

Çimento Stabilizasyonlu Zeminin Esnek Üstyapı Maliyetine Etkisi

The Effect of Cement Stabilized Subgrade on Cost of the Flexible Pavement

Baha Vural KÖK^{a*}, Mehmet YILMAZ^a, Alaaddin GEÇKİL^b

^aFırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23169, Elazığ

^bNiğde Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu İnşaat Bölümü, 51100, Niğde

Geliş Tarihi/Received : 04.11.2011, Kabul Tarihi/Accepted : 29.03.2012

ÖZET

Yol otoriteleri, dayanıklı minimum bakım gerektiren, trafik güvenliği yüksek, uzun ömürlü ve ekonomik yolları hedeflemektedirler. Taşıma gücü zayıf zeminlerde ekonomik bir üstyapı inşası güç olmaktadır. Bu çalışmada düşük taşıma güçlü zeminlerde yapılacak olan çimento stabilizasyonunun taşıma gücüne ve üstyapı maliyetine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla %4-%16 aralığında çimento ile stabilize edilen düşük taşıma güçlü bir zeminin Kaliforniya Taşıma Oranları (CBR) tespit edilmiştir. CBR'da meydana gelen artışın üstyapı maliyetine etkisi MATLAB programı vasıtasıyla binlerce alternatif dikkate alınarak tespit edilmiştir. Sonuçta zemin CBR değerinin artması ile azalan üstyapı maliyeti ile zeminin CBR değerini artırmak için yapılan ilave masraf arasındaki optimum çimento oranı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çimento, Stabilizasyon, Esnek üstyapı, Maliyet.

ABSTRACT

The road authorities aim roads that are resistant, with less maintenance, with high traffic security, with long life and economic. It is difficult to have an economic pavement construction on the subgrade with weak bearing capacity. In this study the effect of the cement stabilization on the weak subgrade and pavement costs has been studied. For this purpose the California Bearing Ratio (CBR) of a weak subgrade that has been stabilized with 4% - 16% cement have been determined. The effect of the increase in the CBR on the pavement costs has been determined thanks to MATLAB program by considering thousands of alternatives. Consequently, the optimum cement content between the decrease on the pavement costs with increase on subgrade' CBR value and the additional costs spent to increase the CBR value has been determined.

Keywords: Cement, Stabilisation, Flexible pavement, Cost.

1.GİRİŞ

Yollar, bölgenin sosyo-ekonomik durumuna bağlı olarak ihtiyaç ve talepleri karşılayacak şekilde tasarlanmaktadır. Yol kullanıcıları olarak sürücüler, düzgün, konforlu, kayma direnci yüksek, hızlı erişimli, ulaşım maliyeti ve gürültü seviyesi düşük yollar talep ederken, yol otoriteleri, dayanıklı minimum bakım gerektiren, kalıcı deformasyonlara karşı dirençli, trafik güvenliği yüksek, uzun ömürlü

yolları hedeflemektedirler (Önal ve Temren, 2004). Ülkemizde yol üstyapısı daha çok esnek üstyapı olarak inşa edilmektedir. Yol üstyapısının özelliklerini iyileştirmek amacıyla bu yapı içerisindeki her bir yapının ya ayrı ayrı yada tamamının özellikleri iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Kaplama tabakasında kullanılan bitümlü sıcak karışımların mühendislik özelliklerini iyileştirmek için iki temel yoldan birisi gradasyonu ve dolayısıyla asfalt çimentosu oranlarını değiştirmektir. Taş mastik

* Yazışılan yazar/Corresponding author. E-posta adresi/E-mail address : bvural@firat.edu.tr (B.V. Kök)

asfalt bu kategoride karışım performansının iyileştirilmesi bakımından tipik bir örnektir. Diğer bir yol ise ya bitüme yada doğrudan karışıma ilave edilen katkı maddeleriyle bitümlü sıcak karışım özelliklerini iyileştirmektedir. Temel ve alttemel tabakalarında ise kalitesi yüksek malzeme kullanımı ve uygun gradasyon seçimi ile iyileştirmeler yapılmaktadır. Bu üç tabaka yüksek kalitede imal edilmiş olsalar da üzerine oturdukları zemin yeterli taşıma gücüne sahip değil ise yollarda altyapı kusurundan kaynaklanan tekerlek izi, oturmalar ve çatlamalar gibi bozulmalar meydana gelmektedir. Bu gibi kusurları önlemek ya zemin taşıma gücünü artırmakla yada yüksek maliyetlere neden olan, tabaka kalınlıklarının artırılmasıyla mümkündür.

Üst yapı dizaynı ampirik ve mekanistik-ampirik olmak üzere iki şekilde yapılabilmektedir. Ampirik bir yöntem olan AASHTO tasarım yöntemi genel olarak zemin taşıma gücünü ve trafik değerini esas almaktadır. Üstyapının oturacağı zeminde tabaka kalınlıklarının ve dolayısıyla maliyetin azalmasını sağlayacak birtakım iyileştirmeler yapılmaktadır. Bu iyileştirme kötü zeminin sökülerek yerine daha iyi özelliklerdeki malzemenin yerleştirilmesi, yada zeminin çeşitli katkı malzemeleriyle stabilize edilmesi şeklinde yapılmaktadır.

2. ÖNCEKİ ALIşMALAR VE çALIşMANIN ÖNEMİ

Prabakar v.d., (2004)   farklı zemine % 9-46 oranlarında uçucu kül ilave ederek bu zeminlerin CBR değerleri, kesme gerilmesi parametreleri ve şişme potansiyellerini incelemiştir. Sonuçta uçucu kül ilavesinin, likit limit ve plastisite indisi en düşük olan CL sınıfındaki zeminde en fazla iyileştirme yaptığı belirtilmiştir. Koliaş v.d., (2005) ince gradasyonlu killi zeminlerde (CL-CH) yüksek kalsiyum içerikli uçucu kül ve imento ile stabilizasyonun etkinliğini incelemişlerdir. Değişik oranlardaki uçucu kül ve imento karışımlı numunelerin elastisite modülleri ve 90 günlük basınç dayanımları ve CBR değerleri tespit edilmiştir. Uçucu kül ve imento ile iyileştirilmiş killi zemin üzerindeki esnek üst yapının analizi yapılarak geleneksel üstyapılar ile karşılaştırılmış ve stabilizasyonun teknik faydaları açıkça ortaya konulmuştur. Dört ayrı tesisten elde edilen, ikisi yüksek oranda CaO, ikisi de yüksek oranda karbon

içeren uçucu küllerin yumuşak zeminlerin stabilizasyonundaki etkilerinin incelendiği çalışmada, k l içeriğinin artması ile değişik zemin cinslerine göre CBR değerinin 2 ile 18 kat arasında, basınç mukavemetinin ise 2 ile 7 kat arasında arttığı, en fazla artışı % 20 uçucu kül içerikli CL sınıfındaki zeminde olduğu belirtilmiştir (şenol v.d., 2006). Çimento stabilizasyonlu uçucu kül malzemesinin temel malzemesi olarak kullanılabilmesi için imento miktarının en az % 8, tabaka kalınlığının ise 30 cm olması gerektiği tespit edilmiştir (Lav v.d., 2006). Optimum uçucu kül oranı tek eksenli basınç deneyi sonuçları dikkate alınarak araştırılmış ve en iyi sonuca % 70 kum ve % 30 uçucu kül karışımının sahip olduğu, bu karışıma % 1 polipropilen lif ilavesinin tek eksenli basınç değerini önemli ölçüde artırdığı belirtilmiştir (Chauhan v.d., 2008). Lif katkısı ve kireç içeren başka bir çalışmada en yüksek basınç dayanımlarının ve içsel sürtünme açılarının % 0,25 lif ve % 5 kireç kullanılması durumunda elde edildiği ve kireç oranının artması ile şişme potansiyelinin azaldığı belirtilmiştir (Cai v.d., 2006).

Gerald v.d., (2000) portlant imentosu üretiminde açığa çıkan atık malzemenin (CKD) düşük ve yüksek plastik zeminlerde stabilize malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Sonuçta CKD ilavesi ile tek eksenli basınç dayanımının iyileştiği, bu iyileşmenin düşük PI değerlerine sahip zeminlerde daha fazla olduğu, CKD katkılı zeminlerin basınç dayanımlarının 7-14 gün içerisinde hızlı bir şekilde arttığı daha sonra artışı hızının azaldığı, CKD ilavesi ile optimum su oranının arttığı ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının azaldığı belirtilmiştir. Seco v.d., (2011), içerisinde Ca, Mg, Si ve Al oksit içeren atık malzemelerle zemin stabilizasyonu yaparak zeminlerin şişme potansiyellerini ve tek eksenli basınç dayanımlarını incelemişlerdir. Sonuçta şişme potansiyelini azaltmada önemli bir etkiye sahip olabilmesi için kirecin % 4 oranından fazla kullanılması gerektiği, aynı orandaki MgO'in en iyi performansı gösterdiği belirtilmiştir. Uçucu kül içerisinde bulunan CaO'in puzzolanik bir etki yaptığı % 25 uçucu kül ile % 10 kireç katkılı zeminlerin basınç dayanımlarının çok yüksek olduğu belirtilmiştir (Dermates ve Meng, 2003). Eren ve Filiz, (2009), yaptıkları çalışmada değişik oranlarda imento ve kireç

katkılı zeminin CBR değerlerini incelemiştir. Kireç oranının % 8 değerine kadar CBR değerinin arttığı daha sonra düşüşe geçtiği kireç katkı zeminin hiç şişme göstermediği tespit edilmiştir. Wu v.d., (2010), kalsiyum sülfat katkı ve yüksek fırın cürufu içeren, kalsiyum sülfat katkı ve uçucu kül içeren ve kırmataştan yapılmış temel tabakalarından oluşan üç farklı kesit hazırlamışlardır. Tekerlek izi deneyinden, 12,5 mm tekerlek izinde kalsiyum sülfat katkı yüksek fırın cürufu ve kalsiyum sülfatlı uçucu küllü kesitlerde yorulma çatlağı ve timsah sırtı çatlakların oluşmadığı buna karşın temel tabakası kırmataştan oluşan kesitte ciddi derecede çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalarda zemin stabilizasyonunda kireç, çimento, uçucu kül gibi malzemeler ayrı ayrı yada birlikte kullanılarak zeminlerin taşıma gücüne olan olumlu etkileri ayrıca likit limit, plastisite indisi değerlerini nasıl etkilediği belirtilmiştir.

Bu çalışmada ilk etapta çimento stabilizasyonunun ele alınan zemin numunesinin taşıma gücünü (CBR) nasıl artırdığı ve dolayısıyla AASHTO tasarım yöntemi ile tespit edilen tabaka kalınlıklarını nasıl azalttığı tespit edilmiştir. Zemin CBR değerinin artması ile üstyapı maliyeti azalmakta buna karşın zeminin CBR değerini artırmak için ilave masraf yapılmaktadır. Üstyapı maliyetindeki azalma ile zemin iyileştirilmesi sırasındaki maliyet artışı arasında optimizasyon yapılarak en uygun çimento miktarı tespit edilmiştir. Maliyetlerin hesaplanmasında 2010 birim fiyatları kullanılmıştır.

3. ÜSTYAPININ EKONOMİK ANALİZİ

AASHTO tasarım yönteminde yapısal tasarım (tabaka kalınlıkları ve cinsi), yükleme (dingil yükü ve tekerrür sayısı) ve drenaj şartlarının kaplamaya olan etkilerinin analizleri ve kaplama performansının yük tekerrürleri, zemindeki şişme ve donma özellikleri altındaki değişimi esas alınmaktadır. Bir kaplamanın performansı, uzun süre taşıtların emniyetli ve konforlu olarak seyahat edebilmelerinin bir göstergesidir. Bu tasarım yönteminde kaplamanın performansı "servis yeteneği" kavramı ile tanımlanmaktadır. AASHTO yol testinde kaplamanın başlangıçta sahip olduğu ve belirli bir kullanım sonunda azalan servis yeteneğine göre kaplamanın performansının nasıl değiştiği saptanmaya

çalışılmış ve buna göre tasarım formülleri geliştirilmiştir. AASHTO-93 yönteminde zemindeki şişme ve donma özelliklerinin etkisinden kaynaklanan servis yeteneği kaybı da dikkate alınmaktadır. Şişmeye duyarlı zeminler, artan su içeriği ile şişme göstererek kaplamada ek gerilmeler oluşturmaktadır.

Üstyapı sayısı (SN) Formül 1 ile belirlenmektedir.

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3 \quad (1)$$

Burada a_1 , her bir tabakanın izafi mukavemet katsayısı, D_i , kaplama, temel ve alt temel tabaka kalınlıkları, m_i , ise drenaj faktörü olup üstyapının doygunluk seviyesine yakın su içeriğine maruz kaldığı sürenin yıl içindeki yüzdesine bağlı olarak değişmektedir. AASHTO yol testlerinin sonuçları trafik yükleri, malzemenin özellikleri, tabaka kalınlıkları, iklim koşulları ve zemin şartlarının etkileri regresyon analizleri ile irdelenmiştir. Esnek kaplamaların tasarımı için 1986 tasarım rehberinde Formül 2 kullanılmıştır (Coree ve White, 1990).

$$\log W_{8,2t} = Z_R \cdot S_0 + 9,36 \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log[(\Delta PSI) / (4,2 - 1,5)]}{0,40 + [1094 / (SN + 1)^{5,19}]} + 2,32 \log M_R - 8,07 \quad (2)$$

Burada,

- $W_{8,2t}$: 8,2 ton tek dingil yükünün üstyapının son servis yeteneğine düşmesi için gerekli toplam tekerrür sayısı,
- Z_R : Güvenilirliğin yüzdesine bağlı olarak tespit edilen standart normal sapma değeri,
- S_0 : Standart sapma,
- M_R : Üstyapının üzerine oturduğu taban zemininin taşıma gücü,
- ΔPSI : Servis kabiliyetindeki azalma miktarı.

Zeminin CBR değeri ile M_R değeri arasında PSI cinsinden $M_R = 1500$ CBR gibi bir ilişki mevcut olduğundan dolayı taban zemininin CBR değeri bilinmesi halinde M_R değeri yaklaşık olarak tayin edilebilir (Tunç, 2004). AASHTO tasarım yönteminde, taban zemini taşıma gücüne, toplam eşdeğer standart dingil yükü (ESDY) sayısına ve hizmet kabiliyeti indeksine göre tespit edilen üstyapı sayısı (SN), tabaka kalınlıkları ile çarpılan izafi mukavemet

ve drenaj katsayılarının toplamına eşit ve büyük olması gerektiği için bir çok kombinasyon ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada tasarım kriterinde yer alan parametrelerin alabileceği farklı değerlerle ortaya çıkan binlerce seçenek AASHTO-93 yöntemine göre MATLAB programı kullanılarak analiz edilmiş ve optimum çözümler bulunmuŐtur. OluŐturulan bütün seçeneklerde drenaj faktörü 1, toplam maksimum hizmet kabiliyeti indeksi kaybı 1,7 olarak alınmıŐtır.  styapıda yer alacak tabakaların izafi mukavemet katsayıları Tablo 1'de verilmiştir.

Yol  st yapısında temel tabakası, imento bağlayıcı granüler temel, plent-mix temel,

granüler temel ve bitümlü temel olmak üzere dört farklı Şekilde; alttemel tabakası ise kum-çakıl alttemel ve kırmataŐ alttemel olarak inşa edilebilmektedirler. Kök ve Kuloğlu, (2007), üstyapının ekonomik analizi ile ilgili yaptıkları çalıŐmalarında optimum tasarımın temel olarak granüler temel, alttemel olarak ise kum-çakıl alttemel kullanılması durumunda ortaya çıktığını tespit etmiŐlerdir. Bu nedenle bu çalışmada temel cinsi granüler, alttemel cinsi ise kum-çakıl olarak seçilmiŐtir. Tablo 2'de farklı ESDY değerlerindeki, zeminin, temel tabakasının ve alttemel tabakasının taşıma gücü (CBR) değerlerine göre Formül 2 ile bulunan SN değerleri verilmiştir.

Tablo 1. Tabaka cinslerine göre izafi mukavemet tabaka katsayıları (Sağlık ve Güngör, 2008).

Tabaka	AŞınma tabakası	Binder tabakası	Bitümlü temel	Granüler temel	Kumakıl alttemel
Tabaka katsayısı	0,43	0,41	0,33	0,14	0,11

Tablo 2. CBR ve ESDY değerlerine göre SN değerleri.

ESDY (10 ⁶)	CBR						
	3	6	15	30	60	Granüler Temel (CBR=100)	Kum-akıl Alttemel (CBR=30)
10	14,35	11,43	8,15	6,22	4,75	3,86	6,22
30	16,58	13,36	9,72	7,46	5,71	4,67	7,46
50	17,67	14,32	10,54	8,12	6,22	5,10	8,12

2010 yılı Karayolları Genel Müdürlüğü birim fiyatlarında, aşınma, binder ve bitümlü temel tabakaları için farklı kalınlıklardaki 1 m² maliyetleri, temel ve alttemel tabakaları için ise m³ maliyetleri verilmiştir. Bu çalışmada, farklı tabaka kalınlıklarına göre verilen maliyet değerleri, tabaka kalınlıklarına bölünerek m²/cm miktarının maliyeti bulunmuŐ ve bu değerlerin de ortalaması alınmıŐtır. Tablo 3'te analizde kullanılacak birim maliyetler ve imento stabilizasyonunun birim fiyat analizi verilmiştir.

Tablo 3'ten % 4, % 7, % 10, % 13 ve % 16 oranlarındaki imento stabilizasyonunun birim maliyetleri sırasıyla 4, 13, 6.61, 9.08, 11.56 ve 14.04 TL'dir. Stabilize edilecek zeminin yoğunluğu 1,6 gr/cm³ olarak alınmıŐtır.

Bu çalışmada, aşınma tabakası 3-7 cm, binder tabakası 4-8 cm, bitümlü temel tabakası 8-16

cm, temel tabakası 10-30 cm ve alttemel tabakası 20-40 cm arasında alınmıŐtır. Hazırlanan program, bütün seçenekleri AASHTO-93 yöntemine göre analiz edip, tabaka kalınlıklarını ve maliyetini içeren satırlar Őeklinde bir matrisin içine atmaktadır. Bu matrisin maliyet sütununun en düşük değerini içeren satır, program çıktısı olarak alınmaktadır. Tablo 4'te zemin taşıma gücüne ve ESDY'ye göre bulunan optimum tabaka kalınlıkları verilmiştir. Temel tabakasında ilave olarak bitümlü temel olması ve olmaması durumları program tarafından ele alınıp daha ekonomik olan seçenek sonuç olarak verilmiştir. Tablo 4'te görüldüğü üzere daha düşük maliyetli bir üstyapı için düşük taşıma g c l  zeminlerde bitümlü temel tabakası yapılması zorunluluk arz etmektedir. Alttemel tabakasının CBR değerleri % 30 olduğundan, zemin CBR değerinin % 30 ve % 60 değerlerinde alttemel tabakası dikkate alınmamıŐtır.

Tablo 3. Tabaka ve çimento stabilizasyon birim maliyetleri.

Poz No	Tanım	Birimi	Maliyet (TL)	1 m ² , 1 cm maliyeti (TL)
6401/M 6400/M	4-5 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu aşınma tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ²	6,00	1,334
6304/M 6300/M 6308/M	6-7-8 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu binder tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ²	8,45	1,208
6207/M- 6200/M	8-9-10-11-12-14 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ²	11,88	1,132
6040	Temel yapılması (granüler temel 1 inç kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ³	30,31	0,3031
6010	Elenmiş çakıllı malzeme ile alttemel yapılması (kum-çakıl alttemel)	m ³	4,95	0,0495
Poz No	Tanım	Birimi	Maliyet (TL)	1 m ² , 40 cm maliyeti (TL)
14019-1	Dolgu altlarındaki mevcut yol yüzeyinin sürülerek veya sökülerek kabartılması	m ²	0,07	0,070
15.140	Makine ile serme	m ³	0,43	0,172
15.141	Makine ile karıştırma	m ³	0,52	0,208
22.05	Her cins toprağın sulanması ve sıkıştırılması	m ³	0,95	0,380
	Çimento maliyeti (%4 için)	ton	129	3,302
	Çimento maliyeti (%7 için)	ton	129	5,780
	Çimento maliyeti (%10 için)	ton	129	8,256
	Çimento maliyeti (%13 için)	ton	129	10,732
	Çimento maliyeti (%16 için)	ton	129	13,209

Tablo 4. Üstyapı maliyetleri.

ESDY (10 ⁶)	CBR	Aşınma (cm)	Binder (cm)	Bitümlü temel (cm)	Temel (cm)	Alttemel (cm)	Mevcut SN ₃ – olması gereken SN ₃	Toplam üstyapı kalınlığı (cm)	Maliyet (TL)
0	3	3	4	9	29	40	14,36-14,35	85	29,79
	6	3	7	0	21	40	11,5-11,43	71	20,80
	15	3	7	0	15	20	8,46-8,15	45	17,99
	30	3	7	0	15	0	6,26-6,22	25	17,00
	60	3	7	0	10	0	5,56-4,75	20	15,49
0	3	5	7	9	30	40	16,59-16,58	91	36,38
	6	4	8	0	29	40	13,46-13,36	81	25,76
	15	4	8	0	18	21	9,83-9,72	51	21,40
	30	4	8	0	18	0	7,52-7,46	30	20,45
	60	4	8	0	10	0	6,40-5,71	22	18,03
0	3	5	8	12	28	40	17,71-17,67	93	40,38
	6	3	4	9	29	40	14,36-14,32	85	29,79
	15	5	8	0	20	21	10,54-10,54	54	23,43
	30	5	8	0	20	0	8,23-8,12	33	22,39
	60	5	8	0	10	0	6,83-6,22	23	19,36

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

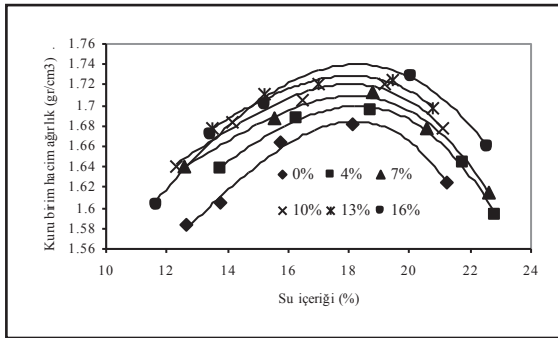
Çalışmada düşük taşıma gücüne sahip bir zeminin farklı oranlarda çimento ile stabilize edilmesinin taşıma gücüne etkisi araştırılmıştır.

Bu amaçla ilk önce ele alınan zeminin özellikleri tespit edilmiştir (Tablo 5).

Tablo 5. Stabilize edilecek zemin özellikleri.

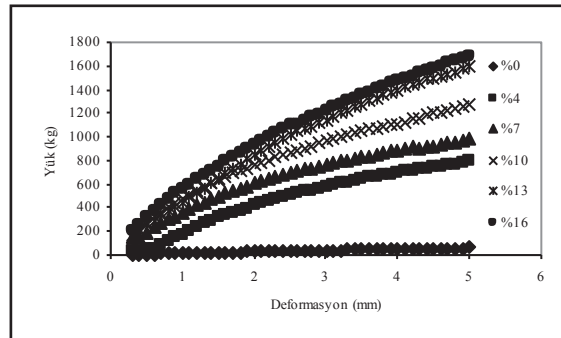
Elek (mm)	4,75	2,00	1,19	0,60	0,30	0,15	0,075
% Geçen	99,3	97,9	96,8	94,4	87,4	64,0	48,4
Likit limit (%)	27,5						
Plastik limit (%)	18,2						
Optimum su oranı (%)	18,1						
Plastisite indeksi	9,3						
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (gr/cm ³)	1,681						

Zeminin 200' nolu elekten geçen kısmına, likit limitine ve plastisite indisine göre çimento ile stabilize edilebilecek karakterde olduğu belirlenmiştir. Daha sonra ağırlıkça % 4, % 7, % 10, % 13 ve % 16 çimento oranlarındaki optimum su muhtevaları Proctor metoduna göre tespit edilmiş ve Şekil 1'de verilmiştir. % 0, % 4, % 7, % 10, % 13 ve % 16 çimento içerikli numunelerin optimum su muhtevaları sırasıyla % 18,09; % 18,70; % 18,79; % 19,15; % 19,41 ve % 20,06 olarak belirlenmiştir.

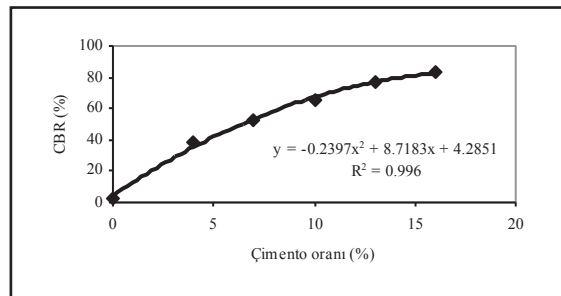
**Şekil 1. Optimum su muhtevaları.**

Çimento oranının artması gradasyondaki yüzey alanının ve dolayısıyla optimum su içeriklerinin artmasına neden olmuştur. Değişik çimento içerikli zemin numuneleri, belirlenen optimum su içeriklerinde her tabakasına 2,5 kg'lık tokmakla 61 darbe uygulanarak 3 eşit tabakada CBR kalıplarında sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numuneler kalıpla birlikte hava almayacak şekilde plastik film ile kaplanıp yedi gün kalmak üzere kür kabineye yerleştirilmiştir. Bu süre sonunda plastik filmlerinden çıkartılan numunelere CBR deneyi uygulanmıştır. Numunelerin CBR deneyindeki yük-deformasyon ilişkileri Şekil 2'de, % 2,9 CBR değerine sahip zemin numunesinin çimento ilavesi ile CBR değerlerinde meydana gelen artış Şekil 3'te verilmiştir. Arazideki uygulama şartlarının laboratuardaki şartlarla aynı

olmayacağı düşüncesiyle elde edilen değerler % 10 oranında azaltılmıştır.

**Şekil 2. Yük-deformasyon ilişkisi.**

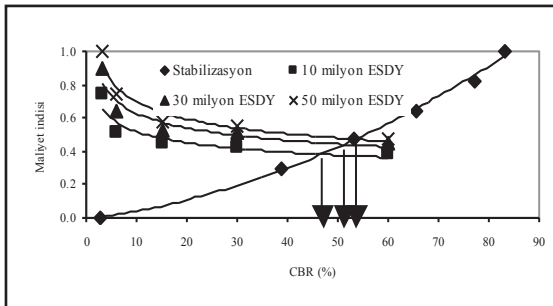
Şekil 2'de görüldüğü üzere % 4 minimum çimento içeriğinde bile CBR deneyinde uygulanan yük değerleri katkısız zemin numunesine göre önemli derecede artmakta, % 13 ve % 16 çimento katkılı numuneler arasında ise çok farklı yük-deformasyon ilişkisi oluşmamaktadır. % 4, % 7, % 10, % 13 ve % 16 çimento oranlarında katkısız zemin numunesine göre CBR değerlerinde sırasıyla 13, 18, 22, 26 ve 28 kat daha fazla artış meydana gelmiştir.

**Şekil 3. Çimento oranı- CBR ilişkisi.**

Stabilizasyondaki optimum çimento oranını bulmak amacıyla Şekil 4'te CBR değerlerindeki artış ile değişik trafik değerlerine sahip üst yapı maliyetinde meydana gelen azalış ve CBR değerlerini arttırmak için stabilizasyon

maliyetinde meydana gelen artış grafiksel olarak verilmiştir. Burada stabilizasyon ve üstyapı maliyetleri kendi içindeki en büyük maliyetlere bölünerek normalize edilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere üstyapı maliyeti % 15 CBR değerine kadar hızlı bir şekilde düşmekte daha sonra maliyet azalış hızı azalmaktadır. CBR değerini artırmak için yapılan stabilizasyon maliyeti CBR artışı ile sürekli bir artış göstermektedir. Üstyapı maliyet eğrileri ile stabilizasyon maliyet eğrisinin kesiştiği noktalar 10, 30 ve 50 milyon ESDY için sırasıyla 46,7; 51,4 ve 54,0 CBR değerlerine karşılık gelmektedir. Şekil 3'ten elde edilen bu CBR değerlerine karşılık gelen çimento oranları ise sırasıyla % 5,8, % 6,6 ve % 7,1 olarak tespit edilmiştir. Ele alınan trafik değerleri arasında çok büyük fark olmasına rağmen bu trafik değerleri için tespit edilmiş olan optimum çimento oranları arasında çok büyük bir fark çıkmamıştır.

Elde edilen sonuçlar neticesinde genel olarak % 7 çimento stabilizasyonunun orta ve hatta ağır trafikli bir üstyapı için optimum bir değer olacağı tespit edilmiştir. % 3 CBR değerine sahip bir yol altyapısında % 7 çimento stabilizasyonu ile CBR değeri % 50'den daha fazla bir değere çıkartılabilmekte ve bu sayede düşük, orta ve yüksek trafikli yollarda yol üstyapı maliyeti sırasıyla % 47, % 50 ve % 51 azalmaktadır. 6,61 TL/m²'lik maliyeti ile % 7 çimento stabilizasyonu 1 m² üstyapı maliyetinin yaklaşık olarak düşük, orta ve yüksek trafik değerleri için % 16 - % 22'sini oluştururken üstyapı maliyetinin % 50 civarında azalmasını sağlamaktadır.



Şekil 4. Üstyapı ve stabilizasyon maliyetlerinin CBR ile değişimi.

5. SONUÇ

Bu çalışmada çimento stabilizasyonu ile taşıma gücü artırılan zeminler üzerine inşa edilecek esnek üstyapıların maliyeti ile stabilizasyon maliyeti arasındaki ilişki araştırılmıştır. Bu amaçla üstyapıda alttemel, temel, binder ve aşınma tabakaları dikkate alınmış, düşük taşıma güçlü zeminlerde ekonomik bir üstyapı için bitümlü temel tabakası yapılması gerektiği belirlenmiştir. Artan CBR değerlerine karşılık ele alınan düşük, orta ve yüksek trafik değerleri için üstyapı maliyetinin % 15 CBR değerine kadar hızlı bir şekilde daha sonra ise yavaş bir şekilde azaldığı, stabilizasyon maliyetinin ise CBR miktarındaki artış ile sürekli arttığı tespit edilmiştir. Stabilizasyonda kullanılan çimento miktarlarının düşük değerlerinde bile çok yüksek CBR değerlerinin elde edildiği ve bunun da üstyapı maliyetini önemli derecede azalttığı tespit edilmiştir. Üstyapı maliyetinin yaklaşık % 20'lik bir bölümünü oluşturan % 7 çimento stabilizasyonunun optimum bir değer olduğu ve üstyapı maliyetinde % 50'lik bir azalma sağladığı tespit edilmiştir. Uzun mesafeler boyunca düşük taşıma güçlü bir altyapı üzerine inşa edilme zorunluluğu olan güzergahlarda ekonomik, akılcı ve dolayısıyla vazgeçilmez bir çözüm olarak tamamen yerli bir malzeme olan çimento ile yapılacak stabilizasyonun uygulanması gerektiği düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

Cai, Y., Shi, B., Charles, W.W. Ng, Tang, C. 2006. Effect of Polypropylene Fibre and Lime Admixture on Engineering Properties of Clayey. Soil Engineering Geology. 87, 230–240.

Chauhan, M.S., Mittal, S., Mohanty, B. 2008. Performance Evaluation of Silty Sand Subgrade Reinforced With Fly Ash and Fibre. Geotextiles and Geomembranes. 26, 429–435.

Coree, J.B, White, T.D. 1990. AASHTO Flexible Pavement Design Method: Fact or Fiction. Transportation Research Record, no. 1286. National Research Council, 206–216.

Dermatas, D., Meng, X. 2003. Utilization of Fly Ash For Stabilization/Solidification of Heavy Metal Contaminated Soils. Engineering Geology. 70, 377–394.

- Eren, S., Filiz, M. 2009. Comparing the Conventional Soil Stabilization Methods To The Consolid System Used as an Alternative Admixture Matter in Isparta Darıdere Material. *Construction and Building Materials*. 23, 2473–2480.
- Gerald, A., Miller, U., Azadb, S. 2000. Influence of Soil Type on Stabilization With Cement Kiln Dust. *Construction and Building Materials*. 14, 89-97.
- Kolias, S., Kasselouri-Rigopoulou, V., Karahalios, A. 2005. Stabilisation of Clayey Soils With High Calcium Fly Ash and Cement. *Cement & Concrete Composites*. 27, 301–313.
- Kk, B.V., Kuloğu, N. 2007. AASHTO-86 Yntemine Gre styapı Tabakalarının Ekonomik Analizi *Teknik Dergi*. 18(4), 4257-4270.
- Lav, A.H., Lav, M.A., Goktepe, A.B. 2006. Analysis and Design of a Stabilized Fly Ash as Pavement Base Material *Fuel*. 85, 2359–2370.
- nal, M.A, Temren, Z. 2004. “Türkiye İle Bazı Avrupa lkelerinin Esnek styapı Tasarımlarının Karşılaştırılması”. 4.Ulusal Asfalt Sempozyumu 2004, 224-243.
- Prabakar, J., Dendorkar, N., Morchhale R.K. 2004. Influence of Fly Ash on Strength Behavior of Typical Soils. *Construction and Building Materials*. 18, 263–267.
- Sağlık, A., Gngr, A.G. 2008. Esnek styapı projelendirme rehberi. *Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı styapı Őube Mdrlğ*, Ankara.
- Seco, A., Ramırez, F., Miqueleiz, L., Garcıa, B. 2011. Stabilization of Expansive Soils For Use in Construction. *Applied Clay Science*, doi:10.1016/j. clay.2010.12.027.
- Senol, A., Edil, T.B., Bin-Shafique, M.S., Acosta, H.A., Benson, C.H. 2006. Soft Subgrades’ Stabilization by Using Various Fly Ashes. *Resources, Conservation and Recycling*. 46, 365–376.
- Tun, A. 2004. *Kaplama Mhendisliği ve Uygulamaları*. Asil Yayın Dağıtım, Ankara.
- Wu, Z., Zhang, Z., Tao, M. 2010. Stabilizing Blended Calcium Sulfate Materials For Roadway Base Construction. *Construction and Building Materials*. 24, 1861–1868.