

MAGNEZYUM Klorürün Magnezyum Oksit İle İyileştirilmiş Kaolin KİLİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF MAGNESIUM CHLORIDE ON MAGNESIUM OXIDE IMPROVED KAOLIN CLAY

Ahmet Sinan TEKER, Suat AKBULUT, Abdullah Mevlüt Mutluel

ÖZET

Çalışmamızda kaolin tipi düşük plastik kilin kuru ağırlığına %2, %4, %6 magnezyum oksit (MgO) dozları karıştırılarak örnekler hazırlanmıştır. Her MgO derecesi için zemin ağırlığının sırasıyla %1 ve %2'si oranında magnezyum klorür (MgCl₂) kimyasalları eklenmiş, ayrıca tüm numuneler içeriğinde (%16,2) karıştırılmıştır. Tüm bileşenler homojen hale gelene kadar 10 dakika planet mikser ile karıştırılmış, daha sonra karışım dökülerek 5 tabakalı halde 25 vuruş kompaksiyon yapılarak yaklaşık 3 ila 10 gün oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılarak Tek Eksenli Serbest Basınç Testi için hazırlanmıştır. **Sonuçlara göre, kimyasal katkı kaolin kilinin mekanik özelliklerini iyileştirmiş, MgCl₂ ve MgO yüzdeleri arttıkça numunenin drenajsız kayma mukavemetinin arttığı görülmüştür. MgO ve MgCl₂ arasındaki etkileşimin kilin çimentolaşmasına katkıda bulunduğu, Sorel Çimentosunun mukavemet gelişimindeki etkisi baz alınarak kaolin kilinin mekanik güçlendirilmesinde rol aldığı söylenebilir. Kür süresinin uzatılması da kaolin kilinin drenajsız kayma mukavemet artışını hızlandırmış olup, elastik modülünü yükselterek numunelerin sertliğini arttırmıştır.** Bu sayede erken gerinimlerde kırılmalar gözlenerek numunelerin kırılabilirliği de yükselmiştir. Sonuç olarak, yapı malzemesi olarak kullanılan MgO ve MgCl₂ karışımının kaolin kili üstünde pozitif etkileri görülmüş olup, geoteknik mühendisliğinde kullanılan dolgu malzemeleri ve iksa projelerinde problem teşkil eden şişme, büzülme ve düşük mekanik özellikler gibi zayıf yönleri bu çalışma ile giderilmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Magnezyum Oksit, Magnezyum Klorür, Kaolin Kil

ABSTRACT

In our study, samples were prepared by mixing 2%, 4%, and 6% MgO doses to the dry weight of kaolin type low plastic clay. In each MgO doses, 1% and 2% of the soil weight, respectively, MgCl₂ chemicals were added, and all samples were mixed at the optimum water content ratio (16.2%). All components were mixed with a planetary mixer for 10 minutes until homogeneous, then the mixture was poured to have 25 blows for 5 layers. All samples were cured under room condition for 3 and 10 days to be tested on Unconfined Compression Test. From results, it was observed that the undrained shear strength of the sample increased as the percentages of MgCl₂ and MgO raised. It can be said that the interaction between MgO and MgCl₂ contributes to the cementation of the clay, and Sorel Cement plays a role in the mechanical strengthening of kaolin clay based on the effect on the strength development. Extending the curing time also developed mechanical properties of kaolin clay, and improved the hardness of the samples by increasing the elastic modulus. In this way, early failures attained at early strains and ductility of the samples increased. Finally, the positive effects of the mixture of MgO and MgCl₂ used as construction material on kaolin clay were observed, and the problematic properties such as swelling, shrinkage and low mechanical properties, which are problematic in filling materials used in geotechnical engineering and shoring projects, were tried to be eliminated with this study.

Keywords: Magnesium Oxide, Magnesium Chloride, Kaolinite Clay

• GİRİŞ

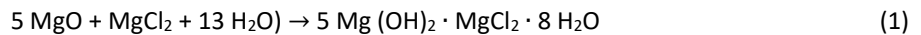
Şehir yaşamının hızla gelişmesinin sonucu insanlar daha iyi koşullarda yaşamak amacıyla otoyollar, köprüler, tüneller, yüksek binalar vb. gibi yapılar inşa etmek durumunda kalmışlardır. Yapı zemininde taşıma gücü, sıvılaşma, oturma gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır (Alpyürür ve Şenol, 2018).

Kil, geoteknik mühendisliğindeki çeşitli baraj, yol, köprü, tünel, iksa ve konut projelerinde uzun ve kısa dönemli şartlar altında suya aşırı tepki göstererek şişme ve büzülme eğilimi göstermektedir. Kaolin kili diğer killere göre (smectite ve montmorillite), düşük plasisiteye, düşük büzülme eğilimine, düşük aktiviteye ve düşük çatlama yoğunluğuna sahiptir. Ancak bu killer, nemli bir ortamda yüksek hacimsel değişimlere maruz kalabilmektedir. Zeminin boşluklarına nüfuz eden suyun daneler ile etkileşimi sonucu, kaolin kilinin partiküler düzeni bozulur, bunun sonucunda lős benzeri çökebilir zemin sınıfına dahil olurlar (Choudhury, 2020).

Zemin iyileştirme sistemleri geçmişten bugüne gelişmektedir. Günümüzde uygulanan zemin iyileştirme sistemlerinde çimento, kireç vb. malzemeler kullanılmaktadır. Ancak küresel ısınma sebebiyle karbon emisyonunu azaltmak amacıyla teknoloji bu yönde alternatif malzeme ve enerji kaynaklarını geliştirme yoluna gitmiştir. Bu tip problematik zeminlerde literatürde çeşitli geleneksel ve modern yöntemlerle iyileştirmeler mevcuttur. Geleneksel olarak, derin karıştırma, vibro flotasyon, donma-çözünme ve dinamik sıkıştırma olmakla birlikte, modern iyileştirmeler olarak koloidal silikat, mikro ince çimento kullanımı ile mikrobiyolojik çözümlerle katılaştırma örnekleri verilebilir (Selçukhan ve Ekinci, 2021). Zemin iyileştirmede kullanılan geleneksel kimyasallara alternatif olarak son dönemlerde literatürde yerini alan magnezyum oksit (MgO), inşaat sektöründen tıp alanına, geri dönüşüm sektöründen gıdaya birçok alanda kullanılmaktadır.

Doğal olarak periklaz halinde bulunan beyaz higroskopik katı bir mineral olan MgO (magnezyum oksit) ile renksiz inorganik bir bileşik olarak suda iyi çözünen tipik iyonik halojenürlerden kristalikusuz katı veya heksahidrat formlarında bulunan MgCl₂ (magnezyum klorür) çeşitli oranlarda karıştırıldığında magnezyum oksisülfat veya Sorel Çimentosu elde edilmektedir (Özer, 1996). Bu çalışmada MgO ve MgCl₂ kaolin kilini iyileştirme amacıyla kullanılmıştır.

Sorel çimentosu, magnezyum oksit (MgO) ile karıştırılmış bir H₂O, MgCl₂ ve MgO oranında magnezyum klorür (MgCl₂) tuzlu su çözeltisinin sonucudur ve üretimi için gerekli kimyasal reaksiyon, 5 fazlı hidratlı magnezyum oksiklorür ürünü oluşturan birçok form alabilir, bu Denklem 1'de gösterilmiştir (Caine ve Ellis, 2008).



Bununla birlikte, magnezyum klorür fazlarının suya uzun süre maruz kaldıktan sonra stabiliteyi düşmektedir. Bağlanma ya da bağ fazlarının bu dengesizliği, magnezyum klorür veya magnezyum hidroksitin süzülmesine yol açmaktadır (Phair 2006). Reaksiyon giren maddelerin oranına göre MgO–MgCl₂–H₂O sistemi içinde dört ana faz tanımlanabilir.

Hidrat fazlarından ikisi, 3Mg(OH)₂·MgCl₂·8H₂O (Faz 3, MOC 3-1-8) ve 5Mg(OH)₂·MgCl₂·8H₂O (Faz 5, MOC 5-1-8), ortam koşullarında hazırlanır ve CO₂ veya H₂O ile reaksiyona girene kadar stabil kalır. Bu iki faz, Magnezyum oksit çimentosu (MOC)'nun sertliği ve mukavemetinden sorumlu temel ürünlerdir (Matkovic ve Young, 1973). İstenilen mekanik özellikler, hem Faz 3 hem de Faz 5'in iğne sivri uçlu yapısının bir sonucudur (Li ve Chau, 2007). Yapıdaki iğneler, hızlı büyümede birbirine kenetlenen ve büyüme için boşluk olmadığında sivri uçların iç içe büyümesi nedeniyle daha yoğun hale gelen çok sert bir yapıyla sonuçlanan sarmal-boru telleri olarak tanımlanabilir (Bilinski vd. 1984). Kalan iki faz, 2Mg(OH)₂·MgCl₂·4H₂O (Faz 2, MOC 2-1-4) ve 9Mg(OH)₂·MgCl₂·5H₂O (Faz 9, MOC 9-1-5) hazırlanabilir ve ayrıca yaklaşık 100 °C sıcaklıkta kararlıdır (Li ve Chau, 2007; Urvongse ve Sorrell 1980; Dorrepaal ve Gowen 2018). Sorel çimentosu üretimindeki kompleks reaksiyonlar esnasında, MgO miktarında zamanla kademeli bir düşüş görülürken, Sorel çimentodaki Faz-5 kristal miktarı artmaktadır. Başlangıçtan itibaren 48 saat içinde, Faz 5 kristallerinin'in %89'u oluşurken, 96 saat sonra ise, MgO oluşumunun %5'ten daha az olduğu görülmektedir (Jiříčková vd., 2020).

İnşaat sektöründe, özellikle kaplama işlerinde nano-MgO katkısı bağlayıcı olarak Sorel çimento (magnezyum klorür çimento) ile kullanılmaktadır. Sorel çimentosu Portland çimentosuna göre yüksek yangın dayanımı, düşük ısı iletkenliği ve inorganik ve organik agregalarla olan güçlü bağ oluşturması gibi birçok üstün özelliği için tercih edilmektedir (Phair, 2006). Portland ve Sorel çimentosunun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 1'de karşılaştırılmıştır. Sorel çimentosunun bileşiminde minimum %87 magnezyum oksit bulunurken Portland çimentosunda maksimum %5 bulunmaktadır. Fiziksel olarak, priz başlama ve bitiş süreleri Portland çimentosu

için sırasıyla minimum 60 dakika ve maksimum 10 saat sürerken, Sorel çimentosunda başlama ve bitiş süreleri sırasıyla 3-6 saat ve 7-15 saat olarak gerçekleşmektedir. Portland Çimentosunda SO_3 ve Cl maddeleri eser miktarda bulunurken, Sorel Çimentolarında bu maddelerden genel anlamda bulunmamaktadır. Basınç mukavemeti bakımından, Portland Çimentosu 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sırasıyla 21 MPa ila 32.5 MPa olabilirken, Sorel Çimentosunda bu konuda yalnızca 7 ve 28 günlük çekme dayanımları 7 MPa ila 10.5 MPa olarak bilinmektedir. (Tonak, 1995).

Sorel çimentosunun geliştirilmesi ile ilgili çalışmalarda katkı maddeleri ön plana çıkmaktadır. Çimentonun fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştirebilen bu katkı maddeleri çimentonun basınç dayanımı ve su geçirmezliği üstünde önemli bir etkiye sahiptir. Örneğin, suya direncini artırmak için fosforik asit (H_3PO_4) veya çözünür fosfatlar, alkali metaller, ferrik, alüminyum veya amonyum (NaH_2PO_4 , $Mg_2(PO_4)_3$, Na_3PO_4 veya NaH_2PO_4) kullanılarak, betonun suya direnci arttırılmıştır (Zhou vd., 2015; Deng, 2003). Literatüre göre, Sorel çimentosu esaslı betonun su geçirmezliğinin arttırılması için az miktarda fosfor eklenmesi gerekmektedir. Bu katkı maddelerin etkileri, su çözeltisinde Faz 5 kristallerinin kararlılığının arttırılmasına dayanmaktadır. Basınç dayanımını arttırmak amacıyla ise granit parçaları kullanılmaktadır. Granit parçalarının çizilmelere, neme, çatlaklara, dökülmelere ve hem yüksek hem de düşük sıcaklığa karşı yüksek dayanıklılığı ve direnci vardır. Bu nedenle, granit parçalarının eklenmesiyle beton, daha fazla plastisiteye ve mekanik özelliklere sahip olmaktadır. Granit parçalarının eklenmesi bu malzemedeki korozyon süreçlerini de etkilemektedir (Li vd.,2013).

Dolayısıyla, Sorel Çimentosunun ana maddelerinden biri olan Magnezyum Oksit uygun kütleme koşullarında ve doğru şekilde zeminle buluşturulduğunda zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Bununla ilgili çalışmalara göre, kil zeminler ile %6 oranında nano magnezyum oksit karıştırıldığında mühendislik özelliklerinde önemli ölçüde artış olurken, %1.0 oranında nano magnezyum oksitin kumlu kil üzerinde kullanıldığı bir diğer çalışmada ise 1 günlük karbonizasyon süresi (MgO hidratasyon ürünlerinin karbondioksite maruz kalması) sonunda zemin basınç dayanımı çimento ile iyileştirilmiş zeminin 28 günlük dayanımına yakın olduğu sonucuna varılmaktadır (Gao vd., 2020; Wang vd., 2021; Unluer ve Al-Tabbaa, 2014). Ek olarak, 2021 yılında 18 milyon ton yıllık üretimi ile Çin, dünyadaki yıllık magnezyum oksit üretiminin (ABD üretimi hariç) %62.06'sını karşılamaktadır. Türkiye ise, 2021 yılında 1.9 milyon ton magnezyum madeni üretimi gerçekleştirmiştir (USGS, 2023). Dolayısıyla, ekonomik ve çevresel boyutlarda yüksek değere sahip Magnezyum Oksit, Magnezyum Klorür ile oluşturduğu yüksek basınç dayanımlarına sahip Sorel Çimentosu yapı malzemesinin geoteknik mühendisliğinde problem teşkil etme potansiyeline sahip kaolin kil üzerinde mekanik ve fiziksel iyileştirici özelliği merak konusu olmuş, ve bu çalışmada araştırılmıştır.

• MALZEME VE METOT

Çalışmamızda ölü-yanmış tip ve saflığı %98 olan magnezyum oksit (MgO) ile renksiz inorganik bir bileşik olan magnezyum klorür ($MgCl_2$)'ün bileşiminden oluşan, bağlayıcılık özelliğine sahip, çimentolaşabilen Sorel çimentosu bazlı kimyasal karışım ile kaolin tipi düşük plastisiteli kil kullanılmış olup, zemine ait genel özellikler Tablo 1'de sunulmaktadır. Kullanılan kimyasallar (MgO - $MgCl_2$) ile ilgili gerekli veriler ise Tablo 2 ve Tablo 3'de verilmektedir.

Tablo 1. Kaolin Kilinin Endeks Özellikleri

Zemin Özellikleri	Sonuçlar
Maksimum Kuru Yoğunluk (g/cm^3)	1.71
Özgül Ağırlık (G_s)	2.63
Optimum Su Muhtevası (%)	16.2
Likit Limit (%)	28
Plastik Limit	21
USCS Zemin Sınıflandırması	CL

Tablo 2. Magnezyum Oksit'in (MgO) Özellikleri

Kimyasal ve Fiziksel Özellikler	Sonuçlar
MgO (%)	88.19
SiO_2 (%)	5.28
CaO (%)	2.61
Fe_2O_3 (%)	0.68
Kızdırma Kaybı (%)	3.04

Spesifik Yüzey Alanı (m ² /g)	18.33
Yoğunluk (g/cm ³)	3.58
Renk	Beyaz
Ortalama Partiküler Boyut (μ)	90/100
Erime Noktası (:C)	2800
Kaynama Noktası (:C)	3600
Tür	Ölü Yanmış
Kalsinasyon Sıcaklık Skalası (:C)	1000-1500

Tablo 3. Magnezyum Klorür'ün (MgCl₂) Özellikleri

Kimyasal ve Fiziksel Özellikler	Sonuçlar
Molar Kütle (g/mol)	95.21
Renk ve Görünüş	Beyaz(renksiz)
Kaynama Noktası (:C)	412
Erime Noktası (:C)	714
Suda Çözünürlük (g/100ml)	54.3
Yoğunluk (g/cm ³)	2.32
pH	>7

Gerekli indeks deneyleri sonucunda kaolin kilinin düşük plastisiteli kil olduğu ve düşük aktiviteye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu tip killerde, ani su muhtevası artışlarında moleküler yapısı itibarıyla düşük taşıma gücü, aşırı oturma gibi problemler meydana gelebilmektedir. Dolayısıyla, bu tür zeminlerin mühendislik özellikleri iyileştirildiği takdirde çeşitli inşaat projelerinde yerinde veya dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi görülmektedir. Bu anlamda, magnezyum oksit- magnezyum klorür ile su kompleks reaksiyonları sonucu oluşan bağlayıcılığı yüksek kristalik ürünler ile bu tür problematik durumların engellenebileceği ve zeminin daha yüksek taşıma gücüne sahip çimentolaşmış/kayaçlaşmış forma ulaşabileceği bu çalışmanın ana amaçlarından birisidir. Numune hazırlığı öncesinde kaolin kilinin optimum su muhtevasının belirlenmesi amacıyla ön çalışmalar yapılmıştır. Bu anlamda, herhangi bir katkı eklemeksizin kaolin kili üzerinde Minyatür Harvard Kompaksiyon testi yapılarak, 5 tabaka halinde 25 vuruş halinde çeşitli su muhtevalarında sıkıştırılmış, böylece her bir MgO doz düzeyleri için optimum su muhtevası belirlenmiştir. Sonuç olarak, her bir MgO doz düzeyi için optimum su muhtevası %16.2 olarak bulunmuştur. Akabinde, kaolin tipi düşük plastik kilin kuru ağırlığına %2, %4, %6 MgO dozları karıştırılarak örnekler hazırlanmıştır. Her MgO derecesi için zemin ağırlığının sırasıyla %1 ve %2'si oranında MgCl₂ kimyasalları eklenmiş, ve tüm numuneler bu optimum su yüzdesinde (%16,2) hazırlanmıştır. Tüm bileşenler Thermomac mekanik karıştırıcı ile homojen hale gelinceye kadar 10 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından, karışım 38 mm çap ve 76 mm yüksekliğe sahip kalıpta 25 vuruş/tabaka olmak üzere 5 tabaka halinde sıkıştırılarak Minyatür Harvard teste tabii tutulmuşlardır. Belirli bir süre kalıpta bekletildikten sonra (1-2 saat aralığında) numuneler kalıptan çıkartılmış, su kaybı olmaması amacıyla streç folyo ile sarmalanmıştır. Tüm numuneler 3 ila 10 günlük sürelerde 23 °C sıcaklık ve %41 nem altında küre tabii tutulmuştur. Gerekli fiziksel ölçümler ve kalibrasyonlar yapıldıktan sonra, tüm numuneler Serbest Basınç Deneylerine tabii tutulmuş, çeşitli düzeltmeler ile yük-deformasyon verileri elde edilmiştir.

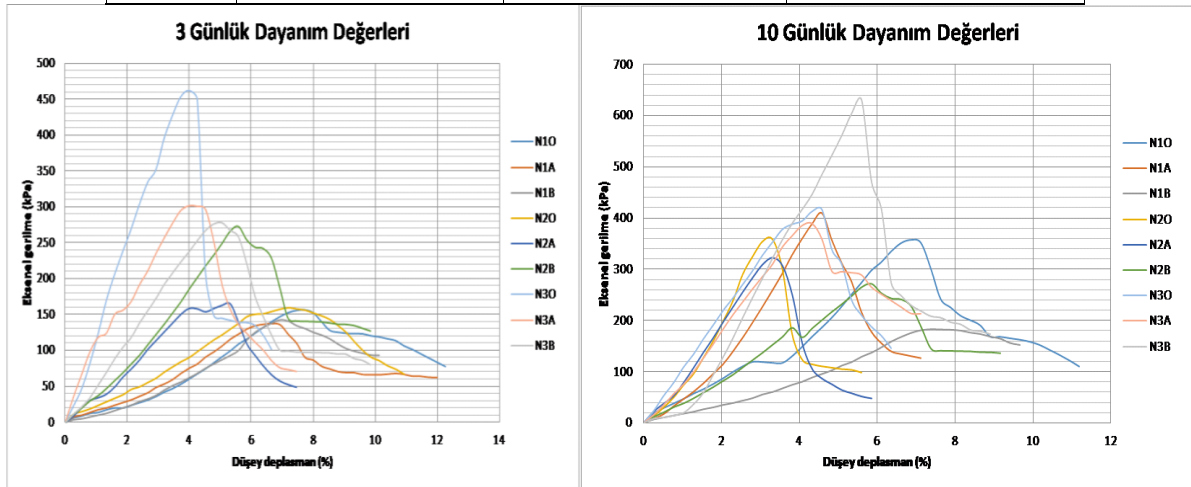
• TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Çalışmamızda belirtilen yöntemler ve koşullarda hazırlanan numuneler, 3 ve 10 günlük kür süreleri sonunda tek eksenli serbest basınç testine tabii tutulmuşlardır. Bu deney gerinim kontrollü şartlar altında 1.27 mm/dakika hızda gerçekleştirilmiş olup, elde edilen serbest basınç dayanım sonuçları Şekil 1'de gösterilmiştir. Grafiklerde kullanılan numunelere ait kısaltmalar ve bu numuneler içerisindeki kimyasalların yüzdelik olarak dağılımı Tablo 4'de sunulmaktadır.

Tablo 4. Numunelere ait Kısaltmalar ve İçerikleri

Kısaltma	Doz Oranları (%)	q _{u,max} (kPA) (3 Günlük)	q _{u,max} (kPA) (10 Günlük)
N1O	%2 MgO	157	380
N1A	%2 MgO + %1 MgCl ₂	138	410
N1B	%2 MgO + %2 MgCl ₂	142	190

N2O	%4 MgO	160	380
N2A	%4 MgO + %1 MgCl ₂	165	310
N2B	%4 MgO + %2 MgCl ₂	271	285
N3O	%6 MgO	462	410
N3A	%6 MgO + %1 MgCl ₂	300	395
N3B	%6 MgO + %2 MgCl ₂	280	618



Şekil 1. 3 ve 10 Günlük Küre Tabi Tutulan Numunelerin Yük-Deformasyon Grafikleri

Kısa kür şartlarında (3 gün), magnezyum klorür miktarının numunelerin mekanik dayanımı üzerinde etkisi sınırlı olmakla birlikte, uzun kür altında (10 gün) bu etki artmaktadır. Sebep olarak, MgO-MgCl₂ arası etkileşimin 3 günlük periyotlarda çeşitli hidrat fazlarından Faz-3 ve Faz-5 kristallerinin büyük bir kısmını meydana getirmesine karşın, bu kristallerin iğne benzeri sivri uçlu yapılarının 10 günlük süreçlerde daha da fazla büyüme sağlayarak birbirine kenetlenmesi ve büyüme için boşluk olmadığında bu yapıların iç içe bükülmesi ile çok sert bir yapıya sahip sarmal-boru telleri oluşumunun sağlanması gösterilebilir. N3B'lerin %300'e varan dayanım artışlarının, 3 günlük süreç sonrasında oluşan Faz-9 kristalleri nedeniyle olabileceği düşünülmektedir (Li ve Chau, 2007; Bilinski vd., 1984). Yalnızca MgO ile hazırlanan numunelerde ise kısa kür süresi altında düşük MgO dozundaki numunedeki mekanik artış en yüksek iken, uzun kür süresi altında düşük doz MgO içeren numunelerin mukavemetleri azalmış, yüksek doz MgO içeren numunelerin dayanımları ise yükselmiştir. Yalnızca MgO içeren numunelerin dayanımları 300-400 kPa aralığında bulunmuştur. Buradan yola çıkarak, yalnızca MgO içeren numunelerde kür süresi ve MgO dozunun mukavemet artışındaki pek fazla etkisinin olmaması kullanılan zeminin düşük plastisiteli kaolin kili olmasından kaynaklanabilir. MgO hidratasyonu sonucu elde edilen Magnezyum Hidroksit ürünleri kil daneleri ile yeterince etkileşime giremediği için kompleks Magnezyum Hidrat molekülleri oluşmaması ve dayanımını çok yüksek derecede arttırmaması ihtimal dahilindedir. Bu anlamda, en yüksek dayanım, 10 günlük kür şartları altındaki N3B numunesinde (MgO %2 + MgCl₂ %2) elde edilmiştir. Sonuç olarak, uygun oranlarda Sorel çimentosu oluşturabilen MgO-MgCl₂ kompleksi kaolin kilinin fiziksel ve mekanik davranışlarını geliştirmiş, doz oranları arttıkça kilin drenajsız kayma mukavemetini arttırdığı görülmüştür. MgO ve MgCl₂ arasındaki etkileşim Sorel Çimentosunun oluşumu vasıtasıyla, kilin çimentolaşmasına katkıda bulunmuş, zeminin mekanik güçlendirilmesinde rol almıştır. Kür süresinin uzatılması da kaolin kilinin drenajsız kayma mukavemet artışını hızlandırmış olup, Elastik Modülün yükselmesini sağlayarak, numunelerin kırılabilirliğine katkıda bulunmuştur. Bu sayede yüksek dayanımlara erişilen erken gerinimlerde çimentolaşmış numunelerde çatlaklar gözlenerek numune kırılabilirliği de yükselmiştir. Sonuç olarak, yapı malzemesi olarak kullanılan MgO ve MgCl₂ karışımının kaolin kil üstünde pozitif etkileri görülmüş olup, geoteknik mühendisliğinde kullanılan dolgu malzemeleri ve ıksa projelerinde problem teşkil eden şişme, büzülme ve düşük mekanik özellikler gibi zayıf yönleri bu çalışma ile giderilmeye çalışılmıştır.

TEŞEKKÜR : Çalışmamızda sağladığı katkılar vesilesiyle Yılmaz Yılmaz ile Safi Nashatsafi ALJALIL'e ve deney şartları için uygun laboratuvar imkanları sunan Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü akademisyenlerine teşekkürlerimizi sunuyoruz.

KAYNAKLAR

- Alpyürür, M., Şenol, A. (2018), "Yü zey sel Zemin İy il eştir me sin d e Yen i Bir Ma lzem e Olarak Atık Gaz b eto n Ku llan ımı", Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Vol 9 (2): 168-178.
- Bilinski, H., Matkovid, B., Mažuranid, C., Žunid, T.B. (1984), "The formation of magnesium oxychloride phases in the systems MgO-MgCl₂-H₂O and NaOH-MgCl₂-H₂O", J. Am. Ceram. Soc., Vol 67, 266–269.
- Caine, GE., Ellis, CW. (2008), "Magnesium oxychloride cement", PCT/US2007/084085, Google. Patents, <https://patents.google.com/patent/WO2008063904A2/en>, Erişim Tarihi: 04.08.2023.
- Choudhury, T. (2020), "Clay Hybrid Materials", doi:10.5772/intechopen.92529.
- Deng, D. (2003), "The mechanism for soluble phosphates to improve the water resistance of magnesium oxychloride cement" Cement and Concrete Research, Vol 33, 1311-1317.
- Dorrepaal, R.M, Gowen, A.A. (2018), "Identification of magnesium oxychloride cement biomaterial heterogeneity using raman chemical mapping and NIR hyperspectral chemical imaging", Sci. Rep., Vol 8, 13034.
- Gao, L., Luo, Y., Ren, Z., Yu, X., Wu, K. (2020), "Experimental Study on Dynamic Properties of Nano-MgO-Modified Silty Clay" International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, doi:6.10.1007/s40891-020-00210-5.
- Jiříčková, A., Lojka, M., Lauermannová, A., Antončík, F., Sedmidubský, D., Pavlíková, M., Záleská, M., Pavlík, Z. and Jankovský, O. (2020), "Synthesis, Structure, and Thermal Stability of Magnesium Oxychloride 5Mg(OH)₂·MgCl₂·8H₂O" Appl. Sci., Vol 10, 1683; <https://doi.org/10.3390/app10051683>
- Li, Y., Yu, H., Zheng, L., Wen, J., Wu, Ch., Tan, Y. (2013), "Compressive strength of fly ash magnesium oxychloride cement containing granite wastes", Construction and building materials, Vol 38, 1- 7.
- Li, Z., Chau, C., (2007), "Influence of molar ratios on properties of magnesium oxychloride cement", Cem. Concr. Res., Vol 37, 866–870.
- Matkovic B., Young J., (1973), "Microstructure of magnesium oxychloride cements", Nat. Phys. Sci.,Vol 246, 79.
- Özer, O., (1996), "Türkiye'de Üretilen Kostik Kalsine Manyezitlerinin İncelenmesi ve Sorel Çimentosu Parametrelerinin Araştırılması", PhD., Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Phair, J. W. (2006), "Green chemistry for sustainable cement production and use", Green chemistry, Vol 8(9), 763-780.
- Selçukhan, O., Ekinci, A. (2021), "Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Yaygın Kullanımına Bağlı Değerlendirilmesi", European Journal of Science and Technology, doi: 10.31590/ejosat.881603.
- Unluer, C., Al-Tabbaa A., (2014), "Enhancing the carbonation of MgO cement porous blocks through improved curing conditions", Cement and Concrete Research, Vol 59, 55-65
- Urwongse, L., Sorrell, C.A. (1980), "The System MgO-MgCl₂-H₂O at 23 °C", J. Am. Ceram. Soc. Vol 63, 501–504.
- USGS, (2023), "Mineral Commodity Summaries", USA.
- Tonak, T. (1995), "Çimento Standartları", Çimento Sempozyum ve Sergisi, Ankara, 81-87.
- Wang, W., Zhou, H., Li, J., Tao, F., Li, C., Qian, B., Jiang, P. (2021), "Influence of Carbonization Process on the Mechanical Properties of Nano-MgO Modified Cement Soil", Sustainability, Vol 13(6), 3558.
- Zhou, Z., Chen, H., Li, Z., Li, H. (2015), "Simulation of the properties of MgO-MgCl₂-H₂O system by thermodynamic method", Cement and concrete research, Vol 68, 105-111.