

# Kaolen Türü Killi Zeminlerin Dayanım Özelliklerinin Melamin Formaldehit Sıvı Polimeri Kullanarak İyileştirilmesi

Altuğ Saygılı<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 48000 Muğla.

## Özet

Zemin iyileştirme yöntemleri, şehirler ve endüstri bölgelerinde artan yapılaşma ihtiyacı sonucunda daha çok alan kullanımı gereksinimi nedeniyle gün geçtikçe uygulamalarda tercih edilen yöntemlerden biri haline gelmiştir. Bir diğer tercih sebebi ise yeni geliştirilen yöntem ve malzemeler ile geleneksel yöntemlere göre daha ekonomik ve hızlı çözümlerin elde edilebilmesidir. Dünyada son yıllarda kimyasal stabilizörlerin, taşıma kapasitesi, şev duraylılığı ve erozyon gibi problemleri durumlarda, zemin iyileştirme uygulamalarında kullanımı, ekonomik oluşu, kolay uygulanması ve erken dayanım kazanma nedenleri ile giderek artış göstermektedir. Bu çalışmada sıvı haldeki melamin formaldehit polimerinin, kaolen türü killerin dayanım özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sıvı melamin formaldehit polimerinin optimum su muhtevasında sıkıştırılmış kaolen örnekler içerisine eklenerek serbest basınç dayanımlarındaki değişimler araştırılmıştır. Sıvı polimer yüzde 3, 6, 9 ve 12 oranlarında örnekler optimum su muhtevasını geçmeyecek şekilde, su ile yer değiştirerek eklenmiş ve hazırlanan polimer katkılı örnekler 3, 7, 14 ve 28 gün boyunca küre tabii tutulmuşlardır. Kür süresi sonunda serbest basınç testlerine tabii tutulan farklı yüzdelere eklenmiş örneklerde, polimer katkı oranı ve kür süresi arttıkça dayanımlarda ciddi artışlar tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre melamin formaldehit sıvı polimer katkısı zemin iyileştirme yöntemi olarak killi zeminlere uygulanabilecektir.

## Anahtar Sözcükler

Kaolin, Serbest Basınç Dayanımı, Zemin İyileştirme, Melamin Formaldehit Polimeri, Erozyon, Heyelan

## Improving the Strength Properties of Kaolinite Type Clays Using Melamine Formaldehyde Liquid Polymer

### Abstract

Soil remediation methods have become one of the preferred methods due to the need for more space for construction activities in cities and industrial areas. Another reason for choosing the remediation techniques is to obtain economical and faster solutions compared to the conventional methods. In recent years, the use of chemical stabilizers in soil remediation applications, such as slope stability, erosion and bearing capacity, has increased steadily due to economy, easy application, workability and early strength gain. In this study, the effects of liquid melamine formaldehyde polymer on the strength properties of kaolinite type clay were investigated. The changes in compressive strength values were evaluated by adding liquid melamine formaldehyde polymer into the kaolinite specimens compacted at previously determined optimum water content value. The liquid polymer was added at 3, 6, 9 and 12 per cent by weight with water, so as not to exceed the optimum water content of the matrix, and the prepared polymer-added samples were cured for 3, 7, 14 and 28 days to observe the strength gain at different curing times. Significant increases were observed in the strength values of the samples stabilized with different percentages of liquid polymer subjected to unconfined compression tests at the end of the curing period as the polymer addition ratio and the curing time increased. According to the obtained results, melamine formaldehyde liquid polymer can be applied to clayey soils as a soil stabilizer.

### Keywords

Kaolinite, Unconfined Compressive Strength, Soil Stabilization, Melamine Formaldehyde Polymer, Erosion, Landslides

### 1. Giriş

Zemin iyileştirme yöntemleri karayolları, demiryolları, dolgular ve su kanalları inşası gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır. Uygulamada çoğunlukla kireç, çimento gibi katkılarla çimentolaşma reaksiyonları içeren yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler çoğu zemin tiplerinin stabilizasyonunda ekonomik çözümler sunmakta ve zeminin mikro yapısını değiştirerek geçirimsizlik, dayanım gibi mühendislik özelliklerini iyileştirmektedirler (Ingles 1972; Hilf 1991; Sherwood 1994; Little 1995; Puppala vd. 2003). Ancak bu katkılar bazı zeminlerde yeterince etkili olamamakta, bazı katkı maddeleri negatif etki bile gösterebilmektedir. Örneğin, sülfatça zengin zeminlerdeki uygulamalarda ettringit (Ca<sub>6</sub>[Al(OH)<sub>6</sub>]<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·26H<sub>2</sub>O) minerali oluşmakta, bu da zeminlerde istenmeyen kabarmalara ve şişmelere neden olabilmektedir (Mitchell 1986; Katz vd. 2001).

Ayrıca, çimentomsu malzemelerle iyileştirilen zeminler daha gevrek hale gelmekte ve böylece dinamik yükler altında veya büzülme etkisinde çatlak oluşma ihtimali artmaktadır (Little 1992; Sebesta 2005; Li 2014). Bu çatlaklar zamanla yüzey kaplamalarına da yansımakta ve yollarda sorunlara neden olmaktadır. Bunun yanı sıra kireç, çimento gibi katkıların üretimi ciddi miktarda enerji gereksinimine ihtiyaç duyulmakta, üretim tesisleri karbon salınımına neden olmakta ve iklim değişikliğine negatif yönde etki etmektedir (Imbabi vd. 2012). Çimentomsu zemin iyileştirme malzemelerinin uygun olmadığı durumlarda reçine, köpük, emülsiyonlar, enzimler, asitler ve endüstriyel atıklarla iyileştirme yaparak çözüme ulaşmak mümkün olabilmektedir (Rauch vd. 2002; Santoni vd. 2002; Newman ve Tingle 2004; Harris vd. 2006; Gilazghi 2016; Naeini ve Ghorbanalizadeh 2010).

Son yıllarda zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılmaya başlanan sıvı polimerler, dayanımı artırmakta, geçirimsizlik ve sıvılaşma riskini azaltmakta, daneler arası adhezyonu artırarak hava koşullarına maruz kalan zeminlerde ciddi performans kazanımına neden olmaktadır (Camberfort 1977; Moustafa vd. 1981; Jones vd. 1991; Ohama 1995; Al-Khanbashi ve Abdalla 2006; Zandieh ve Yasrobi 2010; Ajalloein vd. 2013, Anagnostopoulos ve Papaliangas 2012; Naeini vd. 2012; Anagnostopoulos vd. 2013; Mohammed ve Vipulanandan 2013). Ancak sıvı polimerler çeşit çokluğu ve fiyat farklılıkları (patentli karışımlar) nedeni ile uygulamada uygun malzeme seçimi konusunda zorluklar yaşanmasına da neden olabilmektedir. Ayrıca, farklı sıvı polimerlerin uygulama şekilleri de değişiklik göstermektedir (Rauch vd. 2002; Santoni vd. 2002; Harris vd. 2006). Zemin stabilizasyon malzemelerine gün geçtikçe yenileri eklenmesi nedeni ile ticari olmayan (patentsiz) sıvı polimerler hakkında literatürde kür süreleri ve uygulama yöntemleri hakkında hali hazırda uygulamalarda kullanılan malzemeler ile ilgili yeterince çalışma bulunmamaktadır. Yapılan çalışmalarda farklı kürleme ve karışım yöntemlerinde aynı sıvı polimer kullanıldığı halde farklı sonuçların elde edildiği görülmüş, dolayısı ile geleneksel zemin iyileştirme katkılarından daha detaylı çalışmalar yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır (Harris vd. 2006).

Dünyada kullanılan sıvı polimer zemin stabilizörlerinin büyük çoğunluğu geleneksel iyileştirme katkılarına göre daha hızlı dayanım kazanan ve daha uzun ömürlü çözümler üreten patentli ürünlerdir. Patentli polimer zemin stabilizasyon malzemelerinin içeriği hakkında yasalar gereği bilgi edinilememekte, dolayısı ile maliyetler artmaktadır. Gıdadan, mobilya sektörüne kadar geniş bir alanda kullanılan bu polimerin zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılması maliyetleri patentli ürünlere göre ciddi mertebede düşüreceği düşünülmektedir.

Bu çalışmada, yerli üreticilerden tedarik edilen melamin formaldehit sıvı polimerinin Çanakkale ili Çan-Tepeköy yöresinden derlenen kaolen türü kil örneklerinin dayanım özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, kil örneklerin stabilizasyonu için kür süresi ve katkı oranı etkisi araştırılarak optimum sıvı polimer katkı oranı incelenmiştir. Melamin formaldehit sıvı polimeri zemin stabilizasyonuna yönelik olarak ilk kez bu çalışmada kullanılmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

Çanakkale ili Çan-Tepeköy yöresinden toz halinde derlenen kaolen türü kil örnekleri öğütülmeden örnek hazırlama aşamasına geçilmiş, ASTM D698-12e2 standardına göre gerçekleştirilen Standart proktor deneyi sonucunda maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre optimum su içeriği %15, maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $16.9 \text{ kN/m}^3$  tür. Kaolen kilinin ASTM D4318-17e1(2017) standardına göre gerçekleştirilen deneyler sonucunda likit ve plastik limit değerleri sırasıyla, %26.1 ve %17.9 olarak belirlenmiştir. Tedarikçi firma tarafından kaolen türü kil örneklerinde yapılan ana oksit element analizi sonuçları ise Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1: Kaolen kili örneklerine ait ana oksit element analizi sonuçları

Element	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>4</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	LOI
Kaolin %	63.09	25.50	0.38	0.37	0.30	0.01	0.14	0.30	0.65	-	-	7.30

Deneylerde kullanılan ve teknik özellikleri Tablo 2'de verilen melamin formaldehit polimeri nem ve ısı ile zamanla aktive olmakta, suya yakın akışkanlığı sayesinde örneklerle kolayca karışabilmektedir.

Tablo 2: Melamin Formaldehit sıvı polimerinin teknik özellikleri

Görünüş	Berrak renksiz - sıvı
Katı madde % (ağırlıkça)	53 ±1
Akma zamanı (sn F.C.4 20 °C)	15 - 20
pH (20 °C)	9,30 – 9,50
Su Toleransı (20 °C)	1 /2,5 - 1 /3
Dansite (g/cm <sup>3</sup> 20 °C)	1.225 – 1.235
Jel zamanı (Dak.130 °C)	36 - 40

Melamin formaldehit sıvı polimerin kil örnekler üzerindeki etkisini serbest basınç deneyleri ile incelemek üzere katkısız ve katkılı örnekler hazırlanmıştır. Melamin formaldehit sıvı polimeri, örnek hazırlama esnasında optimum su içeriğini değiştirmeyecek şekilde su ile yer değiştirilerek sıvı formda eklenmiştir. Ağırlıkça farklı yüzdelerde (% 0, 3, 6, 9, 12) karıştırılan örnekler optimum su içeriğini sağlayacak oranda saf su eklenmiş ve örnekler Şekil 1’de gösterilen minyatür harvard kompaksiyon cihazı yardımı ile standart proktor enerjisi (592 kJ/m<sup>3</sup>) seviyesinde sıkıştırılmıştır.



Şekil 1: Minyatür Harvard kompaksiyon ekipmanı

Bu çalışmada tercih edilen karışım oranları Tablo 3’de verilmiştir. Her bir karışımdan 3’er set olmak üzere toplam 48 örnek hazırlanmıştır. Numunelerin hazırlanması sırasında önce su ile homojen karışım elde edilecek şekilde örnekler karıştırılmış, sonrasında ise sıvı polimer eklenip tekrar karıştırılmıştır. Bu örnek hazırlama yönteminin daha iyi sonuç verdiği Gilazghi vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada belirtilmiştir. Standart Proktor enerji seviyesinde sıkıştırılan örnekler kalıptan çıkarıldıktan sonra streç film ve alüminyum folyo ile sarılmış, 21°C sabit sıcaklıkta ve nem kontrollü odada Şekil 2’de görünen desikatörlerin içerisinde 3, 7, 14 ve 28 gün boyunca küre tabii tutulmuştur.

Tablo 3: Karışım oranları

Örnek adı	Kil kütlesi (gr)	Sıvı polimer kütlesi (gr)	Distile su kütlesi (gr)
MF3	120	3.6	14.4
MF6	120	7.2	10.8
MF9	120	10.8	7.2
MF12	120	14.4	3.6



Şekil 2: Desikatör içerisinde kürlenmiş örnekler

Kür süresi sonunda Şekil 3'te gösterilen serbest basınç aleti kullanılarak ASTM D2166M-16 (2016) standardına göre 0.5 mm/dakika yükleme hızı ile örnekler üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda her bir karışım için ortalama dayanım değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 3: Serbest basınç test ekipmanı

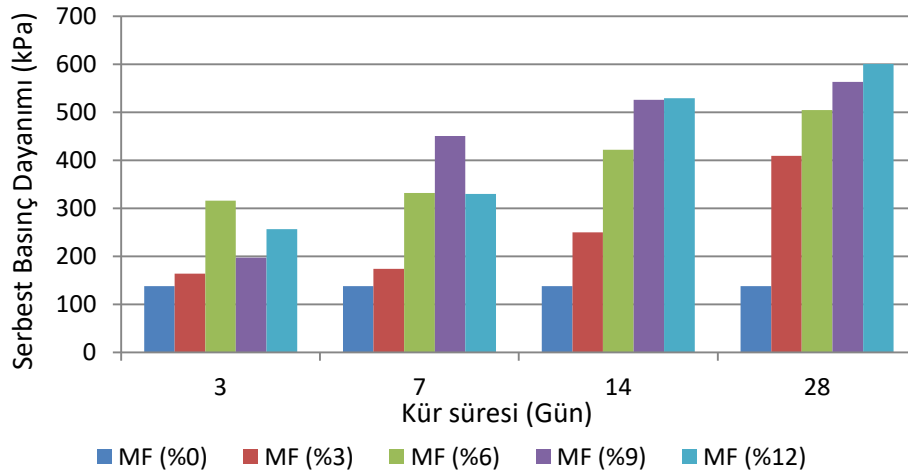
### 3. Bulgular ve Sonuçların İrdelenmesi

Farklı karışım oranlarına sahip toplam 48 örnek, melamin formaldehit sıvı polimer katkılı ve katkısız olacak şekilde 3, 7, 14 ve 28 günlük kürlere tabii tutulmuş ve bu süreler sonundaki dayanım değerleri belirlenmiş olup Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4: Kil numunelerin kür sürelerine göre basınç dağılımları

Örnek adı	Kür süresi (gün)	Serbest basınç dayanımı (kPa)
MF0	-	137.9
	3	164.1
MF3	7	173.8
	14	249.6
	28	409.4
	3	316.2
MF6	7	332.1
	14	421.5
	28	504.7
	3	197.1
MF9	7	450.3
	14	525.7
	28	563.1
	3	256.2
MF12	7	330.2
	14	529.2
	28	600.4
	3	164.1

Şekil 4'te kür süresi sonunda farklı oranlarda melamin formaldehit sıvı polimer katkıli kil örneklerin katkı oranının ve kür süresinin serbest basınç dayanımına etkisi gösterilmektedir.



Şekil 4: Farklı oranlarda sıvı polimer katkıli kil örneklerin kür sürelerine göre basınç dayanımı

Grafiklerde sıvı polimer yüzdesindeki artışın örneklerin serbest basınç dayanımlarına etkisi görülmektedir. Şekil 4'te görüldüğü gibi kontrol örneği olan MF0 (katkısız) örneğine göre 28 gün sonunda MF12 (%12 sıvı polimer katkısı) örneğinde yaklaşık 5 katı aşan bir dayanım artışı meydana gelmiştir. Yine 28 gün sonunda MF3 (sıvı polimer katkısı %3) örneği en az mukavemet artışı gösteren örnektir. Ancak bu örnekten elde edilen değerlerde bile kontrol örneğe (MF0) göre 3 kattan fazla artış söz konusudur. Grafikte sıvı polimer katkısı ve kür süresi arttıkça dayanımlardaki artış açık bir şekilde görülmektedir. Dikkat çeken husus 3 gün gibi kısa bir sürede yaklaşık iki kata çıkan dayanımlar elde etmenin mümkün olduğudur. Bu sonuç özellikle acil müdahale edilmesi gereken durumlarda hızlı dayanım kazanma açısından sıvı melamin formaldehit polimeri ile stabilizasyonu ön plana çıkarmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda (Naeini vd. 2012; Gilazghi vd. 2016; Liu vd. 2011; Rezaeimalek vd. 2017) farklı sıvı polimer katkıli zeminler incelenmiş ve elde edilen dayanım artışları bu çalışma sonucunda elde edilen değerler ile karşılaştırıldığında, sonuçların birbirine yakın olduğu görülmektedir. Rezaeimalek vd. (2017), yaptıkları çalışmada metilen difenil diizosiyanat grubu sıvı polimer ile stabilize edilmiş kumlarda 5 kata kadar dayanım artışı tespit etmiştir. Gilazghi vd. (2016), yüksek plastisiteli killerde metilen difenil diizosiyanat grubu sıvı polimeri yüzde 12 katkı oranına kadar kullanarak stabilizasyon sonucu 10 kata kadar dayanım artışı elde etmiştir. Naeini vd. (2012), ticari patentli bir akrilik sıvı polimer kullanarak killi zeminlerde yüzde 5 e kadar polimer katkısı ile dayanım değerlerinde 14 günde 1.5 kat artış tespit etmişlerdir.

Liu vd. (2011), killerde şev stabilizasyonu için organik patentli polimer kullanmış ve dayanımda 3 günlük kür süresinde 4 kata kadar artıştan bahsetmişlerdir. Bunun yanında kesme kutusu testleri de yapmış ve içsel sürtünme açılarında 2 gün sonunda 30 derece mertebelerinden 55 derece mertebesine varan bir artış tespit etmişlerdir.

Sıvı polimerin nem ve ısı altında aktive olması sonucu kil örnekler daha dayanıklı hale gelmiştir. Sıcaklık ve nem arttırıldığında polimerin sertleşme süresi daha da kısalmaktadır. Bu bilgi ışığında yüksek sıcaklığa sahip iklim ve bölgelerde (kür odası koşulları ile kıyaslanarak) dayanım artışının daha hızlı olacağı öngörülmektedir. Bu da melamin formaldehit sıvı polimerini, ılıman iklime sahip bölgelerde ve yaz aylarında, daha da avantajlı bir zemin iyileştirme malzemesi olarak ön plana çıkarmaktadır.

#### 4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında dünyada son yıllarda kullanılmaya başlanan farklı stabilizasyon malzemelerinden olan sıvı polimerler ile karıştırılan kaolen türü kil örnekleri üzerinde serbest basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Kaolen türü kil örneklerinde sıvı polimer katkısı ile dayanım artışı oluşmuş, kür süresince oluşan artış 28 gün sonunda 5 kata kadar ulaşmıştır.
- MF9 ile MF12 örneklerinde 28 günlük kür sonucunda birbirine çok yakın dayanım değerleri elde edilmiştir. Bu sonuca göre optimum karışım oranı % 9 olarak önerilebilir.
- Yerli kaynaklarca üretilen bu sıvı polimerin özellikle acil müdahale gereksinimi olan zemin duraylılık problemlerinde hızlı çözüm üreteceği düşünülmektedir.
- İhtiyaç duyulan dayanım artışına göre katkı oranı belirlenip kür süresi ve ihtiyaç duyulan dayanım seviyesine göre proje mühendisleri hızlıca karar verebileceklerdir.
- Kullanılan sıvı polimerin sıcaklıkla daha hızlı aktive olduğu bilgisi ile ülkemizde yaz aylarında yapılacak uygulamalarda daha yüksek ortam sıcaklığı ile daha da hızlı dayanım artışını yakalamak mümkün olacaktır.
- Kullanılan polimerin sıvı halde ve yüksek akışkanlıkta olması nedeni ile uygulamada zorluklar yaşanmayacak, karıştırma işlemi için ekstra bir ekipmana ihtiyaç duyulmayacaktır.
- Sertleştikten sonra sağlık açısından bir sorun teşkil etmeyen melamin formaldehit reçineleri ile iyileştirilmiş zeminlerin sızıntı suyu analizlerinin daha sonraki çalışmalarda yapılması düşünülmektedir.

Aynı performans artışını kısa sürelerde sağlayabilmek için çok daha maliyetli katkılar günümüzde zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılmaktadır. Mevcut metodlara ilaveten hızlı bir alternatif olarak mevcut çalışma öne çıkmaktadır.

#### Kaynaklar

- Ajalloeian R., Matinmanesh H., Abtahi S., Rowshanzamir M., (2013), *Effect of polyvinyl acetate grout injection on geotechnical properties of fine sand*, Geomechanics and Geoengineering, 8(2), 86–96.
- Al-Khanbashi A., El-Gamal M., (2003), *Modification of sandy soil using water-borne Polymer*, Journal of Applied Polymer Science, 88(10), 2484–2491.
- Al-Khanbashi A., Abdalla S., (2006), *Evaluation of three waterborne polymers as stabilizers for sandy soil*, Geotechnical and Geological Engineering, 24(6), 1603–1625.
- Anagnostopoulos C., Hadjispyrou S., (2004), *Laboratory study of an epoxy resin grouted sand*, Ground Improvement, 8(1), 39–45.
- Anagnostopoulos C., Papaliangas T., (2012), *Experimental investigation of epoxy resin and sand mixes*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(7), 841–849.
- Anagnostopoulos C., Kandiliotis P., Lola M., Karavatos S., (2013), *Effect of epoxy resin mixtures on the physical and mechanical properties of sand*, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 7(17), 3478–3490.
- ASTM, (2016), *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*, (ASTM D2166M-16). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, (2017), *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*, (ASTM D4318-17e1). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, (2012), *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort*, (ASTM D698-12e2). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Camberfort H., (1977), *The principles and applications of grouting*, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 10(2), 57–95.
- Gilazghi S., Huang J., Rezaeimalek S., Bin-Shafique S., (2016), *Stabilizing sulfate-rich high plasticity clay with moisture activated polymerization*, Engineering Geology, 211, 171–178.
- Harris P., Holdt P., Sebesta S., (2006), *Recommendations for Stabilization of High – Sulfate Soils in Texas*, Federal Highway Administration, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, FHWA/TX-06/0-4240-3.
- Hilf J., (1991), *Compacted fill*, in: H. Fang (Ed.), *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold, New York, ABD.
- Imbabi M., Carrigan C., McKenna S., (2012), *Trends and developments in green cement and concrete technology*, International Journal of Sustainable Built Environment, 1(2), 194–216.
- Ingles O.G., Metcalf J.B., (1972), *Soil Stabilization: Principles and Practice*, Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford, UK.
- Jones E., Ajayi-Majebi A., Grissom W., Smith L., Jones E., (1991), *Epoxy-resin-based chemical stabilization of a fine, poorly graded soil system*, Transportation Research Records: Journal of Transportation Research Board, 1295, 95–108.

- Katz L., Rauch A., Liljestrand H., Harmon J., Shaw K., Albers H., (2001), *Mechanisms of soil stabilization with liquid ionic stabilizer*, Transportation Research Records: Journal of Transportation Research Board, 1757, 50–57.
- Li X.J., (2014), *Shrinkage Cracking of Soils and Cementitiously-Stabilized Soils: Mechanisms and Modeling*, Ph.D. thesis, Washington State University, ABD.
- Little D.N., (1992), *Comparison of in-situ resilient moduli of aggregate base courses with and without low percentages of lime stabilization*, ASTM Special Technical Publication, 1135, 8–22.
- Little D., (1995), *Stabilization of Pavement Subgrades Base Courses with Lime*, Lime Association of Texas, ABD.
- Liu J, Shi B., Jiang H., Huang H., Wang G., Kamai T., (2011), *Research on the stabilization treatment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer*, Engineering Geology, 117, 114–120.
- Mitchell J., (1986), *The twentieth Terzaghi lecture*, Journal of Geotechnical Engineering, 112(3), 255–289.
- Mohammed A., Vipulanandan C., (2013), *Compressive and tensile behavior of polymer treated sulfate contaminated CL Soil*, Geotechnical and Geological Engineering, 32(1), 71–83.
- Moustafa A., Bazaraa A., Nour El Din A., (1981), *Soil stabilization by polymeric materials*, Macromolecular Materials and Engineering, 97(1), 1–12.
- Naeini S., Ghorbanalizadeh M., (2010), *Effect of wet and dry conditions on strength of silty sand soils stabilized with epoxy resin polymer*, Journal of Applied Sciences, 10(22), 2839–2846.
- Naeini S., Naderinia B., Izadi E., (2012), *Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer*, KSCE Journal of Civil Engineering, 16(6), 943–949.
- Newman K., Tingle J., (2004), *Emulsion polymers for soil stabilization*, Airport Technology Transfer Conference, Atlantic City, New Jersey, ABD.
- Ohama Y., (1995), *Handbook of Polymer-Modified Concrete and Mortars*, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, ABD.
- Puppala A.J., Ramakrishna A.M., Hoyos L.R., (2003), *Resilient moduli of treated clays from repeated load triaxial test*, Transportation Research Records: Journal of Transportation Research Board, 1821, 68–74.
- Rauch A., Harmon J., Katz L., Liljestrand H., (2002), *Measured effects of liquid soil stabilizers on engineering properties of clay*, Transportation Research Records: Journal of Transportation Research Board, 1787, 33–41.
- Rezaeimalek S., Huang J., Bin-Shafique S., (2017), *Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization*, Construction and Building Materials, 146, 210–220.
- Santoni R., Tingle J., Webster S., (2002), *Stabilization of silty sand with Nontraditional additives*, Transportation Research Records: Journal of Transportation Research Board, 1787, 61–70.
- Sebesta S., (2005), *Use of microcracking to reduce shrinkage cracking in cement treated bases*, Transportation Research Records: Journal of Transportation Research Board, 1936, 3–11.
- Sherwood P., (1994), *Soil Stabilization with Cement and Lime*, Stationary office, London, UK.
- Zandieh A., Yasrobi S., (2010), *Study of factors affecting the compressive strength of sandy soil stabilized with polymer*, Geotechnical and Geological Engineering, 28(2), 139–145.