

**BOROJİPSİN ALTTEMEL TABAKASINDA STABİLİZASYON  
MALZEMESİ OLARAK KULLANILMASININ ARAŞTIRILMASI**  
**INVESTIGATION OF THE USAGE OF BORO GYPSUM IN THE  
SUBBASE COURSE AS A STABILIZATION MATERIAL**

**Emine ÇORUH<sup>1\*</sup>, Sinan HINISLIOĞLU<sup>1</sup>, Muhtar KOCAKERİM<sup>2</sup>,  
Seracettin ARASAN<sup>1</sup>, Meral OLTULU<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

<sup>2</sup>Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü

**Geliş Tarihi:** 01 Eylül 2012 **Kabul Tarihi:** 09 Aralık 2013

**ÖZET**

Bu çalışmada bor cevheri olan kolemanitten borik asit üretimi esnasında ortaya çıkan borojips atığının, yol üstyapılarındaki alttemel tabakalarında bağlayıcı madde olarak kullanımı araştırılmıştır. Bandırma'da bulunan Eti Bor AŞ.'den sağlanan borojips atığı ile Makimsan AŞ'den sağlanan alttemel malzemesi farklı oranlarda karıştırılarak elde edilen numuneler üzerinde serbest basınç ve CBR deneyleri yapılmıştır. %20 borojips ilaveli karışımlardan 9.5 kg/cm<sup>2</sup>lik maksimum serbest basınç dayanım değeri ve %50 borojips ilaveli karışımlardan %70' lik maksimum CBR değeri elde edilmiştir. %50 borojips içeren alttemel tabakası kullanılarak AASHTO esnek üstyapı tasarımı yapılmıştır. Bu durumda, üstyapıda kullanılan toplam agrega miktarı %43, yol yapım maliyeti ise %12 azalmıştır. Sonuç olarak esnek üstyapılarda borojips kullanımıyla, üstyapı maliyetinin ve bor atığının sebep olduğu çevre kirliliğinin azalabileceği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Borojips, agrega, yol stabilizasyonu, CBR.

**ABSTRACT**

In this study, use of waste borogypsum which is obtained during the production of boric acid from colemanite, in subbase courses in flexible highway pavements as a stabilization material is investigated. Unconfined compressive strength and CBR tests were performed on the specimens prepared by mixing the waste borogypsum provided by Eti Boron Joint-Stock Company in Bandırma and subbase material provided by Makimsan Joint-Stock Company. Maximum compressive strength of 9.5 kg/cm<sup>2</sup> was obtained at the mix with 20% Borogypsum, and max CBR value of 70% was obtained at the mix with 50% borogypsum. For the cost analysis, flexible pavement design was performed using the subbase course with 50% borogypsum. In this case, total amount of aggregate and the cost of pavement is decreased by 43% and 12%, respectively. As a result, it is seen

\*Sorumlu Yazar: emineblb@atauni.edu.tr

that both cost of pavement and environmental pollution caused by waste borogypsum can be decreased using the waste borogypsum in subbase courses.

**Key Words:** Borogypsum, aggregate, road stabilization, CBR.

## 1. GİRİŞ

Hızlı nüfus artışı, ekonomik kalkınma ve yaşam standartlarının yükselmesi gibi birçok faktörün birlikte etki etmesi sonucu ulaşım talebi de hızla artmakta dolayısı ile hem yeni ulaşım yapılarına olan ihtiyaç hemde mevcuttaki ulaşım yapılarının bakım ve onarım giderleri hızla artmaktadır. Dolayısı ile kara ulaşım yapılarında kullanılan doğal agrega stoğu, artan yeni yol yapımı ve bakım talebi ile paralel olarak azalmaktadır. Asfalt kaplamaların yaklaşık % 94'ü agregalardan oluşur, örnek olarak 1 km'lik bir otoyolun yapımı için yaklaşık 32 ton agrega kullanılmaktadır (Zoorop ve Suparma 2000).

Esnek üstyapıyı oluşturan tabakalı sistemin tabaka kalınlıkları, maliyeti önemli derecede etkilemektedir. Temel tabakasının kalınlığını azaltarak maliyeti önemli derecede düşürmesi, dona hassas taban zeminlerini don etkisinden koruması ve taşıma gücünü artırmasından dolayı alttemel tabakası inşa edilir. Alttemel tabakasında, diğer malzemelere göre çok daha ekonomik olduğu için genellikle maliyeti yüksek olmayan yöresel malzemeler ve atık olarak tanımlanabilecek malzemeler kullanılmaktadır (Fındık 2005).

Atık olarak elde edilen birçok ürünün depolanması veya doğaya terkedilmesi sonucu ortaya çıkan atık hacimleri gün geçtikçe daha da artmakta, çevre, hammadde kaybı, enerji kaybı vb. sorunları da beraberinde artırmaktadır (Gürer 2004). Bu atık malzeme ve yan ürünler değerlendirilebilirse, hem kısıtlı olan doğal malzemelerin kullanımı azaltılabilir hem de doğanın daha çok zarar görmesi önlenir. Dolayısı ile bu malzemelerin esnek üstyapı tabakalarında yeniden kullanımı ile çevrede oluşabilecek problemler en aza indirgenir (Gürer 2004; Turabi vd. 2002).

Sanayi faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan ve çevresel problemlere neden olan atıkların değerlendirilmesi üzerinde inşaat sektöründe yoğun olarak çalışılmakta olup, özellikle yol üstyapısında birçok endüstriyel atığın kullanıldığı çalışma yapılmıştır. Bu atıklar

sıralanacak olursa; yüksek fırın cürufu, uçucu kül, inşaat ve yıkım atıkları, sökülmüş beton yol kaplamaları, sökülmüş asfalt yol kaplamaları ve gübre fabrikası atıkları (fosfojips) başta gelmektedir (Yılmaz ve Süttaş 2008).

Değirmenci ve arkadaşları (2006), zemin stabilizasyon malzemesi olarak uçucu kül ve çimento ile birlikte endüstriyel bir atık olan fosfojips kullanmışlardır. Çalışmalarda yol temeli inşası için fosfojipsin tek başına etkili olmadığı görülmüştür. Bu çalışmada çimento içeriği oranı % 5-15 olarak seçilmiştir.

Özbayoğlu (1993) ve Alataş (1996), uçucu kül-çimento-bentonit ve uçucu kül-kireç-bentonit karışimli kum numunelerinde uçucu kül miktarının artması ile maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında az miktarda, optimum su içeriklerinde ise belirgin artışlar olduğunu açıklamışlardır. Yapılan deneylerin sonuçlarına dayanarak uçucu külün, köy ve orman yollarının stabilizasyonunda, dolgu ve katkı malzemesi olarak kullanılmasını önermişlerdir.

De Rezende vd. Pedreira Contagem Bölgesi taş ocağı atıklarının esnek yol üstyapılarının temel tabakalarında değerlendirilmesi amacıyla atık malzemenin laboratuvar deneyleri ile özelliklerini belirleyerek, kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Yapılan çalışmanın sonucunda, Pedreira Contagem Bölgesi taş ocağı atıklarının esnek kaplamaların temel tabakaları için potansiyel kullanım özelliklerine sahip olduğu ve bu malzemenin düşük trafik hacimli yollarda temel malzemesi olarak kullanılabileceğini açıklanmışlardır (Gürer 2004).

Fındık (2005), pomzaların ve volkanik cürufun alttemel tabakasında stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Malzemelerin alttemel tabakasında mekanik stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Hafif agregaların, karışım yapılan malzemenin CBR değerini artırdığı için, karayolu esnek üstyapıları alttemel tabakasında, mekanik stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabileceği görülmüştür.

Yılmaz ve Süttaş (2008), yan ürün olarak ortaya çıkan ve atıl durumdaki endüstriyel atıkların (Ferrokrom cüruflarının) yol üstyapısının temel tabakalarında, doğal agregalar yerine kullanım imkânını araştırmışlardır. Deneysel çalışmalar sonucunda çimento gibi bir bağlayıcı ile stabilize edilen cüruf karışımlarının, yüksek

trafik hacmine sahip karayolları için iyi bir stabilizasyon malzemesi olabileceğini açıklamışlardır.

Türkiye sahip olduğu bor mineralleri rezervlerinin büyüklüğü, niteliği ve çeşitliliği açısından dünyada birinci sırada bulunmaktadır ve 803 milyon ton ( bazında) bor rezervi ile dünya bor rezervlerinin % 63'üne sahiptir. Bu madenin işlendiği tesislerde açığa çıkan atık miktarının 600.000 ton/yıl olduğunu bildirilmiştir (Erkal ve Girgin 1992; Aytekin 1995; Yaman ve Maraşoğlu 1998; Güyagüler 2001).

Bu çalışmada; yukarıda bahsedilen katkı malzemelerine ek olarak, Eti Bor İşletmelerine ait Bor Fabrikası borik asit üretim atığının, yol üst yapısının alttemel tabakasında stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

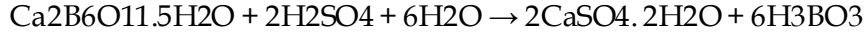
Bu çalışmada Erzurum ili Makimsan A.Ş den temin edilen kalker orijinli alttemel tabakası ile Eti Bor İşletmelerine ait bor fabrikası borik asit üretim atığı olan borojips kullanılmıştır. Borojips % 10, % 20, % 30, % 40 ve % 50 oranlarında alttemel tabaka malzemesi yerine kullanılmıştır (Motor 2007). Borun fiziksel özellikleri Tablo 2.1' de verilmiştir (Kılınç 2005).

**Tablo 2.1** Borun fiziksel özellikleri (Kılınç 2005).

Borun Fiziksel Özellikleri	
Atom Ağırlığı	10.811±0.005 veya 0.007
Ergime sıcaklığı	2190+20°C
Kaynama noktası	4002 °C
Isı genleşme katsayısı (25-1050°C arası, 1°C)	5.10 <sup>6</sup> -7.10 <sup>6</sup>
Knoop sertliği	2100-2580 HK
Mohs sertliği(elmas-15)	9.3
Vickers sertliği	5000 HV

Türkiye'de borik asit üretimi, kolemanit konsantresi kullanılarak yapılmaktadır. Kolemanit kullanımı sırasında, yan ürün olarak borojips elde edilir. Üretim esnasında kolemanit ve sülfürik asit reaksiyona girer.

Reaksiyon sonucu; Denklem 2.1



Denklem 2.1 de verilen borik asit ve borojips oluşur. Borojipsin kimyasal özellikleri malzemelerin temin edildikleri firmalardan alınmıştır. Üretici firmadan temin edilen kimyasal bileşimler Tablo 2.2’de verilmiştir.

**Tablo 2.2** Kullanılan katkının kimyasal bileşimleri (Anonim).

Elementler (%)	Borojips
SiO <sub>2</sub>	1.54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03
CaO	67.08
MgO	1.26
NA <sub>2</sub> O	0.02
SO <sub>3</sub>	1.09
TiO <sub>2</sub>	0.32
K <sub>2</sub> O	0.05
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.30
Kızdırma Kaybı	28.50

## 2.1 YÖNTEM

Alttemel tabakalarında kullanılan kalker orijinli tüm agregaların elek analizi ASTM D 1140’a, kıvam limitleri ASTM D 4318, standart proktor deneyi ASTM D 698’e, serbest basınç mukavemetleri TS 3114-1990’a ve CBR’ı ASTM D 1883-05’e göre belirlenmiştir. Agregaların alttemel malzemesi olarak kullanılabilirliği için yapılan deneyler ve deney sonuçları Tablo 2.3’ te verilmiştir.

**Tablo 2.3** Alttemel Malzemesinin Fiziksel Özellikleri

	Şartname Değerleri	Kullanılan Malzeme Değerleri
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ile kayıp Maksimum (%)	25	2.7
Aşınma Kaybı Maksimum (%)	50	26
Plastisite İndeksi/Likit Limit (Maksimum)	25/6	NP (Non Plastic)

Agrega ile homojen bir karışım elde edilene kadar borojips ile karıştırılan numuneler daha sonra optimum su içeriğinde sıkıştırılmış ve şartnameler dikkate alınarak 22°C oda sıcaklığında 7 günlük küre tabi tutulmuştur. Farklı oranlarda borojips katkılı numuneler üretilmiş, bu numuneler üzerinde serbest basınç ve yaş CBR deneyleri yapılmıştır.

Serbest basınç deneyinde, tüm numuneler sabit yükleme hızı altında, TS 3114-1990'a göre deneye tabi tutulmuştur. Yükleme hızı olarak 3 kg/cm<sup>2</sup>/s seçilmiştir. Serbest basınç deneyi için üretilen silindirik numunelerde standartların belirttiği şekilde yükseklik /çap oranı 2 olan ve numune çapı 'ın 4 katı genişliğinde olan numuneler kullanılmıştır.

Zemin danelerinin en iyi sıkışmayı gösterdiği optimum su içeriği zeminlerin stabilizasyonu için oldukça önem taşımaktadır. Kompaksiyon deneyinin amacı zeminin sıkıştırılması ile maksimum kuru birim hacim ağırlığının ve optimum su içeriğinin belirlenmesidir (2.5 kg. tokmak, 30.5 cm düşme yüksekliği ve her tabakaya 25 darbe). Hazırlanacak numuneler için kullanılan oranlardaki borojipsli karışımların optimum sıkıştırma parametreleri olan (t/m<sup>3</sup>) ve (%) değerleri bulunmuştur.

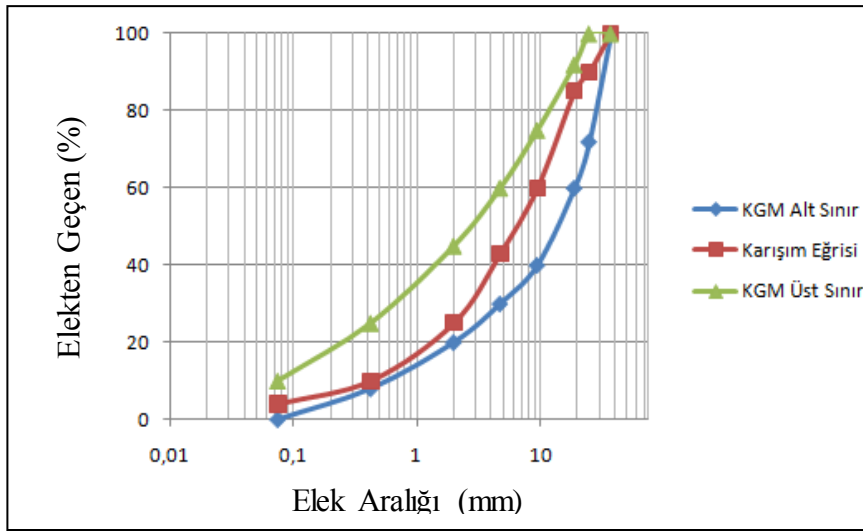
% 100 Agregalı alttemel malzemesinin optimum su içeriği % 4.8, %100 borojipsin ise 18.70 olarak belirlenmiştir. Borojipsli numunelerin optimum su içeriklerinin karışımdaki alttemel malzemesi ve borojips oranı ile ilişkili olduğu açıktır. Bu nedenle, borojipsli numunelerin optimum su içeriklerinin deneyle belirlenmelerine ek olarak formül 2.1'e göre de hesaplanmıştır.

$W_{opt} = (\% 4.8 \times \% \text{Zemin Oranı}) + (\% 18.70 \times \text{Borojips Oranı})$  Formül 2.1

Bu denklem; borojipsli numunelerin optimum su içeriklerinin, karışımda kullanılan agrega miktarının optimum su içeriği ile borojips miktarının optimum su içeriği toplamından oluşabileceği kabulüne dayanmaktadır. Formül 2.1'e göre hesaplanan bu değerler iki ayrı malzemenin bileşik etkisi olmadığı göz önüne alınarak hesaplanmıştır.

### 3. BULGULAR

Stabilizasyonda kullanılacak zemin özelliklerinin şartnamelerde verilen sınırlar içinde olduğunun araştırılması amacı ile yapılan elek analizi sonucu, deneylerde kullanılan zeminin agrega gradasyonu ve şartname sınırlarını gösteren granülometri eğrisi Şekil 3.1.'de verilmiştir. Borojipsli numunelerin hesap ve deney ile bulunan optimum su içerikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

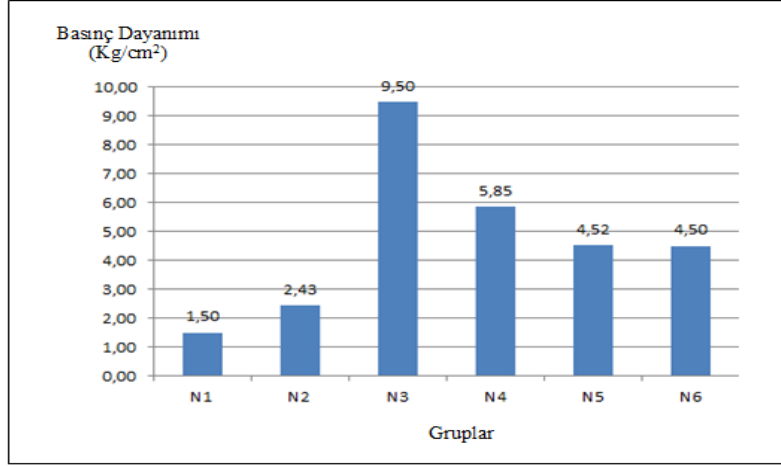


Şekil 3.1. Kullanılan agrega gradasyonu ve şartname sınırları.

Tablo 3.2. Borojipsli numunelerin hesap ve deney ile bulunan optimum su içerikleri.

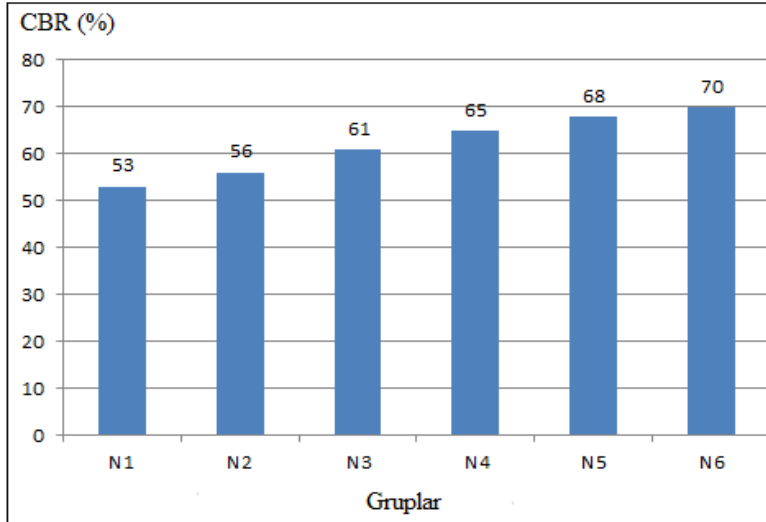
Gruplar	Hesapla Bulunan $W_{opt}$ Değerler (%)	Deney ile Bulunan $W_{opt}$ Değerler(%)
N1 %0 Borojips+ %100 Agrega	-	4,8
N2 % 10 Borojipsli+% 90 Agreg	6.19	6.98
N3 % 20 Borojipsli+% 80 Agreg	7.58	8.1
N4 % 30 Borojipsli+ % 70 Agreg	8.97	9.23
N5 % 40 Borojipsli+% 60 Agreg	10.36	11.25
N6 % 50 Borojipsli+% 50 Agreg	11.75	12.89

Tüm numune gruplarının serbest basınç dayanım sonuçları Şekil 3.2' te verilmiştir. Borojips miktarının artması ile numuneler dayanım kazanmıştır. En yüksek dayanımı N3 (% 20 borojips+% 80 agreg) karışımı vermiştir.



Şekil 3.2. Borojipsli numunelerin serbest basınç dayanım değerleri.

Tüm numune gruplarının CBR sonuçları Şekil 3.3' te verilmiştir. Borojips miktarının artması ile numunelerin CBR değerleri de artmıştır. En yüksek CBR, N6 (% 50 borojips+% 50 agreg) karışımında elde edilmiştir.



Şekil 3.3. Borojipsli numunelerin CBR değerleri.



#### 4. SONUÇLAR

Borojips ve granül alttemel malzemeli karışımlarda serbest basınç deneyinde en yüksek dayanımı 9.5 kg/cm<sup>2</sup>'lik değerle %20 borojipsli karışım vermiştir. Yine aynı karışımlarda en yüksek CBR değerini %50 borojipsli karışım %70 ile vermiştir.

% 53 CBR değerine sahip granül alttemel ve % 70 CBR değerine sahip % 50 borojips + % 50 agrega içeren granül alttemel tabakalarının kullanılması durumları için ayrı ayrı esnek üstyapı tasarımları yapılmıştır. Bu tasarımda sadece, borojipsli tabakaların kalınlığındaki azalmaların etkisi araştırıldığı için, en az karmaşık olan AASHTO 72 kullanılmıştır. Bu nedenle drenaj, şişme ve büzülme parametreleri AASHTO 72'de kullanılmadığı için tasarımda yer almamıştır. Esnek üstyapı tasarım sonuçlarından, %100 agrega kullanılması durumu için 35 cm alttemel tabakası, % 50 borojipsli + %50 agrega kullanılması durumu için ise 30 cm alttemel tabakası hesaplanmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar ışığında agrega yerine borojipsin belli bir oranda kullanılması durumunun, ekonomik olup olmadığının araştırılması için maliyet hesabı yapılması gerekmektedir. Bu amaçla Erzurum ilinde yapılacak bir stabilizasyon işi için, borojipsin Eti Bor A.Ş.'den getirilmesi (Balıkesir-Erzurum 1700 km, 2 merkezin tren garlarına mesafesi: 5km) ve temel malzemesinin Makimsan A.Ş.' den şantiyeye getirilmesi (ortalama= 10 km) maliyetinin hesabı ve karşılaştırılması yapılmıştır.

Borojips maliyeti olarak, borojipsin Eti Bor A.Ş.'den bedelsiz olarak alındığı düşünülürse sadece depodan şantiyeye kadar nakliye giderleri ve kullanıma hazır hale getirme giderleri hesaplanmıştır. Borojipsin kullanıma hazır hale getirme bedeli olarak, malzemenin farklı boyutlarda olması nedeni ile parçalanması ve elekten geçirilerek stabilizasyonda kullanılabilecek boyutlara getirilmesi düşünülmüştür.

Yapılan bu maliyet analizi sonucunda %50 borojips içeren karışımın en uygun olduğu, %50 borojips kullanılarak alttemel yapılması sonucu tabaka kalınlığının 35 cm'den 30 cm'ye düştüğü böylelikle kullanılan agrega miktarı %43, yol yapım maliyetinin tüm yol için %12, alttemel için %50 azaldığı bulunmuştur (Motor 2007).

Böylece üstyapıda kullanılacak doğal agrega miktarı azalacak, kısıtlı doğal kaynakların daha verimli kullanılması mümkün olacak ve çevre kirliliğinin önlenmesine önemli bir katkıda bulunulmuş olacaktır.

İlerde yapılacak olan çalışmalarda % 60'dan daha yüksek borojips oranları için CBR değerlerinin incelenmesi önerilmektedir.

### **SEMBOLLER**

AASHTO: Amerikan devlet otoyolları ve resmi taşımacılık birliği.

CBR: California Bearing Ratio (Kaliforniya taşıma oranı).

KGM: Karayolları Genel Müdürlüğü.

TS: Türk Standartları.

### **KAYNAKLAR**

- Alataş,T,(1996). Afşin-Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Malzemelerle Birlikte Kullanımı, Doktora Tezi, Fırat Üniv.Fen Bil.Enst.,Elazığ.
- Anonim, 15.08.2006 tarihinde <http://www.etimineusa.com>. adresinden alınmıştır
- ASTM D 698-00, (2000). Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM West Conshohocken, PA. Modified.
- ASTM D 1883-05, CBR Standard Test Method for CBR(California Bearing Ratio)of Laboratory-Compacted.
- ASTM D 1140-00, (2000). Standard Test Method for Amount of Material in Soils Finer Than No.200 Sieve. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM D 4318-00, (2000). Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM West Conshohocken, PA.
- Aytekin,Y., (1995). Maden Mühendisliğine Giriş, DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları No:167, 271, İzmir.
- Değirmenci,N.,Okucu,A. ve Turabi,A.,(2006). Application of Phosphogypsum in Soil Stabilization. Building and Environment, G. U. Journal of Science: 18(3),505-515.
- Erkal,İ.F.,Girgin,İ.,(1992). Etibank Emet Kolemanit İşletmesi Kaba Artıklarının Konsantre Üretimi Amacıyla Değerlendirilmesi, IV. Uluslararası Cevher Hazırlama Sempozyumu, Antalya.

- Fındık F.S. (2005). Karayolu Esnek Üstyapıları Alttemel Tabakasının Stabilizasyonunda Hafif Agregaların Kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Gürer C., (2004). Atık Mermer Parçalarının Bitümlü Yol Kaplamalarında Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Güyağüler, T., (2001). Türkiye Bor Potansiyeli, IV. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir.
- Kılınç, B., 2005. Borik Asit Üretimi Ders Notları.
- Motor, E., (2007). Borojipsin Yol Alttemel Tabakasında Stabilizasyon Malzemesi Olarak Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Özbayoğlu, F.U., (1993). Köy Yollarının Termik Santral Külleri ile Stabilizesi, Köy Hizmetleri Dergisi, 45, 8-19.
- TS 1900, 1987, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3114, Beton Basınç Mukavemeti Tayini, TSE, Ankara.
- Turabi, A., Okucu, A., Değirmenci, N., (2002). Fosforik asit üretim atığı fosfojipsin stabilizasyon malzemesi olarak kullanım olanaklarının araştırılması, 4. Mühendislik Mimarlık Sempozyumu, Balıkesir, 93.
- Yaman, C., Maraşoğlu, M., 1998. Bor Minerali Atıklarından Üretilen Camsı Maddenin Olası Kullanım Alanları, IV. Seramik Kongresi, Eskişehir
- Yılmaz A. ve Süttaş İ., (2008). Ferrokrom Cürufunun Yol Temel Malzemesi Olarak Kullanımı, İMO Teknik Dergi, 4455-4470, Yazı 294
- Yıldırım, S., (2002). Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Zoorob, S. E., Suparna, L. B., (2000), Laboratory Design and Investigation of the Properties of Continuously Graded Asphaltic Concrete Containing Recycled Plastics Aggregate Replacement (Plastiphalt), Cement & Concrete Composites, Elsevier Science, Vol.22 pp 233-242

\*\*\*\*