temel hidratasyon ürünleridir. Stabilize edilmiş zeminlerde daha fazla C-S-H oluşması, zemin parçacıkları arasında güçlü bağlar oluşturarak serbest basınç mukavemetinin artmasına neden olur (Chrysochoou, 2014). Termogravimetrik analiz sonuçlarına göre 115–145°C aralığında iyileştirilmemiş zeminlerde ağırlık kaybı oldukça düşük (Haliç kili %0,14; yapay zemin %0,22) iken, stabilize edilmiş numunelerde bu değer belirgin biçimde artmıştır (Haliç kili ≥%0,42; yapay zemin ≥%0,58). Bu durum, başlangıçta bulunmayan C-S-H oluşumunu doğrulamaktadır. Benzer şekilde 145–400°C aralığında saf zeminlerde kütle kaybı Haliç kili için %2,12, yapay zemin için %3,13 iken, iyileştirilmiş numunelerde sırasıyla en az %2,46 ve %2,54 olarak ölçülmüştür. Kayıp miktarının artması, C-S-H oluşumunun arttığını göstermekte ve her iki zeminde de mukavemet artışı ile doğrudan ilişkilendirilmektedir.



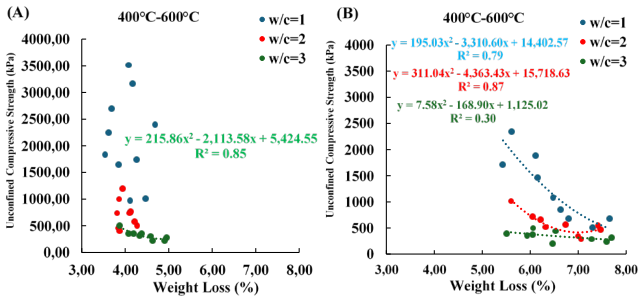
Şekil 3. 115°C ile 145°C arası CSH Fazları A) Haliç Kili; B) Yapay Zemin (8Zoriyeh Aligholi ve Bozbey., 2025)



Şekil 4. 145°C ile 400°C arası CSH Fazları A) Haliç Kili; B) Yapay Zemin (Zoriyeh Aligholi ve Bozbey., 2025)

3.2.2. CH (Kalsiyum Hidroksit) Fazı

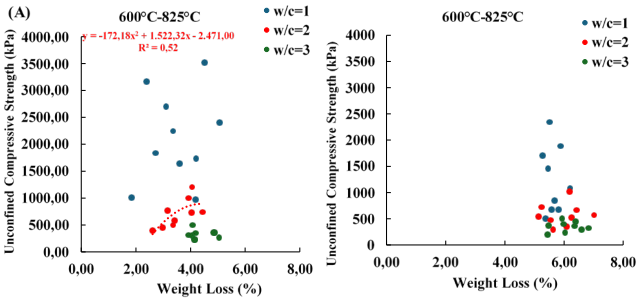
400°C ve 600°C'de kalsiyum hidroksitin ($Ca(OH)_2$) dehidroksilasyonu (kalsiyum hidroksit kristalleri kalsiyum oksit ve suya ayrışır) gerçekleşir ve büyük ağırlık kaybı meydana gelir (Al-Sibahy ve Edwards, 2012). Kütle kaybının artması ile mukavemet değerlerinde azalma oluştuğu görülmektedir. 28 gün sonunda çimento reaksiyonlarının yan ürünü olan kireç miktarının henüz mukavemet oluşturmadığı görülmektedir, yani ortamda önemli miktarda kireç vardır ve ancak henüz zemin ile reaksiyona girmediği için mukavemette azalmaya neden olmaktadır. Ayrıca, 400°C ile 600°C' arasında, CH miktarının az olması reaksiyona girmeyen kalsiyum hidroksitin az olduğunu yani daha yüksek derecede puzolanik reaksiyonun işaretidir. Bu nedenle kütle kaybının artması, reaksiyonun yeterince gerçekleşmediğinin göstergesi olabilir, bu nedenle mukavemet değerlerinde azalma görülmüştür.



Şekil 5. 400°C ile 600°C arası CH Faz Eğrileri a) Haliç Kili; b) Yapay Zemin (Zoriyeh Aligholi ve Bozbey., 2025)

3.2.3. CC (Kalsit, CaCO3) Fazı

Haliç kilinin kalsit oranı %1,25 ve yapay zeminin kalsit oranı %1,75'tir. Bu sıcaklık aralığında oluşan kütle kaybına neden olan mineralin 28 gün sonunda mukavemet oluşturan bir mineral olmadığı görülmektedir.



Şekil 6. 600°C ile 825°C arası CC Faz Eğrileri a) Haliç Kili; b) Yapay Zemin (Zoriyeh Aligholi, H., & Bozbey, I., 2025)

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, organik zeminlerin derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilmesi sonucunda gelişen mukavemet, XRF ve TGA analizlerinden elde edilen bulgularla birlikte değerlendirilmiştir. Haliç kili ve yapay organik zemin üzerinde yapılan incelemeler, iyileştirme etkinliğinin değerlendirilmesinde mekanik deneylerin kimyasal analizlerle desteklenmesinin önemini ortaya koymuştur.

XRF sonuçlarından hesaplanan SAC oranının artmasıyla serbest basınç mukavemetinin genel olarak azaldığı görülmüştür. Çimento dozajının artırılması, karışımdaki CaO içeriğinin yükselmesine bağlı olarak SAC oranını düşürürken, su/çimento oranının etkisi daha sınırlı kalmıştır. Bu bulgular, XRF analizinin zemin–bağlayıcı karışımlarının kimyasal bileşimini belirlemenin yanı sıra, bileşim ile mukavemet arasındaki ilişkilerin değerlendirilmesine de katkı sağladığını göstermektedir.

TGA sonuçlarında, 115–400°C aralığında hidratasyon ürünleriyle ilişkilendirilen kütle kayıpları genel olarak mukavemet artışıyla birlikte gözlenmiştir. Buna karşılık, 400–600°C aralığında kalsiyum hidroksitin ayrışmasıyla ilişkilendirilen kayıpların artması, daha düşük mukavemet değerleriyle birlikte görülmüştür. Böylece TGA, mukavemet gelişiminin yorumlanmasında hidratasyon ürünleri ve reaksiyonların ilerleme düzeyi hakkında tamamlayıcı bilgiler sunmuştur.

XRF ve TGA yöntemlerinin serbest basınç deneyleriyle birlikte kullanılması, iyileştirmenin yalnızca mekanik sonuçlarının değil, bu sonuçları etkileyen kimyasal süreçlerin de değerlendirilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle her iki yöntem, organik zeminlerde uygun bağlayıcı ve karışım koşullarının belirlenmesine ve iyileştirme performansının açıklanmasına katkı sağlayan önemli araçlardır. Bununla birlikte, belirlenen ilişkilerin farklı zeminler ve kür süreleri için doğrulanması, yöntemlerin daha geniş uygulama koşullarında kullanılabilirliğini güçlendirecektir.

Not: Bu çalışmadan elde edilen bulguların bir bölümü, çalışmanın özeti niteliğinde, 2025 yılında *Transportation Geotechnics* dergisinde **"Laboratory Investigation of Strength Evolution in Organic Soils Improved by Deep Mixing Method"** başlıklı makale olarak yayımlanmıştır.

5. KAYNAKLAR

Bruce, M. E. C., Berg, R. R., Collin, J. G., Filz, G. M., Terashi, M., and Yang, D. S. (2013). Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support (FHWA-HRT-13-046). Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, Office of Transportation Management, Federal Highway Administration,.

Kitazume, M, & Terashi, M. (2012). The Deep Mixing Method. Tokyo: CRC Press.

Kitazume, M. and Maruyama, K. (2005). Collapse failure of group column type deep mixing improved ground under embankment. International Conference on Deep Mixing – Best Practice and Recent Advance, 245-254.

Porbaha, A, Tanaka, H., and Kobayashi, M. (1998). State of the art in deep mixing technology. Journal of ISSMGE, 2(3), 125-139.

Kumar, A. (2018). A Review on Soil Stabilization in Road Construction by Using Bituminous. JETIR January, 5(1).

Kamon, M., Tomoshisa, S., and Sawa, K. (1989). On the stabiliza-tion of hedoro by using cement group hardening materials. Journal of the Society of Materials Science, 38(432): 1092– 1097.

Axelsson K, Johansson S-E and Andersson R. (2002). Stabilization of Organic Soils by Cement. Linkoping: Linkoping, Swedish Deep Stabilization Research.

Stibbe, E. and Terpstra, R. (1982). Effects of penetration resistance on emergence and early growth of silage corn in a laboratory experiment with sandy soil. Soil Tillage Res., 2, 143-153.

Arman, A. (1969). A definition of organic soils, an engineering identification. Louisiana State University, Engineering Research Bulletin No. 101. Division of Engineering Research for Louisiana Department of Highways.

Holtz, R.D., Krizek, R.J. (1970). Properties of slightly organic top soils. Journal of the Construction Division, 96, 29–43.

Schmidt, N. (1965). A Study of the Isolation of Organic Matter as a Variable Affecting Engineering Properties of Soil. Illinois: Thesis presented to the University of Illinois at Urbana, IL, in 1965 in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

Greenland, D. (1965). Interaction between clays and organic compounds in soils Part 2. Adsorption of soil organic compounds and its effect on soil properties. Soils Fertilizers, 28, 521-532.

Ohu J.O. , Mamman E. , Mustapha A.A. (2009). Impact of organic material incorporation with soil in relation to their shear strength and water properties. International Agrophysics, 23(2), p.155-162,.

Ohu, J.O., Raghavan, G.S.V. and McKynes, E. (1985). Peatmoss effects on the physical and hydraulic characteristics of compacted soils. Trans. Am. Soc. Agric. Eng, 28, 420-424.

Chen, H., Wang, Q. (2006). The behaviour of organic matter in the process of soft soil stabilization using cement. Bull Eng Geol Environ, 65, 445–448.

Tang, B. L., Bakar, I., & Chan, C. M. (2011). Reutilization of organic and peat soils by deep cement mixing. World Academy of Science, Engineering and Technology, 50, 674-679.

Hayashi, H, and Satoshi,N. (2005). Strength characteristic of stabilized peat using different types of binders. Proceedings of the International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances. Stockholm, Sweden.

A. Al-Sibahy and R. Edwards. (2012). Thermal behaviour of novel lightweight concrete at ambient and elevated temperatures: experimental, modelling and parametric studies. Construction and Building Materials, 31, 174-187.

El-Jazairi, B., & Illston, J. M. . (1977). A simultaneous semi-isothermal method of thermogravimetry and derivative thermogravimetry, and its application to cement pastes. Cement and Concrete Research, 7(3), 247-257.

Bhatty JI, Miller FM. (2004). Application of thermal analysis in cement manufacturing. Innov Portl Cem Manuf, 8(4), 1037-1067.

Peethamparan S, Olek J, Diamond S. (2009). Mechanism of stabilization of Na-montmorillonite clay with cement kilndust. Cem Concr Res, 39(7), 580-589.

J. Formosa, J. M. Chimenos, A. M. Lacasta, L. Haurie, and J. R. Rosell,. (2011). Novel fire-protecting mortars formulated with magnesium by-products. Cement and Concrete Research, 41(2), 191-196.

Chrysochoou, M. (2014). Investigation of the mineral dissolution rate and strength development in stabilized soils using quantitative X-ray diffraction. Journal of Materials in Civil Engineering, 26(2), 288-295.

Taylor, H. F. (1997). Cement Chemistry. London, UK, 2nd edition: Thomas Telford Services.

Hossein Zoriyeh Aligholi, Ilknur Bozbey. (2025). Laboratory investigation of strength evolution in organic soils improved by deep mixing method. Transportation Geotechnics, 52, 101589. doi:https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2025.101589

Bandipally, S., Cherian, C. & Arnepalli, D.N. (2018). haracterization of Lime-Treated Bentonite Using Thermogravimetric Analysis for Assessing its Short-Term Strength Behaviour. Indian Geotech J, 48, 393–404. doi: https://doi.org/10.1007/s40098-018-0305-7

Jiang, Ning-Jun & Du, Yan & Liu, Kai. (2018). Durability of Lightweight Alkali-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) Stabilized Clayey Soils Subjected to Sulfate Attack. Applied Clay Science, 161, 70-75.

Walid Deboucha, Nordine Leklou, Abdelhafid Khelidja, Mohamed N Oudjit. (2017). Hydration development of mineral additives blended cement using thermogravimetric analysis (TGA): Methodology of calculating the degree of hydration. Construction and Building Materials, 146, 687-701.

Wassim E. Tabet, Amy B. Cerato, Andrew S. Elwood Madden and Rolf E. Jentoft,. (2018). Characterization of Hydration Products' Formation and Strength Development in Cement-Stabilized Kaolinite Using TG and XRD. Journal of Materials in Civil Engineering , 30(10).

Van Ngoc Pham, Brett Turner, Jinsong Huang, Richard Kelly, . (2018). Long-term strength of soil-cement columns in coastal areas. Soils and Foundations, 57(4), 645-654.

Ahmad, A.; Sutanto, M.H.; Ahmad, N.R.; Mohamad, M.E.; Bujang, M. (2023). Microstructural Characterization of Fibric Peat Stabilized with Portland Cement and Silica Fume. Materials, 16(18).

Okada, Y. and Shimoda, M. (1980). he Retardation Mechanism of Cement Hydration by Peat (1) –Organic Components of Peat. Research Report of Onoda Co. Ltd.

Seyed Esmaeil Mousavi, Aliakbar Karamvand. (2017). Assessment of strength development in stabilized soil with CBR PLUS and silica sand. ournal of Traffic and Transportation Engineering, 4(4), 412-421.

Niroumand, H., Balachowski, L. & Parviz, R. (2023). Nano soil improvement technique using cement. Sci Rep, 13, 10724.

Cheraghalikhani, M., Niroumand, H. & Balachowski, L. (2023). Micro- and nano- bentonite to improve the strength of clayey sand as a nano soil-improvement technique. Sci Rep, 10913.

Sindete, M.J., Usui, H., Some, D.D. et al. (2024). Sustainable approach to quality assurance in cement-improved soil: applications of handheld XRF for geotechnical solutions. mart Constr. Sustain. Cities, 2(9).

Idiata, D., Kayode – Ojo, N., Okonofua, E. (2025). Geochemical characterisation of soil using XRF: Implication for geotechnical properties. E-Zbornik, elektronički zbornik radova Građevinskog fakulteta., 15(9), 73-83.

Zilong Wu, Yongfeng Deng, Songyu Liu, Qianwen Liu, Yonggui Chen, Fusheng Zha. (2016). Strength and micro-structure evolution of compacted soils modified by admixtures of cement and metakaolin. Applied Clay Science, 127-128, 44-51.

Zoriyeh Aligholi, H., & Bozbey, I. (2025). Laboratory investigation of strength evolution in organic soils improved by deep mixing method. Transportation Geotechnics, 52.