

MEKANİSTİK AMPİRİK ÜSTYAPI TASARIMINDA ESNEKLİK MODÜLÜNÜN ŞARTNAMELERE UYARLANMASI

A. Gürkan GÜNGÖR¹ Ahmet SAĞLIK¹

ÖZET

Karayolu üstyapılarının projelendirilmesinde, yeni nesil metotlar ampirik deneyler ve metotlardan ziyade, malzemelerin performansı ile doğrudan ilişkili mekanik özelliklerine dayalı olarak geliştirilmektedir. Bu bağlamda, ülkemiz üstyapı projelendirme metodunun yeni teknoloji ve gelişmelere adaptasyonunun sağlanabilmesi için üstyapı malzemelerinin temel mekanik özelliklerinden biri olan esneklik modülünün tespit edilmesi zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Bu amaçla TÜBİTAK 'ın 1007 Programı kapsamında desteklenerek yürütülen proje kapsamında; Türkiye'nin bütün bölgelerinden değişik zemin koşullarını temsil edecek şekilde toplanan alttemel, temel ve taban zemini malzemeleri ile farklı agrega ve bitümlerle hazırlanan bitümlü sıcak karışım tabakaları üzerinde, esneklik modülü deneyi ile birlikte malzemelerin diğer fiziksel özelliklerine yönelik deneyler de yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, esneklik modülü ile ilgili bağıntılar ortaya konulmuş, Karayolu Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi buna göre yenilenerek yayınlanmıştır. Bu bildiriye yapılan çalışmaların detayları hakkında bilgi verilmiştir.

1. GİRİŞ

Karayolu maliyetlerinin büyük bir kısmını teşkil eden yol üstyapılarının performansı büyük ölçüde yol üstyapısını oluşturan malzemelerin özelliklerine, trafik yüküne, çevre ve iklim koşullarına bağlıdır. En ekonomik, en güvenilir ve servis kabiliyeti en yüksek bir üstyapının teşkili ise, o üstyapının maruz kalacağı trafik ve çevre koşullarının iyi bir şekilde tahmini ve bu koşullar altında üstyapı tabakalarının davranışını önceden modelleyebilmekle mümkün olabilir.

Üstyapıların modellenmesinde projelendirme metodu olarak ASSHTO 'nun 1960' lı yıllarda 2 yıl süre ile gerçekleştirdiği yol testlerinden elde ettiği verilere göre, ilkinin 1960 yılında, daha sonra ise bunun devamı niteliğinde 1972 yılında yayınladığı geçici rehber son yıllara kadar Ülkemizde geleneksel olarak kullanılmıştır. Bu metotlar ampirik olup, metodun oluşturulmasında sınırlı sayı ve konfigürasyonda trafik ile tamamıyla yerel malzemelerden ve çevresel şartlardan elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu metotta malzemelerin dayanım özellikleri, bağlayıcısız granüler malzemeler için (temel, alttemel, seçme malzeme, taban zemini) Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakaları için ise Marshall Stabilesi değerlerine dayandırılmış olup, bu deneyler statik yüklemeye altında yapılmaktadır.

1. İnş. Yük. Müh., KGM, TADB, Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara

Oysaki gerçek arazi koşullarında yol üstyapısı statik yükten ziyade, sürekli olarak dinamik yüklemelere maruz kalmaktadır. Aynı zamanda üstyapıya etkiyen yükler sabit olmayıp, yükleme koşulları çok değişkenlik arz etmektedir.

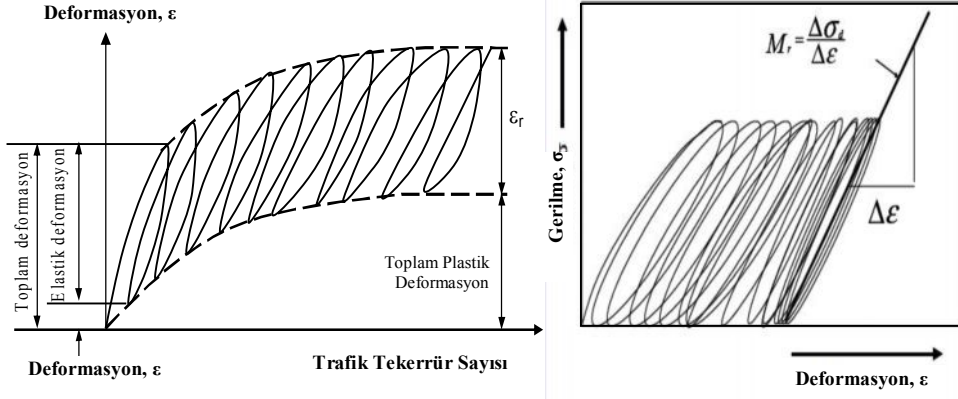
Diğer taraftan, üstyapı teknolojisi özellikle son yıllarda hızlı bir şekilde gelişmekte, yol üstyapısında kullanılan malzemeler çok çeşitlilik göstermektedir. AASHTO yol testlerinin yapıldığı 1960'lı yıllar ile günümüz koşulları karşılaştırıldığında hem üstyapılarda kullanılan malzemeler, hem de yollarda seyir eden taşıt dingillerinin cins ve ağırlıkları kıyas götürmeyecek derecede farklılaşmış durumdadır. Bu kadar çeşitlilik arz eden malzemenin çok değişken trafik yükleri altındaki davranışını ve dolayısıyla üstyapının performansını tek bir CBR değeri ile öngörebilmek olanaklı değildir. Bu modelleme ancak, üstyapı tabakalarının yüklemeler altındaki tepkisini (response), defleksiyon davranışını ve buna bağlı olarak bozulma karakteristiklerini ortaya koyabilmekle mümkündür.

Bu nedenlerle AASHTO, 1986 yılında çıkardığı projelendirme rehberinde üstyapının performansını CBR yerine hem bağlayıcısız granüler malzemeler, hem de bitümlü sıcak karışımlar için esneklik modülü olarak adlandırılan değerle ilişkilendirmiştir. Esneklik modülü (resilient modulus) kısaca, bir malzemenin tekrar eden yük altındaki elastiklik modülüdür. Statik bir yükleme yerine tekrarlı bir yük uygulanmaktadır. Bu nedenle, esneklik modülü yol üstyapılarının trafik yükleri etkisindeki davranışını daha iyi temsil etmektedir. AASHTO 1993 ve daha sonra 1998 yıllarında yayınladığı rehberlerle özellikle üstyapıların bakım ve onarımı ile ilgili ilaveler yaparak, üstyapı takviye tabakalarının projelendirmesinde malzeme parametresi olarak esneklik modülünü kullanmıştır. Şu anda ise, üstyapı projelendirme yöntemi olarak, yol performansının üstyapı tabakalarında meydana gelen gerilme ve deformasyonlara bağlı olarak tespit edildiği mekanik-ampirik projelendirme metotları üzerinde çalışılmaktadır. Bu metotta da gerilme ve deformasyonların hesaplanabilmesi için yine esneklik modülüne ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu doğrultuda Karayolları Genel Müdürlüğü üstyapı projelendirme yöntemindeki hedefini önce AASHTO 1993, daha uzun vadede ise mekanik-ampirik yöntemlere geçiş olarak belirlemiş ve bu hedef doğrultusunda ilk basımı 2006 'da yapılan, 2008 'de ise revize edilen, ASSHTO 1993 yöntemini esas alan Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi yayınlanmıştır. Bu hedeflere ulaşabilmek için, öncelikle esneklik modülünün ülkemiz zemin koşulları için belirlenmesi ve zeminin diğer özellikleri ile esneklik modülü arasında bir ilişkinin ortaya konulması ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Zira esneklik modülleri laboratuvar ve/veya arazi deneyleri yardımıyla bulunabilmekle beraber, bu deneylerin oldukça karmaşık ve hassas olması, konu ile ilgili bilgi ve tecrübe gerektirmesi, deney aletlerinin pahalı ve merkezi bir laboratuvar ortamı gerektiriyor olması gibi uygulama zorlukları nedeniyle malzemelerin esneklik modüllerinin kolay ve rutin olarak tespit edilebilen diğer fiziksel özellikleri ile ampirik korelasyonlar kurularak tahmin edilmesini gerekli kılmaktadır. Bu amaçla TÜBİTAK'ın 1007 " Kamu Kurumları Araştırma ve Geliştirme Projelerini Destekleme Programı" kapsamında desteklenen 105G021 Nolu "Mekanistik-Ampirik Yol Üstyapı Tasarımında Esneklik Modülünün Şartnamelere Uyarlanması" konulu proje yürütülerek, malzemelerin diğer fiziksel özellikleri ile esneklik modülü arasındaki ilişki ortaya konularak, 2008 yılında yayımlanan Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'nde uygulamaya konmuş olup, bu bildiride yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçları hakkında bilgi verilmiştir.

2. ESNEKLİK MODÜLÜ (RESILIENT MODULUS, M_R)

Esneklik modülü, bir malzemenin tekrar eden yük altındaki elastiklik modülü olup, üstyapı tabakalarında yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Esneklik modülü, kaplamanın altında trafik etkisiyle meydana gelen ve yorulma çatlaklarına neden olan çekme gerilmelerinin ve üstyapı tabakalarında oluşan basınç gerilmesinin neden olduğu kalıcı deformasyonları kontrol eder. Tek eksenli dinamik yükleme altındaki esneklik modülü genel olarak maksimum gerilmenin maksimum birim şekil değiştirmeye oranıdır. Üstyapı malzemeleri normal olarak elastik değildir ve her yük tekrardan sonra bir miktar plastik (kalıcı) deformasyon gösterir. Bununla beraber, eğer trafik yükü malzemenin mukavemetine nazaran küçük ise, belirli sayıda yük tekrardan sonra malzeme elastik davranış göstermeye başlar.



Şekil 1: Üstyapı malzemelerinin tekrarlı yükler altındaki davranışı ve esneklik modülü

Yukarıdaki şekil bir numunenin tekrarlı yükler etkisi altında deformasyon eğrisini göstermektedir. Şekilde de görüldüğü gibi, esneklik modülü deneyinde tekerrür eden yükler altında başlangıçta plastik deformasyonlar oldukça fazla oranda gelişirken, tekerrür eden yük sayısı arttıkça plastik deformasyonun artışı giderek azalmakta ve yaklaşık olarak 100-200 yük tekrardan sonra elastik davranış görülmektedir. Üç eksenli ve tekerrürlü yük şartlarındaki deviator gerilme ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$) ve elastik deformasyon (ϵ_r) değerleri için test edilen malzemenin esneklik modülü, M_R ;

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \dots\dots\dots(1) \text{ formülü ile bulunur.}$$

3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Proje kapsamında esneklik modülü deneyinin yapılabilmesi için tüm Türkiye' nin farklı malzeme koşullarını temsil etmek amacıyla Karayolları Genel Müdürlüğü'ne bağlı 17 tane Bölge Müdürlüğü'nün tamamı ziyaret edilerek 171 adet farklı temel, alttemel ve taban zemini malzemesinden toplam 42,75 ton numune toplanmıştır. Bu

malzemeler üzerinde aşağıda adı ve standardı verilen deneyler uygulanmıştır.

Deneyin Adı	Deneyin Standardı
Esneklik Modülü Deneyi	AASHTO T 307 (1999)
Kalifornia Taşıma Oranı (CBR) Deneyi	AASHTO T 193 (1999)
Standart Proctor Deneyi	AASHTO T 99 (2001)
Modifiye Proctor Deneyi	AASHTO T 180 (2001)
Plastik Limit Deneyi	ASHTO T 90 (2005)
Likit Limit Deneyi	AASHTO T 89 (2005)
Elek Analizi	AASHTO T 27 /11(2005)

Daneli malzemeler üzerinde AASHTO T 307 standardına göre esneklik modülünü yapabilmek için numuneler öncelikle Tip-1 (kaba taneli) ve Tip-2 (ince taneli) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Buna göre; 2 mm (No.10) elekten %70'ten azı, 75µm(No.200) elekten %20'den azı geçen ve plastisite indeksi 10 ve daha az olan malzemeler Tip-1 olarak, bunun dışında kalan malzemeler ise Tip-2 olarak sınıflandırılmaktadır. Tip-1 malzemeler titreşimli tokmak metodu metoduna göre 150 mm çaplı, Tip-2 malzemeler ise Standart Proctor metoduna göre 100 mm çaplı silindirik kalıplarda sıkıştırılarak deney için hazırlanmıştır.

Daneli malzemelerin esneklik modülü gerilme şartlarına göre değiştiğinden, deneyde koşullandırma seviyesinden sonra Tip-1 ve Tip-2 malzemeler için farklılık gösteren 15 değişik yanal ve eksenel yük seviyesinde üç eksenli olarak yükleme yapılır. Deneyde; 0.1 s yükleme ve 0.9 s dinlenme periyodu (rest period) olmak üzere toplam 1 s aralıklarla, her bir yükleme seviyesi için 100 adet tekrarlı bir yük uygulanmakta ve 100 tekrarlı yüklemdeki son 5 yüklemeye ait esneklik modüllerinin ortalaması o yük seviyesine ait esneklik modülü olarak kaydedilmektedir.

Mekanistik metotların ve 1993 AASHTO projelendirme metodunun uygulanabilmesi için bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakalarının da esneklik modüllerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında ülkemizde yaygın olarak kullanılan BSK tiplerinin esneklik modülleri de deneysel olarak belirlenmiştir.

Esneklik modülü gerilme seviyesine bağlı olan bağlayıcısız granüler malzemelerden farklı olarak BSK malzemeleri esneklik modülü bakımından değişik gerilme seviyelerine karşı daha kararlı bir davranış sergilerler. Belli bir BSK tabakalarının esneklik modülü daha çok sıcaklık ve yükleme frekansına bağlı olarak değişmektedir.

Bu çalışmada, ülkemizde sıklıkla kullanılan Asfalt Betonlu Aşınma, Taş Mastik Asfalt (TMA), Binder ve Bitümlü Temel tabakaların farklı agregası ve bitüm sınıfları ile sıcak karışım biriketleri hazırlanarak esneklik modülleri tayin edilmiştir. Buna göre, agregası olarak asfalt betonu aşınma numunesinde hem kireçtaşı hem bazalt; TMA numunesinde sadece bazalt, binder ve bitümlü temel numunelerinde ise sadece kireçtaşı kullanılmıştır. Bitüm olarak ise asfalt betonu aşınma ve TMA numunelerinde hem normal (B 50/70), hem de %5 SBS katkılı polimer modifiye bitüm (PMB); binder ve bitümlü temel numunelerinde ise sadece normal bitüm (B 50/70) kullanılmıştır. Bu seçimler yapılırken, bazalt ve modifiye bitümün ülkemizde genellikle yüzey tabakalarında kullanılıyor olması dikkate alınmıştır.

Tablo 1: Esneklik modülü belirlenen BSK numuneleri

	Aşınma		Taş Mastik Asfalt		Binder		Bitümlü Temel	
	B 50/70	PMB (%5SBS)	B 50/70	PMB (%5SBS)	B 50/70	PMB (%5SBS)	B 50/70	PMB (%5SBS)
Bazalt	X	X	X	X	-	-	-	-
Kireçtaşı	X	X	-	-	X	-	X	-

Hazırlanan numunelere esneklik modülü deneyi NCHRP Project 1-28A “Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design” standardına göre yapılmıştır. Buna göre öncelikle 15 cm çapındaki kalıplarda yoğurmalı sıkıştırıcı (gyratory compactor) ile sıkıştırılan biriketler yanlarından kesilerek 5 cm kalınlığında 15 cm çapında numuneler hazırlanmıştır. Her iki yanına yatay ve düşey deformasyon ölçerler yerleştirilen ve 25°C deney sıcaklığında kararlı hale gelen numunelere, yükleme süresi 0.1 saniye, dinlenme süresi (rest period) 0.9 saniye olmak üzere, toplam 1 saniye aralıklarla tekrarlı bir haversine yük uygulanmıştır. Her bir yüklemde numuneye uygulanan toplam yük, tekrarlı yük (cyclic load) ve temas yükünün (contact load) toplamı olup, temas yükü numunenin sabit kalmasını sağlarken tekrarlı yük, esneklik modülünün hesaplandığı esas yüküdür. Burada uygulanan yükün numunenin elastik sınırları içerisinde kalması istendiğinden, tekrarlı yük o numunenin bulunan indirekt çekme dayanımının %15 ‘i, temas yükü ise tekrarlı yükün %4’ü olarak seçilmiştir. 100 adet ön yüklemmeden sonraki 5 adet yüklemeye ait esneklik modüllerinin ortalaması numunenin o yöndeki esneklik modülü olarak, her iki yöndeki esneklik modüllerinin ortalaması ise o numunenin esneklik modülü olarak belirlenmiştir.

4. VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Granüler malzemeler için esneklik modülünün istatistiksel analizi

Esneklik modülü granüler malzemelerde, malzeme üzerine etkiyen gerilmenin bir fonksiyonu olup, kum-çakıl malzemeleri genellikle gerilme artışı ile sertleşen (stress hardening), ince malzemeler ise gerilme artışı ile yumuşayan (stress softening) malzemeler olarak bilinir. Granüler malzemeler üzerinde yapılan esneklik modülü deneylerinde edilen sonuçlarda en yüksek korelasyonun aşağıdaki “Pezo Modeli” olarak bilinen (2) modelde elde edildiği görülmüştür.

$$\text{Rafael Pezo: } M_R = k_1 \sigma_d^{k_2} \sigma_3^{k_3} \quad (2)$$

- M_R : Esneklik modülü
 k_1, k_2, k_3 : Regresyon katsayıları
 σ_d : Deviator gerilme
 σ_3 : Çevresel basınç

Buna göre Pezo Modelinde gerilme değerleri, çok tabakalı elastik model kullanılarak WINJULEA programı yardımı ile bulunmuştur. Bunun için dingil yükü olarak 8.2 ton, teker basıncı olarak ise 100 psi değerleri alınmıştır. Laboratuarda belirlenen esneklik modülleri, malzemelerin diğer fiziksel özellikleri, yanal gerilme (σ_3) ve deviator gerilme (σ_d) ile beraber istatistiksel olarak analiz edilerek bütün malzeme grupları için $R^2=0.682$ korelasyon katsayısı ile aşağıdaki bağıntı bulunmuştur.

$$M_R = 10^{4.88} \cdot \sigma_d^{0.436} \cdot \sigma_3^{0.436} \cdot \text{CBR}^{0.512} \cdot \left(\frac{1}{1 + \log(\text{No}200)} \right)^{0.413(\text{LL} \cdot \text{PI} + 1)^{0.0709}} \cdot \left(\frac{\gamma_{\text{maks}}}{\text{No}4} \right)^{0.106 \log(\omega_{\text{opt}})} \quad (3)$$

$$R^2=0.682$$

Bu formüldeki yanal gerilme (σ_3) ve deviator gerilme (σ_d) değerleri de, yine esneklik modülü üstyapı kalınlığına bağlı olduğundan, gerilme formülleri ile gerekli dönüştürmeler yapılarak, esneklik modülü için kalınlığın bir fonksiyonu olarak aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$M_R = 10^{4.479} \cdot (D_{\text{BSK}} + k)^{0.436} \cdot \text{CBR}^{0.435} \cdot \left(\frac{1}{1 + \log(\text{No}200)} \right)^{0.35(\text{LL} \cdot \text{PI} + 1)^{0.06}} \cdot \left(\frac{\gamma_{\text{maks}}}{\text{No}4} \right)^{0.09 \log(\omega_{\text{opt}})} \quad (4)$$

Burada;

M_R	: Esneklik modülü, psi
D_{BSK}	: Bitümlü sıcak karışım tabakalarının toplam kalınlığı, cm
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı, %
ω_{opt}	: Optimum rutubet, %
γ_{maks}	: Maksimum kuru birim ağırlık, g/cm^3
LL	: Likit limit, %
PI	: Plastisite İndeksi, %
No200	: 200 Nolu elekten geçen malzeme yüzdesi
No4	: 4 Nolu elekten geçen malzeme yüzdesi

Bu formüldeki esneklik modülü, optimum rutubet ve maksimum kuru birim ağırlığında laboratuvar ortamında sıkıştırılmış bir numunenin ideal esneklik modülüdür. Oysaki, gerçek arazi koşullarında zemin esneklik modülü yeraltı suyu değişimi, donma çözülme gibi olaylar nedeniyle yıl içerisinde mevsimlere bağlı olarak sürekli değişmektedir. Bu nedenle laboratuvarda bulunan ideal esneklik modülününün mevsimsel bir hasar faktörü ile azaltılması gerekmektedir. İdeal ve düzeltilmiş esneklik modülü arasındaki bu hasar faktörü yaş CBR değerinin, kuru CBR değerine oranı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{M_{\text{Reff}}}{M_{\text{Rideal}}} = \frac{\text{CBR}_{\text{yaş}}}{\text{CBR}_{\text{kuru}}} \implies M_{\text{Reff}} = M_{\text{Rideal}} \frac{\text{CBR}_{\text{yaş}}}{\text{CBR}_{\text{kuru}}} \quad (5)$$

M_{Reff}/M_{Rideal} ile $CBR_{yaş}/CBR_{kuru}$ oranına bağlı hasar faktörü arasında istatistiksel olarak aşağıdaki bağımlı bulunmuştur.

$$\frac{M_{Reff}}{M_{Rideal}} = 10^{1.235} \cdot CBR_{yaş}^{0.838} \quad R^2=85.1 \quad (6)$$

(5) ve (6) nolu bağıntılar düzenlenerek düzeltilmiş esneklik modülü için aşağıdaki genel formül elde edilmiştir.

$$M_R = 1750 (D_{BSK} + k)^{0.436} \cdot CBR^{0.4} \cdot \left(\frac{1}{1 + \log(No/200)} \right)^{0.35(LL \cdot PI + 1)^{0.06}} \cdot \left(\frac{\gamma_{maks}^2}{No^4} \right)^{0.09 \log(\omega_{opt})} \quad (7)$$

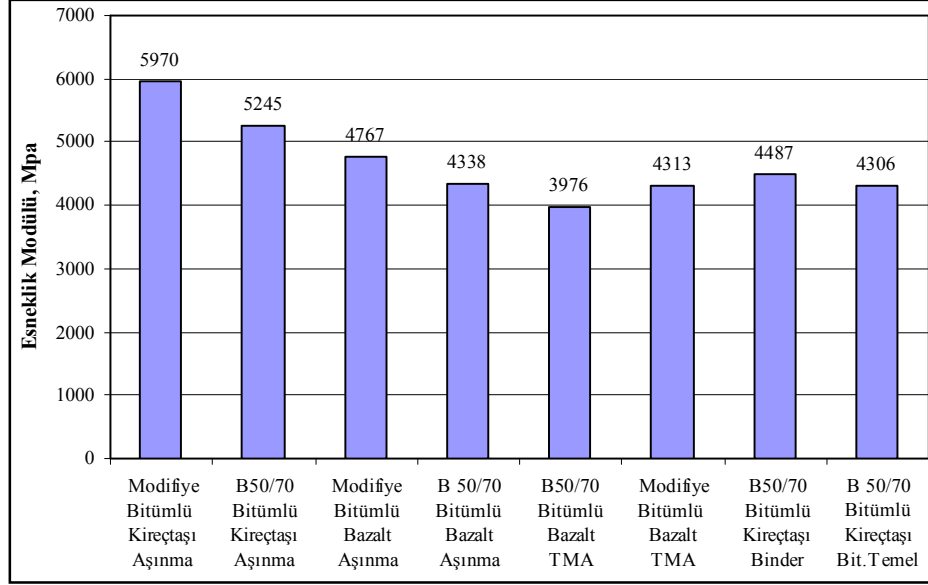
Bu genel formülde, $(D_{BSK}+k)$ ifadesi üstyapı tabakasının bulunduğu derinliğe bağlı olarak gerilme seviyelerinin değişimini temsil etmektedir. D_{BSK} toplam BSK kalınlığı olup, tek kat sathi kaplamalı yollarda 2 cm, çift kat sathi kaplamalı yollarda ise 4 cm alınır. Derinlik düzeltme faktörü k ise tabaka cinsi ve üstyapı kesit tipine göre Şekil 2'den seçilir.

Tabaka	k (cm)	Tabaka	k(cm)	Tabaka	k (cm)	Tabaka	k (cm)
BSK	-	BSK	-	BSK	-	BSK	-
Temel	0 cm	Temel	0 cm	Temel	0 cm	Temel	0 cm
Alttemel	0 cm	Taban Zemini	0 cm	Alttemel	0 cm	Seçme Malzeme	0 cm
Taban Zemini	17 cm			Seçme Malzeme	17 cm	Taban Zemini	17 cm
				Taban Zemini	30 cm		
(1)		(2)		(3)		(4)	
Tabaka	k (cm)	Tabaka	k (cm)	Tabaka	k (cm)	Tabaka	k (cm)
Sathi Kap.	-	Sathi Kap.	-	Sathi Kap.	-	Sathi Kap.	-
Temel	15 cm	Temel	15 cm	Temel	15 cm	Temel	15 cm
Alttemel	15 cm	Taban Zemini	15cm	Alttemel	15 cm	Seçme Malzeme	15 cm
Taban Zemini	32 cm			Seçme Malzeme	32 cm	Taban Zemini	32 cm
				Taban Zemini	45 cm		
(5)		(6)		(7)		(8)	

Şekil 2 : Üstyapı kesit tipine göre derinlik düzeltme faktörleri (k)

4.2 BSK tabakaları için elde edilen esneklik modülünün değerlendirilmesi

Bitümlü sıcak karışım tabakaları üzerinde yapılan esneklik modülü deneylerine ait sonuçlar aşağıda grafik olarak verilmiştir.



Şekil 3: BSK tabakalarına ait esneklik modülü değerleri

Elde edilen deney sonuçlarına göre, BSK tabakaları esneklik modülünün tahmini için, dinamik modülünün belirlenmesinde kullanılan Witzack formülünden eşdeğer frekans (4 Hz) değeri için aşağıdaki bağıntı türetilmiştir.

$$\log E^* = 3.75 + 0.029 \text{No}200 - 0.00177 \text{No}200^2 - 0.0028 \text{No}4 - 0.058 V_h - 0.8 \left(\frac{V_b}{V_b + V_h} \right) \quad (8)$$
$$+ \frac{3.87 - 0.0021 \text{No}4 + 0.004 \text{No}3/8 - 0.000017 \text{No}3/8^2 + 0.0055 \text{No}3/4}{1 + e^{-2.56 + 0.89 \log(\text{pen}) - 0.0015 [\log(\text{pen})]^2}}$$

Burada ;

- E* : Dinamik modül, psi
- V_h : BSK'nın boşluk oranı, %
- V_b : BSK'nın bitüm yüzdesi, %'e
- pen : Bitümlü bağlayıcının penetrasyonu, 0.1 mm
- No200 : 200 Nolu elekten geçen malzeme yüzdesi,
- No4 : 4 Nolu elek üzerinde kalan malzeme yüzdesi,
- No3/8 : 3/4 Nolu elek üzerinde kalan malzeme yüzdesi,
- No3/4 : 3/4 Nolu elek üzerinde kalan malzeme yüzdesidir.

5. SONUÇLAR

Belirli tipteki malzemelerin statik (durağan) yükler altında davranışını esas alan eski projelendirme yöntemi (AASHTO 1972), günümüz teknolojik gelişmesine bağlı çeşitlilik arz eden malzemeleri ve güncel trafik şartlarını temsil edemez duruma geldiğinden; ülkemiz projelendirme şartnamelerini daha ileriye götürebilmek için hem AASHTO 1993, hem de yeni Mekanistik-Ampirik projelendirme metodunun gerekli kıldığı ve malzemelerin dinamik yükler altındaki davranışını temsil eden esneklik modülünün belirlenmesi bir gereklilik olarak ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, ülkemizdeki karayolu üstyapılarında kullanılan malzemelerin esneklik modüllerinin belirlenmesi ve şartnamelere kazandırılması için TÜBİTAK destekli bir proje yürütülmüştür. Bu kapsamda, Türkiye'nin hemen her tarafından temin edilen pek çok çeşit üstyapı malzemesi üzerinde esneklik modülü ile birlikte likit limit, plastik limit, CBR ve kompaksiyon deneyleri yapılmış olup, elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak analiz edilip, esneklik modülü ile malzemenin diğer özellikleri arasındaki bağıntı kurularak, esneklik modülünün kolayca tespit edilebilmesi sağlanmıştır. Aynı zamanda farklı tipteki bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakaların da esneklik modülü deneysel olarak tespit edilmiş ve buna yönelik bağıntılar ortaya konularak üstyapı projelendirmesinde kullanımı sağlanmıştır.

Bu çalışma sonunda, Karayolu Esnek üstyapılar Projelendirme Rehberi esneklik modülünün esas alındığı AASHTO 1993 'e göre düzenlenerek 2008 yılında uygulamaya konmuştur. Esneklik modülüne dayanan rehberle beraber üstyapı tabaka kalınlıkları yenilenerek, tüm Ülkemiz karayollu uygulamalarında kullanımı sağlanmış, üstyapıların daha gerçekçi modellenmesi ile büyük bir ekonomi de sağlanmıştır. Aynı zamanda, Ülkemizde esneklik modülünün tespitine yönelik ilk defa bu projeye gerçekleştirilen çalışma ile birlikte hem konu ile ilgili bilgi ve tecrübe artırılmış, hem de ülkemiz malzeme koşullarını temsil eden önemli bir veri tabanı oluşturulmuştur. Proje sonuçları 18. Bilim ve Teknoloji Yüksek Kurulunda katılımcılara aktarılmıştır.

6. TEŞEKKÜR

Çalışma, 105G021 No ile TÜBİTAK' ın 1007 kodlu "Kamu Kurumları Araştırma ve Geliştirme Projeleri Destekleme Programı" kapsamında desteklenmiş olup, projeye 2006 yılında başlanmış ve sonuç raporu 2008 yılında TÜBİTAK tarafından kabul edilmiştir. Yazarlar, desteklerinden başta TÜBİTAK olmak üzere, ODTÜ öğretim üyesi Doç. Dr. Murat Güler' e ve emeği geçenlere teşekkür eder.

7. KAYNAKLAR

1. Nazarian,S., and Feliberti, M., (1993) Methodology for Resilient Modulus Testing of Cohesionless Subgrades. In Transportation Research Record 1406, Washington, D.C. 1993, pp.108-115.

2. NCHRP National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board, (2004) Guide for Mechanistic-Empirical Design of New And Rehabilitated Pavement Structures Material Characterization, Illinois.
3. Pezo, R and Hudson, W. R., (1994) Prediction Models of Resilient Modulus for Nongranular Materials. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 17, No. 3, pp. 349 ~ 355.
4. Rahim, A.M., (2005) Subgrade soil index properties to estimate resilient modulus for pavement design, The International Journal of Pavement Engineering.
5. Seed, H.B., Chan, C.K., and Lee, C.E., (1962) Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements. Proc. 1st International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan.