İNCE KUM ZEMİNLERDE UÇUCU KÜLÜN ZEMİN ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ[89]

Elanur YAZICI[1], Yeşim Sema ÜNSEVER[1],
[1]Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bursa / Türkiye

Öz: Günümüzde, atık malzemelerin zemin iyileştirmede kullanımı hem çevre sorunlarını azaltması hem de ekonomik olması açısından önemli bir alternatiftir. Kum zemin iyileştirme uygulamalarında uçucu külün etkinliği ve literatürde kum zeminlerin uçucu kül ile iyileştirilmesi konusunda daha fazla çalışma yapılması gerektiğine dair öneriler dikkate alınarak bu çalışmada uçucu külün kum zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanımı değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında kum zemine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında uçucu kül ve sabit %3 oranında aktivatör olarak çimento katılarak numuneler hazırlanmıştır. Standart kompaksiyon deneyleri ASTM D698'e göre yapılarak numunelerin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri bulunmuştur. %80 rölatif sıkılıkta ve optimum su içeriğinde hazırlanan numunelere kesme kutusu deneyleri yapılarak her bir karışımın içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri elde edilmiştir ve katkısız kum numune ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Kesme kutusu deneyleri ASTM D3080'e göre 54.5 kPa, 109 kPa ve 218 kPa normal gerilme değerleri altında yapılmıştır. Deneye tabii tutulan numunelerin yenilme anına kadar kesme kuvveti ve yatay deformasyon okumaları alınmıştır. Deneylerin sonucunda kum zemine eklenen uçucu kül miktarı arttıkça optimum su muhtevası değerinin arttığı, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Çimento aktivatör olarak %3 oranında bulunmasına rağmen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Artan uçucu kül içeriğinin içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerini artırıp kayma dayanımına pozitif olarak etki ettiği bulunmuştur. Yapılan deneyler neticesinde uçucu külün ince kum zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirmede kullanılabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Uçucu Kül, Çimento, Zemin İyileştirme, İçsel Sürtünme Açısı, İnce Kum

GİRİŞ ve KURAMSAL ÇERÇEVE

Zeminlerin kimyasal olarak stabilizasyonu kireç, uçucu kül, portland çimentosu ya da sodyum klorür benzeri aktif kimyasal bileşikler veya viskoelastik olan bitüm benzeri malzemelerin zeminlere eklenmesi ya da enjeksiyonlanmasıdır. Sönmüş kireç, Portland çimentosu ve uçucu kül geleneksel olan stabilizatörler, sülfonatlı yağlar, amonyum klorür, enzimler, polimerler ile potasyum bileşiklerinin oluşturduğu geleneksel olmayan stabilizatörler; çimento fırın tozu, kireç fırın tozu gibi yan ürün stabilizatörler olarak kimyasal stabilizatörler üç kategoride sınıflandırılmıştır. Kireç ve çimento üretim sonucu elde edilen malzemeler iken uçucu kül elektrik elde etmek için kömürün yanmasıyla yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Kireç ve çimentoya göre uçucu külün stabilizasyonda kullanımı ekonomiktir fakat uçucu kül yanan kömürün türüne ve kömürün yakılma sürecine göre farklılık gösteren bileşime sahip olabilir (Little ve Nair, 2009).

Killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin uçucu kül gibi kimyasallarla iyileştirilmesi uzun zamandır araştırılan bir uygulamadır. Son yıllarda ise kum zeminlerin uçucu küller ile iyileştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmıştır (Sahu, 2001, Sumesh vd., 2010, Saha ve Pal, 2013, Motamedi vd., 2015, Ige ve Ajamu, 2015, Mahvash vd., 2017, 2018, Keramatikerman vd., 2017, Simatupang vd., 2020, Azaiez vd., 2021a, 2021b). Bu

[89] Bu çalışma 1. sırada yer alan yazar(ın) yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

çalışmalarda uçucu külün belli oranlarda kullanımının kumun geoteknik özelliklerini iyileştirdiği, bir başka deyişle, uçucu kül katkılı kum zeminlerin dayanımının iyileştirilmemiş kum zemine kıyasla daha fazla olduğu ve bunun da uçucu külün kum danelerini bağlayıp daha kararlı bir yapı oluşturmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Uçucu külün serbest basınç mukavemetini artırdığı fakat uçucu kül miktarının çok fazla olması durumunda serbest basınç mukavemetine negatif bir etkisi olduğu Motamedi vd., (2015) tarafından belirtilmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada gerekli uçucu külün miktarının ve uçucu külle birlikte kullanılan aktivatörün etkisini daha detaylı incelemek için ince kum zemine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında uçucu kül ve sabit %3 oranında aktivatör olarak çimento katılarak 5 farklı numune hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde deneysel çalışmalar yürütülmüş ve ince kum zeminlerin geoteknik özellikleri üzerine etkisi değerlendirilmiştir.

AMAÇ

Çalışmanın amacı, termik santrallerde enerji üretmek amacıyla yakılan kömürden atık bir ürün olarak ortaya çıkan uçucu külün ince kum zeminlerin kompaksiyon ve kayma dayanımı parametrelerine etkisini araştırmak, iyileştirmek için gerekli optimum uçucu kül oranını bulmak ve bu sayede atık malzemelerin yeniden kullanımını değerlendirmektir.

KAPSAM

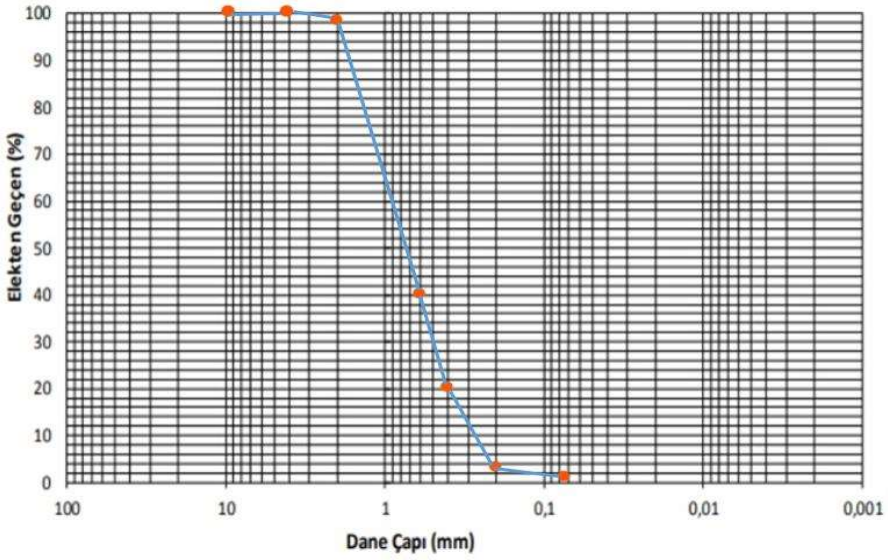
Çalışma kapsamında piyasadan temin edilen inşaat kumu kullanılarak uçucu külün kum zeminin kompaksiyon ve kayma dayanımı parametrelerine etkisi değerlendirilmiştir. Uçucu kül ile stabilize etmek için temiz kum numuneler, sırayla 30 no'lu (0.6mm çaplı) ve 200 no'lu (0,074mm çaplı) eleklerden elenmiştir ve maksimum dane boyutu 0.6 mm olarak kullanılmıştır.

YÖNTEM

Kum zemine %5, %10 ve %15 oranlarında uçucu kül eklenerek oluşturulan katkılı numunelere ve katkısız kum numunesine kompaksiyon ve kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Katkılı numunelere, çimento aktivatör olarak sabit %3 oranında eklenmiştir.

Deneysel çalışmada zemin malzemesi olarak piyasadan temin edilen inşaat kumu kullanılmıştır. Kumun zemin sınıflandırması ASTM D2487'e göre yapılarak kötü derecelendirilmiş temiz kum (SP) olarak tanımlanmıştır ve dane boyutu dağılım eğrisi Şekil 1'de gösterilmiştir. Tablo 1'de kumun laboratuvar deneyleri ile belirlenen fiziksel özellikleri verilmiştir. Numunelerde aktivatör olarak bulunan çimento için ise CEM II / A-M (P-L) 42,5 R tercih edilmiştir. Kullanılan uçucu kül ve çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'de görüldüğü gibi uçucu külde CaO=%29.28>%10 ve SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3 =%50.92>%50 olduğundan dolayı ASTM C 618 standardına göre C sınıfı uçucu kül olarak tanımlanmaktadır. Deneysel program için hazırlanan numuneler Tablo 3'te görülmektedir.

Şekil 1. Kum zeminin dane boyutu dağılım eğrisi



Tablo 1. Kum zeminin endeks özellikleri

5. Kum				
6. **Gs**	7. e_{max}	8. e_{min}	9. $\gamma_{d,max}$ (kN/m^3)	10. $\gamma_{d,min}$ (kN/m^3)
11. **2.78**	12. 1.19	13. 0.626	14. 16.76	15. 12.44

Tablo 2. Uçucu kül ve çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

16. Malzeme	**18. Fiziksel Özellikler**		**19. Kimyasal Bileşenler (%)**							
17.	20. Özgül ağırlık	21. Özgül yüzey (cm^2/g)	22. SiO_2 23.	24. Al_2O_3	25. Fe_2O_3	26. CaO 27.	28. MgO	29. SO_3 30.	31. Na_2O	32. K_2O
33. Uçucu Kül	34. 2.46	35. 2380	36. 29.88	37. 15.03	38. 6.01	39. 29.28	40. 2.27	41. 13.34	42. 0.13	43. 1.71
44. Çimento	45. 3.04	46. 4260	47. 25.08	48. 6.24	49. 2.90	50. 56.44	51. 0.88	52. 2.34	53. 0.73	54. 0.96

Tablo 3. Deneysel program çerçevesinde hazırlanan numuneler

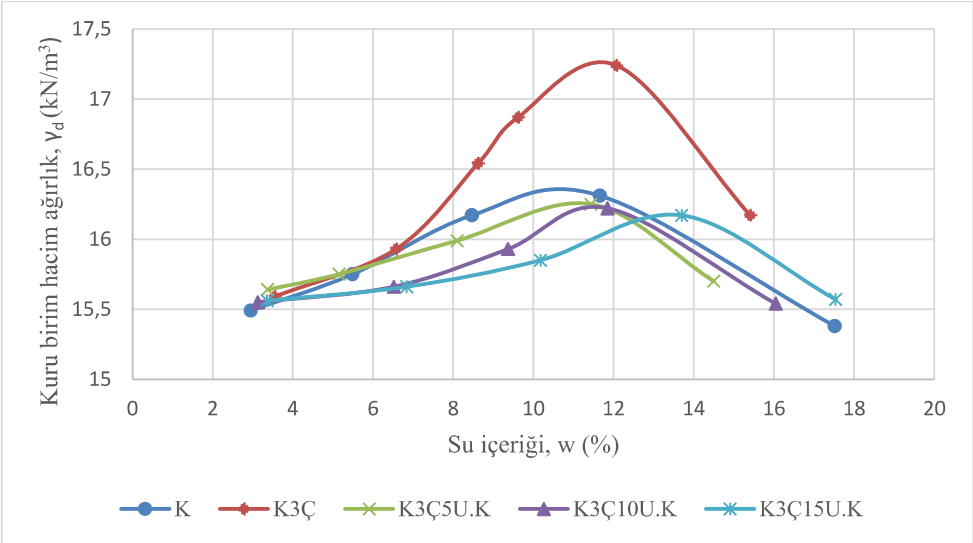
55. Numune	**57. Notasyon**	**58. Çi-**	**59. Uçucu**
60. **Kum**	61. K	62. -	63. -
64. **Kum+%3çimento**	66. K3Ç	67.	69.
71. **Kum+%3çimento+%5 uçucu kül**	72. K3Ç5U.K	73.	75.
77. **Kum+%3çimento+%10 uçucu kül**	78. K3Ç10U.K	79.	81.
83. **Kum+%3çimento+%15 uçucu kül**	84. K3Ç15U.K	85. 86. 3	87. 88. 15

Numunelerin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerini elde edebilmek için ASTM D698'e göre standart proktor deneyleri yapılmıştır. Kayma dayanımı parametreleri için ise ASTM D3080'e göre kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler 60*60*25 mm boyutundaki kare kesme kutusuna %80 rölatif sıkılıkta yerleştirilmiştir. Kesme kutusu deneyleri 54.5 kPa, 109 kPa ve 218 kPa normal gerilme değerleri altında ve 0.5 mm/dk kesme hızında yapılmıştır. Numunelerin yenilme anına kadar kesme kuvveti ve yatay deformasyon okumaları kaydedilmiştir.

BULGULAR

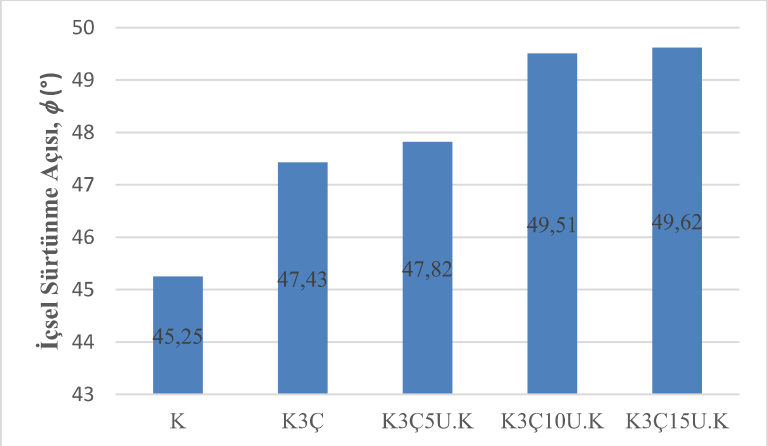
Standart Proktor deneyiyle bulunan optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerine ait eğriler Şekil 2'de tüm numuneler için sunulmuştur. Kum zemine yalnızca %3 oranında çimento ilave edildiğinde optimum su muhtevası %12.07 ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 17.24 kN/m^3 bulunmuştur. Artan uçucu kül içeriği ile optimum su muhtevası değerleri artarken, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri azalmıştır. Bunun nedeni kullanılan katkı malzemelerinin yoğunluğunun daha düşük olması ve karışımların hidrasyon için daha çok suya ihtiyacı olmasıdır. Optimum su muhtevasının %13.70 ile en fazla K3Ç15U.K numunesinde olduğu gözlemlenmiştir. Mahvash vd. (2017) ve Prabakar vd. (2004) zeminlere uçucu kül katkısı ile benzer bir eğilim bildirmişlerdir.

Şekil 2. Deney karışımlarının kompaksiyon eğrileri

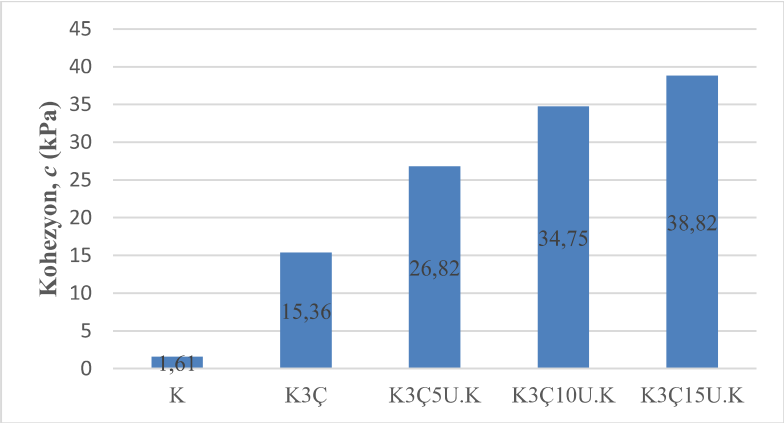


Numunelerin optimum su muhtevalarında %80 sıkılıktaki kum için kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Kesme kutusu deneyleri sonucunda elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri Şekil 3'te, kohezyon değerleri Şekil 4'te sunulmuştur. Şekil 3'te görüldüğü gibi uçucu kül eklenmesi ile içsel sürtünme açılarında artış eğilimi vardır. İçsel sürtünme açısı katkısız numunede 45.25^0 bulunmuştur, bu değer K3Ç numunesinde %4.81 oranında, K3Ç5U.K numunesinde %5.68, K3Ç10U.K numunesinde %9.41, K3Ç15U.K numunesinde %9.65 oranında artış göstermiştir. Uçucu kül miktarının artmasıyla kohezyon değerlerinin 1.61 kPa'dan 38.82 kPa'a kadar arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 4). Şekilden de görülebileceği gibi, kohezyonsuz olan kum numunesine çimento ve uçucu kül katkısının kohezyonu arttırmakta önemli bir etkisi vardır. Azaiez vd. (2021b) sonuçları ile uyumlu olarak tüm numunelerde artan normal gerilme değerleri için kayma dayanımlarının arttığı görülmüştür.

Şekil 3. Kesme kutusu deneyi ile elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri



Şekil 4. Kesme kutusu deneyi ile elde edilen kohezyon değerleri



SONUÇ

Bu çalışmada uçucu kül ve çimento katkısının ince kum zeminlerin geoteknik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda kum zemine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında uçucu kül ve katkılı numunelere sabit %3 oranında aktivatör olarak çimento katılarak 5 farklı numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde kompaksiyon ve kesme kutusu deneyleri yapılarak uçucu kül ve çimento katkısının ince kum zeminlerin kompaksiyon ve kayma dayanımı parametreleri üzerine etkisi değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Kum zemine yalnızca çimento eklendiğinde (K3Ç) maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 0.93 kN/m^3 artmıştır ve çimentonun kum zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır. Çimentonun özgül ağırlığı kumdan daha yüksek olduğundan dolayı maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin artmasına neden olabileceği düşünülmüştür. Mevcut sabit oranda çimento katkısı ile birlikte kum zemine ağırlıkça %5, %10 ve %15 uçucu kül eklendiğinde numunenin maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla %0.36, %0.55 ve %0.85 oranında azalmıştır. Uçucu külün düşük özgül ağırlığından dolayı maksimum kuru birim hacim ağırlıkta bir azalmaya neden olabileceği düşünülmüştür. Çimento ve artan oranlarda uçucu kül katkısı optimum su içeriğini artırmıştır. Uçucu kül ve çimentonun kum zemine kıyasla hidrasyon için daha fazla su ihtiyacının olmasının bu artışa neden olduğu düşünülmektedir.

Uçucu kül ve çimento katkısı kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerini artırmıştır. Uçucu kül ve çimentonun zemin boşluklarını doldurup daha yoğun ve kararlı bir yapı oluşturduğu ve bu sayede kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinin artış gösterdiği düşünülmektedir. İçsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinin c=38.82 kPa ve ϕ= 49.62° olarak en fazla %15 uçucu kül katkılı numunede olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan deneyler sonucunda uçucu külün kum zeminlerin geoteknik özelliklerine pozitif olarak etki ettiği anlaşılmıştır. Çalışma kapsamında CBR ve üç eksenli basınç deneyleri yapılarak uçucu külün ince kum zeminlerdeki etkisinin daha detaylı incelenmesi planlanmaktadır.

KAYNAKÇA

ASTM C618, (2003). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, *Annual Book of ASTM Standards*.

ASTM D698, (2012). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3)), *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM D2487, (2017). Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system), *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM D3080, (2011). Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

Azaiez, H., Taiba, A. C., Mahmoudi, Y., Belkhatir, M., (2021a). Characterization of granular materials treated with fly ash for road infrastructure applications. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 8(2), 228-253.

Azaiez, H., Taiba, A. C., Mahmoudi, Y., Belkhatir, M., (2021b). Shear characteristics of fly ash improved sand as an embankment material for road infrastructure purpose. *Innovative Infrastructure Solutions,* 6(3), 1-14.

Ige, J. A., Ajamu, S. O., (2015). Unconfined compressive strength test of a fly ash stabilized sandy soil. *International Journal of Latest Research in Engineering and Technology,* 1(3), 1-11.

Keramatikerman, M., Chegenizadeh, A., Nikraz, H., (2017). Experimental study on effect of fly ash on liquefaction resistance of sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 93, 1-6

Little, D. N., Nair, S., (2009). Recommended practice for stabilization of subgrade soils and base materials.

Mahvash, S., López Querol, S., Bahadori Jahromi, A., (2017). Effect of class F fly ash on fine sand compaction through soil stabilization. *Heliyon*, 3(3), e00274.

Mahvash, S., López Querol, S., Bahadori Jahromi, A., (2018). Effect of fly ash on the bearing capacity of stabilised fine sand. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement,* 171(2), 82-95.

Motamedi, S., Song, K. I., Hashim, R., (2015). Prediction of unconfined compressive strength of pulverized fuel ash–cement–sand mixture. *Materials and Structures,* 48(4), 1061-1073.

Prabakar, J., Dendorkar, N., Morchhale, R. K., (2004). Influence of fly ash on strength behavior of typical soils. *Construction and Building Materials,* 18(4), 263-267.

Saha, S., Pal, S. K., (2013). Influence of fly ash on unconfined compressive strength of soil and fly ash layers placed successively. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering,* 18(H), 1593-1602.

Sahu, B.K., 2001. Improvement in California bearing ratio of various soils in Botswana by fly ash. International Ash Utilization Symposium, University of Kentucky, USA.

Simatupang, M., Mangalla, L. K., Edwin, R. S., Putra, A. A., Azikin, M. T., Aswad, N. H., Mustika, W., (2020). The mechanical properties of fly-ash-stabilized sands. *Geosciences,* 10(4), 132.

Sumesh, M., Kalita, A., Singh, B., (2010). An experimental investigation on strength properties of fly ash blended soils treated with cement. *J. Environ. Res. Dev, 5*(2), 322-329.