

## Bazalt Agregalı Bitümlü Sıcak Karışım Tabakalarının Dinamik Rijitlik Modülünün Hesaplanması ve Marshall Tasarım Kriterleriyle Karşılaştırılması

### *Determination of Dynamic Stiffness Module of Basalt Aggregated Bituminous Hot Mix Layers and Comparison with Marshall Design Criteria*

İhsan Güzel<sup>1\*</sup>, Ahmet Benli<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bingöl Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bingöl, iguzel@bingol.edu.tr

<sup>2</sup> Bingöl Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bingöl, abenli@bingol.edu.tr

#### MAKALE BİLGİLERİ

*Makale geçmişi:*

Geliş: 31 Mart 2020  
Düzeltilme: 5 Eylül 2020  
Kabul: 10 Eylül 2020

*Anahtar kelimeler:*

Tasarım, Dinamik Rijitlik Modülü,  
Asfalt Betonu, Marshall Dizaynı,  
Master Eğrisi

#### ÖZET

Ülkemizde 2008 yılında yayınlanan Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberiyle, tasarımcıya çeşitli tasarım ve malzeme seçiminde olanaklar sağlayan, ampirik ve analitik yöntemlere dayalı AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) 2002 Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi kriterlerine geçiş yapılmaya başlanmıştır. AASHTO 2002 Projelendirme Rehberinde, kaplama performansını etkileyen en önemli faktörlerden olan dinamik rijitlik modülü ikinci, üçüncü hiyerarşik seviye projeler için deney yapılmadan tahmin modelleriyle hesaplanmasına izin verilmektedir. Tahmini modellerle hesaplanan dinamik rijitlik modülünün, ülkemizde bitümlü sıcak karışım dizaynında yaygın olarak kullanılan Marshall yöntemi verileriyle ilişkisinin araştırılması proje bazında tasarımcıya alternatif olanaklar sağlayacaktır. Bu çalışmada bazalt agregalı bitümlü temel, binder ve aşınma tabakalarının karışım tasarımları Marshall yöntemiyle yapılarak; belirlenen frekans ve sıcaklıklarda optimum bitüme göre Witczak 2002 Modeliyle dinamik rijitlik modülleri hesaplanıp ana eğrileri çizilmiştir. Sonuç olarak dizayn kriter değerlerinde maksimum dinamik rijitlik modülüne yaklaşılmış ve sıcaklığın yüklem sürelerine göre dinamik rijitlik modülünü daha fazla etkilediğinden projelerde öncelikli olarak iklim şartlarına göre tabakaların dinamik rijitlik modülünün belirlenerek tasarım yapılması, ayrıca aşınma karışımlarının dayanımın artırılması için maksimum agrega tane boyutunun büyütülmesi gerektiği tespit edilmiştir.

Doi: 10.24012/dumf.712090

#### ARTICLE INFO

*Article history:*

Received: 31 March 2020  
Revised: 5 September 2020  
Accepted: 10 September 2020

*Keywords:*

Design, Dynamic Stiffness  
Module, Asphalt Concrete,  
Marshall Design, Master Curve

#### ABSTRACT

In Turkey with the published Flexible Pavements Projecting Guide 2008, the designer that offer opportunities in various design and material selection, empirical and analytical methods based on AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) 2002 Flexible Pavement Design Guide is being made the transition to the criteria. In AASHTO 2002 Project Designing Guide, dynamic stiffness module, which is one of the most important factors affecting coating performance, is allowed to be calculated with estimation models for second and third hierarchical level projects. Investigating the relationship between the dynamic stiffness module calculated with estimated models and Marshall method data, which is widely used in bituminous hot mix design in our country, will provide alternative opportunities for the designer on a project basis. In this study, the mixture designs of basalt aggregate bituminous foundation, binder and wear layers are made by Marshall method; According to the optimum bitumen at determined frequencies and temperatures, dynamic stiffness modules are calculated with Witczak 2002 Model and their main curves are drawn. As a result, it has been determined that the maximum dynamic stiffness modulus in design criteria values has been approached and since the temperature affects the dynamic stiffness modulus more than the loading times, it has been determined that the dynamic stiffness modulus of the layers should be determined primarily in the projects according to the climatic conditions, and the maximum aggregate particle size should be increased in order to increase the strength of the wear mixtures.

\* Sorumlu yazar / Correspondence

Ahmet BENLİ

✉ abenli@bingol.edu.tr

Please cite this article in press as İ. Güzel, A. Benli, "Bazalt Agregalı Bitümlü Sıcak Karışım Tabakalarının Dinamik Rijitlik Modülünün Hesaplanması Ve Marshall Tasarım Kriterleriyle Karşılaştırılması", DUJE, vol. 11, no.3, pp. 1373- 1384, September 2020.

## Giriş

Ülkemizin, karayolu uzunlukları karşılaştırılmasında uluslararası kıstas olan karayolu uzunluğunun ülke yüzölçümü oranı, gelişmiş ülkelere göre daha düşük olması nedniyle ihtiyaç olan karayolu kaplamalarının esnek kaplamadan elde edilen deneyimler ve bu kaplamaların avantajları dikkate alınarak esnek kaplama tipinin tercih edilebilecektir. Ayrıca mevcut asfalt betonu yol kaplamalarının bakım ve onarımında asfalt betonunun kullanımı öncelikli olacaktır. Bu nedenle esnek üst yapıların proje şartlarını daha fazla göz önünde bulunduran yöntemle tasarlanması sürdürülebilirlik açısından önemlidir.

Asfalt betonu üst yapısının tasarımı amprik, analitik, amirik - analitik yöntemlerle yapılmaktadır. AASHTO 1972 rehberi, CBR (California Bearing Ratio) yöntemi amprik yöntemlere, AASHTO 1986, AASHTO 1993 rehberleri ve bu rehberlere göre daha detaylı ve değişik girdilerin girilmesine olanak sağlayan AASHTO 2002 rehberi amprik - analitik yöntemlere, Shell yöntemi ise analitik yöntemlere örnek olarak verilebilir.[1]

Tasarımcıya çeşitli tasarım ve malzeme seçiminde olanaklar sağlayan AASHTO 2002 rehberi, AASHTO'nun diğer rehberlerinin eksiklik ve yetersizliklerini (Trafik yükü, tabakalarda kullanılan malzeme özellikleri, gerçeği temsil edecek iklim ve çevre koşulları vb) [2], proje özelliği ve mevcut imkanlara göre tasarımcıya üç seviyede girdi girilmesini sağlayarak minimize etmektedir.

AASHTO 2002 Rehberinde üst yapı tasarımını ve performansını doğrudan kullanılan; kalibrasyon faktörleri, kaplama tabakalarının birim şekil değiştirmesi, deformasyonu ve karışımların en temel özelliği olan dinamik rijitlik modülü etkilemektedir. Dinamik rijitlik modülü birinci seviye için deneysel, ikinci ve üçüncü seviyeler için ise yaklaşık yöntemlerle hesaplanmaktadır [3]

Amprik - analitik yöntemine geçiş yapılmak üzere AASHTO 1993 kriterleri esas alınarak 2008 yılında yayınlanan ve halen yürürlükte olan Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberin'de asfalt betonu kaplamaların kalınlığı eşdeğer standart dingil yükü sayısı, güvenilirlik, üstyapı taban zemini esneklik modülü, çevre ve

iklim koşullarına göre belirlenmektedir. Bu rehberde yeni yapılacak üstyapı ve takviye tabakalarının kalınlıklarının belirlenmesinde kullanılan üst yapı sayısı malzemelerin için belirlenen izafi mukavemet katsayılarına göre hesaplanmakta olup; aşınma ve binder kaplama tabakalarının toplam kalınlığı 11cm ile 18 cm, bitümlü temel tabakası kalınlığı 8 cm ile 16 cm, plentmiks temel 15 ile 20 cm, alttemel tabakası kalınlığı ise 0 ile 50 cm arasında değişmektedir [4].

2019 yılı fiyatlarına göre ocak taşından aşınma, binder, bitümlü temel tabakalarının bir santim kalınlığının ortalama maliyeti 5 TL/m<sup>2</sup>, olup; % 50'si bitüm zati bedelidir. Plentmiks temel ve plentmiks alt temel tabakalarının bir santim kalınlığının yaklaşık maliyeti ise 1 TL/ m<sup>2</sup> dir [5].

Yeni yapılacak karayolu üst yapıları ve mevcut üstyapıların onarım maliyetleri göz önüne alındığında; iklim, çevre ve trafik yükü koşullarında, proje süresince asfalt betonu kaplamalarının hedeflenen performansı karşılaması ülke ekonomisi açısından önemlidir. Üst yapılarda hedef performansın gerçekleşmesini önemli seviyede AASHTO 2002'de belirtildiği üzere ülke koşullarına uygun kalibrasyon faktörleriyle beraber tabakaların en temel özelliği olan dinamik rijitlik modülünün, kullanılan malzemelere göre belirlenmesi etkilemektedir.

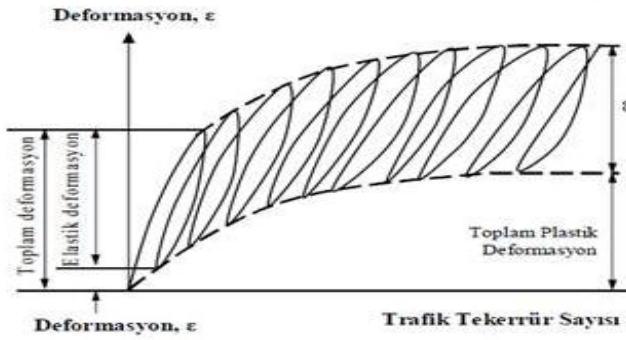
Ülkemizde yürürlüğe olan üst yapı projelendirme rehberinde tasarım;karışım malzemelerinin farklılıklarını dikkate almadan genel olarak belirlenen dinamik rijitlik modülüyle ilişkili olan tabakaların izafi mukavemet katsayılarıyla yapılmaktadır. Proje bazında temin edilebilecek agrega türlerine göre tabaka tasarım yapılması üst yapı performansı için önemlidir.

Bu nedenle aynı ocaktan üretilen bazalt agregalı bitümlü temel, binder ve aşınma tabakalarının, ülkemizde süper pave dizaynına geçinceye kadar kullanılacak Marshall dizaynı verileriyle, AASHTO 2002 Rehberin'de ikinci, üçüncü hiyerarşik seviye projelerde tahminine izin verilen dinamik rijitlik modül ilişkisinin incelenmesinin, proje bazında tasarımcılara ekonomik değerlendirmelere ve analitik

çalışmalara katkıda bulunacağı düşünülerek bu çalışma yapılmıştır.

### Üstyapı Tabakalarının Esneklik ve Dinamik Rijitlik Modülü

Karayolu esnek üstyapılarını amprik ve analitik yöntemle tasarlanması için tabakalara elastik teorinin uygulaması gerekmektedir. Bu durumda tabakaların statik yük yerine gerçek yükleme koşullarına uygun olan tekrar eden yükler altında elastikiyet modülü Şekil-1’de görüleceği üzere tekerrür eden yüklerle yapılan üç eksenli deneylerde elde edilen devilatör gerilmenin elastik deformasyona oranı olan esneklik; (resilient) modülü ile yaklaşımıyla yapılmaktadır [6].



Şekil 1. Üstyapı malzemelerinin tekrarlı yük – deformasyon ilişkisi[6]

Karayolları Genel Müdürlüğü’nün yürürlükte olan Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberin’de alttemel, temel ve üstyapı tabanının esneklik modülü, asfalt betonu kalınlığı, CBR, optimum rutubet, maksimum kuru birim ağırlık, likit limit, plastisite indeksi, derinlik düzeltme faktörü, No4 ve No200 ‘den geçen malzeme yüzdeleriyle ilişkilidir. Rehberde belirtilen izafi mukavemet katsayılarına göre çimento bağlayıcılı granüller temel 133520 psi (921MPa), plentmiks temel granüler temel 37037 psi(256MPa), granüler temel 30112 psi (208MPa), kırma taş alttemel 24110 psi (166MPa), kum çakıl alttemelin ise 14606 psi (101 MPa) olarak esneklik modüllerinin kabul edildiği hesaplamalarla tespit edilmiştir.

Bitümlü karışımların serilip sıkıştırıldıktan sonra tabakada oluşan boşluklar tabakanın mekanik ve fiziksel özelliklerini etkilerken; vizkoelastik ve termoplastik malzeme olan

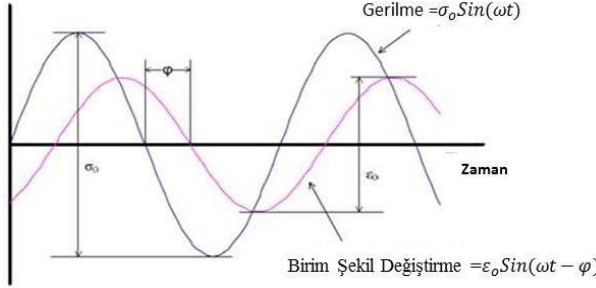
bitüm sıcaklık ve trafik yüklemelerine bağlı olarak sıkıştırılmış kaplamada, reolojik hali nedeniyle en büyük etkiyi yapmaktadır.

Bitümlü karışım tabakalarının performansının değerlendirilmesinde gözönüne alınan mekanik özelliklerden birisi olan rijitlik, bitünlü karışım malzemelerin vizkoelastik malzeme olması nedeniyle elastik malzemelerin elastikiyet modülüne benzeyen yükleme hızı, yükleme süresi ve sıcaklık dikkate alınarak gerilme deformasyon arasındaki ilişkiyi ifade eden rijitlik modülü ile tanımlanmaktadır. Rijitlik modülü indirekt çekme, sünme, üç eksenli tekerrürlü yük, üç eksenli dinamik modül, serbest basınç veya çekme deneyleriyle tespit edilmekle beraber, bitüm rijitliği, karışımdaki agrega ve bitümün hacimsel yüzdeleri, akma, stabilite ve serbest basınç mukavemet değişkenleri dikkate alınarak Nijboer, Goet-Metcalf, Henkelom-Klomp yaklaşımı, Shell Abakları ve Bonnaune’nin geliştirdiği eşitliklerle de hesaplanmaktadır [7].

Trafik yükünün en fazla etkili olduğu asfalt betonu kaplama (aşınma, binder) karışım numunelerine uygulanan tekerrürlü maksimum yükün yatay yönde kaydedilen birim şekil değiştirme oranı olarak tanımlanabilen esneklik modülü [8], tabakaların yük dağıtma kabiliyetinin bir göstergesi olmasına rağmen viskoelastik karışımların mekanik özelliklerini tam olarak temsil etmemektedir.

Viskoz davranış gösteren asfalt betonu karışımların performansını değerlendirmek için Papazian tarafından 1962 yılında yapılan çalışmalarda kompleks modülü kavramı belirtilmiştir[9]. 1970 yılının başında bu kavram Asfalt Enstitüsü tarafından kullanılmıştır [10]. Doğrusal viskoelastik malzemelerin sürekli bir sinüzoidal yükleme altında meydana gelen Şekil 2’de gösterilen gerilme, şekil değiştirme genlikleriyle ilişkilendiren tekerlek izi ve yorulma çatlaklarının öngörülmesini sağlayan kompleks modülün (Eşitlik-1) mutlak değeri genellikle dinamik modül olarak adlandırılır. Asfalt karışımların rijitliğinin zaman ve sıcaklıkla ilişkili detaylı olarak hesaplanması olarakta tanımlanan dinamik modülün artması

asfalt betonu tabakasının trafik yüklemeleri altında deformasyonlara ve yüksek sıcaklıklarda teker izine karşı direncini ve düşük ısı çatlaklarına duyarlılığını artıracaktır [11].



Şekil 2. Dinamik kompleks modülü testinin şematik bileşenleri[11]

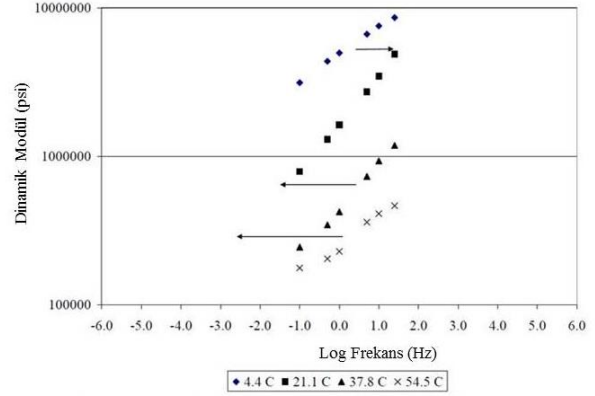
$$E^* = \frac{\sigma_o \sin(\omega t)}{\epsilon_o \sin(\omega t - \varphi)} \quad (1)$$

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

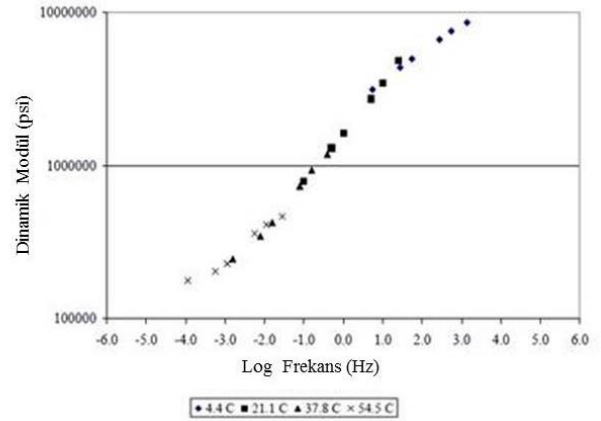
$$\varphi = \frac{t_{lag}}{t_p} \cdot (360^\circ = t_{lag} \cdot f \cdot (360^\circ)) \quad (3)$$

$E^*$  kompleks modül,  $\sigma_o$  tepe gerilme,  $\epsilon_o$  tepe birim şekil değişirme,  $t$  zaman,  $\omega$  açısal hız,  $\varphi$  tepe gerilme ile tepe birim şekil defermasyon arasındaki zaman farkı (Faz acısı)  $t_p$  tekrarlı gerilmenin yükleme periyodu,  $t_{lag}$  gerilme şekil değişirme arasında zaman farkıdır.

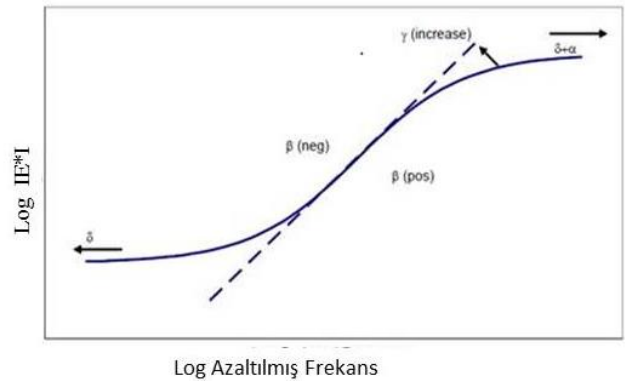
AASHTO 2002 Rehberin’de hiyerarşik olarak birinci seviye projelerde farklı frekans (25, 10, 5, 1.0, 0.5, , 0.1 Hz) ve sıcaklıklarda((-10, 4.4, 21.1,37.8,54.4°C) elde edilen dinamik modülü deney sonuç eğrileri zaman ve sıcaklık süperpozisyon ilkesine göre referans sıcaklığı referans alınarak tek bir düz fonksiyonda birleşene kadar yükleme süresinde değişim yapılarak (Eşitlik 2,3) meydana getirilen dinamik modül master (ana) eğrisinden zamana (frekans) bağlı dinamik modül değerleri hesaplanmaktadır (Şekil 3,4).Maryland Üniversitesi tarafından yapılan araştırmalarda dinamik modül master eğrisinin Eşitlik-4’de gösterilen sigmimodal fonksiyonla (Şekil-5) temsil edileceği gösterilmiştir [12,13].



Şekil 3. Test sonuçlarına göre farklı sıcaklıklarda dinamik modül frekans eğrileri [12]



Şekil-4. Test sonuçlarına göre düzeltilmiş dinamik modül ana eğrisi [12]



Şekil 5. Sigmoidal fonksiyon [13]

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

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

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

$|E^*|$  dinamik modül,  $\delta$  minimum modül değeri  $t_r$  referans sıcaklığında azaltılmış yükleme

süresi ,  $\delta + \alpha$  maksimum modül değeri ,  $\beta, \gamma$  sigmodal fonksiyonun şeklini tanımlayan parametreler  $a(T)$  değiştirme faktörü ,  $t$  yükleme süresi ,  $f$  yükleme frekansı,  $f_r$  referans sıcaklığında azaltılmış yükleme frekansdır. Hiyerarşik olarak birinci seviye projeler için dinamik modül, superpave tasarımının bağlayıcı değerleriyle beraber laboratuvar deneylerinden tespit edilmektedir. Dinamik modül deneyleri zamanın yanı sıra ortalama 80.000 \$ ekipman maliyeti gerektirmektedir [14] . İkinci seviye projelerde dinamik modül için deney gerekmezken; bağlayıcılar için geleneksel bitüm deneyleri yapılmaktadır. Üçüncü seviye projeler için ise dinamik modül ve bağlayıcı deneyleri yapılmamakta olup; bağlayıcılar için tasarım rehberinde belirtilen değerler dikkate alınarak, yaşlanmayı da kapsayan zaman sıcaklık ilişkisini gösteren ana eğrileri teşkil edilir [15].

İkinci ve üçüncü seviye projeler için .1954 yılından itibaren hacimsel hesaplamalara dayanan karışım dizaynlarının (Marshall ,Hvem vb) otuz yıla yakın sürede ölçülen dinamik modül değerlerinin sonuçlarına göre çoğu ABD kaynaklı olan, agrega boyutu ve bağlayıcıların viskozitesiyle ilişkili dinamik modülü tahmin eden modeller geliştirilmiştir. Genellikle Witczak 1999, Witczak 2002 Yeni Witczak 2006 Asphalt Enstitüsü (AI), Hirsch Alkhatieb modelleriyle tahminler yapılmaktadır [16,17]. Geleneksel Witczak 1999, Witczak 2002 modelleri karışım özellikleriyle beraber bağlayıcıların dinamik kesme modülü ve faz acısıyla ilişkilidir. Ülkeler veya bölgeler kendi koşullarına dikkate alarak dinamik modül veri tabanlarına göre bu modelleri modifiye etmekte veya kendi koşullarına uygun tahmin modelleri geliştirmektedir. Idaho, Florida karışımlarının dinamik modüllerinin tahmin modelleri örnek olarak gösterilebilir. Yerel koşullara ait dinamik modül verilerine uyarlanmış modeller tasarımcıya yerel malzemeleri daha iyi tanıma, farklı tasarım amaçları için uygun maliyetli malzeme seçimi ve bitümlü kaplamaların performansının daha gerçekçi ön görülmesini sağlayacaktır.

Kaplama karışımlarının kalite özelliklerini yansıtan dinamik modülün, tahmininde yaygın olarak kullanılan tahmin modellerinden Witczak1996 (Eşitlik 7), Yeni Witczak 2002 Modeli (Eşitlik 8) eşitlikleri aşağıda gösterilmiştir.

$$\text{Log}|E^*| = 3,750063 + 0,02932 \cdot \rho_{200} - 0,001767 \cdot (\rho_{200})^2 + 0,002841 \cdot \rho_4 - 0,058097 \cdot V_a - 0,802208 \left| \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right| + \frac{3,87197 - 0,0021 \cdot \rho_4 + 0,003959 \cdot \rho_{38} - 0,000017 \cdot (\rho_{38})^2 + 0,00547 \cdot \rho_{34}}{1 + e^{(-0,603313 - 0,313351 \text{Log}(f) - 0,593532 \text{Log}(\eta))}} \quad (7)$$

$$\text{Log}|E^*| = -1,249937 + 0,029232 \cdot \rho_{200} - 0,001767 \cdot (\rho_{200})^2 + 0,002841 \cdot \rho_4 - 0,058097 \cdot V_a - 0,802208 \left| \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right| + \frac{3,871977 - 0,0021 \cdot \rho_4 + 0,003959 \cdot \rho_{38} - 0,000017 \cdot (\rho_{38})^2 + 0,00547 \cdot \rho_{34}}{1 + e^{(-0,603313 - 0,313351 \text{Log}(f) - 0,593532 \text{Log}(\eta))}} \quad (8)$$

$$\text{Log Log}(\eta) = A + VTS \cdot \text{Log}(T_R) \quad (9)$$

$$\text{Log}(\eta) = 10,5012 - 2,2601 \text{Log}(pen) + 0,00389 (\text{Log}(pen))^2 \quad (10)$$

$\eta$  bitümün viskozitesi (106 Poise ),  $f$  yükleme frekansı,  $V_a$  hava boşluğu %,  $V_{beff}$  hacimsel olarak efektif bitim %,  $\rho_4, \rho_{38}, \rho_{34}$  No4,3/8",3/4" elekler üzerinde kalan (%),  $\rho_{200}$  No200 elekten geçen (%),  $T_R$  sıcaklık (Rankine),  $A$  regresyon kesmesi,  $VTS$  viskozite sıcaklık duyarlılığının regresyon eğimi,  $pen$  bitümün penetrasyondur.

Asfalt betonu karışımlarının rijitlik, esneklik modülü ve ölçülen dinamik modülle tahmin edilen dinamik modül arasında ilişkiyi; agrega gradasyonu, bağlayıcı sınıfı, miktarı, yeni malzeme tipleri, yükleme süresi ve sıcaklık faktörlerine göre değerlendiren bazı çalışmaların sonuçları aşağıda belirtilmiştir.

Kuloğlu, Henkelom-Klomp eşitliklerinde değişen boşluk oranları, bitüm özgül ağırlığı, agrega efektif özgül ağırlığı, agrega ve bitüm yüzdelere göre karışım rijitlik değerlerini 22019 MPa ile 33042MPa, karışımın plastik rijitliğini ise değişen bitüm viskozitesi ve yükün toplam etkime sürelerine göre 411 MPa ile 2596 MPa aralığında tespit etmiştir. [18]

Sayın, Henkelom-Klomp eşitlikleri kullanarak farklı numune sıcaklıklarında bulmuş olduğu

karışım rijitlikleri bulanık mantık yöntemiyle karşılaştırma çalışmasında -10, 0, 10, 20, 30, 40 °C numune sıcaklıkları için sırasıyla 16008 MPa, 10024 MPa, 5385 MPa, 2262 MPa, 605 MPa, 51 MPa olarak hesaplamıştır [19].

Özgan, karot numunelerinin 17.30.40.50 °C sıcaklıklarda Marshall akma ve stabilite değerlerine göre Nijboer yaklaşımı ile karotların rijitlik modülünü  $403 \text{ kg/cm}^2$  (39 MPa) ile  $192 \text{ kg/cm}^2$  (19 MPa) aralığında belirlemiştir [20].

Yılmaz 19 mm maksimum boyutlu kalker ve kalker + çelik çürüfu karışımı agregalara B160/220, B50/70 sınıfı bitümler ve bunların modifiye edilmiş tipleriyle yapılan karışımlara 5,20,35 °C sıcaklıklarda uygulanan indirekt çekme rijitlik modülü deneyinde rijitlik modülünü yaklaşık 500 MPa ile 7500 MPa arasında hesaplamıştır [21].

Alataş, maksimum agrega dane boyutu 19 mm olan kalker ve bazalt agregalı karışımların Marshall numunelerine 20 °C'de yaptığı tekrar yüklemeli indirekt çekme deneylerinden bazalt agregalı karışım için 1706 MPa kalker karışım için ise 1353 MPa olarak esneklik modülü sonuçları elde etmiştir [22].

Garcia ve Thompson, dinamik modülün sıcaklıkla ilişkisi çalışmasında, PG64-22, PG 76-22,38 sınıfı ve nodifiye edilmiş bitümleri kullanarak; 19 mm, 12.50 mm, 9.50 mm maksimum boyutlu agrega karışımlarına -10 4 °C .20 °C sıcaklık ve 25 Hz ile 0.1 Hz aralığında yüklemelerden ölçülen dinamik modüller 8.883.851 psi (61.298 Mpa) ile 156120 psi (1077 MPa) aralığındadır. Dinamik modülün tahmininde yaygın olarak kullanılan Hirsch Modeliyle deneyde ölçülen dinamik modüller arasında (Eöl=DF.Et) düzeltme faktörünün (DF) 0.96 ile 1.43 arasında değiştiği tespit edilmiştir [23].

Thomas, PG64-22, PG76-22 sınıfı bitümlerle maksimuma agrega boyutu 25 mm ve 9 mm olan karışımlara laboratuvar ve standart performans deneyleri yapılmıştır. Frekansın artmasıyla dinamik modülün arttığı, teker izi oturmalarına karşı dinamik modülün yüksek olması gerektiği, ayrıca tahmini edilen dinamik modülle (Witczak ,Hirsch ) ölçülen dinamik

modül arasında %10 farklılıklar olduğu; TxDOT (Teksas Taşıma Departmanının) standart performans testlerinde 20 Hz, 25 Hz ile 0.1 Hz frekans aralığında 5 sn yüklemeli 5 sn yüklemesiz) 0.60 mm çatlak genişliği esas alınarak yüklemeye sayılarına göre çatlakların meydana geldiği dinamik modüller belirlenmiştir.[24]

Yu, geri dönüştürülmüş asfalt karışımı çatı kaplamalarının asfalt karışımlarda kullanılması durumunda ölçülen dinamik modellerin, tahmin edilen dinamik modellerin yaklaşık %70'i olduğundan; istatistik değerler ( $R^2$ ,  $S_e/S_y$ ) göz önüne alarak tahmini model eşitliklerini yeniden güncellemiştir [25].

Huanan ,PG64-22, PG64 -28, PG76-28 PG70-28 sınıfı bitümlerle %20 oranında geri kazanılmış asfalt kaplamaların kullanıldığı maksimum dane boyutu 19 mm ve ortalama bitüm yüzdesi % 5.40 olan karışımlara 0.1 Hz 130 °F'da yapılan dinamik modülü deneylerinde PG 76-28 sınıfı bitümün diğer bitümlere göre belirgin bir şekilde dinamik modülü yükselttiği, 1 Hz, 140 °F'da bitüm sınıflarının dinamik modülü çok fazla etkilemediğini tespit etmiştir. Bitüm ve boşluk yüzdesinin artışıyla dinamik modülün azaldığı, agrega gradasyonunun dinamik modül üzerinde etkisi olduğu; ayrıca kompozit malzemeler için Hirsch modelinin daha uygun olacağını belirtmiştir [26].

Hyun, Jong, Lee , modifiye bitümlü kaplamaların geleneksel kaplamalara göre dinamik modülünün daha yüksek ve performansının daha iyi olduğunu laboratuvar ve saha testleriyle tespit etmiştir [27].

Güngör ve Sağlık, TÜBİTAK projesinde B 50/70 bitümle aşınma (kireçtaşı) ,taş mastik aşınma (kireçtaşı) , aşınma (bazalt), binder (kireçtaşı) ve bitümlü temel (kireçtaşı) karışımların esneklik modülü sırayla 5245 MPa, 4338 MPa, 4487 MPa 4306 MPa modifiye bitümlü kireç taşı ve bazalt agregalı aşınma karışımları için sırasıyla 5970 MPa, 4767 MPa, bazalt agregalı modifiyeli ve modifiyesiz taş mastik karışımlar için ise sırasıyla 4313 MPa, 3906 MPa olarak tespit edilmiş olup; Witczak formülüne benzer 4 Hz'de dinamik

rijitlik modülün tahmininde kullanılabilir eşitlik geliştirmiştir[28].

Srempihar,elyaf katkılı ve katkısız karışımların 40 °F ile 100 °F sıcaklıklarda esneklik modüllerini karşılaştırmış,elyaf katkılı karışımların 100 °F katkısız göre esneklik modülünü 2 kat arttığı aynı sıcaklıkta 5 Hz frekans yüklemeye esneklik modülü ile dinamik modülünün eşdeğer olduğunu belirleyen araştırmalara benzer sonuçları elyaf katkılı karışımlar içinde elde etmiştir. [29].

Esfandiarpour ve Shalaby, %10 ile %50 arasında değişen oranlarda geri kazanılmış asfalt kaplama karışımlarının kullanıldığı karışımların dinamik modülünün tahminini, amprik ve analitik kaplama tasarımına göre değerlendirilme çalışmasında,seviye iki için yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklıklarda tahmin edilen dinamik modülün ölçülenin yarısı, seviye üç için ise yüksek sıcaklıklarda ortalama %50 düşük sıcaklıklarda ise %150 oranında fazla tespit edilmiş olup ;ölçülenle tahmin edilen dinamik modüller arasında istatistiksel kriterler için korelasyon çalışmaları yapmıştır [30].

MJeong,değişik yüzdelerde geri kazanılmış asfalt kaplama karışımlarının kullanıldığı modifiye edilmiş karışımların beş sıcaklık ve ,altı yüklem frekansında ölçülen dinamik modülleri, Witczak 1999 ve 2006 modelleri ile tahmin edilenlerle karşılaştırma çalışmasında 1999 modelinden istatistiksel olarak daha iyi sonuçlar elde edilmiştir [31].

## Metodoloji

Çalışmada bazalt taş ocağından üretilen agregalara Karayolları 18 Bölge Laboratuvarında yapılan bitümlü temel, binder, aşınma Marshall dizaynlarından yararlanılarak (25,10,5,1,0.5,0,1,0.05,0.025) Hz frekans ve (-10 ,0,4.4,21,1,37.8,54.4)°C sıcaklıklarda Witczak 2002 (Eşitlik 7) modeliyle dinamik rijitlik modülleri hesaplanmış;.21.1 °C referans sıcaklığında kaplama karışımlarının Excel’de dinamik rijitlik modülü ana eğrisi,(master curve) çizilmiştir.Tabakalar için yapılan Marshall dizaynında değişen bitüm yüzdelerine göre

tahmini dinamik rijitlik modülü hesaplanarak;Marshall dizaynından elde edilen ,boşluk, asfaltla dolu boşluk , stabilite,akma ,agregalar arası boşluk ve hacimsel özgül ağırlıkla ilişkisi araştırılmıştır.

## Deneysel – Teorik Çalışma

Bazalt taş ocağından konkasörde üretilen 11/2”-3/4”, 1”-3/4”, 3/4”-1/2”,1/2”-No4,ve No4-altı agrega gruplarından bitümlü temel, binder, aşınma tabakaları için elde edilen karışım gradasyonlarında (Tablo-1) B 70/100 sınıfı bitüm kullanılarak farklı bitüm yüzdelerinin her birinde üç adet numune hazırlanarak bu tabakalara ait yapılan Marshall dizaynından elde edilen sonuçlar Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Bitümlü temel, binder, aşınma tabakalarının agrega karışım gradasyonları

Elek Açık. (inch)	Bitümlü Temel		Binder		Aşınma	
	Dizayn Grad (%)	Şart. Grad (%)	Dizayn Grad (%)	Şart. Grad (%)	Dizayn Grad (%)	Şart. Grad (%)
1 1/2"	100	100	100	100	100	100
1"	88,29	72-100	100	100	100	100
3/4"	76,49	60-90	90,54	100-80	100	100
1/2"	62,44	50-78	71,29	58-80	91,048	80-100
3/8"	55,89	43-70	62,2	48-70	80,456	72-90
No.4	40,51	30-55	43,01	30-52	46,344	42--52
No.10	25,15	18-42	26,78	20-40	28,512	25--35
No.40	10,68	6--21	11,91	8--22	12,936	10--20
No.80	6,57	2--13	7,26	5--14	8,096	7--14
No.200	3,66	0-7	4,14	2--7	4,84	3--8

Tablo 2.a Bitümlü temel tabakası Marshall deney sonuçları

Grup No	Bitüm Wa (%)	Hacim Özg. Ağırlık Dp	Maks. Teo. Özgül Ağ. Dt	Boşluk Vh (%)	V.M.A (%)	Asf. Dol Boş. Vf (%)	Akma (mm)	Düzeltilmiş Stabilite (kg)
1	3	2,179	2,43	10,376	15,2	31,72	2,99	865,64
2	3,5	2,204	2,42	8,751	14,64	40,22	2,74	944,42
3	4	2,231	2,4	7,037	14,01	49,77	2,84	1058,78
4	4,5	2,248	2,38	5,716	13,75	58,45	2,48	1133,65
5	5	2,255	2,37	4,85	13,92	65,15	2,6	1183,53
6	5,5	2,25	2,36	4,473	14,51	69,18	2,64	1104,2
7	6	2,246	2,34	4,076	15,08	72,97	2,73	1071,34
Dizayn	5,04	2,256	2,368663	4,756	13,9084	65,80197	2,66	1150
Şartname	3,5- 6,5	--	--	4--6	13-15	60-75	2--4	Min 750

**Tablo 2.b. Binder tabakası Marshall deney sonuçları**

Grup No	Bitüm Wa (%)	Hacim Özg. Ağrlı Dp	Maks. Teo Özgül Ağ. Dt	Boşluk Vh (%)	V.M.A (%)	Asf. Dol Boş. Vf (%)	Akma (mm)	Düzeltilmiş Stabilite (kg)
1	3	2,179	2,43	10,376	15,2	31,72	2,99	865,64
2	3,5	2,204	2,42	8,751	14,64	40,22	2,74	944,42
3	4	2,231	2,4	7,037	14,01	49,77	2,84	1058,78
4	4,5	2,248	2,38	5,716	13,75	58,45	2,48	1133,65
5	5	2,255	2,37	4,85	13,92	65,15	2,6	1183,53
6	5,5	2,25	2,36	4,473	14,51	69,18	2,64	1104,2
7	6	2,246	2,34	4,076	15,08	72,97	2,73	1071,34
Dizayn Şartname	5,04 3,5-6,5	2,256 --	2,368663 --	4,756 4-6	13,9084 13-15	65,80197 60-75	2,66 2-4	1150 Min 750

**Tablo 2.c. Aşınma tabakası Marshall deney sonuçları**

Grup No	Bitüm Wa (%)	Hacim Özg. Ağrlı Dp	Maks. Teo Özgül Ağ. Dt	Boşluk Vh (%)	V.M.A (%)	Asf. Dol Boş. Vf (%)	Akma (mm)	Düzeltilmiş Stabilite (kg)
1	3,5	2,152	2,41	10,79	16,53	34,7	2,41	950,47
2	4	2,175	2,4	9,25	16,05	42,3	2,45	1065,78
3	4,5	2,194	2,38	7,872	15,71	49,9	2,65	1092,2
4	5	2,23	2,37	5,801	14,76	60,71	2,95	1111,08
5	5,5	2,249	2,35	4,416	14,45	69,43	2,99	1164,93
6	6	2,244	2,34	4,019	15,01	73,23	3,11	1153,92
7	6,5	2,238	2,32	3,73	15,66	76,18	2,81	1153,92
Dizayn Şartname	5,54 4-7	2,246 --	2,351417 --	4,483 3-5	14,58175 14-16	69,25524 60-75	2,84 2-4	1151 Min 900

Tabakaların Marshall deneyinde belirtilen farklı bitüm yüzdeleri ( $W_a$ ) için agregaların bitüm absorsiyonu ( $P_{abs}$ ), karışımın efektif bitümü ( $P_{efbit}$ ), bitüm özgül ağırlığı ( $G_{bit}$ ) ve biriketlerin hacimsel özgül ağırlığıyla ( $D_p$ ) ilişkili olan efektif bitüm yüzdeleri ( $V_{efbit}$ ) hacimsel olarak hesaplanarak Tablo 3’ de gösterilmiştir.

**Tablo 3.a. Bitümlü temel karışımlarının efektif bitüm yüzdeleri**

$W_a$ (%)	$P_{abs}$ (%)	$P_{efbit}$ (%)	$D_p$	$G_{bit}$	$V_{efbit}$ (%)
2,5	0,73	1,77	2,188	1,028	3,702
3	0,73	2,27	2,201	1,028	4,752
3,5	0,73	2,77	2,225	1,028	5,833
4	0,73	3,27	2,259	1,028	6,958
4,5	0,73	3,77	2,25	1,028	7,952
5	0,73	4,27	2,248	1,028	8,954
5,5	0,73	4,77	2,241	1,028	9,927
Dzy 4,65	0,73	3,92	2,257	1,028	8,282

**Tablo 3.b. Binder karışımlarının efektif bitüm yüzdeleri**

$W_a$ (%)	$P_{abs}$ (%)	$P_{efbit}$ (%)	$D_p$	$G_{bit}$	$V_{efbit}$ (%)
3	0,66	2,34	2,179	1,028	4,847
3,5	0,66	2,84	2,204	1,028	5,921
4	0,66	3,34	2,231	1,028	7,014
4,5	0,66	3,84	2,248	1,028	8,088
5	0,66	4,34	2,255	1,028	9,124
5,5	0,66	4,84	2,25	1,028	10,104
6	0,66	5,34	2,246	1,028	11,074
Dzy 5,04	0,66	4,38	2,256	1,028	9,209

**Tablo 3.c. Aşınma karışımlarının efektif bitüm yüzdeleri**

$W_a$ (%)	$P_{abs}$ (%)	$P_{efbit}$ (%)	$D_p$	$G_{bit}$	$V_{efbit}$ (%)
3,5	0,66	2,84	2,152	1,028	5,781
4	0,66	3,34	2,175	1,028	6,838
4,5	0,66	3,84	2,194	1,028	7,894
5	0,66	4,34	2,23	1,028	9,022
5,5	0,66	4,84	2,249	1,028	10,098
6	0,66	5,34	2,244	1,028	11,067
6,5	0,66	5,84	2,238	1,028	12,011
Dzy 5,54	0,66	4,88	2,246	1,028	10,166

Karışımlarda kullanılan B70/100 sınıfı bitümün performans sınıflandırılması PG 64-28 kabul edilerek bu performansa ait A ve VTS parametreleri sırasıyla 10.312, -3.440 alınarak farklı sıcaklıklarda Eşitlik 9’a göre bitüm viskozitesi hesaplanmıştır (Tablo-4).

**Tablo 4. Bitüm viskozite değerleri**

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

Karışımların farklı frekans (25,10,5,1,0,5,0,1,0,05,0,025).Hz.ve (-10,0,4 4,21 1,37 8,54 4 )°C sıcaklıklarda dinamik rijitlik modülü Eşitlik 7’ye göre hesaplanarak Tablo 5’ te gösterilmiştir .Bu değerlere göre aynı sıcaklıkta frekans azaldıkça ve aynı frekansta sıcaklık yükseldikçe dinamik rijitlik modülün azaldığı; ayrıca maksimum dane boyutuna göre 19.10 mm elek üzerinde kalan malzeme miktarı artıkça dinamik rijitlik modülünün artığı bu nedenle bitümlü temel bitümlü tabakalar arasında en yüksek dinamik rijitlik modülüne sahip olduğu tespit edilmiştir

**Tablo 5.a. Aşınma karışımlarının farklı frekans ve sıcaklıklara göre hesaplanan dinamik rijitlik modülü**

f (Hz)	Sıcaklık °C					
	-10	0	4,4	21,11	37,8	54,4
	E (psi)					
25	3301590	2357617	1957726	814234	295910	113182
10	3123971	2148000	1749624	674523	231433	86242
5	2983238	1988996	1595275	579922	190974	70088
1	2638381	1625420	1254355	396999	120218	43282
0,5	2483712	1474193	1117767	333368	97969	35240
0,1	2116714	1144117	831221	217006	60543	22107



Tablo 5.b. Binder karışımlarının farklı frekans ve sıcaklıklara göre hesaplanan dinamik rijitlik modülü

f (Hz)	Sıcaklık °C					
	-10	0	4,4	21,11	37,8	54,4
	E (psi)					
25	4038254	2858505	2362204	960291	339920	126805
10	3815511	2598052	2104944	791631	264159	95941
5	3639257	2400925	1914644	677936	216892	77551
1	3208296	1951774	1496085	459544	134899	47294
0,5	3015474	1765692	1329181	384139	109350	38301
0,1	2559234	1361341	980851	247277	66735	23738
0,05	2362292	1202196	849568	202688	53925	19451
0,025	2167193	1053581	730195	165390	43621	16021

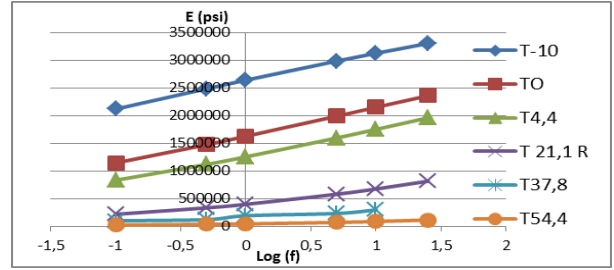
Tablo.5.c Bitümlü temel karışımlarının farklı frekans ve sıcaklıklara göre hesaplanan dinamik rijitlik modülü

f (Hz)	Sıcaklık °C					
	-10	0	4,4	21,11	37,8	54,4
	E (psi)					
25	4919053	3455300	2843283	1132926	391862	143008
10	4641859	3133797	2527135	929938	302819	107530
5	4422773	2890937	2293820	793635	247546	86507
1	3888100	2339304	1782553	533334	152345	52179
0,5	3649382	2111559	1579525	444045	122916	42058
0,1	3085940	1618603	1157728	283050	74194	25791
0,05	2843391	1425432	999568	230985	59668	21039
0,025	2603558	1245556	856226	187628	48040	17254

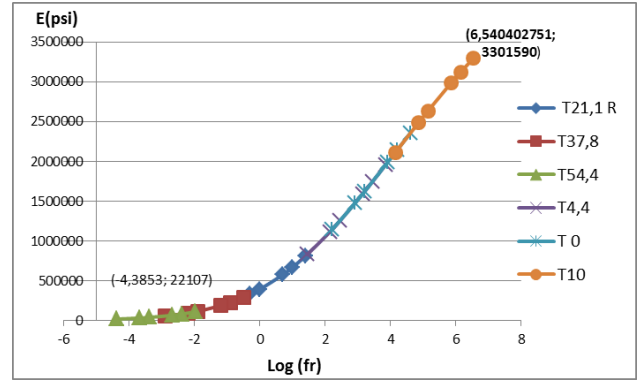
Belirtilen sıcaklık ve frekansta hesaplanan aşınma tabakasına ait dinamik rijitlik modülünün değişimi (Şekil 6) 21.1 °C referans sıcaklığına göre düzeltilmiş frekanslarla (Tablo-6 ) çizilen dinamik rijitlik modülü ana eğri Şekil 7’de gösterilmiştir. Bitümlü temel, binder tabakaları içinde aynı hesaplamalar yapılarak dinamik rijitlik modülü ana eğrileri çizilmiştir(Şekil 8).

Tablo 6. Referans sıcaklığında (21 11 °C) düzeltilmiş frekanslar

	Sıcaklık °C					
	-10	0	4,4	21,1	37,8	54,4
	Düzeltilmiş Frekans Log(f)					
6,540403	4,599605	3,841299	1,39794	-0,5	-1,98737	
6,142463	4,201665	3,443359	1	-0,898	-2,38531	
5,841433	3,900635	3,142329	0,69897	-1,199	-2,68634	
5,142463	3,201665	2,443359	0	-1,898	-3,38531	
4,841433	2,900635	2,142329	-0,30103	-2,199	-3,68634	
4,142463	2,201665	1,443359	-1	-2,898	-4,38531	
3,841433	1,900635	1,142329	-1,30103	-3,199	-4,68634	
3,540403	1,599605	0,841299	-1,60206	-3,5	-4,98737	

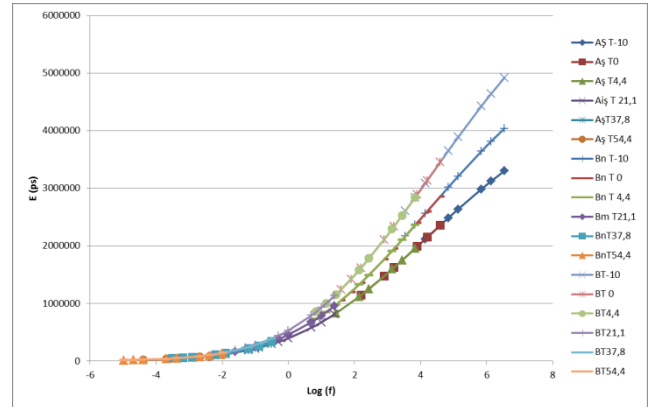


Şekil 6. Farklı sıcaklıklarda aşınma karışımının frekanslara göre dinamik modülü



Şekil 7. Referans sıcaklığında (21,1 °C) aşınma tabakasının dinamik rijitlik modülü ana eğrisi

Tabakaların referans sıcaklığına göre çizilen dinamik rijitlik modülü ana eğrilerinden görüleceği (Şekil-8) üzere 1 Hz’e kadar dinamik modülleri birbirine yakın olmasına karşın düşük sıcaklıklarda 1 Hz’den büyük frekanslarda tabakaların dinamik modülleri arasında fark atmakta olup; tasarımcıların analitik hesaplamalarda bu durumu göz önüne alması ekonomiklik ve yoğun trafigin olduğu kaplamaların performansı açısından önem arz etmektedir

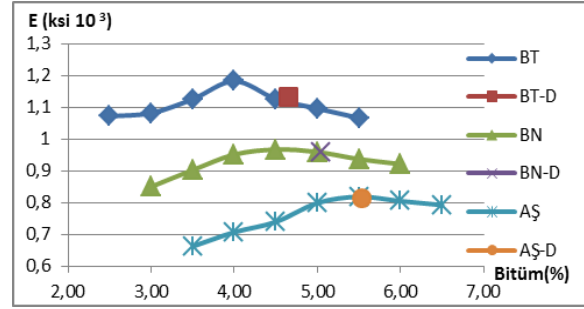


Şekil 8. Referans sıcaklığında (21,1 °C) aşınma binder, bitümlü temel tabakalarının dinamik rijitlik modülü ana eğrileri

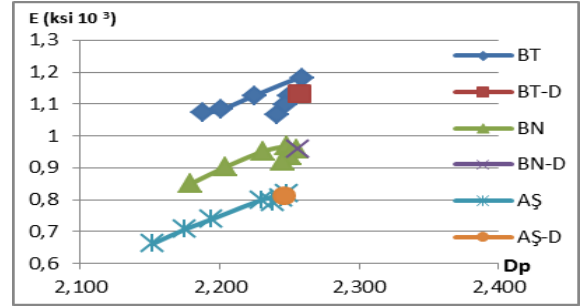
Ülkemizde tabakaların karışım dizaynında yaygın olarak kullanılan Marshall dizaynından elde edilen bitüm yüzdelere ( $W_a$ ) göre pratik özgül ağırlık ( $D_p$ ), boşluk ( $V_h$ ), agregalar arası boşluk ( $VMA$ ), bitümle dolu boşluk ( $V_f$ ), akma ve stabiliteyle tabakaların rijitlik modülü arasında ilişkinin araştırılmasının deney zamanı, maliyetleri ve tasarımcıya analitik hesaplamalarda öngürüde bulunması açısından önemli olduğu düşünülmektedir. Tabaka karışımlarının dizaynında kullanılan bitüm yüzdelere göre 21,1 °C referans sıcaklığında ve 25 Hz frekansta (0,04 sn yükleme süresi) hesaplanan dinamik rijitlik modüllerle (Tablo - 7) aynı bitüm yüzdesine ait Marshall dizayn sonuçları grafik olarak Şekil -9'da gösterilmiştir. Tabakaların dinamik modülünün Marshall briketi parametreleriyle ilişkisi incelendiğinde; Marshall biriketlerinin  $D_p$ ,  $V_f$ ,  $W_a$  ve stabilite değerlerinin artışıyla dinamik rijitlik modülü artarak maksimum noktaya ulaştıktan sonra tekrar düştüğü,  $V_h$  ve  $VMA$  değerleri azaldıkça dinamik modülün arttığı,  $V_h$  belli bir noktada dinamik modülü maksimum yaptıktan sonra boşluğun artmasıyla dinamik modülünde azaldığı tespit edilmiştir. Aşınma karışımlarında optimum bitüm yüzdesinde maksimum dinamik rijitlik modülü elde ederken diğer karışımlarda optimum bitümde maksimum dinamik modül elde edilmemiştir.

Tablo 7. Bitüm yüzdesine göre tabakaların dinamik modülü

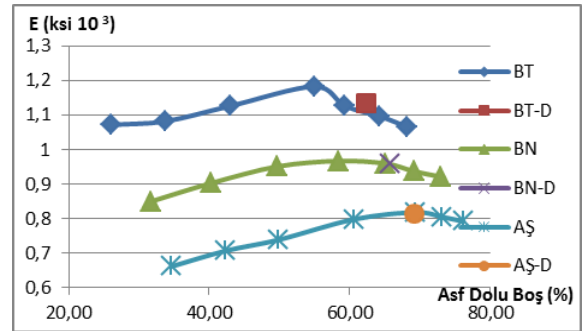
Bitümlü Temel		Binder		Aşınma	
$W_a$	E(psi)	$W_a$	E(psi)	$W_a$	E(psi)
2,50	1072405,87	3,00	850268,44	3,50	662395,96
3,00	1082487,30	3,50	902898,06	4,00	707087,63
3,50	1126418,55	4,00	951728,85	4,50	739358,58
4,00	1183213,77	4,50	967586,26	5,00	799036,88
4,50	1127162,91	5,00	959926,73	5,50	818742,88
5,00	1096751,07	5,50	937301,54	6,00	805088,81
5,50	1067039,54	6,00	921746,32	6,50	792536,86
Dzy 4,65	1132925,83	Dzy 5,04	960451,67	Dzy 5,54	814234,26



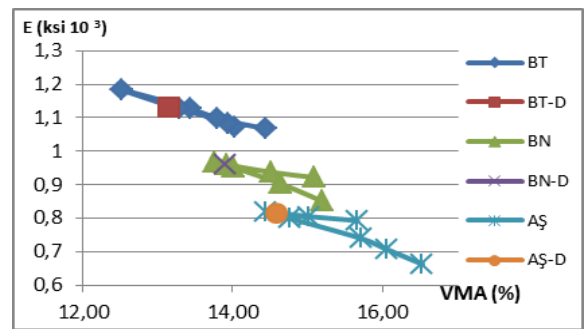
a) Dinamik Modül -  $W_a$



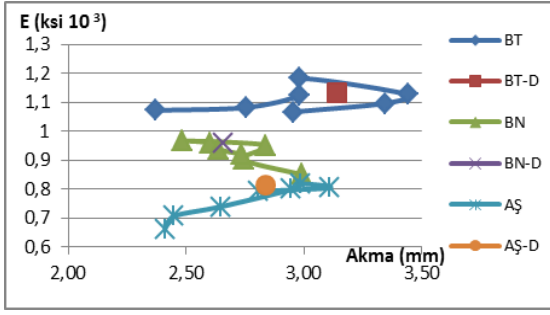
b) Dinamik Modül -  $D_p$



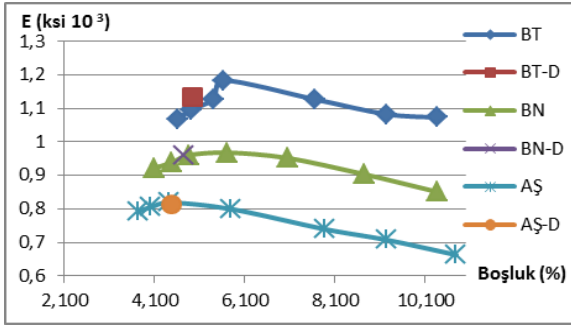
c) Dinamik Modül -  $V_f$



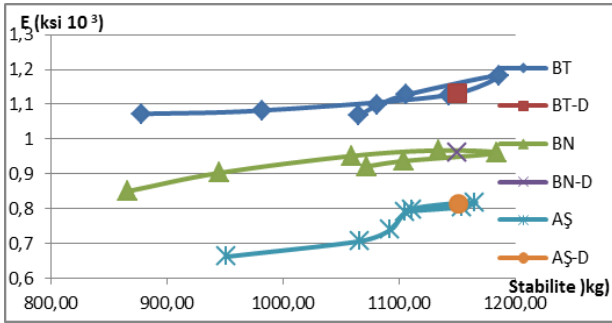
d) Dinamik Modül -  $VMA$



e) Dinamik Modül – Akma



f) Dinamik Modül – Vh



g) Dinamik Modül – Stabilite

Şekil 9. Karışımların dinamik modül Marshall parameter eğrileri

### Sonuçlar

Aşınma, binder ve bitümlü temel karışımlarının Marshall dizayn verileriyle belirtilen sıcaklık ve frekansta tahmin modeliyle hesaplanan dinamik rijitlik nodüllerinden,

- Karışımlarda 19 mm elek üzerinde kalan malzemenin dinamik rijitlik modülünü artırdığından, trafik yükü ve sıcaklıktan en fazla etkilenen aşınma tabakası karışımlarının kaplama konforunda dikkate alınarak maksimum dane boyutunun büyütülmesi
- Marshall dizaynından hesaplanan optimum bitümden sonraki bitüm

artışlarının dinamik rijitlik modülünü azalttığı

- Referans sıcaklığına göre 25 Hz frekansta bitümlü temel binder ve binder, aşınma tabakalarının dinamik rijitlik modülleri arasında %18 fark olduğu
- Aynı sıcaklıkta frekans azaldıkça ve aynı frekansta sıcaklık yükseldikçe dinamik rijitlik modülüm azaldığı
- Sıcaklıkların yükleme sürelerine göre dinamik rijitlik modülünü daha fazla etkilediği
- Marsahall stabilitesi ve akma değerlerinin deney sıcaklıklarının, projenin sıcaklık değerleri göz önüne alınarak belirlenmesi buna göre tabakaların izafi mukavemet katsayılarının hesaplanması gerektiği tespit edilmiştir.

### Kaynaklar

- [1] Kök Eda, “ Karayolu Havaalanı Üstyapı Tasarım Yöntemleri Karşılaştırılmazı ve Türkiye Uygulamaları” İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi , 2-3, 2008,
- [2] A.Stephen,P.Cross,“Determination of Dynamic Modulus Master Curves for Oklahoma HMA Mixtures” Oklahoma State University, Final Report, - 5 ,(2007)
- [3] AASHTO, Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide , 10-27, 2008,
- [4] KGM, Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Teknik Araştırmas Dairesi Üst Yapı Şubesi Müdürlüğü, 5-99,2008
- [5] Karayolları Genel Müdürlüğü Birim Fiyatları <https://birimfiyat.com/> (17.09.2019)
- [6] A.Güngör, A.Sağlık “ Mekanistik Amprik Üstyapı Tasarımında Esneklik Modülünün Şartnamelere Uygulanması” Gazi University 18 Publication ,4-7,2009
- [7] A.Tunç, Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı ,199-201 ,2004
- [8] K.Sarayoot,“Comparision Between Resilent Modülüs and Dinamic Modülüs of Western Australian Hot Mix Asphalt Basaed on Fleixible Pavement Design Prespectives” 26th ARRB Conference -Reseach

- Driving Efficiency Sdney ,1-18, Sempozyumu (İATS'09), 1-4,2009
- [9] R.Timothy,"Dynamic and Resilient Modulus of Mn/DOT Asphalt Mixtures "Department of Civil EngineeringUniversity of Minnesota Technical ReportDocumentation,14,2003
- [10] M Y.Huang Pavement Analysis and Design Second Edition ,307,2006
- [11] Y.Xiao "Evaluation of Engineering Properties of Hot Mix Asphalt Concrete for the Mechanistic-Empirical Pavement Design"Ph.D thesis. Florida State University ,20-41,2009
- [12] S. Cross, "Development of a Flexible Pavement Database for Local Calibration of the MEPDG",Final Report – FHWA-OK-11-06 (2), 7-22,2011
- [13] G.Garcia ,M. Thompson, "HMA Dynamic Modulu Predictive Models –A Review" Research Report FHWA-ICT-07-005 ,8-20,2007
- [14] A.Enwuso, "Comparative Study of Asphalt Institute – Witczak 1-40D Dynamic Moduli for Polythene Bag Modified HMA Concrete Using Predictive Models" International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, Vol 3 Issue 5 IJSET , 46-48,2016
- [15] S.Avcı,"Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemlerinin AASHTO 2002 İle AASHTO 1993 Yöntemlerinin Karşılaştırılması "İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi 10-23,2006
- [16] M.Robbins," Thesis Graduate ,An Investigation Into Dynamic Modulus of Hot –Mix Asphalt AndIt's Contributing Factors"Graduate Faculty of Auburn University 17-21,2009
- [17] S.Yousefdoost,B.Vuong,P.Armstrong and B,Sullivan" Evaluation of Dynamic Modulus Predictive Models for Typical Australian Asphalt Mixes" 15th AAPA International Flexible Pavements Conference, 3-7,2013
- [18] N.Kuloğlu ,"Bittüm ve Bittümlü Sıcak Karışım Rijitliğine Etki Eden Parametreler" Turk J Engin Environ Sci 25 (2001) , 61 -67 TÜBİTAK, 2001
- [19] E.Sayın ,H.Tanyıldızı, "Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliğinin Bulanık Mantık ile Bulunması" Gazi Üniv Müh Mim Fak Der J Fac Eng Arch Gazi Univ Cilt 21, No 4, 645-649, 2006. ,
- [20] E.Özgan, M. Emiroğlu,A.Beycioğlu , K.Yıldız "Asfalt Beronunda Rijitliğin Belirlenmesi İçin Bir Yaklaşım", 5 Uluslararası İleri Teknolojiler
- [21] M.Yılmaz, B.V.Kök,"Sivas Divriği Çelik Cürufunun Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliği" C Ü Fen-Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi Cilt 30 Sayı 1 1-18,
- [22] M.Alataş , A.Perviz A, Y.Doğan," Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agrega Cinsinin Kaplamanın Fiziksel Özelliklerine Etkisi" Fırat Üniv Fen veMüh Bil Der Science and Eng J of F ırat Univ 18 (1), 81-89,2006 Conference -
- [23] G.Garcia ,M.Thompso,"HMA Dynamic Modulu Predictive Models–Temperature Relations" Research Report FHWA-ICT-07-006,2-65,2007
- [24] R.Timothy ,"Dynamic and Resilient Modulus of Mn/DOT Asphalt Mixtures "Department of Civil EngineeringUniversity of Minnesota Technical Report Documentation,14,2003
- [25] T.Bennert 2009 "Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt"FHWA-NJ-2009-011 Final Report,60-81,2009
- [26] Y.Jianhu,"Modification of Dynamic Modulus PredictiveModels for Asphalt Mixtures Containing Recycled Asphalt Shingles " A thesis Submitted to the Graduate Faculty Iowa State University ,9-72,2012
- [27] Y.Huanan , S.Shen,"An Investigation of Dynamic Modulus And Flow Number Proporties of Asphalt Mixtures İn Washington Washington State "University Research Project Agreement No 709867 Final Report ,14-81,2012
- [28] J.L.Hyun"Performance Evaluation of High Modulus Asphalt Mixtures for Long Llife Asphalt Pavements" Construction and Building Materials 21 (2007) 1079–1087 2007
- [29] A.Sağlık,A.G.Güngör ,"Resilent Modulus Of Unbound and Bituminous Bound Road Materials" 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 5-9,2012
- [30] J.Stempihar, "Resilient Modulus to Dynamic Modulus Relationship and Pavement Analysis with the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide" Research Report Arizona State University 2-6,2015
- [31] S.Esfandiarpour ,"An evaluation of Pavement ME Design dynamic modulus prediction model for asphalt mixes containing RAP" The 2015 Conference of the Transportation Association of Canada 3-18,2015
- [32] J.Myung ,J. Younghan,"Dynamic Complex Modulus Prediction of Non-Conventional Asphalt Mixes" 51st ASC Annual International Conference Proceedings 2-8,2015.