

## Türkiye'de bitümlü bağlayıcı karışımların dinamik modüllerinin belirlenmesine yönelik farklı yaklaşım

### Different approach for the determination of dynamic modulus of asphalt mixtures in Turkey

Saadoon Obaid EYADA<sup>1\*</sup>, Osman Nuri ÇELİK<sup>2</sup>, Mohammed Ihsan ALDAKUKY<sup>3</sup>

<sup>1</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye.  
saadooneyada@gmail.com, oncelik@selcuk.edu.tr, moh.ihs91@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 06.12.2020  
Kabul Tarihi/Accepted: 27.06.2021

Düzeltilme Tarihi/Revision: 27.04.2021

doi: 10.5505/pajes.2021.38085  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Bitüm, güçlü, yapışkan ve dayanıklı özelliklerinden dolayı değerli bir yapı malzemesi olarak kabul edilmektedir. Bitümlü bağlayıcı viskoelastik bir malzemedir ve farklı iklim koşulları, trafik yükleri ve hız altında farklı davranışlara sahiptir. Bitümlü bağlayıcı karışımlarının Dinamik Modülü ( $E^*$ ), kaplama tasarımında önemli bir faktördür. Dolayısıyla, bu modülün belirlenmesi amacıyla yürütülen araştırmalara dayanarak Türkiye'deki Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), dinamik modülünün belirlenmesi için bir matematik modeli geliştirmiştir. Bu çalışma sırasında, bu modelin farklı iklim koşulları (sıcaklıklar) ve trafik hızları altında  $E^*$  tayini için yeterli olmadığı görülmüştür. Türkiye'de farklı saf ve modifiye bitümlü bağlayıcıların test edilmesi için deneysel bir program yürütülmüştür. Sonuçlar, Türkiye'de (KGM) tarafından tavsiye edilen yeni Mekanistik- Ampirik Kaplama Dizayn Metodu (MAKDM) kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan bu yeni model, bu yeni tasarım yöntemin bir parçasıdır. Türkiye'de,  $E^*$  modülünün belirlenmesi için yeni bir yaklaşım belirlenmiş ve önerilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Dinamik modülü, Türk tipik Kesitleri, Mekanistik-Ampirik kaplama tasarımı.

#### Abstract

Asphalt is considered a valuable construction material because of its strong, adhesive, and durable characteristics. Asphalt binder is a viscoelastic material and has a different behavior under different climate condition and traffic loadings and speed. Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures  $E^*$  is an important factor in pavement design therefore Highway Authority in Turkey has developed a mathematical model for the determination of  $E^*$  based on research conducted for this purpose. During this study, it was found that this model is not sufficient for the determination of  $E^*$  under different climate conditions (temperatures) and traffic speeds. An experimental program has been conducted for testing different typical virgin and modified asphalt binders in Turkey. The results have been analyzed using Mechanistic Empirical Pavement Design Method MEPDM as the new model will be part of this new design method as recommended by Highway Authority in Turkey. A new approach for the determination of  $E^*$  in Turkey has been found and recommended.

**Keywords:** Dynamic modulus, Turkish typical sections, Mechanistic-Empirical design method.

## 1 Giriş

Bitüm, güçlü, yapışkan ve dayanıklı özelliklerinden dolayı değerli bir yapı malzemesi olarak kabul edilmektedir. Bitüm bağlayıcısı viskoelastik bir materyaldir. Davranışı, hem sıcaklığa hem de yükleme hızına bağlıdır. Türkiye'de kıyı bölgelerindeki gibi sıcak iklimlerde veya sürekli yükler altında, bitümlü bağlayıcı, daha viskoz bir sıvı gibi davranır. Öte yandan, Türkiye'de Anadolu bölgesinde olduğu gibi soğuk iklimlerde ya da yüksek hızlı yükler altında, bitüm, daha fazla elastik katı şekilde davranmaktadır. Burada, aşırı yük altında bitümlü bağlayıcı sertleşebilmekte ve çatlayabilmektedir. Bu tür koşullar altında farklı sıcaklık ve yükleme koşullarında (Hız) bitümün davranışı, Bitümlü bağlayıcı kaplama ömrü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu için dikkatle incelenmelidir.

Eski AASHTO 1993 standardı yerine, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) yeni Mekanistik-Empirik Kaplama Tasarım Metodu MAKDM'nin benimsemesini dikkate almıştır. Bu tarihten itibaren, MAKDM'yi izlemek için yapılan bazı yeni girişimler dışında bu maksatla gerçek bir çaba sarf edilmemiştir [1],[5],[6],[7].

### 1.1 Bitümlü bağlayıcıları için matematiksel modeller

İlgili sıcaklıkta bitümlü bağlayıcının viskozitesi, Denklem 1 ile tanımlanan ASTM viskozite sıcaklık ilişkisinden saptanabilir [5].

$$\log \log \eta = A + VTSx \log TR \quad (1)$$

Burada;

- $\eta$  = Viskozite, cP,
- TR = Sıcaklık, rankin derece,
- A = Regresyon kesişmesi,
- VTS = Regresyon eğimi (viskozite sıcaklık duyarlılık parametresi).

Bu ilişki, modifikasyon yüzdelerinin (%2-3) arasında olması şartıyla çok çeşitli saf ve modifiye bağlayıcılara uygulanabilir. Denklem 1, genellikle karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını geliştirmek için 140 °F ve 275 °F'deki viskozite ölçümlerinden elde edilen verilerle kullanılsa da, halka ve bilye Yumuşama Noktası (Softening Point) (SP) ve penetrasyon verileri kullanılarak daha düşük sıcaklıklarda da kullanılabilir. Sonradan Mirza ve Witczak tarafından geliştirilen, Shell tarafından yapılan bir araştırma, çoğu saf bitümlü bağlayıcı için

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

yumuşama noktasının, 13,000 poise'lik bir viskoziteye karşılık geldiğini belirtmektedir. 100 g ve 5 sn. yükleme şartlarını kullanarak yapılan testlerde elde edilen penetrasyonlar, Denklem 2'yi kullanarak viskoziteye dönüştürülebilir [2].

$$\log \eta = 10.5012 - 2.2601 x \log(\text{Pen}) + 0.00389 x (\log(\text{Pen}))^2 \quad (2)$$

Burada;

Pen = 100g, 5 sn. yükleme, 0.10 mm için ölçülen penetrasyon

Böylece, viskozite derecesini bulmak için rutin olarak ölçülen penetrasyon, SP, kinematik ve mutlak viskozite testlerinin bir kombinasyonundan, geniş bir sıcaklık aralığında ki bağlayıcının viskozitesi, Denklem 1 ve 2'den belirlenebilmektedir. Mirza ve Witczak ayrıca, orijinal bağlayıcı maddenin karıştırma ve sıkıştırma sırasında ortaya çıkan kısa dönem yaşlanma ve uzun dönem arazide yaşlanma için viskozite sıcaklık ilişkisini değiştiren denklemler geliştirmişlerdir. Bu denklemler, bağlayıcının yaşlanma potansiyeli, kaplamanın sıcaklığı ve hizmetteki zamanı dikkate almaktadır. Bitümlü bağlayıcının özelliklerinden bitümlü bağlayıcı karışımının kompleks modülünün ( $E^*$ ) ve ilgili faz açısı ( $\delta$ )'nın tahmini, kaplama tasarım prosedüründe önemli bir rol oynamaktadır.

Bitümlü bağlayıcı karışımı kompleks modülünü ( $E^*$ ) tahmin etmek için birden fazla model geliştirilmiştir [4],[7]. Bu modellerin genel olarak (1-5 MPa) aralığındaki bitümlü bağlayıcı karışımın  $E^*$  değerleri için makul bir tahmin sağladıkları kabul edilmektedir. Bu modeller, çeşitli karışım türleri için ve ayrıca çeşitli saf ve polimer modifiye bitümler için geçerlidir. Bitümlü bağlayıcı karışımlarının faz açısı, bitümlü bağlayıcının faz açısı ile kısmen bağlantılıdır. Düşük sıcaklıklarda, bağlayıcının faz açısı, karışımın faz açısı davranışını yansıtmada eğiliminde olmaktadır. Bununla birlikte, iki faz açısı arasında, orta ila yüksek sıcaklıklarda büyük bir sapma görülmektedir. Sıcaklık daha fazla yükseldikçe, bağlayıcının faz açısı, saf viskoz bir malzemeninkine yaklaşmakta olup, 90 dereceye kadar yaklaşacaktır. Witczak ve meslektaşları tarafından araştırmalarla geliştirilen dinamik modülünün tahmin denklemi, mevcut en kapsamlı karışım  $E^*$  modellerinden biridir. Bu model, çeşitli sıcaklık ve yükleme oranlarında bitümlü bağlayıcı karışımlarının  $E^*$  değerini tahmin etme kabiliyetine sahiptir.

Son zamanlarda Witczak ve diğ. Sıcak karışımın Plentte ve arazide oluşan yaşlanma etkisi içerecek şekilde modeli genişletmiştir. Mevcut tahmin denkleminin en gelişmiş hali Denklem 3'te gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} \log E^* &= -1.249937 + 0.02923 x p200 - 0.001767x (p200)^2 \\ &+ 0.002841 x p4 - 0.058097 x Va - 0.82208 x [Vbeff \\ &/ (Vbeff + Va)] + [(3.871977 \\ &- 0.0021 x p4 x 0.003958 x p38 - 0.000017 x (p38)^2 \\ &+ 0.00547 x p34) / [1 \\ &+ e^{-0.603313 - 0.313351 x \log(f) - 0.393532 x \log(\eta)}] \end{aligned} \quad (3)$$

Burada;

$E^*$	=	Dinamik modülü, $10^5$ psi,
$\eta$	=	Bağlayıcı viskozitesi, $10^6$ Poise,
$f$	=	Yükleme frekansı, Hz,
Va	=	hava boşluğu içeriği, %
Vbeff	=	Etkin bağlayıcı içeriği, % hacimce
P34 %	=	kümülatif, 19 mm elek üzerinde kalan
P38 %	=	kümülatif, 9.5 mm elek üzerinde kalan

P4 %	kümülatif, 4.76 mm elek üzerinde kalan
P200 %	P200 0.075 mm elekten geçen

## 1.2 Türkiye'de bitümlü bağlayıcılar için matematiksel modeller

Eski AASHTO 1993 kaplama tasarım yönteminin eksikliklerinden dolayı, Türk Karayolu Teknik Şartnamesinde rapor edilen yeni Mekanistik-Ampirik Kaplama Tasarım Metoduna geçiş dikkate alınmıştır. 2006 yılında Ahmet SAĞLIK ve diğ. tarafından, geleneksel deneylerden  $E^*$ 'nin belirlenmesi için yeni ulusal modelin belirlenmesi amaçlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir [8],[12]. Bu model Denklem 4'te gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} \log E^* &= 3.75 + 0.02923 . p200 - 0.001767 x (p200)^2 \\ &+ 0.002841 . p4 - 0.058097 x Va - 0.82208 x [Vbeff \\ &/ (Vbeff + Va)] + [(3.871977 - 0.0021 x p4 \\ &+ 0.003958 x p38 - 0.000017 x (p38)^2 \\ &+ 0.00547 x p34) / [1 \\ &+ e^{-2.56 - 0.89 x \log(\text{pen}) - 0.0015 x \log(\text{pen})^2}] \end{aligned} \quad (4)$$

Bu projenin ulusal bir proje olarak Türkiye'de Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından (105 G021) proje numarasıyla desteklenmesine ve yeni MAKDM'ye yönelik ilk adımlardan biri olarak kabul edilebilmesine rağmen, sunulan modelin aşağıdakilerden dolayı bazı kısıtlamaları ve kusurları bulunmaktadır:

- 1 Bir bitümlü bağlayıcı B50-70 tipi kullanılmıştır. Bu tip bitümlü bağlayıcı sadece sıcak iklim ve düşük hız koşulu için kullanılmaktadır. Soğuk iklim koşullarını temsil etmek üzere B70-100 bitüm tipinin kullanılması gerektiğini düşünülmektedir,
- 2 21 Km/Saat'e eşit olan 4 Hz yükleme frekansını seçerek gösterilen trafik hızı. Bu, Witczak'a ait orijinal Denklem 3'teki frekans parametresi  $f$  göz ardı ederek çok çeşitli trafik hızlarının devre dışı bırakıldığı anlamına gelmektedir. Bu arada, seçilen hız (4Hz) 21 km/s çok düşük bir hızdır,
- 3 Witczak'a ait orijinal Denklem 3'teki gibi viskozite parametresi yerine denklem 4'deki penetrasyon kullanılmıştır. Viskozite parametresi sıcaklıkla yüksek derecede bağlantılıdır ve farklı sıcaklık ve iklim koşulları altında  $E^*$ 'nin değişimini göstermek amacıyla ASTM A-VTS ilişkisinden hesaplanabilmektedir,
- 4 Kullanılan bitümlü sıcak karışımının sayısı düşüktür. Bu da,  $E^*$  üzerindeki bitümlü bağlayıcı karışımlarının (örneğin, Hava boşlukları, Mineral Agrega'daki Boşluklar) hacimsel parametrelerinin etkisinin belirlenmesinde çok önemlidir.

## 1.3 Problem tanımı

Daha önce bahsedilen nedenlere göre, bitümlü bağlayıcı karışımının  $E^*$  modülünün belirlenmesi için KGM tarafından kullanılan Denklem 4'te gösterilen modelin, farklı iklim koşulları ve trafik hızları altında  $E^*$  modülünün belirlenmesi için yeterli olmadığına inanılmaktadır. Bu arada, bu MAKDM'ye göre kullanılmamaktadır. Bu modelin geliştirilmesi veya bir başka modelin kurulması için çaba gösterilmesi gerekmektedir.

Bu makalede aşağıdakilerin yapılmasına karar verilmiştir:

- 1 Sağlam bir istatistiksel temele sahip olduğu ve büyük veri örnekleme dayandığı için, Bitümlü bağlayıcı karışımının E\* tayini için Witczak'a ait Denklem 3'ün kullanılması. Ayrıca bu denklem, NCHRP 1-37A ve MEPDG programının bir parçasıdır [13],
- 2 Denklem 1'i kullanarak, bitüm viskozitesini ve Türkiye'de kullanılan tipik bitüm tiplerinin A-VTS değerlerini belirlemek. Farklı iklim koşulları ve trafik hızı altındaki viskoziteler, denklem 3 ile aynı iklim koşulları ve trafik hızı altında E\* modülünün belirlenmesi için kullanılacaktır.

## 2 Türkiye'de tipik bitümlü bağlayıcı tiplerinin a-vts değerleri

A-VTS ilişkisi doğrusal olduğu için, ilişkiyi tamamen karakterize etmek için geleneksel bağlayıcı deneylerinden sadece ikisinin (viskozite (kinematik, mutlak, rotasyon), penetrasyon veya yumuşama noktası) ölçüleri gereklidir. Aşağıdaki bölümler, her bir test kategorisi altında üç ölçümü gerçek viskoziteye dönüştürmek için gerekli olan denklemleri sağlamaktadırlar.

### 2.1 Penetrasyon deneyi

Bitümlü bağlayıcı için penetrasyon değeri AASHTO T49-07 [13] ile belirlenmektedir. Bu deneyde, bir bitüm numunesine 5 s boyunca nüfuz etmek için bir (100 g) iğne kullanılmaktadır. Özellik amaçları bakımından tipik olarak kullanılan ölçüm sıcaklığı (25 °C)'dir. Ancak, bu makalede diğer sıcaklıklarda da (4 ve 35 °C) ölçüm yapılmıştır. Penetrasyon değerleri, Denklem 2'de görüldüğü gibi Mirza ve Witczak tarafından önerilen ilişki kullanılarak viskoziteye dönüştürülmektedir.

### 2.2 Halka ve bilye yumuşama noktası (softening Point) (SP) sıcaklık deneyi

AASHTO T53-08 [14] ile ölçüldüğü gibi bitümlü bağlayıcının yumuşama noktası SP, R&BT olarak da bilinmektedir. Konu ile ilgili literatüre göre, Santigrat cinsinden ölçülen bu sıcaklık, bitümlü bağlayıcının 13,000 Poise (1300 Pas) viskoziteye sahip olduğu sıcaklığa karşılık gelmektedir. Bu makalede, bu varsayımın her zaman doğru olmadığı görülmüştür. Bu nedenle her yumuşama noktası sıcaklığında bir viskozite deneyi yapılmıştır. Sonuçlar, yumuşama noktasındaki bağlayıcının viskozitesinin yaklaşık 13,000 Poise (1300 Pas) olduğu varsayımından oldukça farklılık göstermiştir.

### 2.3 Rotasyonel viskozite RV deneyi

Bir Rotasyonel Viskozite RV testi, bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklıklarda (60 °C'den fazla) akış özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır. Ortaya çıkan sıcaklık-viskozite ilişkisi, Bitümlü Sıcak Karışımların (HMA) karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesi için kullanılmaktadır. Bu araştırmada RV deneyi, ASTM (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu 1998) D4402-15'e göre 60, 90, 135 ve 165 °C'de gerçekleştirilmiştir [15].

## 3 Materyal

### 3.1 Saf Bitüm

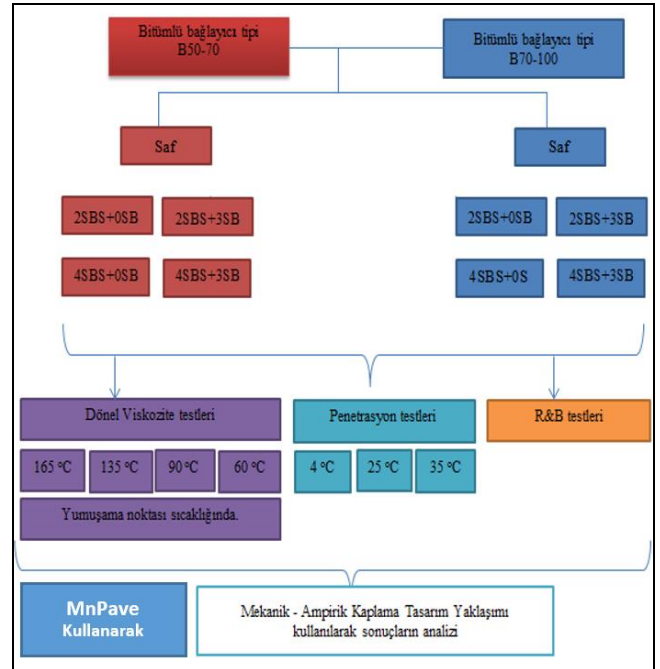
Türkiye'de yerel olarak üretilen iki tip bitüm kullanılmıştır; bunlar sıcak iklim bölgelerinde kullanılan B50-70 bitüm tipi ve soğuk iklim bölgelerinde kullanılan B70-100 tipidir.

### 3.2 Stiren Butadien Stiren SBS

SBS, bitüm reolojik özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılan en ünlü malzemelerden biridir. Bu çalışmada kullanılan SBS, Türkiye'deki Kraton (ABD) şirketinin yerel distribütöründen elde edilmiştir. SBS,% 2 ve % 4'lük saf bitüm ile karıştırılmıştır. Karıştırma sıcaklığı, 180-185 °C'dir. Bitüm modifiye mikseri, 2000 rpm (dakikada devri sayısı) karıştırma hızında kullanılmıştır. 2 saatlik bir karıştırma süresi kullanılmıştır. Tüm karıştırma koşullarında, tedarik edici firmanın önerileri dikkate alınmıştır.

### 3.3 Sasobit SB

SB, Bitümlü bağlayıcı karışımının işlenebilirliğini artırma ve karışım sıcaklığını azaltma yeteneğine sahip olduğundan dolayı, Ilık Karışım Bitümlü bağlayıcı (WMA) uygulamasında kullanılan malzemelerden biridir. Üreten firma tarafından önerilen optimum Sasobit dozajı, bitümün toplam ağırlığının % 3'dür. Sasobit'in erime noktası yaklaşık 85 ila 115 °C'dir (185 ila 240 °F). Bitümde tamamen erimesi için 120-125 °C'de karıştırılmıştır. Deneysel plan Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Deneysel plan.

Figure 1. Implementation plan.

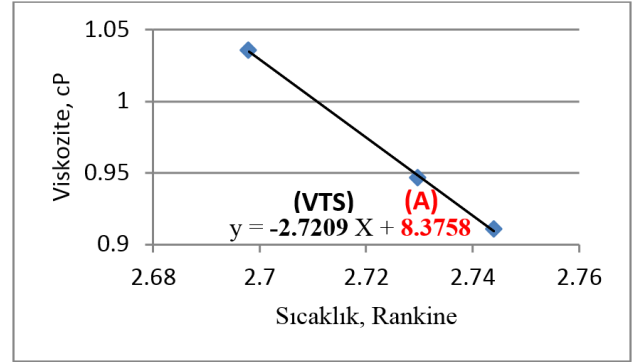
## 4 Sonuçlar

Deney sonuçları, Denklem 1 kullanılarak bitüm viskozitesinin belirlenmesinde büyük bir rol oynayan VTS ve A parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Önceki bölümlerde tartışıldığı gibi, Viskozite değerleri, Denklem 3 kullanarak bitümlü bağlayıcı karışımının E\* modülünün belirlenmesi için kullanılacaktır. A-VTS değerleri tamamen kullanılan deney tiplerine (penetrasyon, SP veya Viskozite) bağlıdır. Bu nedenle, bu deney sonuçlarının farklı kombinasyonu, Penetrasyon (Pen), Yumuşama Noktası (Softening Point) (SP) ve Rotasyonel Viskozite (Vis) deneylerinden oluşarak A-VTS değerlerinin belirlenmesi için kullanılmıştır. A ve VTS parametreleri aşağıdaki kategoriler altında belirlenmiştir:

- Pen: Bu kategoride her bir bitüm modifiyesi için A ve VTS değerleri, 4, 25 ve 35 °C'deki penetrasyon test değerleri kullanılarak belirlenmiştir,
- Pen-SP: Bu kategoride her bir bitüm modifiyesi için A ve VTS değerleri, 4, 25 ve 35 °C'deki penetrasyon test değerlerinin, yumuşama noktası değeri ile bir kombinasyon kullanılarak belirlenmektedir,
- Vis: Bu kategoride her bir bitüm modifiyesi için A ve VTS değerleri, 60, 90, 135 ve 165 °C değerlerinde rotasyonel viskozite sonuçları kullanılarak belirlenmiştir,
- Vis-SP: Bu kategoride her bir bitüm modifiyesi için A ve VTS değerleri, 60, 90, 135 ve 165 °C değerindeki viskozite sonuçları, yumuşama noktası değeri ile bir kombinasyon kullanılarak belirlenmiştir,
- Pen-SP-Vis: Bu kategoride her bir bitüm modifiyesi için A ve VTS değerleri, 4, 25 ve 35 °C'deki penetrasyon değerleri, yumuşama noktası değeri ve 60, 90, 135 ve 165 °C değerlerindeki rotasyonel viskozite sonuçları ile bir kombinasyon kullanılarak belirlenmektedir.

Tablo 1 ve 2'de, her bir kategori altında belirlenen A ve VTS parametrelerinin sonuçları gösterilmektedir.

Bitümlü bağlayıcı B50-70 için Pen yöntemi kullanılarak (4SBS + 0SB) vaka sonucunun örneği Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Vaka (4SBS+0Sb) Pen yöntemi ve Bitümlü bağlayıcı B50-70 kullanılarak sonucu.

Figure 2. Sample of the result of the case (4SBS+0SB) using Pen method for asphalt type B50-70.

A-VTS değerlerinin belirlenmesi için farklı kombinasyon kategorileri oluşturulmuştur. Uygun bir kombinasyon kategorisinin seçilmesi çok önemlidir. Seçilen bu kategoriye ait A-VTS değerleri, viskozitenin belirlenmesi için Türkiye'nin varsayılanları olarak kullanılmaktadır, dolayısıyla farklı koşullar altında E\* modülünün belirlenmesi için kullanılabilir. Hem B50-70 hem de B70-100 sonuçları üzerinde aynı etkiye sahip olduklarından ve karşılaştırmadaki kolaylaşmalarından dolayı, B50-70, uygun kombinasyon kategorisinin seçimi ve analizi için seçilmiştir.

Tablo 1. B50-70 Bitüm tipi için her bir asphalt modifiye tipi ve kombinasyon kategorisi için A-VTS sonuçları.

Table 1. Results of A-VTS values for each asphalt mix type and combination category for asphalt type B50-70.

Bitümlü Bağlayıcı Modifiye Tipi	A-VTS Değerleri		A-VTS Kombinasyon Tipi
	VTS	A	
Saf <sup>a</sup>	-2.8318	8.6557	Pen
	-3.3308	10.01	Pen-SP
	-3.3959	10.164	Vis
	-3.4576	10.341	Vis-SP
	-3.549	10.603	Pen-SP-Vis
2SBS+0SB	-2.6585	8.1947	Pen
	-3.2496	9.8003	Pen-SP
	-3.2608	9.81	Vis
	-3.2946	9.9069	Vis-SP
	-3.3935	10.19	Pen-SP-Vis
2SBS+3SB <sup>b</sup>	-2.572	7.9743	Pen
	-3.0986	9.4058	Pen-SP
	-3.6335	10.873	Vis
	-3.6966	11.055	Vis-SP
	-3.5523	10.646	Pen-SP-Vis
4SBS+0SB	-2.7209	8.3758	Pen
	-3.3137	9.9866	Pen-SP
	-3.0985	9.3793	Vis
	-3.0876	9.3478	Vis-SP
	-3.2356	9.7707	Pen-SP-Vis
4SBS+3SB	-2.5256	7.8552	Pen
	-2.9769	9.0821	Pen-SP
	-3.397	10.207	Vis
	-3.4391	10.357	Vis-SP
	-3.3212	10.023	Pen-SP-Vis

<sup>a</sup>: Saf bitümlü bağlayıcı,

<sup>b</sup>: % 2 SBS ve % 3 SB ile saf bitümlü bağlayıcı katkısı.

Tablo 2. B70-100 Bitüm tipi için her bir Bitümlü bağlayıcı modifiye tipi ve kombinasyon kategorisi için A-VTS sonuçları  
Table 2. Results of A-VTS values for each asphalt mix type and combination category for asphalt type B70-100.

Bitümlü Bağlayıcı Modifiye Tipi	A-VTS Değerleri		A-VTS Kombinasyon Tipi
	VTS	A	
Saf <sup>a</sup>	-3.1231	9.4261	Pen
	-3.3284	9.9832	Pen-SP
	-3.4608	10.319	Vis
	-3.5721	10.638	Vis-SP
	-3.6194	10.774	Pen-SP-Vis
2SBS+0SB	-3.229	9.7371	Pen
	-3.5278	10.548	Pen-SP
	-3.3478	10.037	Vis
	-3.375	10.115	Vis-SP
	-3.4857	10.431	Pen-SP-Vis
2SBS+3SB <sup>b</sup>	-3.0776	9.3351	Pen
	-3.2927	9.9198	Pen-SP
	-3.7008	11.04	Vis
	-3.7536	11.192	Vis-SP
	-3.6332	10.851	Pen-SP-Vis
4SBS+0SB	-2.8352	8.6779	Pen
	-3.277	9.8783	Pen-SP
	-3.1819	9.6032	Vis
	-3.19	9.6265	Vis-SP
	-3.2848	9.8974	Pen-SP-Vis
4SBS+3SB	-2.7229	8.3835	Pen
	-2.7981	8.5877	Pen-SP
	-3.4874	10.468	Vis
	-3.6467	10.928	Vis-SP
	-3.4404	10.342	Pen-SP-Vis

<sup>a</sup>: Ssaf bitüm.

<sup>b</sup>: % 2 SBS ve% 3 SB ile saf bitümün modifiyesi.

Uygun kombinasyon kategorisinin seçilmesi için daha fazla araştırma yapılmıştır. Bu nedenle, en uygun A-VTS değerleri, Türkiye'de en yaygın bitüm tipini ve geçerli katkılı bitümü temsil etmektedir. MAKDM bu amaç için kullanılmaktadır. M-E analizinin, elle yapılması mümkün olmamaktadır. Bu nedenle MnPave yazılımı, Şekil 1'de gösterilen plana ve aşağıdaki Tablo 3'te gösterilen verilere göre KGM tarafından hazırlanan Türk Tipik Esnek Üstyapı Kesitlerinin (TTEÜK) Tekerlek izi (0.5 inç'e ulaştığında) ve Yorulma Çatlağı (timsah sırtı çatlak tekerlek izi alanının%10'una ulaştığında) M-E analizi için kullanılmıştır.

Tablo 3. MnPave kullanılarak M-E analiz işleminde kullanılacak (TTEÜK) kılavuzuna göre trafik, tabakalar ve malzeme grupları.

Table 3. Traffic, layers and material groups according to TTS catalogue that will be used in the M-E analysis.

Tabaka Tipi	Trafik kategorisi, MESAL <sup>b</sup>
	T1(3-20) (20 MESAL kullanılmıştır)
Aşınma, cm	5
Binder, cm	10
Bitümlü bağlayıcı temel, cm	11
Plenti Karışım temeli PKT, cm	20
Üst temel, cm	25
Alt temel dayanımı (S3) <sup>a</sup> M <sub>R</sub> , psi	8900

<sup>a</sup>S3, (TTEÜK) kılavuzuna göre bir üçüncü alttemel dayanım gücü grubudur.

<sup>b</sup> MESAL Milyon Eşdeğer Tek Dingil Yüklü anlamına gelir.

Türkiye'de sıcak iklim koşulunu simüle etmek için Antalya şehri seçilmiştir. Yılın farklı günlerinde sıcaklık değişimleri Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Sıcak bölgenin iklim verileri (Antalya şehri).

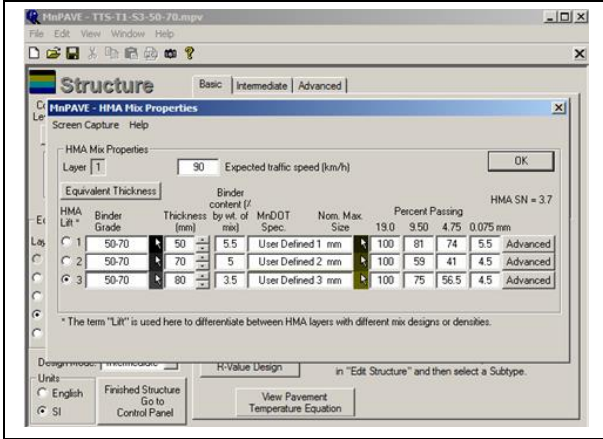
Table 4. Climate data of hot region (Antalya city).

Ay	Gün Sayısı	Aylık Ortalama Sıcaklık, °C	Mevsim	Mevsim Başına Toplam Gün Sayısı	Her Mevsim İçin Ortalama Sıcaklık, °C
Kasım	30	14.8	Kış	120	11.6
Aralık	31	11.4	Kış		
Ocak	31	9.9	Kış		
Şubat	28	10.3	Kış		
Mart	31	12.7	Güz	92	16.4
Nisan	30	16.1	Güz		
Mayıs	31	20.3	Güz		
Haziran	30	25.0	Yaz	153	25
Temmuz	31	28.1	Yaz		
Ağustos	31	27.7	Yaz		
Eylül	30	24.5	Yaz		
Ekim	31	19.7	Yaz		

Şekil 3 ve 4'te MnPave yazılımın ekranları ve istenen verilerini gösterilmiştir.

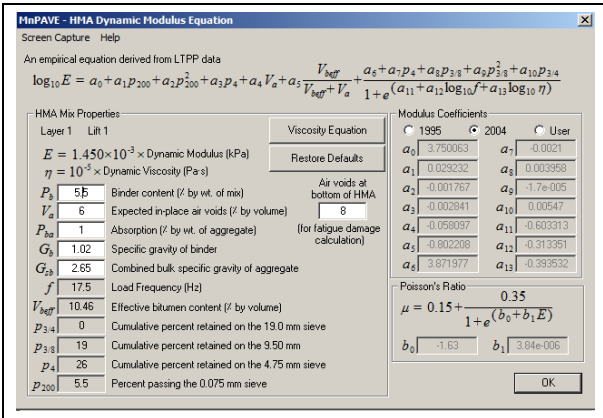
Yine, SB'nin, TTEÜK'ün tekerlek izi ve yorulma ömrü üzerindeki dengesiz etkileri, yukarıdaki Şekil 5 ve 6'da gösterilmiştir. SB'nin bitüme eklenmesi, farklı kombinasyon kategorileri altında SBS içeren katkılı bitümlere kıyasla,

sonuçlanan tekerlek izi ve yolulma ömrü üzerinde sahte ve kararsız bir etkiye sahiptir. SBS içeren katkılı bitümler, düşük tekerlek izi ve yolulma ömrü ile benzer kararlı eğilim göstermiştir. Bu da, SB'nin daha yüksek sıcaklıkta farklı davranışlara sahip olduğunu göstermektedir. (Viskozite-düşürücü etkisi). Bu nedenle, Türkiye için E\* modülünün belirlenmesinde SB-Katkılı bitümün A-VTS değerlerinin kullanılması önerilmemektedir. Sonuçlar, aşağıdaki Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir.



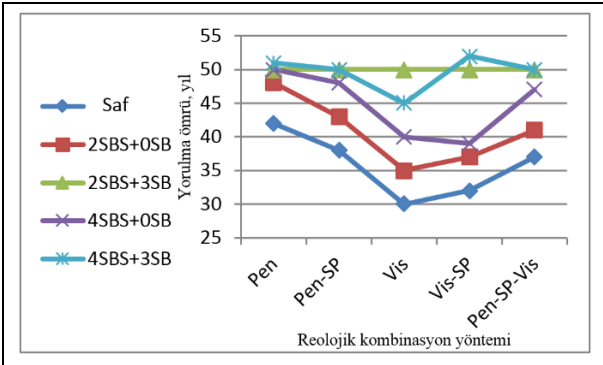
Şekil 3. MnPave Ekranı(HMA Gradasyonu)

Figure 3. MnPave screenshot. (Gradation of HMA).



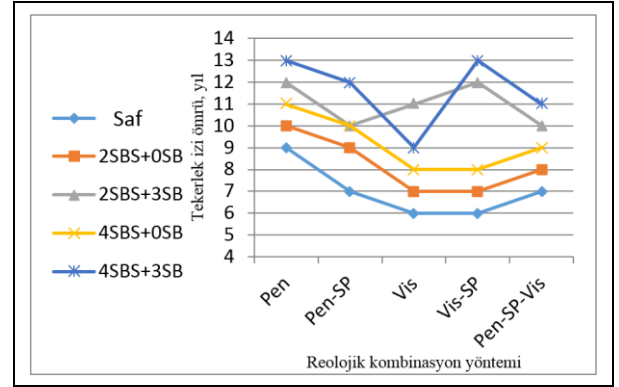
Şekil 4. MnPave Ekranı (HMA'nin Hacimsel özellikleri).

Figure 4. MnPave screenshot. (HMA volumetric properties).



Şekil 5. Farklı bitüm modifiye kombinasyon kategorisinin, TTEÜK'nin yolulma ömrüne etkisi.

Figure 5. The effect of combination category of different modified asphalt mixes on Fatigue Life of TTS.



Şekil 6. Farklı bitüm modifiye kombinasyon kategorisinin, TTEÜK'nin tekerlek izi ömrüne etkisi.

Figure 6. The effect of combination category of different modified asphalt mixes on Rutting Life of TTS.

Şekiller, aynı zamanda, SBS-Katkılı bitümün, saf bitüm (B50-70)'e göre daha gelişmiş özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. SBS-Modifiye bitümün tekerlek izi ve yolulma ömrü, her %2 SBS için %10 artmıştır. Şekil 5 ve 6'deki kombinasyon kategorilerinin, TTEÜK'nin yolulma ve tekerlek izi ömrüne etkisi gösterilmektedir. Düşük sıcaklıklarda (örn. Pen ve Pen-SP) test edilen kombinasyon kategorileri kullanılarak bitüm karışımlarının FL ve RL değerleri, daha yüksek sıcaklıklarda (örn. Vis ve Vis-SP) veya geniş sıcaklık aralığında (Pen-SP-Vis) test edilenlerden daha yüksek çıkmıştır. Bu da, düşük sıcaklık (Pen ve Pen-SP) koşullarında A-VTS değerlerinin, bitüm modifiyeleri üzerinde sertleştirme etkisi ve daha yüksek tekerlek izi ve yolulma ömrü üretmesi nedeniyle olabilmektedir. Diğer taraftan, yüksek sıcaklık (Vis ve Vis-SP) kombinasyonlarda A-VTS değerleri yumuşatıcı etki ve daha düşük tekerlek izi ve yolulma ömrü üretmektedirler. Tüm bu reolojik etkilerinin birleştirilmesinin ortalama etkisi, (Pen-SP-Vis) kombinasyon kategorisinden A-VTS değerlerini kullanılarak, tekerlek izi ve yolulma ömrü sonuçlarında görülebilmektedir.

Bir NCHRP 1-37A raporunda, Superpave PG bağlayıcılar, bitümlü bağlayıcı viskozite dereceli bağlayıcılar ve penetrasyon dereceli bağlayıcılar dahil olmak üzere farklı spesifikasyon dereceleri için, bir dizi varsayılan A-VTS değeri belirlenmiştir. Bu değerler ve bu çalışmada elde edilen sonuçlar arasında, Saf (B50-70 ve B70-100) bitüm ve SBS-katkılı bitüm için farklı kombinasyon kategorileri kullanılarak bir karşılaştırma yapılmıştır. Ne yazık ki, NCHRP A1-37 raporu, Türkiye'de kullanılan tipik saf veya Modifiye bitümün A-VTS değerleri hakkında herhangi bir bilgi içermemektedir. Bu makalede elde edilen A-VTS değerlerine dayanarak, en çok benzer bitüm ile karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 5 ve 6'da gösterilmiştir.

Sonuçlar, bu makalede yapılan deneylerden elde edilen A-VTS sonuçlarına göre, (Pen-SP-Vis) kombinasyon kategorisinin, bitüm tipinin belirlenmesinde başarılı olduğunu göstermektedir. Diğer kombinasyon kategorileri ise, bitüm tipinin tahmininde bir veya birkaç kez (N.O.A) başarısız olmuştur. Bu arada, (Pen-SP-Vis) kombinasyon kategorisini kullanılarak belirlenen bitüm tipi, literatürde elde edilen sonuçlarla uyumludur.

Tablo 5. B50-70 bitümlü bağlayıcı tipi için her bitümlü bağlayıcı modifiyesi ve kombinasyon kategorisi için A-VTS değerlerini kullanarak bitümlü bağlayıcı tipleri.

Table 5. Asphalt grades using A-VTS values for each asphalt mix type and combination category for asphalt type B50-70.

Bitümlü Bağlayıcı Karışımı Tipi	A-VTS Değerleri		Aşağıdaki A-VTS ilişkilerine Dayanarak	Benzer A-VTS Değerlerine Sahip Bitümlü Bağlayıcı Tipi [1]
	VTS	A		
Saf	-2.8318	8.6557	Pen	N.O.A <sup>a</sup>
	-3.3308	10.01	Pen-SP	N.O.A
	-3.3959	10.164	Vis	PG 64-28
	-3.4576	10.341	Vis-SP	PG 64-28
	-3.549	10.603	Pen-SP-Vis	PEN 60-70 or PG 70-16
2SBS+OSB	-2.6585	8.1947	Pen	PG 52-46
	-3.2496	9.8003	Pen-SP	N.O.A
	-3.2608	9.81	Vis	N.O.A
	-3.2946	9.9069	Vis-SP	N.O.A
	-3.3935	10.19	Pen-SP-Vis	PG 64-28
4SBS+OSB	-2.7209	8.3758	Pen	PG 64-40
	-3.3137	9.9866	Pen-SP	N.O.A
	-3.0985	9.3793	Vis	PG 64-34
	-3.0876	9.3478	Vis-SP	PG 64-34
	-3.2356	9.7707	Pen-SP-Vis	PG 70-28

<sup>a</sup>: N.O.A, varsayılan A-VTS değerlerinden herhangi birisi uygulanamaz anlamına gelmektedir.

Tablo 6. B70-100 bitümlü bağlayıcı tipi için her bitümlü bağlayıcı modifiyesi ve kombinasyon kategorisi için A-VTS değerlerini kullanarak bitümlü bağlayıcı tipleri.

Table 6. Asphalt grades using A-VTS values for each asphalt mix type and combination category for asphalt type B70-100.

Bitümlü bağlayıcı karışımı tipi	A-VTS değerleri		Aşağıdaki A-VTS ilişkilerine dayanarak:	Benzer A-VTS değerlerine sahip bitümlü bağlayıcı tipi [1]
	VTS	A		
Saf	-3.1231	9.4261	Pen	PG 52-40
	-3.3284	9.9832	Pen-SP	PG 58-34
	-3.4608	10.319	Vis	N.O.A <sup>a</sup>
	-3.5721	10.638	Vis-SP	PG 52-34
	-3.6194	10.774	Pen-SP-Vis	PEN 85-100
2SBS+OSB	-3.229	9.7371	Pen	N.O.A
	-3.5278	10.548	Pen-SP	N.O.A
	-3.3478	10.037	Vis	PG 58-34
	-3.375	10.115	Vis-SP	N.O.A
	-3.4857	10.431	Pen-SP-Vis	PG 64-28
4SBS+OSB	-2.8352	8.6779	Pen	N.O.A
	-3.277	9.8783	Pen-SP	PG 58-34
	-3.1819	9.6032	Vis	N.O.A
	-3.19	9.6265	Vis-SP	N.O.A
	-3.2848	9.8974	Pen-SP-Vis	PG 58-34

<sup>a</sup>: N.O.A, varsayılan A-VTS değerlerinden herhangi birisi uygulanamaz anlamına gelmektedir.

## 5 Değerlendirme

E\*'nin farklı iklim koşulları (Sıcaklıklar) ve trafik hızlarında (Frekanslar) hesaplanmasında iki yaklaşım kullanımı arasındaki farklılıklar Tablo 7'de gösterilmektedir. Eski Yaklaşım, bugünlerde Türkiye'de Ulaşım Otoritesi tarafından

kullanılmaktadır. Denklem 4, E\*'nin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Yeni Yaklaşım, bu çalışmanın sonuçlarına göre önerilen durumdur. Buna göre 1 ve 3 denklemleri E\*'nin hesaplanmasında kullanılmıştır.

Tablo 7. Farklı iklim koşulları ve trafik hızları altında iki yaklaşımı kullanan E\* sonuçları.

Table 7. The results of E\* using two approaches under different climate conditions and traffic speeds.

Trafik Hızı, Km/sa.	E* Modülü, ksi			
	Sıcak Bölge, Sıcaklık 50 °C		Soğuk Bölge, Sıcaklık 20 °C	
	Eski Yaklaşım	Yeni Yaklaşım	Eski Yaklaşım	Yeni Yaklaşım
21(4Hz)	523.7	582.9	394.6	2164.4
90*(17.5Hz)	523.7	841.1	394.6	2716.1

<sup>†</sup>: Bu hız MAKDM 'ye göre seçilir.

Araç hızının E\* üzerinde önemli bir etkisi olduğu iyi bilinmektedir. Düşük hızda, araç ağırlığı, E değerinde önemli bir düşüşe neden olarak ve Şekil 7'de gösterildiği üzere kavşak gibi düşük hızlı bölgelerde fark edilebileceği gibi kaplamada bozulmaya neden olan düşük hızlarda yüklem hızının az olmasının kalıcı deformasyonları arttırdığı. Eski Yaklaşım, sonuçların farklı araç hızlarında aynı olduğu araç hızının E\* üzerindeki etkisini yakalayamamıştır, Yeni Yaklaşım ise Tablo 7'de gösterildiği gibi düşük hızda E\*'nin azaltılmasıyla hızın etkisini kaydetmeyi başarmıştır.



Şekil 7. Düşük hızlı bölgelerde fark edilebileceği gibi kaplamada bozulması.

Figure 7. Deterioration of pavement condition at low speed zones (intersection).

Diğer taraftan, iklimin (Sıcaklık) bitümlü bağlayıcının Visko-Elastic davranışı nedeniyle E\* üzerinde önemli bir etkisi vardır. Soğuk iklim koşulunda ki (Düşük Sıcaklık) zıt davranışa kıyasla, sıcak iklim koşullarında (Yüksek Sıcaklık) bitümlü bağlayıcı döşeme, E\*'de bir azalmaya neden olarak yumuşamaya başlar. Ne yazık ki, yüksek sıcaklıkta hesaplanan E\* düşük sıcaklıkta hesaplanan E'den daha yüksek olduğunda, Eski Yaklaşım, bitümlü bağlayıcı kaplama için karşıt davranışı kaydederken, yüksek sıcaklıkta hesaplanan E\* düşük sıcaklıkta hesaplanan E'den daha düşük olduğunda ise, Yeni Yaklaşım, bitümlü bağlayıcı kaplamanın davranışı ile uyumlu olmuştur.

Alınan sonuçlar, bu çalışmanın amacı ile bitümlü bağlayıcı kaplamanın E\* esneklik modülünün belirlenmesi için Eski Yaklaşımın yeterli olmadığı ve Yeni Yaklaşımın sonuçlarında belirtildiği gibi iyileştirilmesi gerektiğine karar verdi.

Bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak, Türkiye'deki saf (B50-70 ve B70-100) ve SBS-Katkılı bitümlerin tipik değerlerini gösteren aşağıdaki Tablo 8'den A-VTS değerlerinin bitümlü bağlayıcı karışımının E\* Elastik Modülü hesaplamasında kullanılabilir.

Tablo 8. Türkiye'deki Saf (B50-70 ve 70-100) ve SBS-Katkılı bitümlü bağlayıcı A-VTS değerleri.

Table 8. A-VTS values of Pure (B50-70 and 70-100) and SBS-Modified asphalt in Turkey.

Modifiye Bitüm Tipi	B50-70 kullanarak A-VTS değerleri		B70-100 kullanarak A-VTS değerleri	
	VTS	A	VTS	A
Saf	-3.549	10.603	-3.6194	10.774
2SBS+OSB	-3.3935	10.19	-3.4857	10.431
4SBS+OSB	-3.2356	9.7707	-3.2848	9.8974

## 6 Sonuç ve öneriler

Bu makalede, bitümlü bağlayıcı karışımının Elastik Kompleks Modülü E\*'nin belirlenmesi için kullanılan KGM'deki modelin, farklı iklim koşullarında ve trafik hızında E\* modülünün belirlenmesi için uygun olmadığı sonucuna dayanmaktadır. E\* modülünün iklim koşulları ve trafik hızı altında hesaplanması için yeni bir yöntem belirlemesi amacıyla bir deney programı uygulanmıştır.

Bu araştırmada tipik Saf ve Katkılı bitüm tipleri üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara dayanarak, Tipik saf (B50-70 ve B70-100) bitüm tipi ve SBS-Katkılı bitümler (%2 ve %4) için E\*'nin belirlenmesine yönelik yeni yöntem aşağıdaki gibi sonuçlanmakta ve önerilmektedir:

- 1) Bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak, Türkiye'deki saf (B50-70 ve 70-100) ve SBS-Katkılı bitümlerin tipik değerlerini gösteren yukarıdaki Tablo 8'den A-VTS değerlerinin kullanılması,
- 2) Farklı iklim koşullarında (sıcaklıklarda) saf (B50-70 ve 70-100) ve SBS-Katkılı bitümlerin viskozitelerinin belirlenmesi için yukarıda denklem 1'in kullanılması,
- 3) Farklı iklim koşulları (sıcaklıkları) ve trafik hızları altında bitümlü bağlayıcı karışımının Elastik Kompleks Modülü E\* modülünün belirlenmesi için, yukarıda belirtilen denklem 3'ün kullanılması,
- 4) Denklem 3'teki model halen NCHRP 1-37A'nın bir parçasıdır, dolayısıyla Türk Karayolu Teknik Şartnamesinde bildirildiği gibi, Türkiye'nin, yeni MAKDM'ye geçişinin bir parçası olarak kullanılabilir,
- 5) Tablo 7'ye eklenecek Türkiye'deki diğer bitüm tiplerinin A-VTS değerlerinin karakterizasyonu için, daha fazla çalışma gereklidir,
- 6) Türkiye'de, yeni bir model geliştirerek, Elastik Kompleks Modül'ün E\* belirlenmesi için Tipik bitümlü bağlayıcı karışımları ile tipik saf ve katkılı bitüm tipleri için daha kapsamlı bir çalışma yapılabilir.

## 7 Conclusions and recommendations

The aims of this paper is based on a conclusion that the model used by Turkey Pavement Design Manual THPDM for the determination of Elastic Complex Modulus E\* of asphalt mixture is not appropriate since it does not differentiate between climate conditions and different traffic speeds. An experimental program was conducted to determine new method for the calculation of E\* under different climate conditions and traffic speeds. Based on the results obtained from the tests conducted in this research on Pure and Modified asphalt types commonly used in Turkey, it can be concluded and recommended that the new method for determination of E\* for typical pure asphalt type (B50-70 and B70-100) and SBS-Modified asphalts (2 and 4%) are as follows:

- 1) The use of A-VTS values shown in Table 8 which represents the typical values of pure (B50-70 and B70-100) and SBS-Modified asphalts in Turkey based on the results of this study,
- 2) Using Eq. 1 above for the determination of viscosities of pure (B50-70 and B70-100) and SBS-Modified asphalts under different climate conditions (temperatures),
- 3) The use of Eq.3 above for the determination of Elastic Complex Modulus E\* of asphalt mixture under different climate conditions (temperatures) and traffic speeds,
- 4) The model in Eq. 3 is already part of NCHRP 1-37A so it can be used as a part of the transition of Turkey toward the new Mechanistic-Emerical Pavement Design Method as reported in THPDM,
- 5) Further works are required for the characterization of A-VTS values of any other types of asphalt in Turkey to be added to Table 7,
- 6) A comprehensive study can be conducted for typical pure and modified asphalt types with typical asphalt mixtures in Turkey for the development of new model for the determination of Elastic Complex Modulus E\* in Turkey.

## 8 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Saadon Obaid EYADA fikrin oluşması, tasarımın yapılması, testler yapılması ve literatür taraması başlıklarında; Osman Nuri ÇELİK elde edilen kullanılan malzemelerin temin edilmesi ve testler yapılması başlıklarında; Mohammed Ihsan ALDAKUKY yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

## 9 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur" "Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

## 10 Kaynaklar

- [1] Çelik ON, Eyada SO. "A plan for the implementation of mechanistic-empirical pavement design guide in Turkey". *Pertanika Journal of Science & Technology*, 26(4), 1927-1949, 2018.



- [2] Mirza MW, Witczak MW. "Development of a global aging system for short and long term aging of asphalt cements (with discussion)". *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 64(1), 393-430, 1995.
- [3] Fonseca O, Witczak MW. "A prediction methodology for the dynamic modulus of in-place aged asphalt mixtures (with discussion)". *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 65(1), 532-572, 1996.
- [4] Bonaquist R, Pellinen T, Witczak M. *Development of Relationship Between Binder Viscosity and Stiffness*. Maryland, USA, Department of Civil Engineering University of Maryland, 1998.
- [5] Çelik ON, Eyada SO. "The Use of Mechanistic-Empirical Pavement Design Approach for The Assessment of Flexible Pavement Rutting Life of Turkish Typical Sections". *3<sup>rd</sup> International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICOCEE)*, Cesme, Turkey, 24-27 April 2018.
- [6] Çelik ON, Eyada SO. "Effect of cold climate and asphalt types on rutting and fatigue life of flexible pavement using mechanistic empirical pavement design approach in Turkey". *International Conference on Engineering, Management, Applied Sciences and Information Technology-EMAI*, Istanbul, Turkey, 7-8 July 2018.
- [7] Çelik ON, Eyada SO. "Türk tipik kesitlerinin esnek kaplama yorulma ömrünün mekanistik ampirik kaplama tasarım yaklaşımı kullanılarak sahil bölgesi için değerlendirilmesi". *7<sup>th</sup> National Symposium and Exhibition on Asphalt*, Ankara, Turkey, 29-30 November 2017.
- [8] Sağlık A, Güngör AG. "Resilient modulus of unbound and bituminous bound road materials". *5<sup>th</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Istanbul, Turkey, 13-15 June 2012.
- [9] Shook JF, Kallas BF, McLeod NW, Finn FN, Pell PS, Krchma LC, Haas RC, Anderson KO. "Factors influencing dynamic modulus of asphalt concrete". *Association of Asphalt Paving Technologists Proc.*, Washington, DC, USA, February 1969.
- [10] AASHTO. "Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing (Part II-Tests)". Washington DC, USA, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1997.
- [11] Asphalt Institute. "Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing". Kentucky, USA, Asphalt Institute, 2003.
- [12] KGM. "Turkish Highway Pavement Design Manual". Ankara, Turkey, KGM, 2005.
- [13] Kim YR, Underwood B, Far MS, Jackson N, Puccinelli J. "LTPP Computed Parameter: Dynamic Modulus". Washington DC, USA, FHWA, HRT-10-035 Report, 2011.
- [14] AASHTO. "AASHTO Provisional Standards". USA Washington DC, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008.
- [15] ASTM. "Annual Book of ASTM Standards". Pennsylvania, USA, American Society for Testing and Materials, 1998.