

Bitümlü karışımların gerilme-şekil değiştirme davranışı

Altan ÇETİN*, Emine AĞAR

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ulaştırma Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Bitümlü karışımların tasarımı için halen yaygın olarak kullanılmakta olan ampirik yöntemler, sıkıştırılmış karışımların gerçek malzeme özelliklerini tam olarak yansıtamamakta ve yalnızca kabul-red ölçütü olarak kullanılabilir. Asfalt kaplama performanslarının tahminine yönelik tasarım yöntemlerinde kullanılan temel malzeme özelliklerinin belirlenmesine gereksinim duyulmaktadır. Üç Eksenli Kayma Mukavemeti (ÜKM) deneyi, özellikle zemin mekaniğinde kohezyonlu ve granüler malzemelerin davranışlarını belirlemede halen yaygın olarak kullanılmaktadır. Marshall yönteminin yetersiz kaldığı günümüzde ÜKM deneyinin bitümlü karışımların deformasyon davranışının belirlenmesinde daha gerçekçi sonuçlar vereceği düşünülmüştür. Bu çalışmada, agrega gradasyonun ve bağlayıcı yüzdesinin bitümlü karışımların deformasyon davranışı üzerindeki etkileri ÜKM deneyi ile incelenmiştir. Kalıcı deformasyonların yüksek sıcaklıklarda olduğu dikkate alınarak deneyler 40, 50, ve 60 °C'lerde gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 2006 yılında yayınlanan Karayolları Teknik Şartnamesinde yer alan üç farklı karışım tipi (Aşınma Tip-1, TMA Tip-1 ve TMA Tip-2) seçilmiştir. Tek tip bitümlü bağlayıcının (İzmit B 50-70) kullanıldığı çalışmada belirtilen karışım tipleri için Marshall ve statik sıkıştırma yöntemleri ile hazırlanan numuneler üzerinde Marshall tasarımları yapılmıştır. ÜKM deney numunelerinin hazırlanmasında çift taraflı statik sıkıştırma yöntemi kullanılmıştır. ÜKM deneyinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri, incelenen parametrelerin deformasyon direnci üzerindeki bilinen etkilerini çok iyi derecede açıklamaktadır. Marshall deneyi sonuçları Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımların gerçek deformasyon direncini yansıtmazken, ÜKM deney sonuçları agrega gradasyonun deformasyon direncine olumlu etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, ÜKM deneyinin karışım tasarımında ve kalıcı deformasyon tahmininde kullanılabilirliğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Bitümlü karışımlar, deformasyon direnci, üç eksenli kayma mukavemeti deneyi, gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, agrega gradasyonu, bitüm yüzdesi.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Altan ÇETİN. alcetin@anadolu.edu.tr; Tel: (222) 321 35 50 dahili:6614.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ulaştırma Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Bitümlü sıcak karışımların deformasyon direncinin üç eksenli kayma mukavemeti deneyi ile incelenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 04.07.2008 tarihinde dergiye ulaşmış, 17.09.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Stress-strain behaviour of bituminous mixtures

Extended abstract

All over the world, established and new hot-mix asphalt design methods may be classified as recipe, empirical, volumetric, performed-related and performed based. Simulation and fundamental test methods are generally carried out in recently developed performance-related and performance-based mix design methods since they give the best relations between the results obtained in-situ and laboratory. In addition to this, simulation and fundamental test methods measure the material response under various stress conditions. In the analytical design, the fundamental properties of materials of pavement layers are required to determine stress-strain curve of the structure. Well known empirical design methods such as Marshall do not reflect the material properties. On the other hand, Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave) which is the cutting edge method in mix design requires complicated and expensive equipment. For this reason, economical and less complicated methods are investigated. The triaxial shear strength test is not new in concept and theoretical development. The triaxial shear strength test has been shown to be suitable for evaluating the strength of asphalt concrete mixtures. The triaxial test is widely used in soil mechanics in order to determine the shearing resistance and stress deformation behavior of cohesive and granular materials under various conditions of axial loadings and confining pressures and drainage conditions of test specimens. Asphalt concrete mixtures which are composed of aggregates, bitumen and air are some extend analogous to soils which are composed of soil solids, water and air. Thus it is logical to apply the theory for the triaxial testing developed in soil mechanic to asphalt concrete mixtures. However, the use of the triaxial test for testing asphaltic paving materials is slow in acceptance by pavement engineers mainly due to the complexity of the test and also the lack of a standard procedure. This is evident by the scarcity of published information on the use of the triaxial test for strength testing of asphalt concrete mixtures since the pioneering work of the Triaxial Institute in the early 1950's. Research in this direction was discontinued due to the complexity of the laboratory triaxial tests, which are time consuming and the difficulties in relating the test results to field behavior of asphalt mixtures.

In this study the deformation resistances of hot-mix asphalt mixtures were investigated by the means of triaxial shear strength test. Effects of grading, bitumen content and the temperature on the deformation resistance were investigated. For this purpose, three different asphalt mixtures (Wearing Course Type-1, SMA Type-1 and SMA Type-) were selected. The Marshall mix design (ASTM D 1559) were carried out on three different mixtures. Triaxial shear strength test was conducted on the specimens prepared by double-plunger static compression method. In total, 132 and 145 were tested for the Marshall Design, triaxial shear strength test, respectively. A preliminary study investigated the compaction energy for Wearing Course Type-1 and Stone Mastic Asphalt (SMA) by using the double-plunger compaction equipment as detailed in ASTM D 1074. Later, optimum bitumen contents of mixtures prepared utilizing both static and Marshall Compactor were determined by Marshall Design method. In experimental study, the effect of mixture gradation and the bitumen content on the deformation resistance were examined by the triaxial shear strength tests. For this purpose, İzmir B 50-70 bitumen were used in three different contents. The triaxial shear strength tests were conducted at temperatures of 40, 50 and 60 °C.

According to the results, compared to deviator stress values between Wearing Course Type-1 and SMA mixtures for specimens tested at 40 °C, the discrepancy were relating high than the specimens tested at 50 °C and 60 °C. In addition, the deformation resistance of Wearing Course Type-1 was reduced more than that of SMA mixtures at 50 and 60 °C. It should also be noted that the stress-strain curves related to Wearing Course Type-1 were located under those related SMA mixtures. The results revealed that the effects of gradation on deformation resistance were positive at higher temperatures such as 50 and 60 °C. The results revealed that gap grading is superior to continuous grading in terms of deformation resistant. The results revealed that gap grading is superior to continuous grading in terms of deformation resistant. More realistic results were obtained from the stress-strain curves showing the effects of above parameters on the deformation resistance.

Keywords: Bituminous mixtures, deformation resistance, triaxial shear strength test, stress-strain, gradation of aggregate, bitumen content.

Giriş

Asfalt betonu karışımların tasarımında, kaplama bozulmalarının en aza indirilmesi amacıyla bağlayıcı ve agrega gibi karışım bileşenlerinin doğru olarak seçilmesi hedeflenir. Halen kullanılan Marshall (ASTM D1559) tasarım yöntemi, sıkıştırılmış bitümlü karışımların içsel sürtünme ve rijitlik gibi temel özelliklerini yansıtmayan ampirik bir yaklaşımdır. Bununla beraber, Strategic Highway Research Program (SHRP) çerçevesinde geliştirilen performans dayalı deneylerin efektif olarak kullanılmayışı, asfalt kaplamaların performans özelliklerinin belirlenmesinde alternatif olabilecek daha basit deney yöntemlerinin araştırılmasının gerekliliğini orta-ya koymaktadır (Witczak vd., 2002).

Agrega, bitüm ve hava boşluğundan oluşan bitümlü karışımlar, zemin taneleri, su ve havadan oluşan zemin ile büyük ölçüde benzeşmektedir. Dolayısıyla, zemin mekaniğinde geliştirilen üç eksenli deney teorisinin asfalt betonu karışımlara uygulanması mantıklı görülmektedir (Tan vd., 1994). 1950'li yılların başlarında, kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) kavramları asfalt kaplama karışımların tasarımında kullanılması etkin bir araştırma alanıydı. Bununla beraber araştırmacılar, üç eksenli kayma mukavemeti deneylerinin Marshall deneyi gibi ampirik deneylere göre uzun zaman alması, karmaşıklığına bağlı olarak uygulamacılar arasında rağbet görmemesi sebebiyle bu alandaki çalışmalarını devam ettirmediler. Bu alanda yapılan çalışmaların azlığı bunun bir göstergesidir (Fwa vd., 2001).

Smith (1950), tarafından yapılan çalışma bu alanda öncülük etmiş ve üç eksenli tasarım yöntemi olarak literatürde yer almıştır. Smith'in bitümlü karışım tasarım alanına en büyük katkısı, arazide inşa edildiğinde stabilliği sağlanan bitümlü karışımlara ait kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleriyle oluşturduğu tasarım abaklarıdır. Bitümlü karışımların temel gerilme özelliklerinin değerlendirilmesinde üç eksenli kayma mukavemeti deney yönteminin kullanıldığı çalışmalardan elde edilen bulgular, içsel sürtünme açısının şekil değiştirme hızından etkilenmediği, şekil değiştirme hızı arttığında ko-

hezyon değerinin arttığını göstermektedir (Duriez ve Arrambide, 1954; Goetz ve Chen, 1950). Yüksek bitüm yüzdesinde deviatör gerilmeye oluşan azalmanın, bitümlü bağlayıcının yumuşama davranışıyla ilişkili olduğu saptanmış, bazı ilişkilerin anlaşılmasında Üç-eksenli Kayma Mukavemeti (ÜKM) deneyinin yumuşama evrelerini içeren farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilmesinin gerekliliği vurgulanmıştır (Akili, 1975).

Günümüzde de bitümlü karışımların içsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyon (c) ve elastik sıkışma modülü gibi mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde üç eksenli basınç deneyinin kullanımını araştıran çalışmalara azda olsa rastlanmaktadır (Tan vd., 1994; Pellinen vd., 2004). Bu çalışmalarda da deney sıcaklığı, şekil değiştirme oranı ve hücre basıncının asfalt betonunun sıkışma davranışı üzerindeki etkileri incelenmektedir. Diğer bir çalışmada, ÜKM deneyi ve Marshall deneyi sonuçları arasında bir bağıntı kurmak amacıyla kohezyon, içsel sürtünme açısı ve elastik modül gibi üç eksenli deney parametreleri ile Marshall deneyi sonuçları arasında istatistiksel bir bağlantı olduğunu belirlemişlerdir (Low vd., 1993).

TMA karışımların kalıcı deformasyon direncinin geleneksel asfalt betonuna göre daha iyi olduğu bilinmektedir. Fakat Marshall deneyi bu sonucu yansıtmamaktadır. Bu bağlamda, Marshall yönteminin yetersiz kaldığı günümüzde ÜKM deneyinin bitümlü karışımların deformasyon davranışının belirlenmesinde daha gerçekçi sonuçlar vereceği düşünülmüştür. Bu çalışmada, agrega gradasyonu ve bitümlü bağlayıcı yüzdesinin bitümlü karışımların deformasyon davranışına etkileri üç eksenli kayma mukavemeti deneyi ile incelenmiştir. ÜKM deneyinden elde edilen sonuçlar kullanılarak deviatör gerilmeler hesaplanmış ve karışımların gerilme-şekil değiştirme eğrileri çizilmiştir. İncelenen parametrelerin deformasyon direncine etkileri gerilme-şekil değiştirme eğrileri kullanılarak açıklanmıştır. Üç eksenli kayma mukavemeti deneyinden elde edilen kayma parametrelerinin karışımların kalıcı deformasyon tahmininde kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışmalar

Çalışmada öncelikle, Aşınma Tip-1 ve Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımlar için 150 mm yükseklikli numunelerin sıkıştırma enerjisinin belirlenmesi amacıyla bir ön çalışma gerçekleştirilmiştir. Statik sıkıştırma basınçları, Marshall tokmağı kullanılarak hazırlanan numunelerin birim hacim ağırlıkları dikkate alınarak belirlenmiştir. Seçilen karışım tipleri (Aşınma Tip-1 ve TMA Tip-1) üzerinde her iki sıkıştırma yöntemi kullanılarak yapılan Marshall tasarımları karşılaştırılmıştır. Agrega granülometrisi ve bitüm yüzdesinin kalıcı deformasyon direnci üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmada, üç farklı karışım tipi (Aşınma Tip-1, TMA Tip-1 ve TMA Tip-2) ve tek tip bitümlü bağlayıcı için en az üç farklı bitüm yüzdesinde hazırlanan numuneler üzerinde 40, 50 ve 60 °C’lerde ÜKM deneyi gerçekleştirilmiştir.

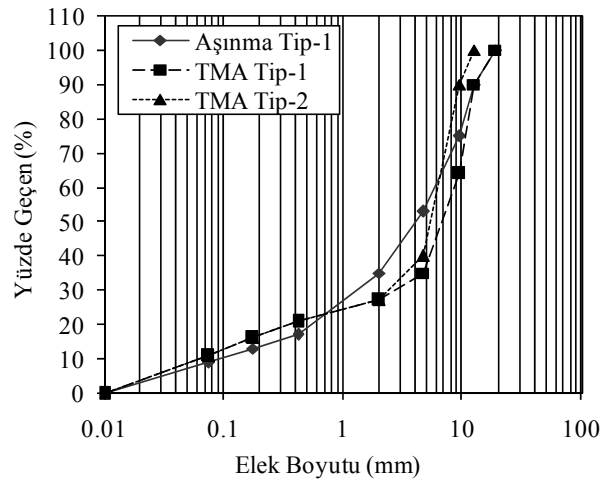
Kullanılan malzemeler

Bitümlü bağlayıcı ve selülozik fiber- Bu çalışmada, İzmir Rafinerisi ürünü olan B 70-100 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır. Bitümlü bağlayıcıya ait özellikler Tablo 1’de verilmiştir. Ayrıca, TMA karışımlardan bitümün süzülmesini önlemek amacıyla % 33 oranında bitüm emdirilmiş selülozik fiber (Viatop 66) kullanılmıştır. Schellenberger bitüm süzülme deneyi sonucunda, TMA Tip-1 ve TMA Tip-2 karışımlarda kullanılacak fiber miktarı yapılan önceki çalışmalarda dikkate alınarak karışım ağırlığının % 0.9 olarak belirlenmiştir. 3-4 mm çapında 2-3 mm uzunluğunda olan fiber karışım içinde homojen olarak dağılması için 1dakika süre ile agrega ile kuru olarak karıştırılmıştır.

Agrega- Çalışmada, kaba agrega olarak Eskişehir ili Kızılinler-Eşenkara bölgesindeki taş ocağın- dan temin edilen bazalt agrega, ince agrega ve filler olarak ise kireçtaşı agrega kullanılmıştır. Kaba (bazalt) agregaya ait özellikler Tablo 2’de verilmiştir. Bu çalışmada, 2006 yılında yayınlanan Karayolu Teknik Şartnamesi’nde yer alan yoğun gradasyonlu (Aşınma Tip-1) ve kesikli gradasyona sahip (TMA Tip-1 ve TMA Tip-2) karışımlar seçilmiştir. Şartname sınırları içerisinde kalacak şekilde seçilen karışımlara ait tane çapı dağılımları Şekil 1’de görülmektedir.

Tablo 1. Kullanılan bitümlü bağlayıcının özellikleri (İzmit B 50-70)

Özellikler ve standartlar	Değerler
Penetrasyon, 25 °C, (×0,1 mm) TS 118 EN 1426	69
Yumuşama nok., °C TS 120 EN 1427	49
Sertleşmeye karşı direnç, 163 °C	
Kütle kaybı, % TS 121 EN 12607-2	-0.13
Kalıcı penetrasyon, % TS 118 EN 1426	31
Sert. bitümün yum.nok., °C TS 120 EN 1427	54
Parlama noktası, °C TS 123 EN 22592	304
Özgül ağırlık TS 1087	1.030



Şekil 1. Seçilen karışımlara ait agrega granülometri eğrileri

Deney yöntemleri

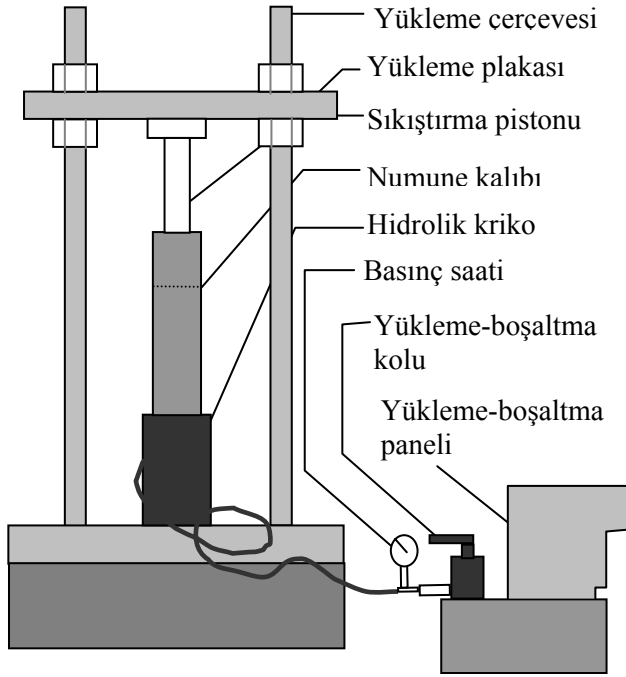
Numunelerin hazırlanması- Bu çalışmada, 101.6 mm çapında ve 150 mm yüksekliğindeki ÜKM deney numunelerinin hazırlanmasında, ASTM D-1074’te tanımlanan çift taraflı statik sıkıştırma yöntemi kullanılmıştır. Şekil 2’deki numune hazırlama düzeneği bir yükleme çerçevesi, 30 tonluk bir hidrolik yükleme aparatı ve otomatik yükleme-boşaltma elemanı ve özel numune kalıplarından oluşmaktadır.

Tablo 2. Kullanılan kaba agreganın (bazalt) özellikleri

Özellikler ve Standartlar	Standartlar	Kullanılan agrega değerleri	Limit değerler	
			Aşınma	TMA
Aşınma kaybı, maks. (%)	TS 3694 (ASTM C-131)	13.5	30	25
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık, maks. (%)	TS 3655 (ASTM C-88)	0.64	10	8
Kırılmışlık oranı, min. (%)	ASTM D 5821	100	100	100
Yassılık indeksi, maks. (%)	BS 812	24	30	25
Cilalanma değeri, min. (%)	TS EN 1097-8	53	50	50
Su absorpsiyonu, maks. (%)	TS 3526 (ASTM C-127)	1.65	2.0	2.0
Soyulma direnci, min. (%)	Kısım 403 EK-A	60-65	50	60

Bu yöntemde, sıkıştırma sıcaklığına ulaşan bitümlü karışım iki parça halinde, ısıtılmış ve yağlanmış kalıp içerisine yerleştirilerek spatula ile 15 defa dıştan olmak üzere 25 defa şişlenmiştir. Bitümlü karışımın kalıp kenarlarına iyice yerleşmesini sağlamak için 1 Mpa'lık ön bir sıkıştırma basıncı uygulanmıştır. Daha sonra Aşınma Tip-1 karışımlar 35 MPa'lık ve TMA karışımlar 25 MPa'lık basınç altında 20 dakika süreyle sıkıştırılmıştır.

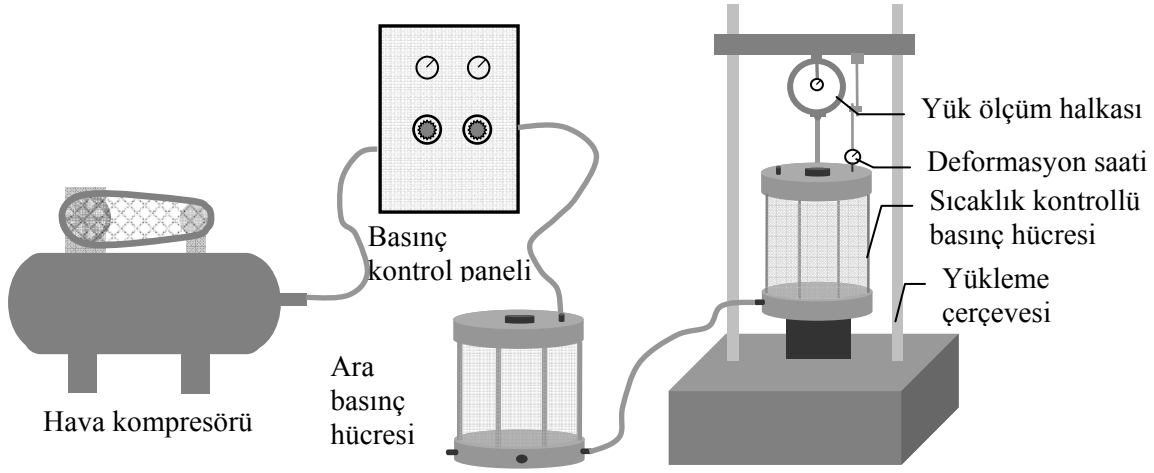
Statik sıkıştırma yöntemiyle hazırlanan numunelerin alt ve üst yüzeyleri kesme aleti ile düzeltilerek standart yüksekliklerde olması sağlanmıştır. Böylelikle, yüzeylerin dikliği ve pürüzsüzlüğü sağlanan ÜKM deney numunelerine başlık yapılmasına gerek kalmamıştır. Aynı zamanda, statik sıkıştırma yöntemi ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan Marshall tasarımlarında kullanılan numuneler de kesilerek elde edilmiştir.



Şekil 2. Çift taraflı statik sıkıştırma aleti

Üç-eksenli Kayma Mukavemeti (ÜKM) deneyi- Bu çalışmada, zemin mekaniğinde kullanılan üç eksenli kayma mukavemeti deney düzeneği esas alınmıştır. Şekil 3'te görülen deney sistemi, hava kompresörü, basınç kontrol paneli, ara basınç hücresi, 50 kN kapasiteli deformasyon kontrollü yüklem çerçevesi ve sıcaklık kontrollü basınç hücresinden oluşmaktadır.

Çalışmada zemin mekaniğinde kullanılan hücre tipinden farklı olarak sıcaklık kontrollü yeni bir basınç hücresi tasarlanmıştır. Deneylerin istenilen sıcaklıklarda yapılabilmesi için hücre tabanına termostat kontrollü dairesel bir ısıtıcı yerleştirilmiştir. Bu sistem ile hücre içerisindeki suyun sıcaklığı ± 0.5 °C hassasiyetle kontrol edilebilmektedir. Ayrıca, iki adet termal algılayıcı (thermocouple) vasıtasıyla hem hücre içerisindeki suyun, hem de numunenin sıcaklığı kontrol edilmektedir.



Şekil 3. Üç eksenli kayma mukavemeti deney düzeneği

Bitümlü karışımlarda uygulanan ÜKM deney yönteminin belirli bir standardı bulunmamaktadır. Bu konuda gerçekleştirilen önceki çalışmalar ışığında, araştırmada kullanılacak deney parametreleri belirlenmiştir. ÜKM deneyi, 1.27 mm/dak yüklem hızında gerçekleştirilmiştir. Değişen her bir deney parametresi (karışım tipi, bitüm yüzdesi, sıcaklık) için 69, 138, 207 ve 276 kPa hücre basınçlarında 4 adet numune test edilmiştir. Kalıcı deformasyon direnci deneylerinin gerçekleştirildiği sıcaklıklar ve bitümlü bağlayıcının yumuşama noktası değeri göz önüne alınarak deney sıcaklıkları 40, 50 ve 60°C olarak seçilmiştir. Bu deneyde 101.6 mm çapında ve 150 mm yüksekliğinde numuneler kullanılmıştır. Deney numunesinin hücre içerisindeki sudan yalıtımı lastik membranlar ve O-ringler aracılığıyla sağlanmıştır.

Hücre içerisine yerleştirilen numunelerin deney sıcaklığına ulaşması için yaklaşık 60 dakika beklenmiştir. Deney sırasında belirli deformasyon aralıklarında yük okumaları kaydedilmiştir. Bütün numuneler için 0.01 mm hassasiyetli deformasyon saatinin her 20 biriminde yük değerleri kaydedilmiştir. Numune kırıldıktan sonraki davranışın gözlenebilmesi için deformasyon 1000 birime ulaşmaya kadar deneyler devam ettirilmiştir. Her bir hücre basıncı için deney sırasında kaydedilen yük-şekil değiştirme verileri kullanılarak birim deformasyonlara karşılık gelen deviatör gerilme değerleri hesaplanmış ve dört farklı hücre basıncı için gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri çizilmiştir.

Deneysel çalışma sonuçları

Bitümlü sıcak karışımlar üzerinde gerçekleştirilen Marshall deneyi ve ÜKM deneyi sonuçları aşağıda verilmiştir.

Marshall deneyi sonuçları

Aşınma Tip-1 ve TMA karışımlar için iki farklı sıkıştırma yöntemi ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan Marshall tasarım sonuçları sırasıyla Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir. TMA Tip-2'ye ait karışım numuneleri yalnızca çift taraflı statik sıkıştırma yöntemi ile hazırlanmıştır. İki farklı sıkıştırma yönteminin (çift taraflı statik sıkıştırma ve Marshall kompaktörü) karşılaştırıldığı ön çalışma sonucunda, numunelerin birim hacim ağırlık ve Marshall tasarım değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir.

Karışım tipleri karşılaştırıldığında ise sürekli gradasyona sahip olan Aşınma Tip-1'in stabilite değeri kesikli gradasyona sahip olan TMA karışımlardan oldukça yüksektir. TMA Tip-1'in stabilite değeri azda olsa TMA Tip-2 karışımlardan yüksektir. Bilindiği üzere Marshall stabilite deneyi TMA karışımların performansının belirlenmesinde yetersiz kalmaktadır. 2006 yılında yayınlanan KTS'nde TMA karışımların tasarımında Marshall deneyi yer almamaktadır.

ÜKM deney sonuçları

ÜKM deneyinden elde edilen sonuçlar kullanılarak deviatör gerilmeler hesaplanmış ve karışımların gerilme-şekil değiştirme eğrileri çizil-

Tablo 3. Aşınma Tip-1 için Marshall tasarım sonuçları

Özellikler	Marshall kompaktörü için tasarım sonuçları	Statik sıkıştırma için tasarım sonuçları	KGM şartname limitleri	
			Min.	Maks.
Optimum bitüm, %	5.35	5.40	4.0	7.0
Birim hacim ağırlık, t/m ³	2.429	2.421	–	–
Stabilite, kgf	1125	1195	900	–
Akma, mm	3.65	3.62	2	4
Asf. dolu boşluk, %	72.5	72.9	65	75
Boşluk, %	3.94	3.98	3	5
VMA, %	14.03	14.13	14	–

miştir. Bu değer deformasyon direncinin bir göstergesidir. İncelenen parametrelerin deformasyon direncine etkileri gerilme-şekil değiştirme eğrileri kullanılarak açıklanmıştır. Seçilen hücre basınçlarındaki sonuçlar değişimleri genellikle aynı şekilde yansıttığından, burada 138 kPa hücre basıncındaki gerilme-şekil değiştirme grafikleri verilmiştir.

Şekil 4'te görüldüğü gibi, Aşınma Tip-1, TMA Tip-1 ve TMA Tip-2 karışımlar için en yüksek deviyatör gerilme değeri sırasıyla, % 5.5, % 6.5 ve % 7.0 bitüm oranlarında elde edilmiştir. Bu sonuçlar, maksimum Marshall stabilite değerinin elde edildiği bitüm yüzdeleri ile aynıdır.

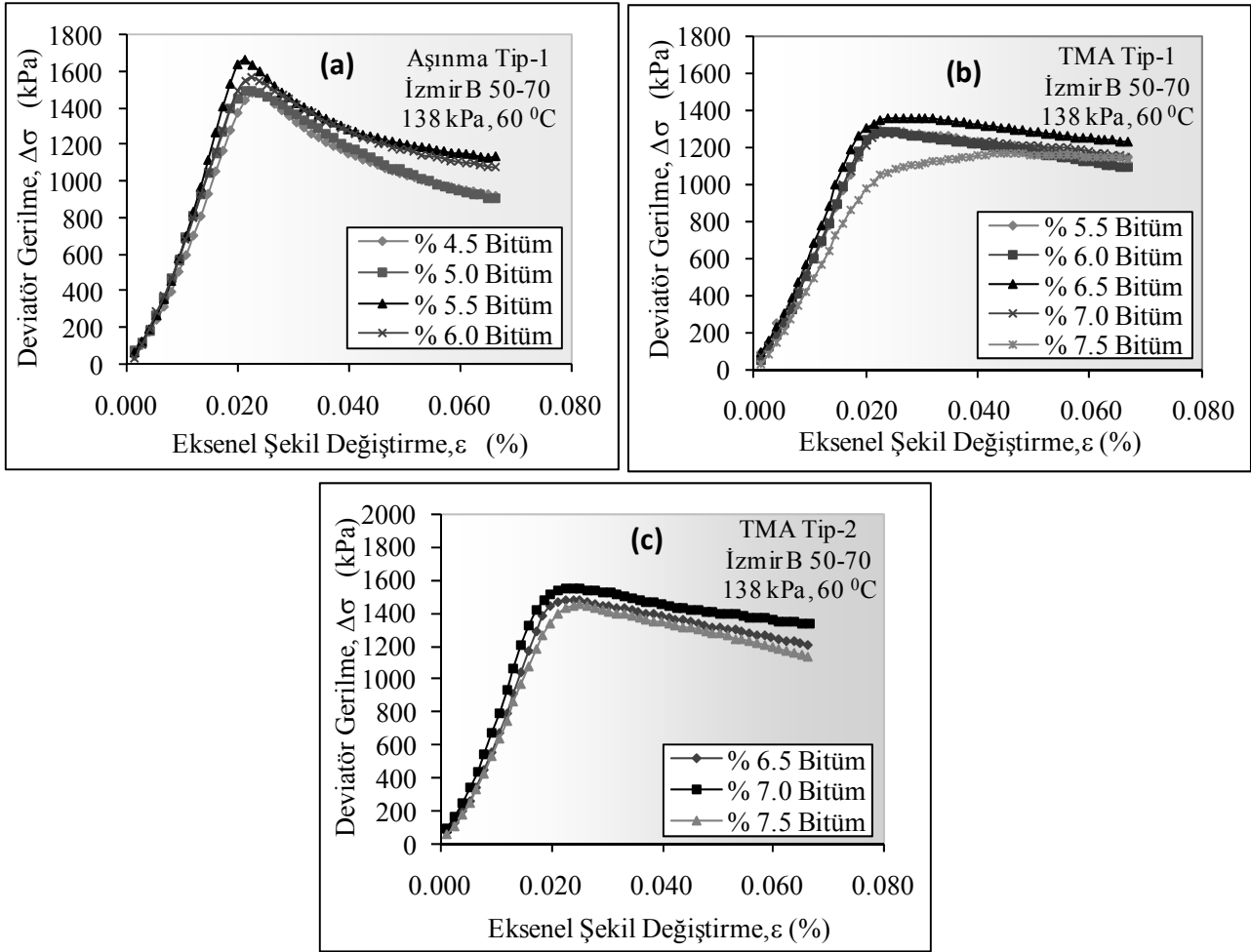
Şekil 5'teki grafikler incelendiğinde, Aşınma Tip-1'e ait 50 ile 60 °C'lerindeki gerilme-şekil değiştirme eğrileri birbirine yakinken, 50 ile 40

°C'lerindeki gerilme-şekil değiştirme eğrileri arasındaki fark oldukça büyüktür. TMA Tip-1 ve TMA Tip-2 karışımlarda ise 50 ile 60 °C'lerdeki gerilme-şekil değiştirme eğrileri hemen hemen aynıyken, 50 ile 40 °C'lerindeki gerilme-şekil değiştirme eğrileri arasındaki fark, Aşınma Tip-1'dekinin üçte biri kadardır. Bu sonuçlar, yumuşama noktası değerini geçen sıcaklıklarda bitümlü bağlayıcının deformasyon direncine katkısının oldukça azaldığını, kaba agregalar arasındaki kenetlenmenin sağlandığı TMA karışımların deformasyon direncinin bitümlü bağlayıcının dayanım kaybından çok daha az etkilendiğini göstermektedir.

Üç karışım tipine ait 40, 50, 60°C'lerindeki gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin verildiği Şekil 6'daki grafiklerde, Aşınma Tip-1 ile TMA karışımların 40 °C'de maksimum deviyatör gerilmeleri

Tablo 4. TMA Tip-1 ve TMA Tip-2 için Marshall tasarım sonuçları

Özellikler	TMA Tip-1 tasarım sonuçları		TMA Tip-2 tasarım sonuçları (Statik sıkıştırma)	KGM şartname limitleri	
	Marshall kompaktör	Statik sıkıştırma		Min.	Maks.
Optimum bitüm, %	6.61	6.80	6.9	4.0	7.0
Birim hacim ağırlık, t/m ³	2.359	2.368	2.391	–	–
Stabilite, kgf	709	876	837	900	–
Akma, mm	5.17	4.92	5.08	2	4
Bitümle dolu boşluk, %	77.0	80.0	82.5	65	75
Boşluk, %	3.89	3.35	3.10	3	5
VMA, %	16.95	16.93	17.04	14	–



Şekil 4. Farklı bitüm yüzdelerindeki üç karışım tipine ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri

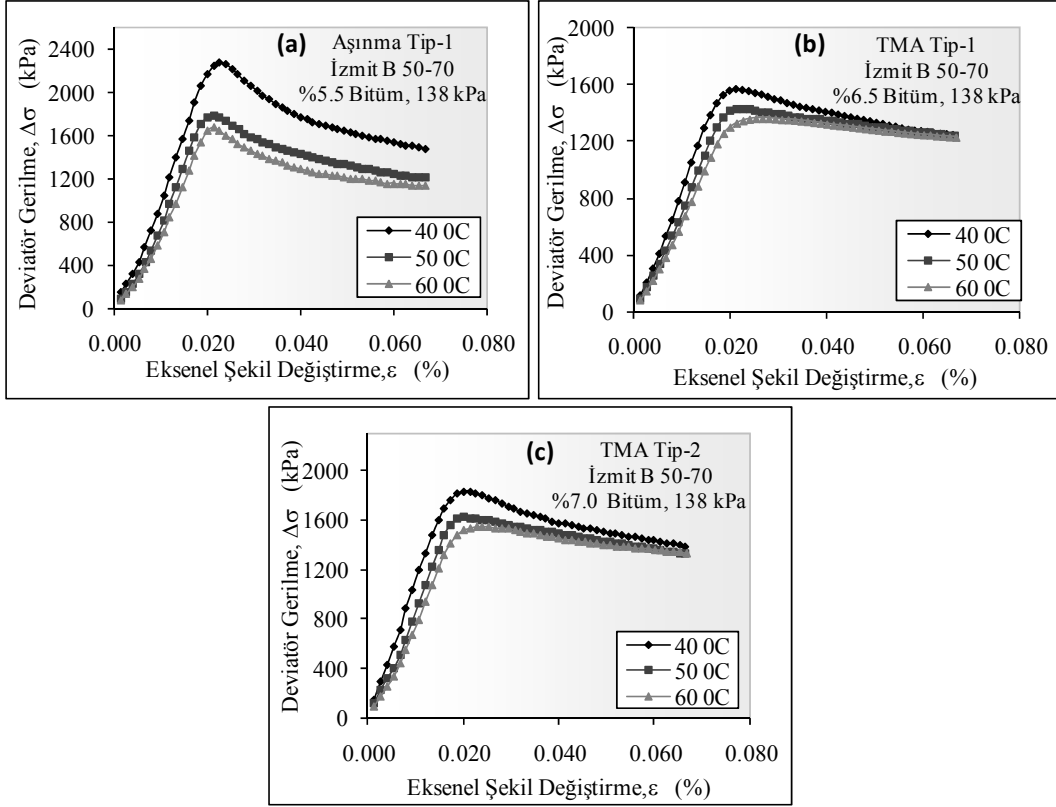
arasındaki fark yaklaşık 700 kPa civarında iken, 50 ve 60°C'lerde bu farkın yaklaşık 200 kPa düştüğü görülmektedir. Ayrıca, bu sıcaklıklarda yapılan deneylerdeki numuneler kırıldıktan sonra, Aşınma Tip-1'in deformasyon direncinde TMA karışımlara göre daha büyük oranda azalma gözlenmektedir, Aşınma Tip-1'e ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri TMA karışımların gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin altına düşmektedir. TMA Tip-1 ve TMA Tip-2 kırıldıktan sonraki gerilme değerlerinde ani ve aşırı bir azalma görülmemektedir. Bu sonuçlar, TMA karışımların yüksek sıcaklıklardaki deformasyon direncinde iri agrega miktarının olumlu etkisini ortaya koymaktadır.

Sonuçlar

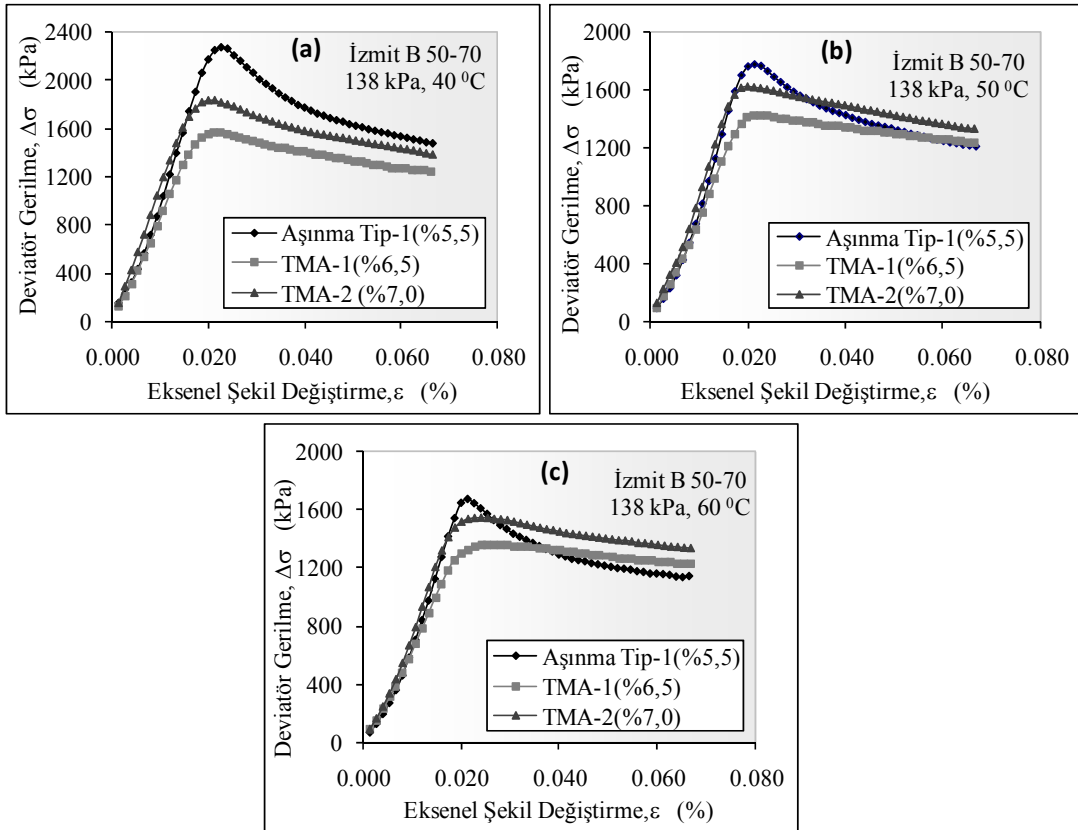
Deneysel çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Sıcaklık değişimlerinde deviatör gerilmeler arasındaki fark TMA karışımlarda Aşınma Tip-1'e göre daha azdır. TMA karışımlar maksimum deviatör gerilme değerine ulaştıktan sonra çok az bir dayanım kaybına uğramaktadır. Dolayısıyla, 50 ve 60°C'lerde TMA karışımların deformasyon direnci Aşınma Tip-1'den daha büyüktür. Bu sonuç, bitümlü bağlayıcıların TMA karışımların deformasyon direnci üzerindeki etkisinin daha az olduğunu ve karışımların yüksek sıcaklıklardaki deformasyon direncinde iri agrega miktarının olumlu etkisini göstermektedir.
- Üç eksenli kayma mukavemeti deney sonuçlarından, sıcaklık arttıkça deviatör gerilme değerlerinin düştüğü ve bunda bitümlü bağlayıcının yumuşama noktasının belirleyici olduğu saptanmıştır. Yumuşama noktası aşıldıktan sonra, bitümlü bağlayıcının deformasyon direncine katkısı oldukça azalmaktadır.

Bitümlü karışımların gerilme-şekil değiştirme davranışı



Şekil 5. Farklı sıcaklıklardaki üç karışım tipine ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri



Şekil 6. Üç karışım tipinin farklı sıcaklıklardaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri

- Bu çalışmada da Marshall deneyi bilindiği gibi TMA karışımların gerçek dayanım değerini yansıtmamıştır. Üç eksenli kayma mukavemeti deneyi sonuçları ise TMA karışımların deformasyon direncini gerçekçi olarak ortaya koymaktadır. Marshall deneyinde numuneye yanal basıncın uygulanamaması, TMA karışımların agrega iskeletinin deformasyon direncine olumlu etkisinin anlaşılmasına en büyük sebeptir.
- Üç eksenli kayma mukavemeti deneyleri, agrega gradasyonu ve bitümlü bağlayıcı yüzdesinin kalıcı deformasyon direncine bilinen etkisini yansıtmakta ve bitümlü sıcak karışımların gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin ve deformasyon direncinin belirlenmesinde gerçekçi sonuçlar vermektedir.
- ÜKM deneyi bitümlü karışımların ve özellikle TMA karışımlarının tasarımında alternatif bir performans esaslı deney olarak kullanılabilir.
- Üç eksenli kayma mukavemeti deneyi sonuçları kullanılarak kohezyon ve içsel sürtünme açıları belirlenebilmektedir. Bu çalışma sonuçları, kayma parametrelerinin bitümlü karışımların kalıcı deformasyon direncinin tahmininde kullanılmasının yerinde olacağını göstermektedir.

Kaynaklar

- Akili, W., (1975). Strength behavior of soil-asphalt mixtures in compression, *The Journal of the Institution of Highway Engineers*, **22**, 10, 9-13.
- ASTM D 1559-89, (1998). Test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using marshall apparatus, *ASTM Standard Specifications*, Pennsylvania.

- ASTM D 1074, (2002). Standard test method for compressive strength of bituminous mixtures, *ASTM Standard Specifications*, Pennsylvania.
- Duriez, M. ve Arrambide J., (1954). *Liants Hydrocarbonnes*, **481**, Dunod, Paris.
- Fwa, T.F., Tan, S.A. ve Zhu, L.Y., (2001). Reexamining c- ϕ concept for asphalt paving mix design, *Journal of Transportation Engineering*, **127**, 67-74.
- Goetz, W.H. ve Chen, C.C., (1950). Vacuum triaxial technique applied to bituminous aggregate mixtures, *Proceedings of Association of Asphalt Technologists*, **19**, 55-81.
- Low, B.H., Tan, S.A. ve Fwa, T.F., (1993). Analysis of marshall test behavior with triaxial test determined material properties, *Journal of Testing and Evaluation*, **21**, 192-198.
- Pellinen, T.K., Song, J. ve Xiao S., (2004). Characterization of hot mix asphalt with varying air voids content using triaxial shear strength test, *Proceedings, 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04)*, Sun City, South Africa.
- Smith, V.R., (1950). Application of the triaxial test to bituminous mixtures california research corporation method, *ASTM Special Technical Publication*, **106**, 55-78.
- Tan, S.A., Low, B.H. ve Fwa, T.F., (1994). Behavior of asphalt concrete mixtures in triaxial compression, *Journal of Testing and Evaluation*, **22**, 195-203.
- Witczak, M.W., Kaloush, K., Pellinen, T., El-Basyouny, M. ve Von Quintus, H., (2002). Simple performance test for superpave mix design, NCHRP Report 465, Transportation Research Board, Washington D.C.