

Sivas Divriği Çelik Cürufunun Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliği

Baha Vural KÖK, Mehmet YILMAZ*, Mesude YILMAZ

Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Elazığ
mehmetyilmaz@firat.edu.tr

Received: 16.04.2008, Accepted: 03.02.2009

Özet: Bu çalışmada Sivas Divriği Demir-Çelik Fabrikası'ndan temin edilen cürufun, bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla demir cürufu, doğal granülometrisine bağlı olarak 200 numaralı elek üzerinde kalan malzeme ve filler yerine kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca stiren-butadien-stiren modifiyeli bitümlerin cüruf içeren bitümlü sıcak karışımlar üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan Sivas Divriği Demir-Çelik Fabrikası'ndan temin edilen cüruf içeren numunelerin kalker kullanılan numunelere göre Marshall stabilite, kalıcı Marshall stabilitesi bakımından benzer performans sergilediği, Marshall oranı (MQ), indirekt çekme rijitlik modülü bakımından ise daha iyi performans sergilediği belirlenmiştir. İndirekt çekme mukavemeti ve nem hasarına karşı dayanım bakımından kabul edilebilir sonuçlar vermediği ayrıca polimer modifikasyonunun demir cürufu kullanılan bitümlü sıcak karışımların performansı üzerinde fazla bir etkisinin bulunmadığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bitümlü sıcak karışım, cüruf, polimer, stabilite, nem hasarına karşı dayanım.

The Usefulness of Sivas Divriği Steel Slag in Hot Mix Asphalt

Abstract: In this study the use of steel slag obtained from Sivas Divriği Iron-Steel Plant in hot mix asphalt was investigated. For this purpose steel slag was used as filler material considering the grading. Furthermore the effects of binders containing styrene-butadiene-styrene on the mixtures including steel slag were investigated. From the obtained results it was determined that, the mixtures containing Sivas

Divriği steel slag showed similar performance in terms of Marshall stability, retained Marshall stability and exhibited better performance in terms of Marshall quotient (MQ), indirect tensile stiffness modulus than the mixtures prepared with limestone. It was also determined that this mixtures did not give satisfactory results with regard to resistance to moisture damage and the polymer modification did not have a significant effect on the performance of hot mix asphalt containing steel slag.

Keywords: Hot mix asphalt, slag, polymer, stability, resistance to moisture damage.

1. Giriş

Karayolu üstyapılarında agrega olarak en fazla kalker veya bazalt türü kırmataş malzeme kullanılmaktadır. Esnek kaplama türleri içerisinde en yüksek dayanımı agrega ve bitümün ısıtılıp karıştırılmasıyla elde edilen bitümlü sıcak karışımlar göstermektedir. Ülkemizde ise en fazla sathi kaplamalar uygulanmaktadır. Bitümlü yol kaplamalarında ağırlıkça yaklaşık olarak %90-95 agrega kullanılmaktadır. Agreganın elde edilmesi sırasında yapılan işlemler, doğal arazi yapısının bozulmasına ayrıca akarsu gibi diğer doğal kaynakların kirlenmesine neden olmaktadır.

İlerleyen teknolojiye bağlı olarak meydana gelen endüstriyel gelişim, üretimin ve dolayısıyla atık madde miktarının her geçen gün artmasına neden olmaktadır. Bu durum, atık maddelerin geri dönüşümü gibi yeni bir sektörün oluşmasına neden olmuştur. Atık maddelerin faydalı alanlarda kullanmak amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmış, cüruf, atık cam [1], lastik [2] ve plastik [3,4] gibi maddelerin yol esnek üstyapılarında kullanılabilirliği tespit edilmiştir. Cüruf olarak en çok, demir çelik fabrikalarında oluşan yüksek fırın cürufları esnek üstyapılarda agrega olarak kullanılmıştır. Cüruf kullanılan karışımların yüksek sıcaklık özelliklerinin ve düşük ısı çatlaklarına karşı dayanımının bazalt kullanımına göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir [5]. Cürufun yüzey yapısı pürüzlü olduğundan karışımın içsel sürtünmesinin artmasını sağlamaktadır [6]. Aynı zamanda özgül ağırlığı yüksek olması ve köşeliliğinin fazla olması bitümlü sıcak karışımların daha stabil ve tekerlek izine karşı daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır [7,8]. Gordon ve ekibi, bazik oksijen cürufunun ve yüksek fırın cürufunun, karışımın yoğunluğunu ve rijitlik modülünü normal agrega kullanılan karışımlara göre önemli oranda arttırdığını tespit etmişlerdir [9]. Bagampadde'nin yaptığı çalışmada kaba agrega olarak çelik cürufu, ince agrega ve filler olarak kireçtaşı kullanılan karışımlarda polimer modifiyeli bağlayıcı kullanılması ile karışımların

yorulma ömrünün ve tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarının arttığı tespit etmiştir [10].

Bitümün reolojik olarak karmaşık bir yapıya sahip olup yükleme süresi ve sıcaklığa bağlı olarak viskozdan elastığe kadar değişik davranış sergileyebilmektedir. Bir viskoelastik malzeme olarak bitüm, esnek üstyapılarının bir çok performans parametresi üzerinde büyük paya sahiptir. Bitümlü karışımların performansını arttırmak amacıyla bitüme polimer türü katkı maddeleri ilave edilmesi üzerine bir çok çalışma yapılmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Elastomer grubuna ait olan stiren-butadien-stiren (SBS) blok kopolimeri bu amaçla en çok kullanılan polimer türüdür. Laboratuarda yapılan deneyler ve arazi uygulamaları sonucunda, SBS modifikasyonunun bitümlü karışımların kalıcı deformasyona karşı direncini, yorulma ömrünü, durabilitesini ve nem hasarına karşı mukavemetini arttırdığı belirlenmiştir [11-13].

Bu çalışmada, Sivas Divriği Demir Çelik fabrikasından temin edilen cürufun bitümlü sıcak karışımlarda agrega olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Demir çelik fabrikası cürufu kullanılan bitümlü sıcak karışımlar üzerinde polimer modifiyeli bitümlerin etkilerini belirleyebilmek amacıyla karışım numunelerinde hem saf bitüm hem de SBS modifiyeli bitümlü bağlayıcılar kullanılmıştır. Bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, indirekt çekme rijitlik modülü, statik yüklemeli sünme rijitliği ve indirekt çekme mukavemeti deneyleri uygulanarak Divriği demir çelik fabrikası cürufunun bitümlü sıcak karışımlarda kullanımını geniş bir çerçevede incelenmiştir.

2. Materyal

Çalışmada agrega olarak Elazığ Belediyesi Hanpınarı Şantiyesi'nden elde edilen kalker türü malzeme kullanılmıştır. Sivas Divriği Demir Çelik Fabrikası'ndan temin edilen cüruf, filler ve 200 numaralı elek üzerinde kalan malzeme yerine kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan agrega gradasyonu ve cürufun doğal granülometrisi Tablo 1.'de verilmiştir. Agregalara uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 2.'de verilmiştir.

Tablo 1. Agrega ve cürufun doğal gradasyonu.

Elek açıklığı (mm)	19.0	12.5	9.5	4.75	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
% Geçen (Kalker)	100	95	88	65	39	24	18	14	10	6
% Geçen (Cüruf)	100	99,63	99,36	98,37	96,93	93,4	90,54	87,53	86,14	51,66

Tablo 2. Agregalara Uygulanan Deneylelerden Elde Edilen Sonuçlar.

Özellikler	Standart	Agrega				
		Kalker			Cüruf	
		Kaba	İnce	Filler	İnce	Filler
Aşınma Kaybı, % (Los Angeles)	ASTM DC 131	21	-	-	-	-
Donma Kaybı, % (Na ₂ So ₄)	ASTM C 88	5,32	-	-	-	-
Özgül Ağırlık, gr / cm ³	ASTM C127	2,629	-	-	-	-
Su Emme, %	ASTM C127	0,90	-	-	-	-
Özgül Ağırlık, gr / cm ³	ASTM C128	-	2,677	-	3,016	-
Su Emme, %	ASTM C128	-	1,04	-	1,97	-
Özgül Ağırlık, gr / cm ³	ASTM D854	-	-	2,690	-	3,125

Bitümlü sıcak karışım numunelerinde bağlayıcı olarak TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen iki farklı asfalt çimentosu (B 50/70 ve B 160/220) ve SBS içeren polimer modifiyeli bağlayıcı kullanılmıştır. Modifiye bitümlerin hazırlanmasında, B 160/220 saf bağlayıcısına ağırlıkça %1, %2, %3, %4 ve %5 (sırasıyla PMB₁, PMB₂, PMB₃, PMB₄, PMB₅) oranlarında SBS ilave edilerek 175°C sıcaklık ve 500 devir/dakika hızda 1 saat karıştırma işlemi uygulanmıştır. Kullanılacak SBS içeriğini belirleyebilmek için bağlayıcılara geleneksel deneyler (penetrasyon, yumuşama noktası), dönel viskozimetre (RV) ve dinamik kayma reometresi (DSR) deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca bağlayıcılar ASTM D 2872 standardına uygun olarak dönel ince film halinde ısıtma deney (RTFOT) yöntemiyle kısa süreli yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Yaşlandırma işleminden önce ve sonra, saf ve beş farklı oranda SBS içeren polimer modifiye bağlayıcılara (PMB₁-PMB₅) uygulanan geleneksel deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 3.'de verilmiştir.

Tablo 3. Bağlayıcılara Uygulanan Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar.

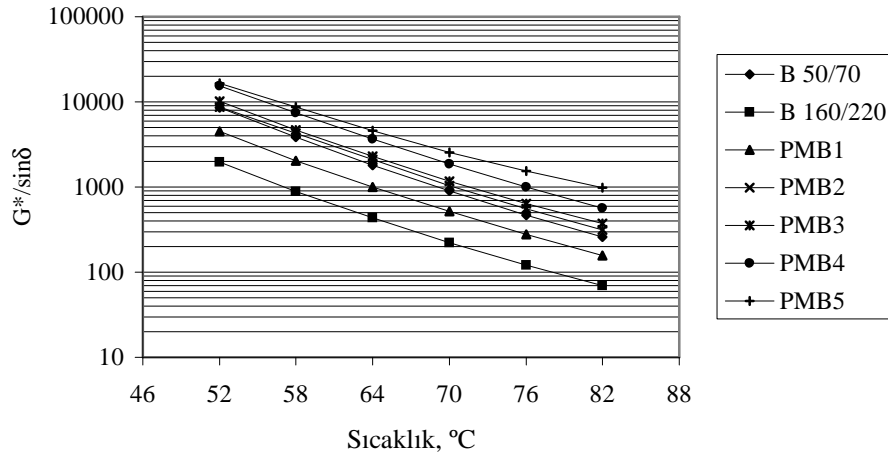
Özellikler	Standart	Bağlayıcı Türü						
		B 50/70	B 160/220	PMB ₁	PMB ₂	PMB ₃	PMB ₄	PMB ₅
Penetrasyon (0,1mm), 100 g, 5 s	ASTM D5	68	190	129	115	98	80	71
Yumuşama Noktası (°C)	ASTM D36	51,7	40,9	46,1	48,9	50,9	56,7	61,3
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	TS 1087	1,039	1,035	1,034	1,031	1,029	1,029	1,027
Penetrasyon İndeksi (PI)	-	- 0,016	0,123	0,424	0,860	0,868	1,640	2,251
RTFOT Sonrası								
Kütle Kaybı (%)	ASTM D2872	0,442	0,935	0,911	0,884	0,870	0,763	0,651
Penetrasyon (0,1mm), 100 g, 5 s	ASTM D5	47	97	71	62	59	51	48
Kalıcı Penetrasyon (%)	ASTM D5	69	51	55	54	60	64	68
Yumuşama Noktası (°C)	ASTM D36	59,9	50,3	55,2	57,6	59,7	65,0	69,2
Yumuşama Noktası Artışı (°C)	ASTM D36	8,2	9,4	9,1	8,7	8,8	8,3	7,9
Penetrasyon İndeksi (PI)	-	0,855	0,673	0,943	1,097	1,400	2,027	2,593

Bitümlü sıcak karışımların agregayla karıştırılmasında bitümlü bağlayıcının 170 ± 20 cP, sıkıştırılmasında ise 280 ± 30 cP viskozite değerine sahip olması gerekmektedir [14]. Bağlayıcılara uygulanan dönel viskozite deneyleri sonucu, bağlayıcıların agregayla karıştırılması ve sıkıştırılması sırasında gerekli olan sıcaklık değerleri belirlenmektedir. Dönel viskozite deney sonuçları ayrıca karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları Tablo 4.'te verilmiştir.

Tablo 4. Dönel Viskozimetre Deney Sonuçları.

Bağlayıcı Cinsi	Viskozite (cP)		$\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$		Sıcaklık Aralığı (°C)	
	135°C	165°C	135°C	165°C	Karıştırma	Sıkıştırma
B 50/70	525,0	150,0	-	-	159-165	148-153
B 160/220	237,5	87,5	1,00	1,00	142-149	127-133
PMB ₁	387,5	125,0	1,63	1,42	154-160	141-147
PMB ₂	562,5	187,5	2,36	2,14	165-171	151-157
PMB ₃	787,5	262,5	3,31	3,00	174-180	161-166
PMB ₄	1113,0	362,5	4,68	4,14	182-189	169-175
PMB ₅	1650,0	462,5	6,94	5,28	186-192	174-180

ASTM D 6373-07 “Performansa göre derecelenmiş bitümlü bağlayıcılar” standardına uygun olarak bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans seviyelerini belirlemek için saf ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcıların AASHTO T 315 standardına göre DSR deneyine tabi tutulması gerekmektedir. Yaşlandırılmamış bağlayıcılara 52–82°C sıcaklık aralığında uygulanan DSR deneylerinden elde edilen $G^*/\sin\delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 2.’de verilmiştir.



Şekil 2. Bağlayıcıların Artan Sıcaklıkla $G^*/\sin\delta$ Değerinde Meydana Gelen Değişim

Superpave sistemine göre tekerlek izi dayanımı bakımından bağlayıcıların performans seviyesi yüksek sıcaklık değerlerinin saf B 160/220 bağlayıcısına göre (PG 58) %1 ve 2 SBS kullanılması durumunda bir derece (PG 64), %3 SBS kullanılması durumunda 2 derece (PG 70), %4 ve 5 oranında kullanılması durumunda ise 3 derece (PG 76) arttığı belirlenmiştir. RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılara

yaşlandırılmamış bağlayıcıların şartname kriterini sağladığı sıcaklıklarda DSR deneyleri uygulanmıştır. Yaşlandırılmış bağlayıcılara uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 5.'te verilmiştir.

Tablo 5. Yaşlandırılmış Bağlayıcılara Uygulanan DSR Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar

Bağlayıcı Cinsi	Sıcaklık, °C	δ , (derece)	$G^*/\sin\delta$ (Pa)
B 50/70	70	74,92	3611,40
B 160/220	58	72,53	5332,26
PMB ₁	64	69,92	4876,45
PMB ₂	64	65,75	6528,93
PMB ₃	70	67,11	5063,48
PMB ₄	76	66,47	4833,89
PMB ₅	76	60,68	5917,20

Elde edilen sonuçlardan saf B 50/70 ve %3 SBS içeren polimer modifiyeli bağlayıcıların aynı performans seviyesi yüksek sıcaklık değerine (PG 70) sahip oldukları belirlenmiştir. Bu nedenle bitümlü sıcak karışım numunelerinde B 50/70 ve B 160/220 saf bağlayıcılarının yanı sıra PMB₃ bağlayıcısı kullanılmıştır.

3. Bitümlü Sıcak Karışımların Hazırlanması

Bitümlü sıcak karışımların karışım dizaynları Marshall yöntemine göre yapılmıştır. Çalışmada, Sivas Divriği Demir çelik fabrikası cürufu No:200 elek üzerinde kalan malzeme ve filler yerine kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak saf B 50/70 ve B 160/220 bağlayıcılarının yanı sıra PMB₃ modifiye bitümü kullanılmıştır. Cürufu karışımlar, B 50/70 ve PMB₃ bağlayıcıları ile hazırlanmıştır. B 160/220 saf bağlayıcısı ve kalker türü agrega ile hazırlanan karışımlar, polimer modifiyeli bağlayıcı ve kalker içeren karışımlar ile karşılaştırılması amacıyla hazırlanmıştır. Numunelerin her bir yüzüne 75 darbe uygulanarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Saf bitüm kullanılan karışımlar için optimum bitüm içerikleri belirlenmiştir. PMB₃ ile hazırlanan karışımlar için optimum bitüm içeriği aranmamış, B 50/70 saf bitümünün optimum bitüm içeriğine göre hazırlanmıştır. Karışım indisleri ve kullanılan bitüm içerikleri Tablo 6.'da verilmiştir.

Tablo 6. Karışım indisleri ve bitüm içerikleri

Agrega Türü	Kısaltma	Bağlayıcı Türü	Bağlayıcı İçeriği
Kalker	K1	B 50/70	4,905
Kalker	K2	B 160/220	4,885
Kalker	PK	PMB ₃	4,905
Kalker +Cüruf	C	B 50/70	5,224
Kalker +Cüruf	PC	PMB ₃	5,224

4. Bitümlü Sıcak Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deneyler

Bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, kalıcı Marshall stabilite ve akma, indirekt çekme rijitlik modülü ve nem hasarına karşı dayanım (ASTM D 4867) deneyleri uygulanmıştır.

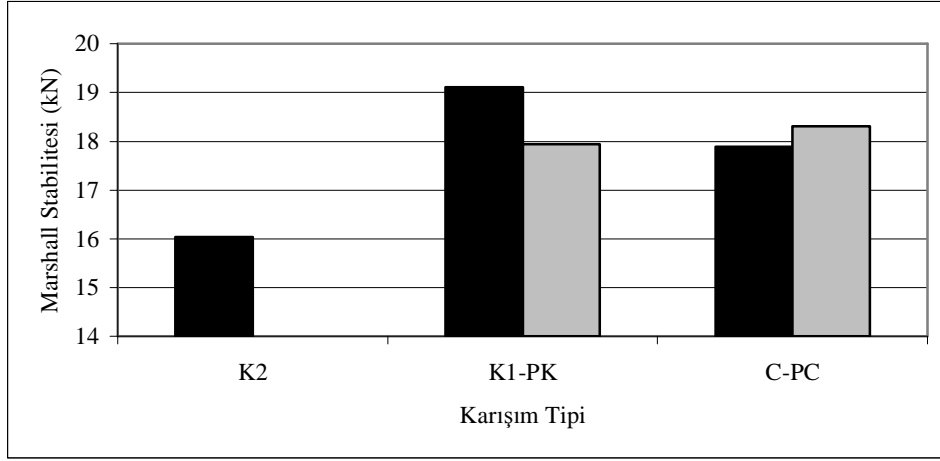
4.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

Belirlenen bitüm içeriklerine göre hazırlanan karışım numuneleri, ASTM D 1559 standardına uygun olarak 30–40 dakika 60°C sıcaklıktaki suda bekletilmiş ve Marshall aletinde deneye tabi tutularak stabilite ve akma değerleri belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen değerlerden sertliğin bir göstergesi olan Marshall oranı (MQ) değerleri tespit edilmiştir.

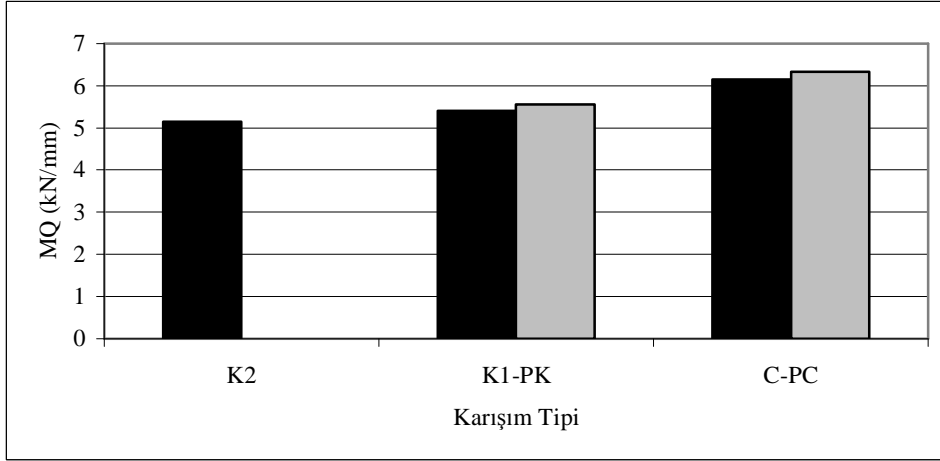
Her bir numune tipi için üçer numune hazırlanarak test edilmiştir. Tablo 7.'de üçer numuneden elde edilen ortalama deney sonuçları, Şekil 3.'te ise numune tipleri - Marshall stabilite ilişkisi verilmiştir. Şekil 4.'te ise karışım tipleri – Marshall oranı ilişkisi verilmiştir.

Tablo 7. Marshall Stabilite ve Akma Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar

Karışım Tipi	Marshall Stabilite, kN	Akma, mm	Stabilite/Akma Oranı
K ₁	19,11	3,54	5,40
K ₂	16,04	3,12	5,14
PK	17,94	3,23	5,55
C	17,89	2,91	6,15
PC	18,31	2,89	6,33



Şekil 3. Karışım Tipleri – Marshall Stabilite İlişkisi



Şekil 4. Karışım Tipleri – Marshall Oranı İlişkisi

Marshall stabilite ve akma deneyleri sonucunda en yüksek stabilite değerine K_1 numunelerinin sahip olduğu, en düşük stabilite değerine ise K_2 numunelerinin sahip olduğu belirlenmiştir. Cüruf içeren karışımların (C ve PC) Marshall stabilite değerleri K_1 numunelerine göre düşük, K_2 numunelerine göre ise yüksek çıkmıştır. Karayolları Fenni Şartnamesinde ağır trafikli yollarda kullanılacak bitümlü sıcak karışımlar için minimum stabilite değerinin 9 kN, akma değerlerinin ise 2–4 mm arasında olması istenmektedir. Hem B 50/70 hem de PMB_3 bağlayıcıları içeren cürufli karışımların stabilite değerlerinin şartname kriterinin yaklaşık iki katı oldukları ve akma değerlerinin şartname limitleri arasında bulunduğu belirlenmiştir. Marshall oranı (MQ) değerlerinden PC türü karışımların en yüksek değere, C türü karışımların ise en yüksek

ikinci değere sahip oldukları tespit edilmiştir. Bu sonuç cüruf içeren karışımların ak değerlerinin düşük çıkmasından kaynaklanmıştır.

4.2. Kalıcı Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

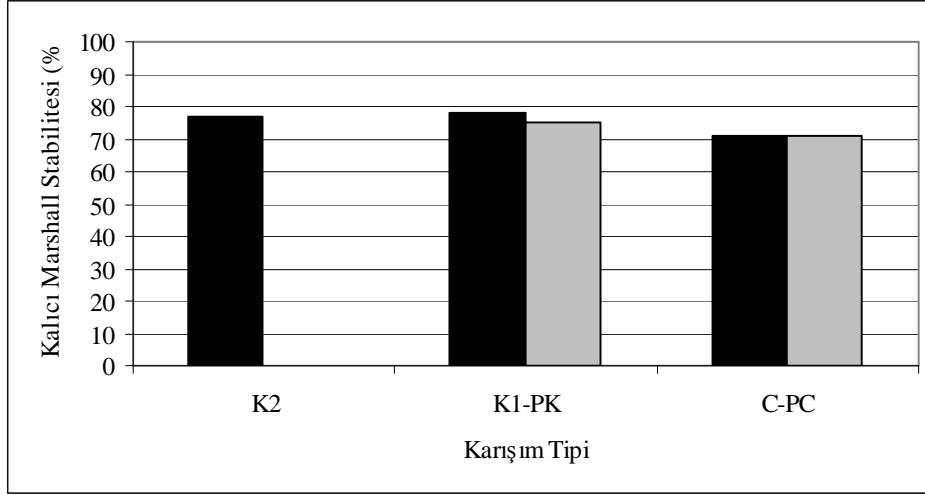
Kalıcı Marshall stabilite ve akma deneyi, bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının bir göstergesidir [15]. Bu deneyde bitümlü sıcak karışım numuneleri, 60°C sıcaklıktaki suda 24 saat bekletilerek koşullandırılmakta ve daha sonra standart Marshall stabilite ve akma deneyi uygulanmaktadır. Formül 1. yardımıyla Kalıcı Marshall Stabilite değeri belirlenmektedir.

$$KMS = \frac{MS_{cond}}{MS_{uncond}} \times 100 \quad (1)$$

Burada; KMS kalıcı Marshall stabiliteyi (%), MS_{cond} 60°C sıcaklıktaki suda 24 saat bekletilen numunelerden elde edilen stabilite değerlerini (kN), MS_{uncond} 30–40 dakika bekletilen numunelerden elde edilen stabilite değerlerini (kN) göstermektedir. Kalıcı Marshall stabilite değerlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 8.'de verilmiştir. Karışım tipi – kalıcı Marshall stabilitesi ilişkisi ise Şekil 5'te verilmiştir.

Tablo 8. Kalıcı Marshall Stabilite ve Akma Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar

Karışım Tipi	Marshall Stabilite, kN	Akma, mm	Kalıcı Stabilite, %	Stabilite/Akma Oranı
K ₁	14,90	3,65	78	4,08
K ₂	12,40	4,02	77	3,08
PK	13,44	3,48	75	3,86
C	12,60	3,88	71	3,25
PC	10,86	3,86	71	2,81



Şekil 5. Karışım Tipleri – Kalıcı Marshall Stabilitesi İlişkisi

Kalıcı Marshall stabilite (KMS) deneyleri sonucunda bütün karışımların KMS değerinin %70'in üzerinde olduğu, en yüksek değere K1 en düşük değerlere ise C ve PC numunelerinin sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, cüruf kullanımının nem hasarına karşı dayanımı azalttığını göstermektedir. Koşullandırılmış numunelerin MQ değerlerinden en yüksek değere K1 en düşük değere ise PC numunelerinin sahip olduğu belirlenmiştir.

4.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi

İndirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi, dinamik yükler karşısında bitümlü karışımların rijitliğini tespit etmek amacıyla yapılmaktadır. Bu amaçla numunelere tekrarlı olarak 5 defa yük etki ettirilmektedir. Deney için hazırlanan numuneler deney sıcaklığında 3 saat bekletilmekte daha sonra numuneler elektronik ITSM deney aletine yerleştirilmektedir (Şekil 6.). Tek eksenli yüklemenin yapılacağı yükleme aparatı yerleştirilmekte ve duyargalar bağlanmaktadır.

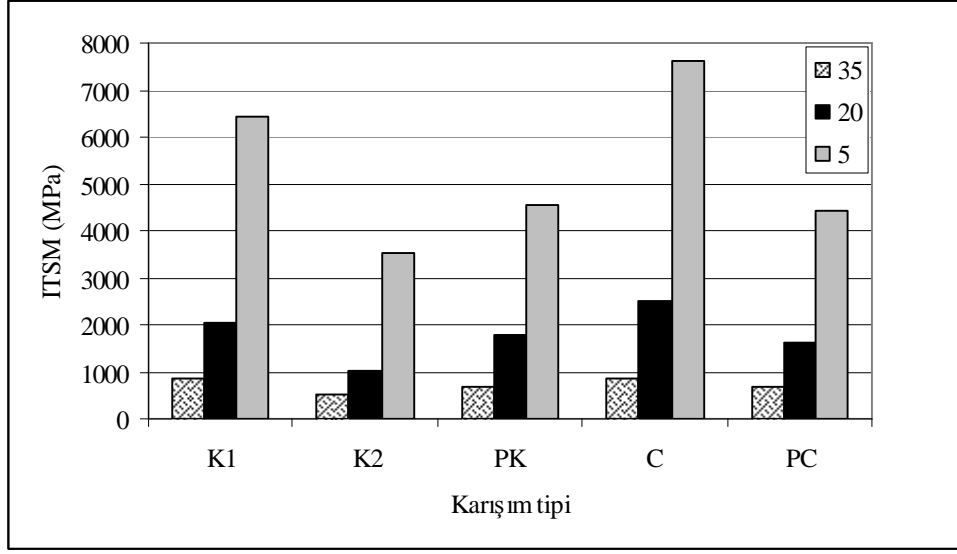


Şekil 6. İndirekt Çekme Aletine Numunelerin Yerleştirilmesi

ASTM D 4123'e uygun olarak yapılan deneyde taşıt hızları göz önünde bulundurulurken yük artış süresi belirlenmektedir. Karışımın tahmini poisson oranı, hedef deformasyon ve yük artış süreleri bilgisayardan girilmekte ve deney başlatılmaktadır. Deneyde önce 5 defa ön yükleme yapılmakta, daha sonra 3000 ms. boyunca 5 defa yük etki ettirilmektedir. Burada yük artış süresi ve hedef deformasyon olmak üzere iki önemli etken bulunmaktadır. Deney aleti, yük etki süresi sonunda hedef deformasyon sağlanacak şekilde numuneye otomatik olarak yük etki ettirmektedir. Uygulanan bu yük değeri kullanılarak rijitlik modülü tespit edilmektedir. Deneylerde yük artış süresi 124 ± 2 ms. ve hedef deformasyon $6 \mu\text{m}$. olarak alınmıştır. Uygulanan maksimum yüke bağlı olarak sertlik modülü, aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$S_m = \frac{F(R + 0.27)}{LH} \quad (2)$$

Burada, S_m sertlik modülünü (MPa), F uygulanan maksimum yükü (N), L numune yüksekliğini (mm), R poisson oranını (0,35 olarak alınmıştır), H ise uygulanan yük sonucu meydana gelen yanal deformasyonu (mm) göstermektedir. Çalışmada numunelere üç farklı sıcaklıkta (5, 20 ve 35°C) ITSM deneyi uygulanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 8.'de verilmiştir.



Şekil 8. Karışım Tipi - İndirekt Çekme Rijitlik Modülü İlişkisi

Elde edilen sonuçlardan sıcaklık değeri arttıkça bütün karışımların rijitlik modülü değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. 5 ve 20°C sıcaklıkta yapılan deneylerde en yüksek değere C numunelerinin, en düşük değerlere ise K2 numunelerinin sahip olduğu tespit edilmiştir. Bütün karışım tiplerinin yüksek sıcaklıktaki (35°C) indirekt çekme rijitlik modülü değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. C numunelerinden elde edilen değerler, MQ değerleriyle uygunluk göstermiştir. Bu sonuçlardan yola çıkarak orta ve yüksek sıcaklıklarda uygulanan yüklere karşı en yüksek dayanımı C numunelerin göstereceği, yüksek sıcaklıklarda ise bütün karışımların benzer davranış sergileyeceği söylenebilmektedir.

4.4. Nem Hasarına Karşı Dayanıklılık Deneyi

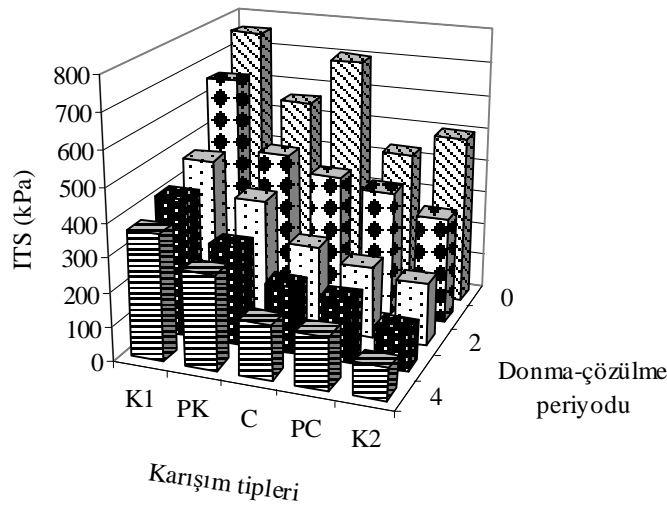
Bitümlü sıcak karışımlarda Divriği demir cürufunun kullanımının neme karşı duyarlılığını araştırmak amacıyla dördüncü olarak indirekt çekme mukavemeti (ITS) deneyi yapılmıştır. Silindirik numunelerin basınç yüklemesine tabi tutulduğu, numunenin düşey çapsal düzlemi doğrultusunda üniform bir gerilme dağılımı oluşturan deneyde, kırılmaya neden olan yük tespit edilip, formül 3 bağıntısı ile ITS (kPa) değerleri hesaplanmıştır.

$$ITS = 2P_{maks} / \pi t d \quad (3)$$

Burada P, kırılmaya neden olan maksimum yük (kN); t, ortalama numune yüksekliği (m); d, numune çapıdır (m).

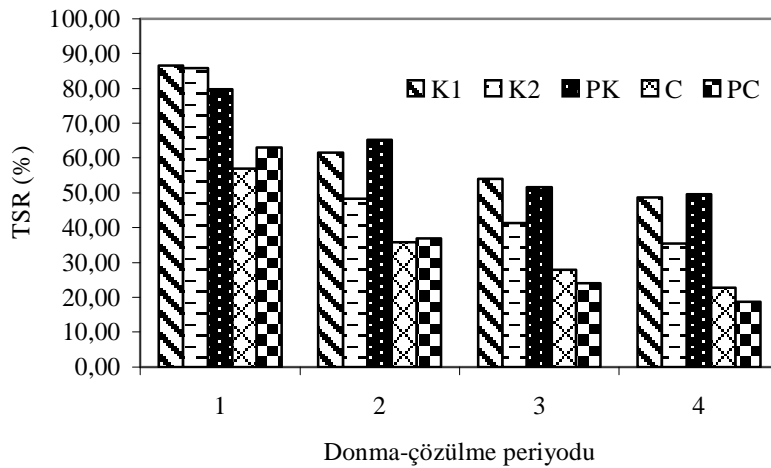
Numuneler standartların öngördüğü %6-8 boşluk oranının ortalaması olan %7 boşluk oranını teşkil etmek amacıyla optimum bağlayıcı oranında her iki yüzüne 35'şer darbe uygulanarak hazırlanmıştır. ITS deneyinde Marshall yüklemesi cihazı kullanılmıştır.

ITS deneyinde her bir karışım tipinden üçer adet olmak üzere iki grup numune deneye tabi tutulmuştur. Birinci grup numuneler kuru numuneler ikinci grup numuneler ise koşullandırılmış numunelerdir. Kuru numuneler 25°C'lik su banyosunda 1 saat bekletilerek Marshall deney cihazında aksel yüklemeye tabi tutulup kırılmaya neden olan maksimum yük tespit edilmiş ve indirek çekme mukavemetleri hesaplanmıştır. Koşullandırılmış numuneler ise ilk önce saf su içinde 20 mmhg 5 dk. vakum uygulanarak %50-%80 arasında doygun hale getirilmiş sonra plastik filmle kaplanmış daha sonra bu numuneler, içinde 3 ml saf su bulunan plastik poşet içine konmuştur. Koşullandırılmış numunelere, bir periyodu -18 °C'de 16 saat ve ardından 60 °C'lik su banyosunda 24 saat bekletilmek üzere dört donma-çözülme periyodu uygulanmıştır. Her bir periyottan sonra koşullandırılmış numuneler kırılmadan önce 25 °C'lik su banyosunda 1 saat daha bekletilmiştir. Sonuçta koşullandırılmış numunelerin indirek çekme mukavemetleri kuru numunelerin indirek çekme mukavemetlerine bölünerek, suya karşı hassasiyetin iyi bir göstergesi olan indirek çekme mukavemeti oranları (TSR) tespit edilmiştir. Şekil 9'da kuru ve koşullandırılmış olarak test edilen numunelerin indirek çekme mukavemetleri, Şekil 10'da ise indirek çekme mukavemeti oranları grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 9. Karışım tipleri – ITS ilişkisi.

Şekil 9’da bütün karışım tiplerinde donma-çözülme periyodunun artması ile indirek çekme mukavemetlerinin düştüğü görülmektedir. Bütün periyotlarda en yüksek ITS değerine agregası kalker olan ve saf B 50/70 bağlayıcısı ile hazırlanmış K1 karışım tipinin sahip olduğu belirlenmiştir. Saf B 50/70 bağlayıcısı ve cüruf içeren karışım tipi (C), koşullandırma işleminden önce en yüksek ikinci ITS değerine sahip iken dördüncü periyot sonunda bu değerde yaklaşık olarak %77 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Dördüncü periyot sonunda ITS değerinde en az azalma yaklaşık olarak %50 ile, agregası kalker olan B 50/70 ve PMB3 ile hazırlanan karışım tiplerinde meydana gelmiştir. Koşullandırılmış numunelerin ITS değerlerinin bütün periyotlarda K1>PK>C>PC>K2 şeklinde sıralandığı dolayısıyla B 50/70 ile hazırlanan ve cüruf içeren karışım tipinin K1 ve K2 kontrol numuneleri arasında bir performans sergilediği tespit edilmiştir.



Şekil 10. Karışım tipleri-TSR ilişkisi.

Bitümlü sıcak karışımların neme karşı duyarlılıklarını belirlemede kullanılan ASTM D 4867 standardı, karışımların nem hasarına karşı yeterli dirence sahip olabilmesi için, birinci donma-çözülme periyodundan sonraki indirek çekme mukavemeti oranlarının %70’den fazla olmasını öngörmektedir.

Şekil 10’da görüldüğü üzere birinci donma-çözülme periyodu sonunda K1,K2 ve PK karışım tiplerinin TSR değerlerinin, şartname kriteri olan %70’in üzerinde olduğu, cüruf içeren C ve PC karışım tiplerinin ise bu kriteri sağlayamadığı tespit edilmiştir.

İkinci donma-çözülme periyodundan sonra hiçbir karışım tipinin TSR değerinin %70'in üzerinde kalamadığı, 2. 3. ve 4. donma-çözülme periyotları sonucunda en yüksek TSR değerlerine bağlayıcı olarak PMB3, agrega olarak kalker kullanılan PK karışım tipinin sahip olduğu belirlenmiştir. Cüruf içeren karışım tipleri ise bütün periyotlarda en düşük TSR değerlerine sahip olmuştur.

5. Sonuç

Çalışmada Sivas Divriği Demir-Çelik Fabrikası'ndan temin edilen cürufun, bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla demir cürufu doğal granülometrisine bağlı olarak 200 numaralı elek üzerinde kalan malzeme ve filler yerine kullanılmıştır. Ayrıca SBS modifiyeli bitümlerin cüruf içeren bitümlü sıcak karışımlar üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

Bitümlü sıcak karışımlar üzerinde uygulanan Marshall stabilite ve akma deneyleri sonucunda en düşük Marshall stabilite değerine B 160/220 saf bağlayıcısı ile hazırlanan karışım numunelerinin (K_2), en yüksek stabilite değerine ise agregası tamamen kalkerden oluşan ve bağlayıcı olarak B 50/70 kullanılarak hazırlanan karışımların (K_1) sahip olduğu belirlenmiştir. Marshall oranı (MQ) değerlerinden ise en yüksek değere agregasında demir cürufu bulunan ve PMB₃ bağlayıcısı ile hazırlanan karışımların (PC), en düşük değere ise K_2 karışımlarının sahip olduğu tespit edilmiştir. Koşullandırılmış numunelerin MQ değerlerinden en yüksek değere K_1 , en düşük değere ise PC numunelerinin sahip olduğu belirlenmiştir. Koşullandırılmamış numuneler içerisinde en yüksek MQ değerine PC numunelerinin sahip olması akma değerlerinin düşük olmasından, koşullandırılmış numuneler içerisinde en düşük değere PC numunelerinin sahip olması ise stabilite değerlerinin düşük olmasından kaynaklanmıştır. İndirekt çekme rijitlik modülü deney sonuçlarından en yüksek değere C numunelerinin en düşük değere ise K_2 numunelerinin sahip olduğu belirlenmiştir. İndirekt çekme mukavemeti deneylerinden bütün periyotlarda en yüksek ITS değerine agregası kalker olan ve saf B 50/70 bağlayıcısı ile hazırlanmış K_1 karışım tipinin sahip olduğu belirlenmiştir. Saf B 50/70 bağlayıcısı ve cüruf içeren karışım tipi (C), koşullandırma işleminden önce en yüksek ikinci ITS değerine sahip iken dördüncü periyot sonunda bu değerde yaklaşık olarak %77 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan çekme mukavemeti oranı (TSR) değerlerinden

birinci donma-çözülme periyodu sonunda K1,K2 ve PK karışım tiplerinin TSR değerlerinin, şartname kriteri olan %70'in üzerinde olduğu, cüruf içeren C ve PC karışım tiplerinin ise bu kriteri sağlayamadığı tespit edilmiştir. TSR deney sonuçları, cüruf kullanımının nem hasarına karşı bitümlü sıcak karışımların dayanımlarının azalttığını göstermektedir. %3 oranında SBS kullanılan polimer modifiye bağlayıcılar kullanılarak hazırlanan karışım numunelerinden, polimer modifikasyonunun demir cürufu kullanılan bitümlü sıcak karışımların performansı üzerinde fazla bir etkisinin bulunmadığı belirlenmiştir.

Elde edilen bütün sonuçlar değerlendirildiğinde Sivas Divriği Demir-Çelik Fabrikası'ndan temin edilen cürufun bitümlü sıcak karışım yol esnek üstyapılarında agrega malzemesi olarak kullanılması durumunda, servis ömrünün ilk dönemlerinde iyi performans sergileyeceği, ilerleyen yıllarda ise özellikle nem hasarına karşı kötü performans sergileyeceği tespit edilmiştir. Ayrıca bu tip karışımlarda polimer modifiye bitüm kullanımının performans üzerinde önemli bir etkisinin olmayacağı belirlenmiştir. Sivas Divriği Demir-Çelik Fabrikası'ndan temin edilen cürufun bitümlü sıcak karışım yol esnek üstyapılarında agrega malzemesi olarak kullanılması durumunda soyulma önleyici katkı maddelerinin kullanılması ile bu tip karışımların özellikle nem hasarına karşı performanslarının arttırılabileceği düşünülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Y.Huang, R.N.Bird, O.Heidrich. A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources Conservation and Recycling* 2007, 52, 58-73.
- [2] O.N.Çelik, C.D.Atış. Compactibility of hot bituminous mixtures made with crumb rubber-modified binders. *Construction and Building Materials* 2008, 22,1143–1147.
- [3] S.E.Zoorob, L.B.Suparma. Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt). *Cement and Concrete Composites* 2000, 22, 233-242.
- [4] A.Çetin. Reuse of crumb rubber and plastic on hot-mixed asphalt concrete. *Petroleum and Coal*, 2001, 43, 183-187.
- [5] S.Wu , Y.Xue, Q.Ye, Y.Chen. Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Building and Environment* 2007, 42, 2580–2585.
- [6] T.L.Ramirez. Steel slag aggregates in bituminous mixtures. Final report March 1992

- [7] A.S.Noureldin, Mc.Daniel, S.Rebacca. Evaluation of surface mixtures of steel slag and asphalt. Transportation Research Record 1990, 1296.
- [8] B.Lemass. Slag solutions for heavy duty road pavements. Proceedings 16th ARRB conference, part2, 1992.
- [9] G.D.Airey. C.C.Andrew, H.T.Nicholas. Mechanical performance of asphalt mixtures incorporating slag and glass secondary aggregates. 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa 2004.
- [10] U.Bagampadde, A.A.Wahhab, S.A.Aiban. Optimization of Steel Slag Aggregates for Bituminous Mixes in Saudi Arabia, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 1999, 11, 30-35.
- [11] M.J.Khattak, G.Y.Baladi. Engineering properties of polymer–modified asphalt mixtures. Transportation Research Record 1998 1638, 12–22.
- [12] H.Aglan, A.Othman, L.Figueroa, R.Rollings. Effect of styrene-butadiene-styrene block copolymer on fatigue crack propagation behavior of asphalt concrete mixtures. Transportation Research Record 1993, 1417, 178–186.
- [13] Z.Vlachovicova, C.Wekumbura, J.Stastna, L.Zanzotto. Creep characteristics of asphalt modified by radial styrene–butadiene–styrene copolymer. Construction and Building Materials, 2007, 21, 567–577.
- [14] J.P.Zaniewski, M.E.Pumphrey. Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol. Asphalt Technology Program, 2004, p. 107.
- [15] S.E.Zoorob, L.B.Suparma, Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt). Cement and Concrete Composites 2000, 22, 233-242.