

## Granüler Temel Tabakasının Mekanik Davranışına Sıkıştırma Yöntemleri ve Agregata Özelliklerinin Etkisi

Zülküf KAYA\*  
Altan ÇETİN\*\*  
Bora ÇETİN\*\*\*  
Ahmet AYDİLEK\*\*\*\*

### ÖZ

Bazı deneyimler, granüler temel tabakası tasarımında agrega özellikleri ve sıkıştırma değerlerinin en önemli faktörler olduğu, darbeli kompaksiyon yönteminin arazideki gerçek malzeme performansını yansıtmadığı yönündedir. Granüler temel tabakası (GAB) tasarım esaslarının geliştirilmesine yönelik bu çalışmada, agrega gradasyonu ve fiziksel özelliklerinin tasarımda kullanılan darbeli ve titreşimli kompaktör ile hazırlanan numunelerin mekanik davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Dört farklı agrega kaynağından alınarak her iki sıkıştırma yöntemi ile hazırlanan numuneler üzerinde elek analizi, Kalifornia taşıma oranı ve esneklik modülü deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, agrega fiziksel özellikleri açısından değerlendirilmiş, titreşimli kompaksiyon yönteminin agregaların şekil ve yapısına önemli derecede zarar vermediği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Darbeli kompaksiyon, titreşimli kompaksiyon, esneklik modülü.

### ABSTRACT

#### Effects of Compaction Method and Aggregate Properties on Mechanical Behavior of Granular Base Layer

The aggregate properties and their compaction degrees are the two most important factors that have significant effects on the design of granular highway base layers. The effects of impact compaction and vibratory compaction methodologies on the gradation, physical and mechanical properties of graded aggregate base (GAB) layers were observed in the current study. Sieve analysis, California bearing ratio (CBR) tests and resilient modulus tests were

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 07.09.2011 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2013 gününe kadar tartışmaya açıktır.

- \* Erciyes Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri - zkaya@erciyes.edu.tr
- \*\* Anadolu Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir - alctin@anadolu.edu.tr
- \*\*\* South Dakota Üniversitesi, İnşaat ve Çevre Müh. Bölümü, ABD - bora.cetin@sdsmt.edu
- \*\*\*\* Maryland Üniversitesi, Çevre ve İnşaat Mühendisliği Bölümü, ABD - aydilek@umd.edu

conducted on four different GAB materials. Results indicated that the vibratory compaction methodology has no significant damage on shape of the aggregates.

**Keywords:** Impact compaction, vibratory compaction, resilient modulus.

## 1. GİRİŞ

Esnek yol üstyapısında granüler temel tabakası stabilite ve permeabilite açısından yolun hizmet ömründe belirleyici bir rol oynamaktadır. Kullanılan agrega tipi, kalitesi, fiziksel özellikleri, agrega dane şekli, yüzey dokusu, ince malzeme tipi ve miktarı ile gerekli kompaksiyon seviyelerine bağlı olarak yoğunluk ve su muhtevası değerleri granüler agrega tabakalarının davranışını etkileyen faktörler arasındadır [1, 2]. Kaba agrega oranı yüksek granüler malzemelerde darbeli kompaksiyon yönteminin arazideki gerçek malzeme performansını yansıtmadığı ifade edilmektedir [3]. Esneklik modülü (resilient modülü) deneyi, tekrarlı yükler altında malzemelerin elastik deformasyonunun karakterizasyonunda kullanılmaktadır.

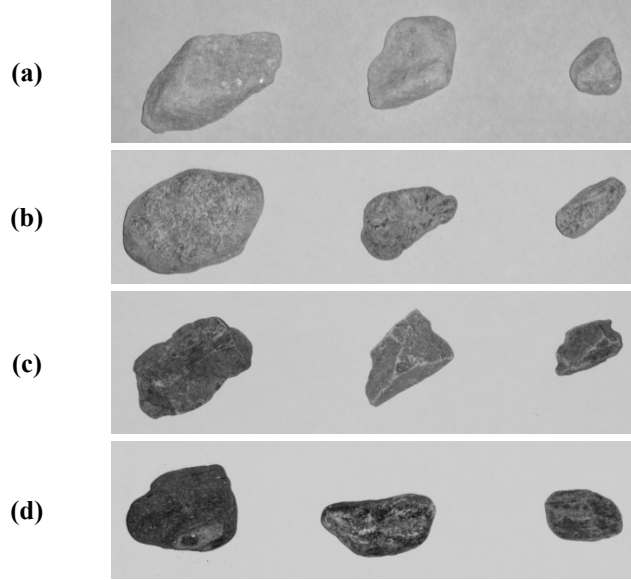
Amerika'da Maryland eyaletinde granüler temel tabakasının (GAB) tasarım esaslarının geliştirilmesi üzerine yapılan projenin ilk aşamasını teşkil eden bu çalışmada, dört farklı taş ocağından (Texas-Mermer, Rockville-Bazalt, Bladensburg-Kireçtaşı, Churchville-Gnays) temin edilen agregaların her biri için modifiye proktor ve titreşimli kompaksiyon yöntemleri ile hazırlanan numuneler üzerinde su muhtevası-birim hacim ağırlık ilişkisi belirlenmiş, kompaksiyon sonrası elek analizi, Kalifornia taşıma oranı (CBR) ve esneklik modülü deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları her iki kompaksiyon yöntemi için agrega gradasyonu ve agrega fiziksel özellikleri göz önüne alınarak değerlendirilmiştir.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM

### 2.1. Agrega Özellikleri

Seçilen agregaların petrografik, morfolojik ve granüler temel tabakasında kullanılabilmesi amacıyla bazı fiziksel özelliklerin belirlenmesi için gerekli deney ve analizler gerçekleştirilmiştir. Kayaç petrografik analiz sonuçlarına göre Texas agregasının %83 oranında kalsit ( $\text{CaCO}_3$ ) içerdiği tespit edilmiş ve kaya tipi muskovit mika ve prit kristalli mermer olarak belirlenmiştir. Rockville, Bladensburg ve Churchville ise sırasıyla ince-orta kristalli meta-bazalt, karbonat esaslı dolomitik kireçtaşı ve ince kristalli hornblend gnays kayaç katagorisinde yer almaktadır.

Yol tabakalarında, özellikle bağlayıcısız granüler tabakalarda kullanılan agregaların morfolojik (şekilsel) özellikleri mekanik davranış üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Dolayısıyla bu çalışmada, öncelikle kullanılan agregalara ait yassı ve uzun malzeme miktarları ASTM D 4791 standardına göre belirlenmiş olup Image-J paket programı ile de bazı şekil özellikleri (yassılık ve uzunluk değeri, küresellik ve şekil faktörü) tanımlanmıştır. Texas, Rockville, Bladensburg ve Churchville için yassı ve uzun malzeme miktarları sırasıyla %5.1, %12, %6.5 ve %16.8'dir. Görüntü analiz sonuçları ile elde edilemeyen köşellilik ve pürüzlülük değerleri agregalar üzerinde yapılan gözlemlere dayalı olarak yorumlanmıştır. Farklı dane boyutlarındaki agregalar üzerinde çekilen fotoğraflar Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Agregat tiplerine ait (soldan sağa sırasıyla) 25.4-19.0mm, 19.0-12.7 mm ve 12.7-9.5 mm boyutlarındaki agrega fotoğrafları:  
(a) Texas (b) Rockville (c) Bladensburg (d) Churchville

Şekil 1 incelendiğinde Bladensburg agregasının en büyük köşelilik değerine sahip olduğu, Texas, Rockville ve Churchville'in ise keskin olmayan köşelere sahip olduğu görülmektedir.

Agregaların, sıkıştırma yöntemleri ve GAB numunelerinin mekanik davranışı açısından önemli olan birim hacim ağırlık ve su emme yüzdeleri, agrega şekil özellikleri (kırılmışlık yüzdesi, yassı ve uzun malzeme yüzdesi vs.), agrega dayanım özellikleri (Los Angeles Aşınma, Mikro-Deval vs.) ve dane çapı dağılımları belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda belirlenen agrega fiziksel özellikleri Çizelge 1'de, GAB'lere ait dane çapı dağılımları ise Şekil 2'de verilmiştir.

## 2.2. DeneY Yöntemleri

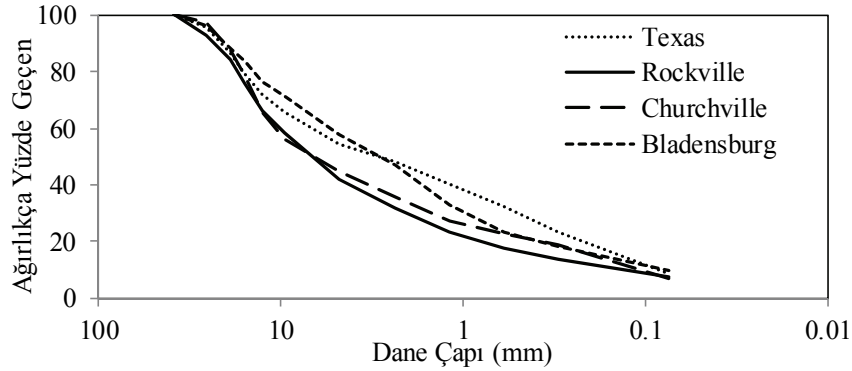
Herbir GAB malzemesi için birim hacim ağırlık-su muhtevası ilişkisi modifiye proktor (ASTM D1557-Method D, AASHTO T180) ve titreşimli kompaksiyon (ASTM D7382-Method A) deneY yöntemleri ile ayrı ayrı belirlenmiştir. GAB malzemelerindeki gradasyon değişimlerini belirlemek için her iki kompaksiyon yöntemi için kompaksiyon öncesi ve sonrasında elek analizi deneyleri yapılmıştır. GAB malzeleri üzerinde AASHTO T-193 ve ASTM D 1883 standartlarına uygun olarak CBR deneyleri yürütülmüştür.

Çizelge 1. Kullanılan agregalara ait bazı fiziksel özellikler

Özellikler	Deney Standardı	Agrega Cinsi								*Limit Değerler
		A		B		C		D		
Aşınma Kaybı (Los Angeles, %)	ASTM C 131	53.0		16.4		23.6		26.9		50
Aşınma Kaybı (Micro-Deval, %)	ASTM D 327	24.8		21.9		7.6		18.5		25
Sağlamlık (Na SO <sub>4</sub> ), maks.(%)	ASTM C 88	0.5		1.6		1.1		2.2		8
Yassı ve Uzun Tane Oranı, maks. (%)	ASTM 4791	5.1		12.0		6.5		16.8		25
Hacim Özgül Ağırlığı	ASTM C 127	Kaba	İnce	Kaba	İnce	Kaba	İnce	Kaba	İnce	
		2.78	2.65	2.75	2.42	2.81	2.64	2.99	2.88	
Su Emme Değeri, maks. (%)	C 128	Kaba	İnce	Kaba	İnce	Kaba	İnce	Kaba	İnce	
		0.40	1.75	0.72	2.33	0.55	3.09	0.49	0.89	

Not: A=Texas(Mermer), B=Rockville (Bazalt), C=Bladensburg (Kireçtaşı), D=Churchville (Gnays)

\* Maryland Depart. of Transportation Standard Specifications for Construction and Materials (2010)



Şekil 2. GAB malzemelerine ait gradasyon eğrileri

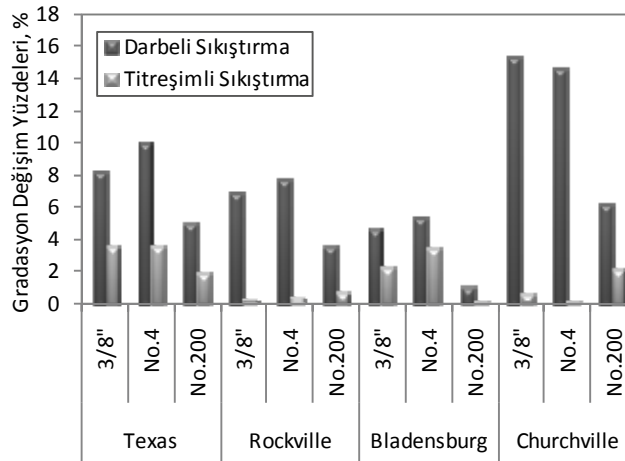
Esneklik modülü deneyleri karayolu üstyapısı temel ve alt temel malzemelerinin esneklik modülü değerinin belirlenmesi için AASHTO T 307-99 standardı [4] doğrultusunda Tip 1

zemin sınıfı için gerçekleştirilmiştir. NCHRP 1-28A [5] temel malzemelerinin tasarım  $M_R$  değerini hesaplamak için 34.5 kPa çevre basıncı ve 103.4 kPa deviator gerilmenin kullanılmasını tavsiye etmektedir. Bu gerilmeler için toplam gerilme 208 kPa ve oktahedral gerilme 48.7 kPa'dır. Bu gerilmelere karşılık gelen ana esneklik modülü (summary resilient modulus,  $SM_R$ ) her bir deney için hesaplanmıştır.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Kompaksiyon Deney Sonuçları ve Agrega Kırılma Oranları

Bu çalışmada kullanılan GAB malzemeleri için modifiye darbeli kompaktör ve titreşimli kompaktör ile belirlenen su muhtevası ve birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Şekil 3'teki grafikte ise her bir GAB malzemesi için darbeli ve titreşimli kompaksiyon sonrasında 9.5mm (3/8"), #4 ve #200 eleklerinden geçen agrega yüzdelerindeki farklar görülmektedir. Çizelge 2 ve Şekil 3'e göre darbeli sıkıştırma esnasında agregada meydana gelen kırılma miktarına bağlı olarak su muhtevası değerlerinin etkilendiği söylenebilir.



Şekil 3. GAB malzemeleri için darbeli ve titreşimli kompaksiyon sonrasında agrega yüzdelerindeki farklar

Malzeme gradasyonları Bladensburg haricinde önemli derecede değişimler sergilememektedir. Bu durum petrografik özelliklerine bağlı olarak micro-deval değeri %7.56 ve yassı - uzun dane oranı %6.5 olan Bladensburg malzemesinin darbe etkisine karşı daha dayanıklı olduğunu göstermektedir. Ayrıca Bladensburg malzemesinin diğerlerine göre az olan kaba agrega yüzdesi (%35) bu sonucu doğuran diğer bir etkidir. Yassı ve uzun malzeme miktarı %5.1 olmasına rağmen Texas agregasındaki kırılma miktarının fazla olması sertlik derecesi düşük olan kalsit bileşiğine (%83 oranında) bağlıdır. Churchville agregasında sertlik değeri yüksek olan bileşikler bulunmasına rağmen Çizelge 1'den görüleceği üzere en

yüksek yassı ve uzun agrega miktarına sahip olmasından dolayı kırılma miktarı yüksek elde edilmiştir.

### 3.2. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deney Sonuçları

Statik yükleme ile belirlenen dayanımın göstergesi olan CBR deney sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir. Titreşimli kompaksiyon yöntemi ile daha efektif sıkışma elde edilmektedir. CBR değerini etkileyen en büyük özellik agrega morfolojisidir. Yapılan morfolojik analizler ve Şekil 1’e bakıldığı zaman Bladensburg agregasının kübik ve keskin köşeli, Rockville agregasının ise kübik olmasına rağmen köşelilik değerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca gözle yapılan incelemelere dayanarak Rockville agregasının pürüzsüz bir yüzeye sahip olduğu görülmüştür. Dolayısıyla Bladensburg’ta köşelilik ve yüzey pürüzlülüğü sebebiyle agregalar arası iyi bir kenetlenme sağlanırken, Rockville’de agregalar arası stabilite sağlanamamıştır.

### 3.3. Esneklik Modülü Deney Sonuçları

Titreşimli ve darbeli kompaksiyon yöntemleri kullanılarak hazırlanan deney numuneleri için elde edilen CBR, sıkışma yüzdeleri ( $C_r$ ) ve  $SM_R$  değerleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. GAB malzemeleri için CBR ve  $SM_R$  değerleri

Ocak Adı	Modifiye Darbeli Tokmak					Titreşimli Tokmak				
	$w_{opt}$	$\gamma_k$	CBR	$C_r$	$SM_R$	$w_{opt}$	$\gamma_k$	CBR	$C_r$	$SM_R$
	%	$\frac{kN}{m^3}$	%	%	kPa	%	$\frac{kN}{m^3}$	%	%	kPa
Texas	4.4	24.0	84	99	155	4.0	24.4	148	97	131
Rockville	5.8	23.9	58	99	173	5.1	24.3	68	96	117
Churchville	5.2	24.7	175	99	227	4.6	25.6	200	99	157
Bladensburg	4.9	24.4	121	99	169	4.7	25.2	218	97	187

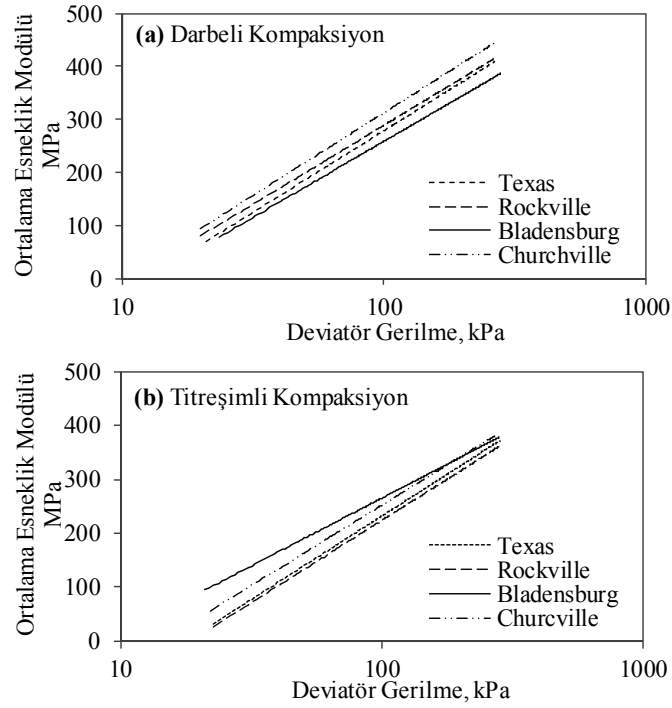
$C_r$ =Kompaksiyon yüzdesi.  $w_{opt}$ =Optimum su muhtevası.  $\gamma_k$ =Maksimum kuru birim hacim ağırlık.

Çizelge 2 incelendiğinde Bladensburg haricinde diğer darbeli kompaktör ile hazırlanan GAB’lerin  $SM_R$  değerleri CBR sonuçlarının aksine titreşimli kompaksiyon ile hazırlanan numunelerden daha yüksek sonuçlar vermiştir. Bladensburg için iki sıkıştırma yönteminin sonuçlarının birbirine oldukça yakın olması agregaların kırılmamasına bağlıdır.

Şekil 4’te deviator gerilmeye karşılık gelen ortalama esneklik modül grafiği verilmiştir. Şekil 4a’da Churchville agregasına ait sonuçlar aynen CBR’da olduğu gibi diğerlerine göre en iyi değere ulaşmaktadır. Bunun nedenini en yüksek kırılma oranına sahip olan Churchville’in bu kırılma neticesinde artan köşelilik değeri ve değişen gradasyonuna

bağlamak mümkündür. Ancak genel olarak  $M_R$  değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Titreşimli kompaktör ile hazırlanan numunelere ait sonuçlarının verildiği Şekil 4b'de en yüksek değerler Bladensburg için elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, esneklik modülü değerleri bir mukavemet göstergesi olmayıp sadece rijitlik hakkında bilgi vermektedir. Örneğin titreşimli tokmak ile hazırlanan numuneler daha yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlığa sahip olmasına rağmen  $M_R$  değerleri daha düşük elde edilmiştir.



Şekil 4. Esneklik modülü deney sonuçları

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, darbeli kompaksiyon yönteminin, agrega petrografik, morfolojik, dayanım ve gradasyon özelliklerine bağlı olarak farklı oranlarda agregaları kırarak GAB malzemelerinin granülometrisini değiştirdiği belirlenmiştir.

Darbeli kompaksiyon yönteminde meydana gelen kırılma miktarı, petrografik özellikler yani agreganın bünyesinde bulunan sertlik derecesi yüksek element oranları, Los Angeles Aşınma ve Mikro-Deval gibi dayanım özellikleri, karışımda bulunan uzun ve yassı malzeme miktarı ve karışımdaki kaba malzeme miktarıyla ilişkilidir. Agrega dane yapısına zarar vermeyen titreşimli kompaktör ile malzemenin gradasyonunu bozmadan daha iyi bir sıkışma elde edildiğini söylemek mümkündür.

Darbeli kompaksiyon yönteminden daha büyük esneklik modülü değerlerinin elde edilmesi, esneklik modülü deneyinin malzemenin performansını temsil etmediğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla malzeme davranışının belirlenmesinde daha sağlıklı sonuçlar elde edebilmek için esneklik modülü deneyi yanında farklı performans deneylerinin yapılması daha doğru olacaktır. Bununla beraber, darbeli kompaksiyon sırasında danelerin kırılması nedeniyle elde edilen fazla su muhtevası, esneklik modülü deneyinde numunelerin davranışını etkilemektedir.

Agrega fiziksel özelliklerinin GAB karışımlarının CBR ve esneklik modülü deney sonuçlarına etkileri açısından bir değerlendirme yapıldığında, karışım granülometrisi ve agrega morfolojisinin agrega dayanımından (Los Angeles Aşınma, Mikro-Deval vs.) daha önemli olduğu belirlenmiştir. Özellikle agregalar arası iyi bir kenetlenmenin sağlanmasında önemli olan uzun ve yassı malzeme miktarı, köşelilik, yüzey pürüzlülüğü ve ince malzeme oranı yüksek olan karışımların daha iyi bir performansa sahip olduğu ortaya çıkmıştır.

**Semboller**

$SM_R$	: Ana esneklik modülü	$M_R$	: Esneklik modülü
$Cr$	: Kompaksiyon yüzdesi	$w_{opt}$	: Optimum su muhtevası
$\gamma_k$	: Maks. kuru birim hacim ağırlığı	CBR	: Kalifornia taşıma oranı

**Teşekkür**

Bu çalışmayı destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), Erciyes Üniversitesi Vakfı ve Maryland State Highway Administration (MSHA)'a teşekkürlerimizi sunarız.

**Kaynaklar**

- [1] Lekarp, F., Isacsson, U. ve Dawson, A. R., State of the art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates, Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 126, No. 1, 66-75, 2000.
- [2] Thompson, M.R., ve K.L. Smith, Repeated Triaxial Characterization of Granular Bases, Transportation Research Record, 1278, 7-17, 1990.
- [3] Sebesta, S., Harris, P. ve Liu, W., Improving Lab. Compaction Methods for Roadway Base Materials, Texas Department of Transportation and Federal Highway Administration, FHWA/TX-07/0-5135-2, 2008.
- [4] AASHTO T307, Determining the Resilient Modulus of Soil And Aggregate Materials, Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing, Washington, D.C., 2005.
- [5] NCHRP, Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final Rep. 1-37A, Part 2, National Research Council, Washington, D.C., 2004.