



Geleneksel bitümlü sıcak karışım üstyapı tabakalarının dinamik rijitlik modülünün tahmini ve Marshall dizayn yöntemi verileriyle karşılaştırılması

Estimation of dynamic modulus of stiffness of conventional bituminous hot mix pavement layers and comparison with Marshall Design method data

İhsan Güzel^{1*}, Ahmet Benli²

¹ Bingöl Üniversitesi, İnşaat Muhendisliği Bölümü, iguzel@bingol.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0746-070X>

² Bingöl Üniversitesi, İnşaat Muhendisliği Bölümü, ahbenli@bingol.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3557-4704>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 18 Şubat 2022
Revizyon 27 Nisan 2022
Kabul 19 Haziran 2022
Online 28 Haziran 2022

Anahtar Kelimeler:

Bitüm, agrega, mekanistik ampirik, dinamik modül, marshall dizaynı, ana eğri

ÖZ

Bitümlü sıcak karışım en önemli mekanik özelliklerinden biri olan dinamik rijitlik modülünün ülkemizde yaygın olarak kullanılan Marshall dizaynı verileriyle ilişkisinin incelenmesinin tasarımcıların kaplama performansı ve yaşam döngü maliyetlerinin analizlerine katkıda bulunacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada kalker taş ocağından üretilen agregayla bitümlü temel, binder, aşınma karışımlarının Marshall dizaynından optimum bitümü tespit edilmiştir. Mekanistik- ampirik tasarım yönteminde ikinci ve üçüncü seviye projelerde kullanılmasına izin verilen 1999 Witczak Modeliyle optimum bitümlü karışımların farklı sıcaklık ve frekanslarda dinamik rijitlik modülleri hesaplanmıştır. Optimum bitümlü karışımların 21.1°C sıcaklık referans alınarak farklı yükleme sürelerinde dinamik modül ana (master) eğrileri çizilmiştir. Dinamik rijitlik modülünü agreganın maksimum dane boyutuyla artırdığından aşınma tabakası karışım gradasyon sınırlarının yeniden düzenlenmesi proje içerisinde yükleme süresi değişimine göre üst yapı tabaka kalınlıklarında değişiklikler yapılabileceği tespit edilmiştir. Marshall dizaynı verileriyle dinamik rijitlik modülü grafiklerinde optimum bitümde bu verilere ait değerlerin dinamik modülün maksimum yaptığı, bitümlü temel ve binder karışımlarında bir miktar bitüm azaltılması durumunda optimum bitümde tahmin edilen dinamik modüle yaklaşılabileceği belirlenmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18 February 2022
Received in revised form 27 April 2022
Accepted 19 June 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

Bitumen, aggregate, mechanistic empirical dynamic module, marshall design master curve

ABSTRACT

It is thought that examining the relationship between the dynamic stiffness module, which is one of the most important mechanical properties of bituminous hot mix, and Marshall design data, which is widely used in Turkey, will contribute to the designers' analysis of coating performance and life cycle costs. In this study, optimum bitumen was determined from Marshall design of bitumen base, binder and abrasion mixtures with aggregate produced from limestone quarry. Dynamic stiffness modules of optimum bituminous mixtures at different temperatures and frequencies were calculated with the 1999 Witczak Model, which is allowed to be used in second and third level projects in the mechanistic-empirical design method. Dynamic module master curves were drawn at different loading times by taking the optimum bituminous mixtures as a reference to the 21.1°C temperature. In the dynamic stiffness modulus graphs with Marshall design data, it has been determined that the values of these data at optimum bitumen are maximized by the dynamic modulus, and in the case of some bitumen reduction in bituminous base and binder mixtures, the dynamic modulus estimated at the optimum bitumen will be approached.

Doi: 10.24012/dumf.1075656

* Sorumlu Yazar

Giriş

Dinamik modül $|E^*|$, esnek üstyapının yüklü veya yüksüz durumdayken şekil ve yer değiştirmelerini belirleyen bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakalarının rijitlik ölçülerinden biridir [1].

Esnek üst yapıların tasarım, analiz ve performans değerlendirmesinde dikkate alınan tabakalarını rijitliği, yükleme hızı ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak $|E^*|$ tanımlanmaktadır [2]. Taşıt hızlarının bir fonksiyonu olan yükleme süreleri [3] ve kaplama sıcaklığı tepkilerinden kaynaklı bozulmalarla yüksek oranda ilişkilidir.

Tasarımcıya malzeme seçimi olanaklarıyla çeşitli alternatifler sağlayan, diğer yöntemlerin (mekanistik, ampirik) yetersizliklerini gidermeye çalışan [4] laboratuvar ve saha testlerinin bir kombinasyonu olan mekanistik – ampirik (M-A) yöntemine dayalı AASHTO 2002 Kaplama Tasarımı Rehberinde, BSK tabakalarında en sık gözlenen yorulma ve tekerlek izi hasarlarının tahmini için $|E^*|$ önemli bir girdidir [5]. M-A yöntemde proje girdilerinin doğruluk ve belirsizlik durumuna göre üç hiyerarşik seviye belirlenmiştir [6]. Birinci seviye projeler için $|E^*|$ Superpave tasarımının bağlayıcı değerleriyle beraber laboratuvar deneylerinden tespit edilmektedir. İkinci seviye projeler için $|E^*|$ deneyi gerekmezken; bağlayıcılar için geleneksel bitüm deneyleri yapılmaktadır. Üçüncü seviye projelerde, dinamik modül ve bağlayıcı deneyleri yapılmamaktadır [7]. İkinci seviye analizlerde, bağlayıcı viskozitesi ve sıcaklık arasındaki ilişkiye dayalı olarak bitüm test verileri kullanılarak belirlenen sıcaklık veya frekans referans alınarak, düzeltilmiş frekans, sıcaklık değişimlerine göre çizilen ana eğrisinden tabakaların $|E^*|$ hesaplanmaktadır [8].

Mekanistik analizle karışımların uzun vadeli performansını tahmin edilmesinde $|E^*|$ etkin bir parametredir. Ancak $|E^*|$ deneylerinde ekipman, insan gücü, zaman veri analizi, gereksinimleri, numune üretim ve maliyetlerle ilgili sınırlamalar nedeniyle M-A ve mekanistik üstyapı analizi ve tasarımın geniş çapta kullanımını ciddi şekilde kısıtlamıştır [1-9].

Pahalı ve zaman alıcı laboratuvar test gerekliliklerini hafifletmek için 1990'lı yıllardan itibaren, hacimsel hesaplamalara göre yapılan karışım numuneleri değerlendirilerek tahmin modelleri geliştirilmiştir. Günümüzde karışım tipi ve dizaynlarının değişmesi, alternatif malzeme ve geri dönüşüm kullanımı artmasından dolayı yeni tahmin modelleri ve geliştirilmiş modellerin kalibrasyon yapılarak yeni modeller geliştirilmeye çalışılmaktadır [10-11-12]. AASHTO 2002 M-A Kaplama Tasarım Rehberinde ikinci ve üçüncü hiyerarşik seviyeler için $|E^*|$ tahmininde, Witczak ve Hirsch model denklemlerinin uygulanması kabul edilmiştir [13].

Ülkemizde AASHTO 1993 rehberi esas alınarak 2008 yılında yayınlanan ve yürürlükte olan Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberiyle [14] M-A yöntemine geçiş yapılmaya çalışılmakta olup; bu rehberde agregaların kayaç türleri dikkate alınmadan, genel olarak

belirlenen tabakaların izafi mukavemet katsayılarıyla tasarım yapılmaktadır..

Bazalt cinsi agregalı karışımlarda kalker cinsi agregalı karışımlara göre ortalama % 10- %20 arasında daha fazla bitüm kullanılmaktadır. Tabaka tasarımı ve analizinin proje bazında agregaların üretileceği kayaç türlerine göre yapılması, üst yapı performansını ve maliyet değerlendirmelerini etkileyecektir.

Aşınma, binder, bitümlü temel tabakalarının şartname sınırlarını sağlamak koşuluyla genellikle aynı taş ocağından temin edilen agregalarla üretilmektedir. Trafik yükü, iklim ve çevre koşullarına en fazla etkilenen bu tabakalarda malzeme olarak en fazla miktarda kullanılan agreganın cinsine göre $|E^*|$ belirlenmesi, yaşam döngüsünde ve tabakalarda alternatif malzeme seçeneklerinin değerlendirilmesi açısından önemlidir.

Literatür incelemelerinde ise aynı taş ocağından temin edilen agregalarla üretilen bitümlü temel binder ve aşınma tabakalarının $|E^*|$ lerinin birlikte karşılaştırılıp değerlendirildiği bazalt agregalı çalışma [15] haricinde bir araştırma olmadığı tespit edilmiştir.

Bu nedenle BSK tabakalarının tasarımında yaygın olarak uygulanan Marshall dizaynı için kalker taş ocağından temin edilen agregalarla hazırlanan tabakaların Marshall numunelerinin verileriyle M-A Tasarım Rehberinde ikinci, üçüncü hiyerarşik seviye projelerde tabakaların tahminine izin verilen $|E^*|$, ilişkisi incelenmiştir.

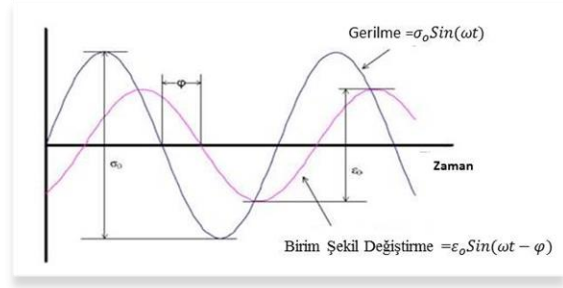
Bu çalışma proje bazında tasarımcıların performans, ekonomiklik değerlendirme ve aynı zamanda analitik çalışmalara katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Dinamik modül

M-A kaplama tasarımında, başarılı ve güvenilir bir tasarım için, malzeme özelliklerinin doğru temsili zorunludur. Bu özelliklerin biri de karışımların kompleks modülüdür. Kompleks modülün iki bileşeninden biri olan faz açısı belirli bir sıcaklık ve yükleme frekansında malzemenin viskoz ve elastik davranışının ölçüsü, diğer bileşeni olan dinamik modül ise belirli sıcaklık ve frekansta malzemenin rijitliği olarak tanımlanmaktadır [16].

Papazian tarafından 1962 yılında viskoz davranış gösteren asfalt betonu karışımların performansını değerlendirme çalışmasında, kompleks modülü kavramı geliştirilmiştir [17]. 1970'lerden başlanarak Asfalt Enstitüsü tarafından bu kavram kullanılmıştır.

Şekil 1'de gösterilen doğrusal viskoelastik malzemelerin sürekli bir sinüzoidal yükleme altındaki gerilme, şekil değiştirme genlikleriyle bağlantılanan ve tekerlek izi ve yorulma çatlaklarının tahmin edilmesini sağlayan kompleks modülün (Eşitlik-1) mutlak değeri genellikle $|E^*|$ olarak ifade edilir. BSK rijitliğinin zaman ve sıcaklıkla ilişkili detaylı olarak hesaplanması olarak da tanımlanan $|E^*|$ 'nin artması, asfalt betonu tabakasının trafik yüklemeleri altında deformasyonlara ve yüksek sıcaklıklarda teker izine karşı direncini ve düşük ısı çatlaklarına hassasiyetini artıracaktır [18].



Şekil 1. Dinamik kompleks modülü testi bileşenleri[18].

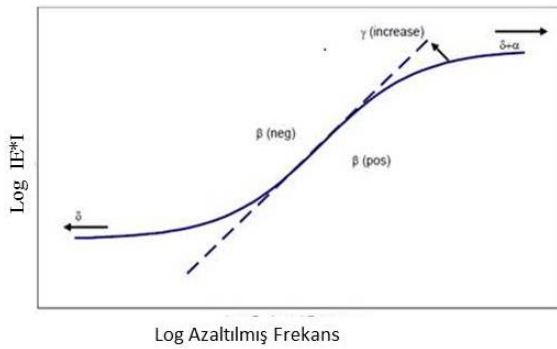
$$E^* = \frac{\sigma_0 \sin(\omega t)}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)} \quad (1)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{t_{lag}}{t_p} \cdot (360^\circ) = t_{lag} \cdot f \cdot (360^\circ) \quad (3)$$

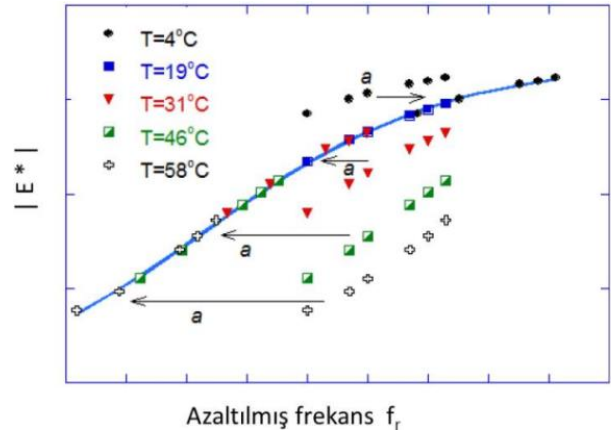
Burada, E^* kompleks modül, σ_0 tepe gerilme, ε_0 tepe birim şekil değişirme, t zaman, ω açısal hız, φ tepe gerilme ile tepe birim şekil deformasyon arasındaki zaman farkı (Faz açısı), t_p tekrarlı gerilmenin yükleme periyodu, t_{lag} gerilme şekil değişirme arasındaki zaman farkıdır.

Maryland Üniversitesi Asfalt Enstitüsün'de yapılan araştırmalarda karışımların sıcaklık ve yükleme frekansına göre $|E^*|$ değişiminin (Eşitlik-4)'te gösterilen sigmimodal matematiksel fonksiyonla çizilen master (ana) eğrisiyle (Şekil-2) temsil edileceği gösterilmiştir [19].



Şekil 2. Sigmimodal fonksiyon eğrisi [19]

Farklı sıcaklık ve yükleme frekansında $|E^*|$ değeri farklı değerlere sahiptir. Frekansın artmasıyla, sıcaklığın artmasıyla azalır. Frekans ve sıcaklığın $|E^*|$ üzerindeki etkilerini birleştirebilmek için bitümün viskozitesi ve sıcaklık arasındaki ilişkiye dayalı olarak bağlayıcı test verileri kullanılır. Belirlenen sıcaklık veya frekans referans alınarak, düzeltilmiş frekans, sıcaklık değişimlerine göre frekans-sıcaklık süper pozisyonu ilkesi kullanılarak çizilen karışımların master (ana) eğrisi (Şekil-3), geniş bir sıcaklık ve frekans aralığında $|E^*|$ hesaplamak için kullanılır [20].

Şekil 3. Asfalt karışımının farklı sıcaklıklarda $|E^*|$ ana eğrisi [20]

$$\text{Log}|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \text{Log}(f_r)}} \quad (4)$$

$|E^*|$ dinamik modül, δ minimum modül değeri t_r referans sıcaklığında yükleme süresi, $\delta + \alpha$ maksimum modül değeri, β, γ sigmodal fonksiyonun şeklini tanımlayan parametrelerdir.

AASHTO M-A Tasarım Rehberinde birinci seviye projeler için, yaşlanmayı da dikkate alan bağlayıcı ve dinamik rijitlik modülü deneylerinden karışımların farklı frekans (25, 10, 5, 1.0, 0.5, , 0.1 Hz) ve sıcaklıklarda (-10, 4.4, 21.1, 37.8, , 54.4°C) deney sonuçlarına göre sıcaklık ve frekansla ilişkili olarak karışımın frekans ve sıcaklık süper pozisyonu ilkesine göre referans sıcaklığı baz alınarak tek bir düz fonksiyonda birleşene kadar değişim yapılarak (Eşitlik 5-6) tespit edilen master (ana) eğrisinden frekansa bağlı $|E^*|$ değerleri hesaplanmaktadır [21].

$$\text{Log}(t_r) = \text{Log}(t) + \text{Log}(a_T) \quad (5)$$

$$\text{Log}(f_r) = \text{Log}(f) + \text{Log}(a_f) \quad (6)$$

a_T sıcaklığın bir fonksiyonu olarak düzeltme faktörü, t yükleme süresi, f yükleme frekansı, f_r referans sıcaklığında azaltılmış yükleme frekansdır.

Bitümlü sıcak karışım üst yapıların M-A yöntemle tasarımında $|E^*|$ tahmini farklı kombinasyonlarda modellerle yapılmaktadır. AASHTO M-A tasarımında ikinci ve üçüncü hiyerarşik seviye projeler için $|E^*|$ tahmininde uygulanmasına izin verilen, modifiye ve modifiye edilmemiş bağlayıcı numunelere yapılan test sonuçlarına göre elde edilen 1999 Witczak Modeli (7) agrega gradasyonu, geleneksel sıcak karışım ve asfalt bağlayıcı davranışı, bağlayıcı-agrega etkileşimi ve yükleme durumunu karakterize eden sekiz girdi parametresinden, bir dizi sıcaklık, yükleme hızı ve yaşlanma koşullarıyla karışımların dinamik rijitlik modülü tahmin edilmektedir [22,23].

$$\begin{aligned} \log|E^*| &= -3,750063 + 0,02932 \cdot \rho_{200} - 0,001767 \cdot (\rho_{200})^2 + 0,002841 \cdot \rho_4 - 0,058097 \cdot V_h \\ &- 0,802208 \left[\frac{V_{beff}}{V_h + V_{beff}} \right] \\ &+ \frac{3,87197 - 0,0021 \cdot \rho_4 + 0,003959 \cdot \rho_{38} - 0,000017 \cdot (\rho_{38})^2 + 0,00547 \cdot \rho_{34}}{1 + e^{(-0,603313 - 0,313351 \cdot \log(f) - 0,393532 \cdot \log(\eta))}} \end{aligned} \quad (7)$$

Bitümün viskozitesiyle sıcaklık ilişkisi logaritmik olarak Eşitlik 8’de gösterilmiştir [15].

$$\log \log(\eta) = A + VTS \cdot \log(T_R) \quad (8)$$

η bitümün viskozitesi (10^6 Poise), f yükleme frekansı, V_h hava boşluğu(%), V_{beff} hacimsel olarak efektif bitüm (%), ρ_4 , ρ_{38} , ρ_{35} No 4, 3/8”, 3/4” elekler üzerinde kalan (%), ρ_{200} No 200 elekten geçen (%), T_R Sıcaklık (Rankine), A , VTS regresyon parametreleridir.

1999 Witczak Modeli eşitliğinde dikkate alınmayan bitümün yükleme frekansıyla viskozite değişimi, [19] 2006 Witczak Modeli (Eşitlik-10) yardımıyla dinamik kayma reometresi deneyinden elde edilen kompleks kayma modülü (G_b^*) ve faz açısı (δ_B) dikkate alınarak daha gerçekçi bir yaklaşım sağlanmaya çalışılmıştır.

$$\begin{aligned} \log|E^*| &= -0,349 + 0,754 \cdot (|G_b^*|^{-0,0052}) \cdot \left(6,65 - 0,032 \cdot \rho_{200} + 0,0027 \cdot \rho_{200}^2 + 0,011 \cdot \rho_4 \right. \\ &- 0,0001 \cdot \rho_4^2 + 0,006 \cdot \rho_{38} - 0,00014 \cdot \rho_{38}^2 - 0,08 \cdot V_h \\ &- 1,06 \cdot \left. \left(\frac{V_{beff}}{V_h + V_{beff}} \right) \right) \\ &+ \frac{2,558 + 0,032 \cdot V_h + 0,713 \cdot \left(\frac{V_{beff}}{V_h + V_{beff}} \right) + 0,0124 \cdot \rho_{38} + 0,0001 \cdot \rho_{38}^2 + 0,0098 \cdot \rho_{34}}{1 + e^{(-0,7814 - 0,5785 \cdot |G_b^*| + 0,8834 \cdot \log(\delta_B))}} \end{aligned} \quad (9)$$

Witczak Modelleriyle (1999;2006) hasar görmemiş numunelerin bitümün referans(η_r) ve istenilen(η) sıcaklıklarda viskozitesiyle ilişkili düzeltme faktörü a_T (Eşitlik-10) uyarlama parametresi (c) ile hesaplanarak karışımların ana eğrisi çizilmektedir [24].

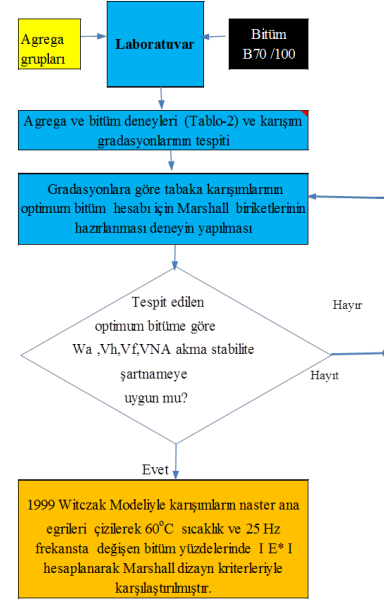
$$\log(a_T) = c (\log(\eta) + \log(\eta_r)) \quad (10)$$

Materyal ve Metod

Doğubayazıt-Iğdır güzergâhında özel işletmeye ait kalker taş taş ocağı malzemesinden konkasörde kırılarak üretilmiş olan dört grup (1 1/2”- 3/4”, 1”-3/4”, 3/4”-1/2”, 1/2”-No 4 ve No4-altı) agreganın, Batman rafinerinden temin edilen B/70/100 sınıfı bitümün mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve Marshall dizaynı için gerekli olan deneyler Karayolları 12 Bölge Müdürlüğü kontrollük laboratuvarında yapılmıştır.

Bu çalışmada temin edilen malzemelerden bitümlü temel, binder, aşınma tabakalarının her biri için (dizayn) Marshall dizaynıyla optimum bitümü tespit edilmiştir. Optimum bitümde farklı frekans (25, 10, 5, 1, 0,5, 0,1Hz) ve sıcaklıklarda (-10, 0, 4.4, 21.11, 37.8, 54.4 °C) Witczak 1999 (Eşitlik-7) modeliyle $|E^*|$ değişimi, 21.1 °C referans sıcaklığında karışımların master (ana) eğrileri çizilmiştir. Marshall dizaynının bitüm

yüzdelelerinde 25 Hz frekansta 59.4 °C sıcaklıkta hesaplanan $|E^*|$ ile Marshall verilerinin ilişkisi incelendiği bu çalışmanın akış şeması çizilmiştir (Şekil-1).



Şekil 4. Çalışmanın akış şeması

Bitümlü temel, binder, aşınma tabakası karışımı agregalarına ve bitüme yapılan deney sonuçları Tablo 1’de gösterilmiştir.

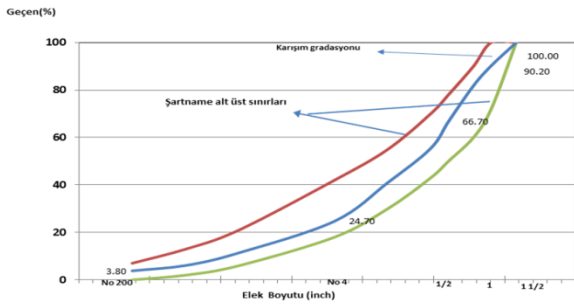
Dört grup malzemeden, Karayolları Teknik Şartnamesine [25] göre bitümlü temel karışımı Tip –A, aşınma karışımı Tip-1, binder karışımı ise şartnamede belirtilen tek gradasyonu limitleri içerisinde bulunacak şekilde hazırlanan karışım gradasyonlarının (Tablo-2) elek analizi grafikleri çizilmiştir.(Şekil-5)

Tablo 1 Agregave bitümün fiziksel ve mekanik özellikleri

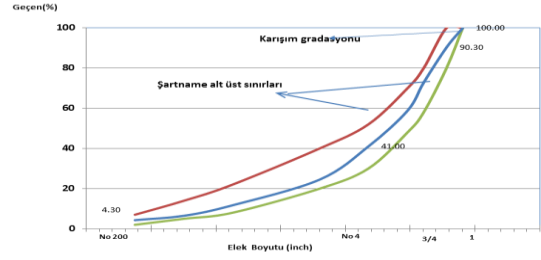
Agrega Deneyleri		Karş. Malz Grup.			Deney Standartı
Deney Adı	Karışım	Kaba	İnce	Filler	
Hacim özgül Ağırlığı	B.Temel	2.669	2.672	-	TSE1997-7
	Binder	2.668	2.670		
	Aşınma	2.678	2.670		
Zahiri Özgül Ağırlığı	B.Temel	2.704	2.711	2.715	TSE1997-7
	Binder	2.701	2.710	2.715	
	Aşınma	2.701	2.710	2.716	
Su Absorbsiyon %	B.Temel	0.49	0.53	-	TSE1997-6
	Binder	0.47	0.56		
	Aşınma	0.44	0.56		
MgSO ₄ Donma kaybı %	B.Temel		1.5		TS EN 1367-2
	Binder		1.5		
	Aşınma		1.5		
Los Angeles Aşınma kaybı %	B.Temel		21		TS EN 1097-2
	Binder		21		
	Aşınma		21		
Yassılık indeksi	B.Temel		20		BS 812
	Binder		20		
	Aşınma		20		
Bitüm Deneyleri					
Deney Adı	Deney Sonucu			Deney Standartı	
Bitüm özgül ağırlığı	1.043			TS EN 15326	
Bitüm penetrasyonu	77			TS EN 1426	
Yumuşama noktası	50.8			TS EN 1427	

Tablo 2 Karışım gradasyonları

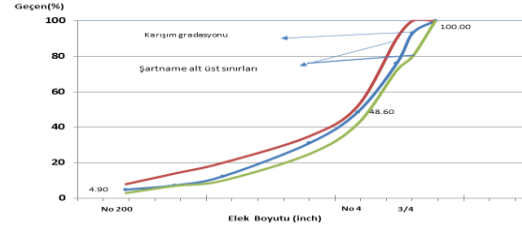
Elek Açıklığı (İnch)	Bitümlü Temel		Binder		Aşınma	
	Düzeltilmiş Diz. Grad.	Şart. Grad.	Düzeltilmiş Diz. Grad.	Şart. Grad.	Düzeltilmiş Diz. Grad.	Şart. Grad.
1 1/2"	100,00	100	100,00	100	100,00	100
1"	90,20	72-100	100,00	100	100,00	100
3/4"	81,80	60-90	90,30	80-100	100,00	100
1/2"	66,70	50-78	72,80	58-80	93,10	88-100
3/8"	55,40	43-70	58,80	48-70	75,90	72-90
No.4	41,00	30-55	41,00	30-52	48,60	42-52
No.10	24,70	18-42	24,50	20-40	31,10	25-35
No.40	11,40	6-21	11,70	8-22	12,40	10-20
No.80	6,10	2-13	6,50	5-14	7,30	7-14
No.200	3,80	0-7	4,30	2-7	4,90	3-8



a) Bitümlü temel



b) Binder



c) Aşınma

Şekil 5. Karışımların elek analizi grafikleri

Marshall dizaynı için tabakaların belirlenen agrega gradasyonlarında hazırlanan toplam 45 adet Marshall numunesinin sonuçları ve dizayn değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Karışımlar için optimum bitüm içeriği şartnamede belirtilen boşluk yüzdeleri aralığı içerisinde kalacak şekilde karışımın diğer özelliklerinin şartnameye uygunluğu kontrol edilerek tespit edilmiştir.

Tablo 3 Tabaka karışımlarının Marshall deney sonuçları

a) Bitümlü temel

Grup No	Bitüm W _a (%)	Hac. Özg. Ağ D _p	Mak. Teo. Özg. Ağ. D _t	Boş. V _h (%)	Ağ. Arası Boş. VMA (%)	Asf. Dol Boşluk V _f (%)	Akma (mm)	Düzeltil. Stab. (Kg)
1	3	2,374	2,572	7,71	13,75	43,94	2,67	1750
2	3,5	2,405	2,554	5,82	13,03	55,34	2,83	1834
3	4	2,421	2,536	4,54	12,88	64,77	2,90	1742
4	4,5	2,419	2,519	3,96	13,36	70,40	3,50	1722
5	5,00	2,419	2,502	3,51	13,96	74,86	3,86	1733
Diz.	3,80	2,42	2,54	5,00	12,90	61,20	3,00	1775
Şartn.	3,50--5,50	--	--	4--6	12-14,50	55-75	2--5	Min 600

b) Binder

Grup No	Bitüm W _a (%)	Hac. Özg. Ağ D _p	Mak. Teo. Özg. Ağ. D _t	Boş. V _h (%)	Ağ. Arası Boşluk VMA (%)	Asf. Dol Boş V _f (%)	Akma (mm)	Düzeltil. Stab. (Kg)
1	3,5	2,380	2,553	6,78	13,91	51,26	2,79	1367
2	4	2,404	2,535	5,15	13,43	61,65	2,84	1431
3	4,5	2,417	2,518	4,01	13,41	70,08	2,48	1445
4	5	2,424	2,501	3,05	13,54	77,46	2,60	1389
5	5,5	2,417	2,484	2,71	14,22	80,92	3,28	1342
Diz.	4,25	2,412	2,526	4,50	13,4	66,1	3,03	1430
Şartn.	3,5- 6,5	--	--	4-6	13-15	60-75	2-4	Min 750

c) Aşınma

Grup No	Bitüm W _a (%)	Hacim Özg. Ağ D _p	Mak. Teo. Özg. Ağ. D _t	Boş. V _h (%)	Ağ. Arası Boş VMA (%)	Asf. Dol Boş V _f (%)	Akma (mm)	Düzeltil. Stabilitite (Kg)
1	4,00	2,375	2,536	6,36	14,52	56,17	2,55	1368
2	4,50	2,395	2,519	4,93	14,21	65,31	2,77	1486
3	5,00	2,410	2,502	3,68	14,08	73,88	3,03	1548
4	5,50	2,420	2,486	2,64	14,14	81,32	3,17	1439
5	6,00	2,415	2,469	2,21	14,72	85,01	3,26	1420
Dizayn	4,90	2,405	2,505	4	14,2	71,5	2,9	1530
Şartname	4-7	--	--	3-5	14-16	60-75	2-4	Min. 900

Witczak Modellerinde karışımın hacimsel efektif bitüm yüzdesi karışımın bitüm oran, agregaların bitüm

absorpsiyonu, bitümün özgül ağırlığı ve numunelerin (Biriketlerin) hacimsel özgül ağırlığıyla ilişkilidir. Karışımların farklı bitüm oranları için efektif bitüm

yüzdeleri (V_{beff}) hacimsel olarak hesaplanarak Tablo 4'de gösterilmiştir.

Tablo 4. Karışımların hacimsel olarak efektif bitümleri

a) Bitümlü Temel

W_a (%)	P_{abs} (%)	P_{beff} (%)	D_p	G_{bit}	V_{beff} (%)
3.00	0.28	2.72	2.37372	1.039	6.05
3.50	0.28	3.22	2.405118	1.039	7.22
4.00	0.28	3.72	2.420856	1.039	8.36
4.50	0.28	4.22	2.418922	1.039	9.43
5.00	0.28	4.72	2.418922	1.039	10.49
Dzy-3.80	0.28	3.52	2.416	1.039	7.91
W_a : Bitüm miktarı, P_{abs} : Bitüm absorpsiyonu P_{EFAst} : Efektif bitüm D_p : Biriketlerin hacimsel özgül ağırlıkları G_{bit} : Bitüm özgül ağırlığı					

b) Binder

W_a (%)	P_{abs} (%)	P_{EFAst} (%)	D_p	G_{bit}	V_{beff} (%)
3.50	0.28	3.22	2.380	1.039	7.15
4.00	0.28	3.72	2.404	1.039	8.30
4.50	0.28	4.22	2.417	1.039	9.42
5.00	0.28	4.72	2.424	1.039	10.52
5.50	0.28	5.22	2.417	1.039	11.54
Dzy 4.25	0.28	3.97	2.412	1.039	8.86
W_a : Bitüm miktarı, P_{abs} : Bitüm absorpsiyonu P_{EFAst} : Efektif bitüm D_p : Biriketlerin hacimsel özgül ağırlıkları G_{bit} : Bitüm özgül ağırlığı					

c) Aşınma

W_a (%)	P_{abs} (%)	P_{EFAst} (%)	D_p	G_{bit}	V_{beff} (%)
4.00	0.28	3.72	2.375	1.041	8.18
4.50	0.28	4.22	2.395	1.041	9.32
5.00	0.28	4.72	2.410	1.041	10.44
5.50	0.28	5.22	2.420	1.041	11.53
6.00	0.28	5.72	2.415	1.041	12.55
Dzy 4.90	0.28	4.62	2.405	1.041	10.20
W_a : Bitüm miktarı P_{abs} : Bitüm absorpsiyonu P_{EFAst} : Efektif bitüm D_p : Biriketlerin hacimsel özgül ağırlıkları G_{bit} : bitüm özgül ağırlığı					

Tablo 5. Farklı sıcaklıklarda bitüm vizkositesi

T (°C)	η (Poise 10 ⁶)
-10	68238,23
0	1943,84
4,4	484,01
21,1	5,48688
37,8	0,16897
54,4	0,01106

performans ait A ve VTS parametrelerine (A=10.312. VTS=-3.440) göre [19] bitümün vizkositesi Eşitlik-8'den hesaplanmıştır (Tablo-5). Optimum bitümlü karışımların AASHTO M-A Tasarım Rehberinde birinci seviye projeler için belirtilen frekans ve sıcaklıklarda $|E^*|$ 1999 Witczak Modeliyle hesaplanmıştır. (Tablo-6)

Farklı sıcaklıklarda $|E^*|$ tahmini için B 707100 bitümün performans sınıfı PG 64-28 kabul edilerek [26], bu

Tablo 6. Karışımların optimum bitümde $|E^*|$

a) Bitümlü temel

f (Hz)	Sıcaklık °C					
	-10	0	4,4	21,11	37,8	54,4
	E (psi)					
25	4753676	3346986	2757725	1105581	385112	141489
10	4487532	3037534	2453011	908685	298113	106590
5	4277104	2803637	2227975	776314	244026	85875
1	3763265	2271859	1734290	523075	150665	51972
0,5	3533700	2052078	1537995	436035	121733	41952
0,1	2991453	1575791	1129619	278778	73727	25809

b) Binder

f (Hz)	Sıcaklık °C					
	-10	0	4,4	21,11	37,8	54,4
	E (psi)					
25	4176886	2955133	2441367	991159	350309	130491
10	3946167	2685498	2175116	816846	272131	98689
5	3763615	2481447	1978195	699369	223373	79747
1	3317311	2016617	1545182	473801	138833	48598
0,5	3117654	1824084	1372562	395952	112504	39345
0,1	2645315	1405822	1012409	254716	68610	24368

c) Aşınma

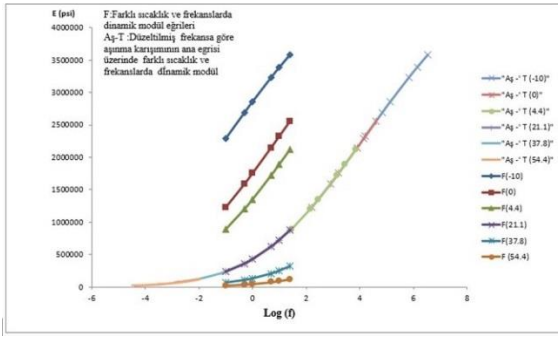
f (Hz)	Sıcaklık °C					
	-10	0	4,4	21,11	37,8	54,4
	E (psi)					
25	3577626	2550326	2115729	876003	316710	120729
10	3384198	2322466	1889743	724993	247388	91866
5	3230978	2149700	1722218	622831	203940	74579
1	2855685	1754932	1352502	425547	128076	45942
0,5	2687445	1590859	1204514	357020	104263	37365
0,1	2288467	1233058	894371	231891	64274	23383

Düzeltilme faktörü a_T 21.1°C referans sıcaklığında $c = 1.255882$ alınarak [19,27] Eşitlik 10 ile hesaplanış,

düzeltilmiş frekanslarla (Tablo-7) çizilen aşınma tabakasının $|E^*|$ ana eğrisi Şekil 6'da gösterilmiştir.

Tablo 7. Referans sıcaklığında düzeltilmiş frekanslar

f (Hz)	Sıcaklık °C					
	-10	0	4,4	21,11	37,8	54,4
	Düzeltilmiş Frekans LOG(fr)					
25	6,540403	4,599605	3,841299	1,39794	-0,5	-1,98737
10	6,142463	4,201665	3,443359	1	-0,898	-2,38531
5	5,841433	3,900635	3,142329	0,69897	-1,199	-2,68634
1	5,142463	3,201665	2,443359	0	-1,898	-3,38531
0,5	4,841433	2,900635	2,142329	-0,30103	-2,199	-3,68634
0,1	4,142463	2,201665	1,443359	-1	-2,898	-4,38531



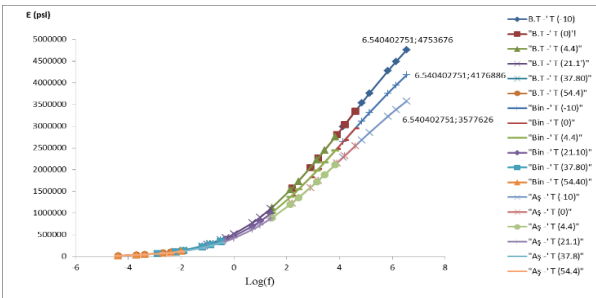
Şekil 6. Aşınma tabakası dinamik modül ana eğrisi

Aynı şekilde bitümlü temel, binder tabakalarının yıllık ortalama 21.11 °C referans sıcaklığında düzeltilmiş

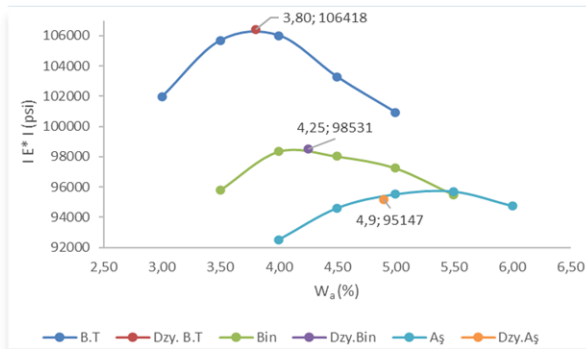
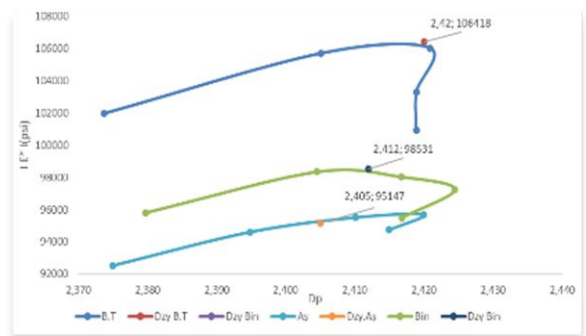
Tablo 8 Değişen bitüm yüzdelinde 59,60 °C 'de $|E^*|$

Bitümlü Temel		Binder		Aşınma	
W_a (%)	E (psi)	W_a (%)	E (psi)	W_a (%)	E (psi)
3,00	101946				
3,50	105681	3,50	95799		
4,00	106017	4,00	98350	4,00	92514
4,50	103274	4,50	98032	4,50	94607
5,00	100928	5,00	97256	5,00	95518
5,50		5,50	95483	5,50	95695
6,00				6,00	94739
Dzy 3.80	106418	Dzy 4.25	98531	Dzy 4.90	95147

frekanslarla $|E^*|$ ana eğrileri çizilmiştir (Şekil-7). Eğrilerden 1 Hz 'den büyük frekanslarda tabakaların $|E^*|$ arasında farkın arttığı tespit edilmiştir.

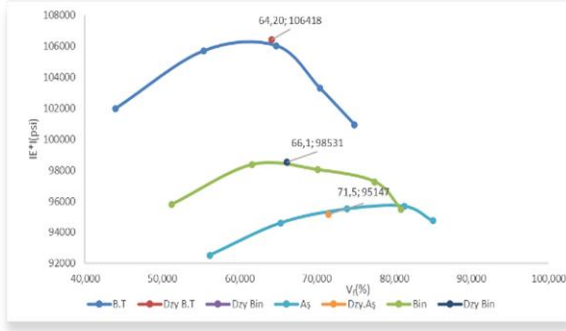
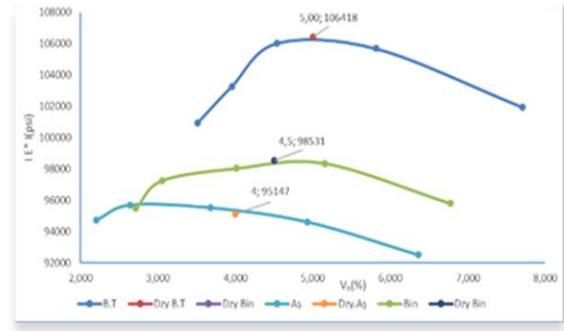
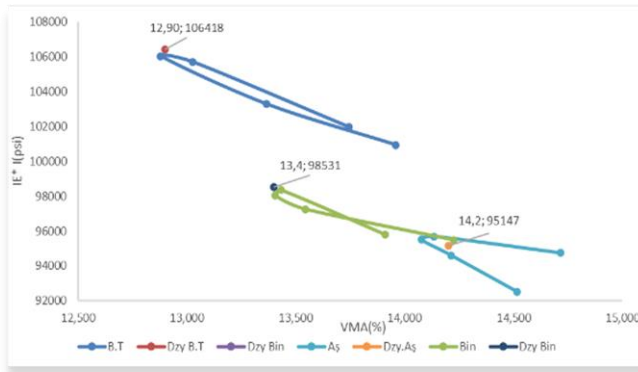
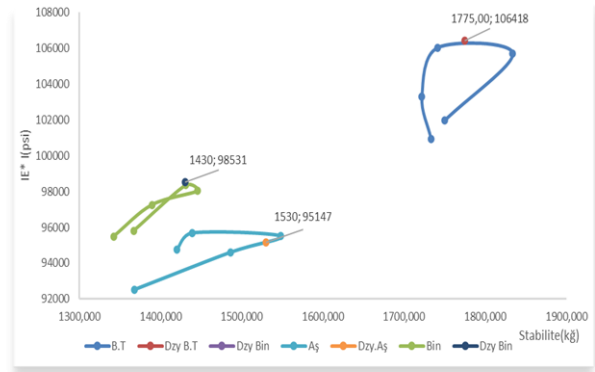
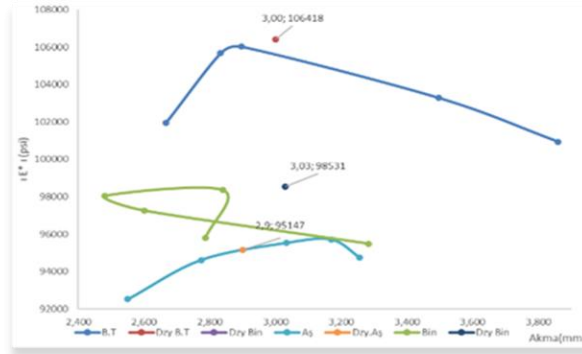


Şekil 7. Tabaka karışımlarının 21.1 °C referans sıcaklığında ana eğrileri

a) $|E^*| - W_a$ b) $|E^*| - D_p$

Hacimsel hesaplamalara dayalı olarak yapılan Marshall dizaynı ülkemizde yeni yapılacak BSK kaplamalar ve mevcut kaplamaların onarım çalışmalarında yaygın olarak uygulanmaktadır. Karışımların en temel özelliklerinden biri olan $|E^*|$ değerlerinin Marshall dizayn sonuçlarıyla ilişkisinin araştırılması için 60 °C su da 40 dakika bekletilen [28] numuneler akma ve stabilite deneyine tabii tutulmadan önce yüzey sıcaklıkları lazer okuyucuyla ortalama olarak 59.4 °C olarak okunmuştur. Bu sıcaklık ve 25 Hz frekansta değişen bitüm yüzdelere (Marshall dizaynı) göre $|E^*|$ değerleri hesaplanmıştır (Tablo-8).

Her tabaka karışımının değişen bitüm yüzdelere göre Tablo 3 'de gösterilen hacim özgül ağırlık (D_p), boşluk (V_h), asfaltla dolu boşluk (V_f), agregalar arası boşluk (VMA) ,akma, stabilite değerleriyle 59,4 °C'de hesaplanan $|E^*|$ ilişkisi Şekil 8'de çizilen grafiklerle gösterilmiştir. Bitümlü temel ve binder karışımlarında optimum bitümden $|E^*|$ maksimum olmasına karşın, aşınma karışımında şartnamede belirtilen V_f üst sınırına yaklaşılmışından dolayı bitüm miktarı azaltılmış bu nedenle maksimum $|E^*|$ yaklaşık % 0.5 daha az tespit edilmiştir.

c) $|E^*| - V_f$ c) $|E^*| - V_h$ d) $|E^*| - VMA$ e) $|E^*| - Stabilite$ f) $|E^*| - Akma$ Şekil 8. $|E^*|$ ile stabilite, akma, W_a , VMA, D_p , V_h , V_f ilişkisi

Karışımların belirlenmiş agrega gradasyonlarıyla Marshall dizaynı verilerinin tahmini $|E^*|$ değerleriyle karşılaştırıldığında optimum bitüm ve buna bağlı dizaynın VMA, D_p , V_h , V_f stabilite değerlerinde tahmin edilen $|E^*|$ yakın değerler elde edildiği gözlenmiştir.

Sonuç ve tartışma

Geleneksel BSK tabakalarının M-A tasarımına göre tahmin edilen $|E^*|$ ile Marshall dizayn verilerinin değerlendirilmesinden

- Karışımların optimum bitümde dinamik modülleri maksimum olduğu ve % 1 bitüm oranı değişiminin karışımın dinamik rijitlik modülünü ortalama \mp % 5 değiştirdiği

- Bitümü optimum olmayan karışımların dinamik modülünün azaldığı
- Karışımların değişen bitüm yüzdelinde, hacim özgül ağırlık boşluk asfaltla dolu boşluk agregalar arası boşluk, stabilite ile dinamik modül değişimi grafiklerinin birbirlerine benzer olduğu, optimum bitümlü bu verilere ait değerlerde dinamik modülün maksimum olduğu
- Belirlenen sıcaklık ve frekans aralığında sıcaklık değişiminin frekansa göre dinamik modülü daha fazla etkilediği,
- Şartname sınırları içerisinde kalan agrega gradasyonlarına göre, bitümlü temel tabakalarının, tahmini dinamik modülünün binder tabakasından ortalama %10, aşınma tabakasından %20 büyük olmasına $\frac{3}{4}$ ' elek üzerinde kalan malzemenin nedenlerden biri olduğundan, iklim, çevre ve trafik yükü koşullarına en fazla maruz kalan aşınma tabakasının maksimum dane boyutunun artırılarak gradasyon sınırlarının yeniden belirlenmesi üst yapı performansını artırtacağı
- Referans sıcaklığında karışımların master(ana) eğrisinde 1 Hz'den yüksek frekanslarda tabakaların dinamik modülleri arasında fark büyüdüğünden tasarımcıların taşıt sayısı, dingil tipi ve hızla ilişkili olan yükleme süresi değişimleri dikkate alınarak proje içerisinde üstyapı tabaka kalınlıklarında değişimlerle ekonomik değerlendirmeler, yapılabileceği tespit edilmiştir.

Marshall dizaynının optimum bitümle tahmin edilen dinamik rijitlik modüllerine optimum bitümden daha az bitümlede yaklaşıldığından, tasarımcılar tarafından iklim, çevre ve trafik yükü koşullarından daha az etkilenen binder ve bitümlü temel tabakalarında daha az bitüm kullanılması durumunda, gerilme analizlerinin yapılarak üst yapı yaşam döngüsünün ve şartname sınırlarının araştırılması gerekmektedir.

Kaynaklar

- [1] Ceylan, H. Gopalakrishnan, K. Kim, S. "Hot Mix Asphalt Dynamic Modulus Prediction Models Using Networks Approach" ANNs in Engineering Conference Missouri.10-14.2007
- [2] Hou.H , Wang.T, Wu.S ,Xue.S ,Tan.R , Chen.J , Zhou.M "Investigation On The Pavement Performance Of Asphalt Mixture Based On Predicted Dynamic Modulus" Construction and Building Materials.11-17,2016
- [3] Alataş, T. İstek, A. "Farklı Katkılarla Hazırlanan Asfalt Karışımların Sünme Performanslarının İncelenmesi" DÜMF Mühendislik Dergisi .745-758,2020
- [4] Stephen.A, Cross. P, Determination of Dynamic Modulus Master Curves for Oklahoma HMA Mixtures" Final Report Oklahoma State University,1-5,2007

- [5] Georgoul.K, Loizos.A, Plati.C "Calibration Of Dynamic Modulus Predictive Model" Construction and Building Materials ,66-68,2016
- [6] S.Avcı,"Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemlerinin AASHTO 2002 İle AASHTO 1993 Yöntemlerinin Karşılaştırılması "İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi 10-23,2006
- [7] AASHTO, Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide , 10-27, 2008
- [8] Clyne .T , Li.X., Marasteanu.O.,Skok.E" Dynamic And Resilient Modulus Of Mn/Dot Asphalt Mixtures" Final Report University of Minnesota Department of Civil Engineering ,2-5,2003
- [9] Igw.A "Comparative Study of Asphalt Institute – Witczak 1-40D Dynamic Moduli for Polythene Bag Modified HMConcrete Using Predictive Models" - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology,47-50,2016.
- [10]Zhang, D. Birgisson. B, Luo, X "A new dynamic modulus predictive model for asphalt mixtures based onthe law of mixtures "Construction and Building Materials 1-20 (2020)
- [11]Nobakht, M. Sakhaefar,S.M. "Dynamic modulus and phase angle prediction of laboratory aged asphalt mixtures" Construction and Building Materials. 2-12, 2018
- [12]Hossain, H. Zaman, M. "Prediction of Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalts withReclaimed Asphalt Pavement "Advances in Civil Engineering , 4-13,2020
- [13]Mateosa.A, Soares.J" Validation Of A Dynamic Modulus Predictive Equation On The Basis Of Spanish Asphalt Concrete Mixtures" Materiales de Construcción,1-5,2015
- [14]KGM," Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi", Teknik Araştırmalar Dairesi Üst Yapı Şubesi Müdürlüğü, 5-99,2008
- [15]Güzel, İ. Benli, A "Bazalt Agregalı Bitümlü Sıcak Karışım Tabakalarının Dinamik Rijitlik Modülünün Hesaplanması ve Marshall Tasarım Kriterleriyle " DÜMF Mühendislik Dergisi.1374-1385,2020
- [16]Nemati.R, Dave.E " Nominal Property Based Predictive Models For Asphalt Mixture Complex Modulus (Dynamic Modulus And Phase Angle)" Construction and Building Materials,308-319,2018
- [17]M Y.Huang "Pavement Analysis and Design" Second Edition ,307,2006

- [18] Xiao.Y “Evaluation Of Engineering Properties Of Hot Mix Asphalt Concrete For The Mechanistic-Empirical Pavement Design” Doctor thesis Department of Civil & Environmental Engineering Florida State University ,41-43,2009
- [19] Garcia.G, Thompson.M ” HMA Dynamic Modulus Predictive Models– A Review” Research Report FHWA-ICT-07-005 ,8-20,2007
- [20] Jamrah.A “Linear Viscoelastic Characteristics of Michigan Asphalt Mixtures and the Effect Of Sample Size on Material Properties” Master Thesis Civil Engineering Michigan State University,8-17,2013
- [21] Kim.Y Im.S, Ban.H” Layer Moduli of Nebraska Pavements for the New Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)” Report Research, University of Nebraska–Lincoln Nebraska Department of Roads,36-45,2010
- [22] Yu.H, Shen.S “An Investigation of Dynamic Modulus and Flow Number Properties of Asphalt Mixtures in Washington State” Final Report ,Department of Civil and Environmental Engineering Washington State University,10-14,(2012)
- [23] Yu.J” Modification of Dynamic Modulus Predictive Models for Asphalt Mixtures Containing Recycled Asphalt Shingles ”Master Thesis Civil Engineering Iowa State University,15-22,2012
- [24] Kavussi.A , Solatifar.N, Abbasghorbani. M “Mechanistic-Empirical Analysis of Asphalt Dynamic Modulus for Rehabilitation Projects in Iran” Journal of Rehabilitation in Civil Engineering , 18-29,2016
- [25] Karayolları Teknik Şartnamesi ,Karayolları Genel Müdürlüğü,407-443,2013
- [26] Güngör. A, Sağlık. A, Orhan. F, Arıkan Öztürk. E” Polimer Modifiye Bitümlerin Superpave Performans Sınıflarının Belirlenmesi” 5. Ulusal Asfalt Sımpozyumu 2-8,2009
- [27] Solatifar .N, Kavussi.A, Abbasghorbani.M, Katica.S ”Development Of Dynamic Modulus Master Curves Of İn-Ser Karayolları teknik Şartnamesi (2013). 407-410.vice Asphalt Layers Using MEPDG Models” Road Materials and Pavement Design, 225-243,2019
- [28] Gültekin.M, Nayır.N, Ziya.U, Çalışkan.K, Öztürk.A, Tutan.N, Komut.M “ Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı “ Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, 2021,59-41,2021