

## Ferrokrom Cürufu Kullanımının Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi

Mehmet YILMAZ\*, Baha Vural KÖK

Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü / ELAZIĞ

Alınış Tarihi:29.04.2008, Kabul Tarihi:01.12.2008

**Özet:** Bu çalışmada ferrokrom cürufunun bitümlü sıcak karışımlarda agrega olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla ferrokrom cürufu hem kaba agrega olarak hem de karışımın bütün agregası olarak kullanılmıştır. Ayrıca styrene-butadiene-styrene (SBS) modifiyeli bitümlerin cüruf içeren bitümlü sıcak karışımlar üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, indirek çekme rijitlik modülü, sünme rijitliği ve indirek çekme mukavemeti deneyleri uygulanmıştır. Sonuçta, kaba agrega olarak ferrokrom cürufu kullanılan karışımların bütün deneylerde en iyi sonucu verdiği, ferrokrom cürufunun bitümlü sıcak karışımlarda agrega malzemesi olarak kullanılabilmesi belirlenmiştir. Ayrıca bitüm modifikasyonunda SBS kullanılması ile bitümlü sıcak karışımların performansının arttığı, ancak aynı yüksek sıcaklık performans derecesine sahip saf bağlayıcı ile SBS modifiyeli bağlayıcılarla hazırlanmış karışımların benzer performans sergilemediği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ferrokrom cürufu, bitümlü sıcak karışım, SBS, stabilite, rijitlik.

## The Effect of Using Ferrochromium Slag on Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt

**Abstract:** In this study the use of the ferrochromium slag as aggregate in hot mix asphalts was investigated. For this purpose the ferrochromium slag was used as both coarse aggregate and as total aggregate of the mixtures. Furthermore the effects of styrene-butadiene-styrene (SBS) modified binders on the mixtures including slag were investigated. The Marshall stability and flow, indirect tensile stiffness modulus, creep stiffness and indirect tensile strength tests were performed on the specimens. In conclusion it was determined that the mixtures including ferrochromium slag as coarse aggregate exhibited the best performance in all experiments and also it was determined that ferrochromium slag can be used as aggregate in hot mix asphalt. In addition, it was determined that the performance of hot mix asphalt increased by using SBS modified binders however the mixtures prepared with the neat and SBS modified binders that have the same high temperature performance grade did not exhibit similar performance.

**Keywords:** Ferrochromium slag, hot mix asphalt, SBS, stability, stiffness.

### Giriş

Esnek yol üstyapıları içerisinde en iyi performansı bitümlü sıcak karışımlar göstermektedir. Bitümlü sıcak karışımlarda kohezyon, bitümlü bağlayıcı tarafından karşılanırken agrega karışımın içsel sürtünme direncini ve stabilitesini sağlamaktadır. Bitümlü sıcak karışım yol kaplamalarında toplam ağırlığın % 90'ından fazlasını agrega oluşturduğundan bu yolların imalat ve onarımında geniş oranda agrega malzemesi gerekmektedir. Büyük oranda gerekli olan agrega ihtiyacını karşılamak amacıyla bir çok dağ ve akarsu tahrip edilmekte böylece çevresel kirlenmeler büyük boyutlara ulaşmaktadır. Agrega yerine atık malzeme kullanılmasıyla çevresel hasarlara neden olan sorunların azaltılması sağlanabilmektedir. Çelik cürufu (Emery,1982; Xue,2006; Wu,2007), ferrokrom cürufu (Lind,2001), atık cam, plastik (Huang,2007; Kandhal,1992) gibi atık maddeler bitümlü sıcak karışımlarda agrega olarak denenmiş ve kalıcı deformasyon, yorulma dayanımı ve su tesirlerine karşı dayanım gibi karışımların çeşitli mekanik özelliklerine olumlu yönde etki ettikleri belirlenmiştir.

Tükenmekte olan doğal kaynakları korumak ve atık malzemelerin kullanımını arttırmak, günümüz modern dünyasında amaçlanan çevresel hedeflerin başında

gelmektedir. Demir ve kromun alaşımı olan ferrokrom, % 45-80 oranında krom, değişik oranlarda demir, karbon ve diğer elementlerden oluşmaktadır. Ferrokrom, kromit cevherinin ( $FeO-Cr_2O_3$ ) karbotermik indirgenmesi şeklinde metalin eritilmesi ile elde edilmektedir. Ferrokrom cürufu başlıca spinel ( $MgO-Al_2O_3$ ), forsterit ( $MgO-SiO_2$ ) gibi değişik fazlarda bulunan  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  ve  $MgO$  bileşiklerinden oluşurken ayrıca küçük oranlarda  $CaO$ , krom ve demir oksitleri ve metal kırıntılarını içermektedir. Ferrokrom cürufu, oksit veya metal formda % 2-12 krom içermektedir. Cevherin eritilmesi sonucu cüruf/metal oranının cevhere bağlı olarak 1,0'den 1,8'e kadar değişmektedir (Erdem,2005). MTA Genel Müdürlüğü, Maden Etüt ve Arama Dairesi bünyesinde, 145 krom yatağında yapılan çalışmalar sonucu, gerek kendisinin derlediği veriler ve gerekse işletme kuruluşlarından derlenen verilerin değerlendirilmesi sonucu %20 den daha fazla  $Cr_2O_3$  içerikli krom rezervi yaklaşık 26 milyon ton olarak verilmektedir. Bu miktarın yaklaşık 10,5 milyon tonu Elazığ Alacakaya ilçesinde bulunmaktadır (JMO,2006). Ülkemizdeki ocaklardan çıkarılan cevherler Antalya ve Elazığ Ferrokrom tesislerinde işlenmektedir. Elazığ Ferrokrom işletmesinde 2003 yılı itibari ile yaklaşık 700.000 ton granüle cüruf atıl

\* mehmetyilmaz@firat.edu.tr

halde bulunmaktadır ve ayrıca her yıl buna 100.000 ton cüruf eklenmektedir (Yazıcıoğlu,2005). Elazığ Ferrokrom işletmesinde bulunan cüruf boyutu 0-100 mm. arasında değişmektedir. Ferrokrom cürufunun esnek yol üstyapılarında kullanılabilirliğinin belirlenmesi durumunda hem mevcut bir atık malzemeden faydalanılacak hem de doğal kaynakların zarar görmesi engellenmiş olacaktır.

Esnek kaplamalarda bağlayıcı görevi gören bitüm, viskoelastik ve termoplastik davranış sergilemektedir. Bitümün bu özelliği bitümlü sıcak karışımlara yansımaktadır. Bu nedenle bitümlü sıcak karışımlar, düşük taşıt hızlarında ve yüksek sıcaklıklarda viskoz, yüksek taşıt hızlarında ve düşük sıcaklıklarda elastik davranış göstermektedir. Bitümün ve bitümlü sıcak karışımların ısıya ve trafik yüklerine karşı dayanımını arttırmak amacıyla genellikle bitüme polimer kökenli katkı maddeleri ilave edilmektedir. Bu katkı maddeleri içerisinde en çok Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) Blok Kopolimerleri kullanılmaktadır. Yapılan bir çok çalışma sonucunda SBS'nin bitümün rijitliğini arttırmasına rağmen düşük sıcaklıklarda çatlama, yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumu ve yorulmaya karşı dayanımı arttırdığı belirlenmiştir (Lu,2000; Khattak,1998; Aglan,1993; Airey,2003).

Bu çalışmada Elazığ Ferrokrom işletmesinden temin edilen cüruf, bitümlü sıcak karışım numunlerinde agrega olarak kullanılmıştır. Ferrokrom cürufu, BSK numunelerinde hem kaba agrega yerine hem de agreganın tamamı olarak kullanılmıştır. Karışım numunelerinde bağlayıcı olarak hem saf hem de SBS içeren polimer modifiyeli bitüm kullanılmıştır. Bu sayede Ferrokrom cürufunun kullanılabilirliği araştırılmış ayrıca cüruf içeren karışımlarda polimer modifiye bitümlerin etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, indirek çekme rijitlik modülü, sünme ve indirek çekme mukavemeti deneyleri uygulanarak geniş bir çerçevede cüruf kullanımı ve polimer modifiyeli bitümlerin cüruf kullanımına etkisi incelenmiştir.

## Deneysel Çalışma

### Agrega Üzerinde Yapılan Deneyler

Çalışmada agrega olarak Elazığ Ferrokrom Fabrikası'ndan temin edilen ferrokrom cürufu ve Elazığ Hanpınarı taş ocağından temin edilen kırmataş kalker kullanılmıştır. Agregalar üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 1'de ferrokrom cürufuna ait kimyasal özellikler Çizelge 2'de verilmiştir.

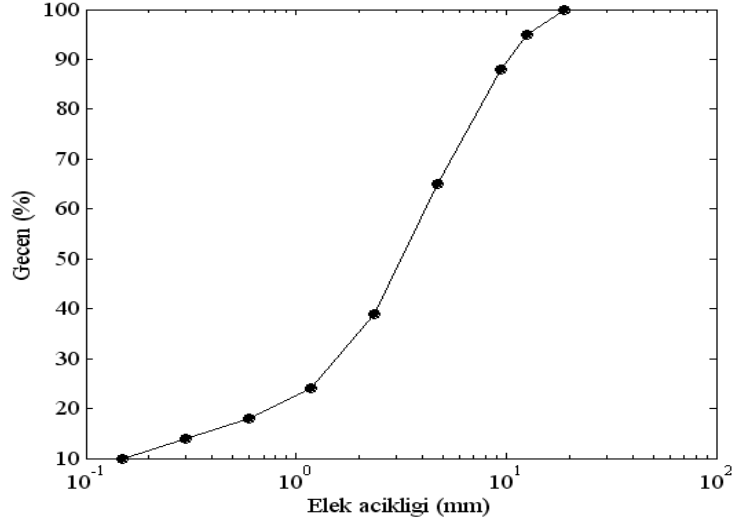
Cüruf ve kalker türü malzeme elenmiş, Şekil 1'de görülen gradasyona uygun oranlarda kullanılarak bitümlü sıcak karışım numuneleri hazırlanmıştır.

**Çizelge 1.** Agregalara uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar.

Özellikler	Standart	Agrega					
		Kalker			Cüruf		
		Kaba	İnce	Filler	Kaba	İnce	Filler
Aşınma Kaybı, % (Los Angeles)	ASTM DC 131	21	-	-	16,4	-	-
Donma Kaybı, % (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	ASTM C 88	5,32	-	-	4,13	-	-
Özgül Ağırlık, gr / cm <sup>3</sup>	ASTM C127	2,629	-	-	2,772	-	-
Su Emme, %	ASTM C127	0,90	-	-	1,68	-	-
Özgül Ağırlık, gr / cm <sup>3</sup>	ASTM C128	-	2,677	-	-	3,016	-
Su Emme, %	ASTM C128	-	1,04	-	-	1,97	-
Özgül Ağırlık, gr / cm <sup>3</sup>	ASTM D854	-	-	2,690	-	-	3,125

**Çizelge 2.** Elazığ Ferrokrom Cürufunun kimyasal özellikleri.

% SiO <sub>2</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% MgO	% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% FeO	% CaO
30,47	31,09	33,66	3,40	0,69	0,49

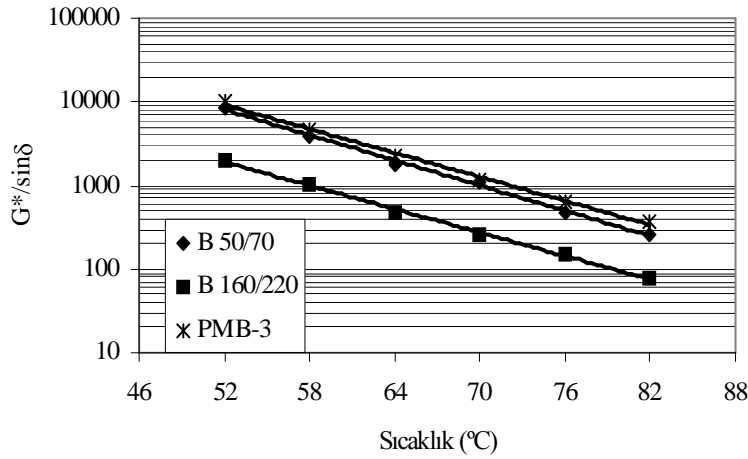


Şekil 1. Kullanılan Agregada Gradasyonu.

### Bağlayıcılar Üzerinde Yapılan Deneyler

Karışımlarda bağlayıcı olarak B 50/70 ve bu bağlayıcı ile aynı performans derecesine sahip Styrene-butadiene-styrene (SBS) modifiyeli B 160/220 kullanılmıştır. Polimer modifiye bitümlerin (PMB) hazırlanmasında, B 160/220 saf bağlayıcısına ağırlıkça %1, %2, %3, %4 ve %5 (sırasıyla PMB<sub>1</sub>, PMB<sub>2</sub>, PMB<sub>3</sub>, PMB<sub>4</sub>, PMB<sub>5</sub>) oranlarında SBS ilave edilerek 175°C sıcaklık ve 500 devir/dakika hızda 1 saat karıştırma işlemi

uygulanmıştır. Daha sonra saf (B 50/70 ve B 160/220) ve değişik SBS oranlarındaki polimer modifiyeli bağlayıcılar, dinamik kesme reometresi (DSR) deneyine tabi tutularak bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans dereceleri belirlenmiştir. Şekil 2’de karışımlarda kullanılan bağlayıcıların  $G^*/\sin \delta$  ve sıcaklık ilişkisi verilmiştir. Burada “ $G^*$ ” kompleks kayma modülünü, “ $\delta$ ” ise faz açısını ifade etmektedir.



Şekil 2. Bağlayıcıların artan sıcaklıkla  $G^*/\sin \delta$  değerinde meydana gelen değişim

Superpave sistemine göre tekerlek izi dayanımı bakımından bağlayıcıların performans derecesi (PG) 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. Elde edilen sonuçlardan saf B 50/70 ve %3 SBS içeren polimer modifiyeli bağlayıcıların aynı performans derecesi yüksek sıcaklık değerine (PG 70) sahip oldukları belirlenmiştir.

B 50/70 saf bitümü ve B 160/220 saf bitümüne %3 oranında SBS ilave edilmesiyle elde edilen polimer modifiye bitüm (PMB<sub>3</sub>) aynı yüksek sıcaklık performans derecesi değerine (PG 70) sahip olduğundan bitümlü sıcak karışım numunelerinde B 50/70 ve B 160/220 saf bitümleri ile B 160/220 + %3 SBS polimer modifiyeli bitümü kullanılmıştır. Çalışmada kullanılacak saf ve polimer modifiyeli bağlayıcılar üzerinde ayrıca özgül ağırlık, yumuşama noktası ve penetrasyon deneyleri uygulanmıştır. Bağlayıcılara uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 3’te verilmiştir.

**Çizelge 3. Bağlayıcılara uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar.**

Özellikler	Standart	Bağlayıcı Türü						
		B 50/70	B 160/220	PMB <sub>1</sub>	PMB <sub>2</sub>	PMB <sub>3</sub>	PMB <sub>4</sub>	PMB <sub>5</sub>
Penetrasyon (0,1 mm), 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 <sup>3</sup> )	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 (0,1 mm), 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 Noktasındaki Artış (°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

Bağlayıcılar üzerinde yapılan deneyler sonucunda modifikasyondaki SBS içeriği arttıkça penetrasyon ve özgül ağırlık değerlerinin azaldığı, yumuşama noktası ve viskozite değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılığını ifade eden penetrasyon indeksi değerlerinden bağlayıcılardaki SBS oranı arttıkça PI değerlerinin arttığı dolayısıyla ısıya karşı duyarlılığın azaldığı tespit edilmiştir.

Bitümlü sıcak karışımların agregayla karıştırılmasında bitümlü bağlayıcının  $170 \pm 20$  cP, sıkıştırılmasında ise  $280 \pm 30$  cP viskozite değerine sahip olması istenmektedir (Zaniewski,2004). Bağlayıcılara uygulanan dönel viskozite deneyleri sonucu, bağlayıcıların agregayla karıştırılması ve sıkıştırılması sırasında gerekli olan sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Dönel viskozite deney sonuçları ayrıca karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları Çizelge 4'te verilmiştir.

**Çizelge 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 <sub>1</sub>	387,5	125,0	1,63	1,42	154-160	141-147
PMB <sub>2</sub>	562,5	187,5	2,36	2,14	165-171	151-157
PMB <sub>3</sub>	787,5	262,5	3,31	3,00	174-180	161-166
PMB <sub>4</sub>	1113,0	362,5	4,68	4,14	182-189	169-175
PMB <sub>5</sub>	1650,0	462,5	6,94	5,28	186-192	174-180

#### **Deney Numunelerinin Hazırlanması**

Çalışmada ferrokrom cürufunun bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla üç farklı agregası tipi ele alınarak Marshall numuneleri hazırlanmıştır. Birinci grup, agregası tamamen kalkerden oluşan kontrol numuneleri (K); ikinci grup, kaba agregası ferrokrom cürufu ince agregası ve filleri kalkerden oluşan karışım numuneleri (CK); üçüncü grup ise agregası tamamen ferrokrom cürufundan oluşan numunelerdir (C). Bu numunelerde B 50/70 saf bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır. %3 SBS modifiyeli B 160/220 ile hazırlanan numuneler ise birinci, ikinci ve üçüncü gruplardaki agregası tipleri ile hazırlanan ve sırası ile SK,

SCK ve SC ile gösterilecek numunelerdir. Ayrıca bitümlü sıcak karışımlarda SBS modifiyeli bitümlerin kullanımının etkisini karşılaştırmalı olarak belirlemek amacıyla tamamen kalker kullanılarak B 160/220 saf bağlayıcısı ile K2 kontrol numuneleri hazırlanmıştır. Deneylerde kullanılacak numuneler hazırlanmadan önce farklı tipteki karışımların Marshall metoduna göre optimum bitüm oranları tespit edilmiştir. Polimer içeren bağlayıcılarla hazırlanmış karışımlar için optimum bitüm içerikleri belirlenmemiş, bu karışımlarda aynı cins agregası grubu için tespit edilen bağlayıcı oranları kullanılmıştır. Çizelge 5'te karışımların agregası, bağlayıcı tipleri ve optimum bağlayıcı oranları verilmiştir.

**Çizelge 5. Karışım tipleri**

Numune Gösterimi	Kaba Agregası	İnce Agregası + Filler	Bağlayıcı	Optimum Bağlayıcı Oranı (%)
K2	Kalker	Kalker	B 160/200	4,885
K	Kalker	Kalker	B 50/70	4,905
CK	Ferrokrom Cürufu	Kalker	B 50/70	5,093
C	Ferrokrom Cürufu	Ferrokrom Cürufu	B 50/70	5,345
SK	Kalker	Kalker	B 160/220 + %3 SBS	4,905
SCK	Ferrokrom Cürufu	Kalker	B 160/220 + %3 SBS	5,093
SC	Ferrokrom Cürufu	Ferrokrom Cürufu	B 160/220 + %3 SBS	5,345

**Karışım Numuneleri Üzerinde Uygulanan Performans Deneyleri**

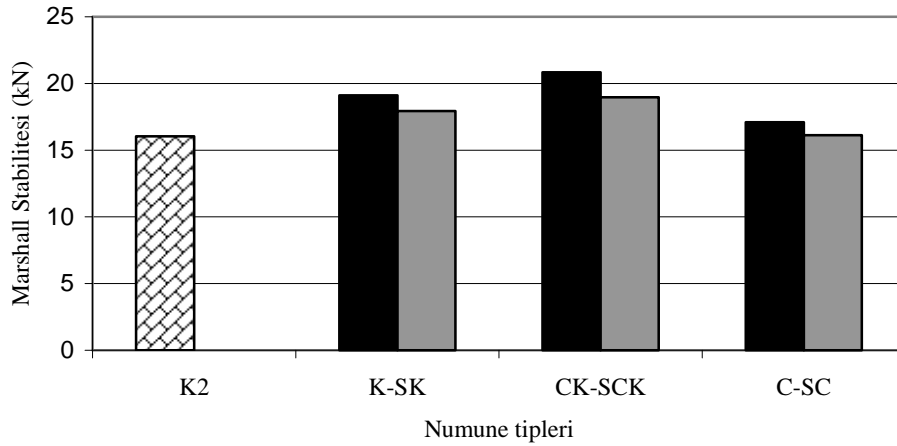
**Marshall Stabilite ve Akma Deneyi**

B 50/70 saf bitümü ile hazırlanan birinci grup (K), ikinci grup (CK) ve üçüncü grup (C) numuneler, %3 SBS içeren polimer modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan SK, SCK ve SC numuneleri ve B 160/220 saf bitümü ile hazırlanan

numuneler (K2), ASTM D1559 standardına uygun olarak test edilerek Marshall stabilite ve akma değerleri tespit edilmiş ayrıca stabilite/akma oranları (MQ) belirlenmiştir. Her bir numune tipi için üçer numune hazırlanarak test edilmiştir. Çizelge 6'da ortalama deney sonuçları, Şekil 3'te ise numune tipleri - Marshall stabilite ilişkisi verilmiştir.

**Çizelge 6. Marshall Stabilite ve akma deneylerinden elde edilen sonuçlar**

Karışım Tipi	Marshall Stabilite, kN	Akma, mm	Stabilite/Akma Oranı
K2	16,04	3,12	5,14
K	19,11	3,54	5,40
CK	20,84	3,22	6,28
C	17,10	2,56	6,68
SK	17,94	3,23	5,55
SCK	18,97	3,17	5,98
SC	16,12	2,64	6,10



**Şekil 3. Numune tipleri – Marshall Stabilite ilişkisi.**

Şekil 3'te görüldüğü gibi en yüksek stabilite değerini, kaba agregası ferrokrom cürufu ince agregası ve filleri kalkerden oluşan ve B 50/70 bağlayıcısı ile hazırlanan karışım (CK) sağlamıştır. CK karışımı yine B 50/70 ile hazırlanan fakat agregasının tamamı kalkerden oluşan K ve B 160/220 bağlayıcısı ile hazırlanan K2 kontrol numunelerine göre sırasıyla %9 ve %30 oranlarında stabilite artışı göstermiştir. Agregasının tamamı ferrokrom cürufu olan C karışımının stabilitesi ise K kontrol numunesinden düşük K2 kontrol numunesine ise yakındır. Ferrokrom cürufu ile birlikte %3 SBS modifiyeli B 160/220 bağlayıcısının (PMB<sub>3</sub>) kullanıldığı karışımlarda stabilite, B 50/70 bağlayıcısı ile hazırlanan karışımlardan düşük çıkmıştır. Ancak PMB<sub>3</sub> ile hazırlanan SK, SCK karışımları B 160/220 bağlayıcısı ile hazırlanan K2

kontrol numunesine göre sırasıyla %12 ve %18 oranlarında stabilite artışı sağlamıştır. Çizelge 6 incelendiğinde karışımlarda ferrokrom cürufu kullanılması ile akma değerlerinin düştüğü dolayısı ile bu numunelerin stabilite/akma oranlarının yüksek olduğu görülmektedir.

**Rijitlik Modülü Deneyi**

Bitümlü tabakaların yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsü olan rijitlik modülü, bitümlü sıcak karışımların en önemli performans karakteristiklerinden biridir (Zoorob,2000). Bu deney BS DD 213 standardı ile tanımlanmış hasarsız bir deney olup rijitlik modülü ( $S_m$ , MPa) Formül 1 ile hesaplanmaktadır.

$$S_m = F(R+0,27) / LH \quad (1)$$

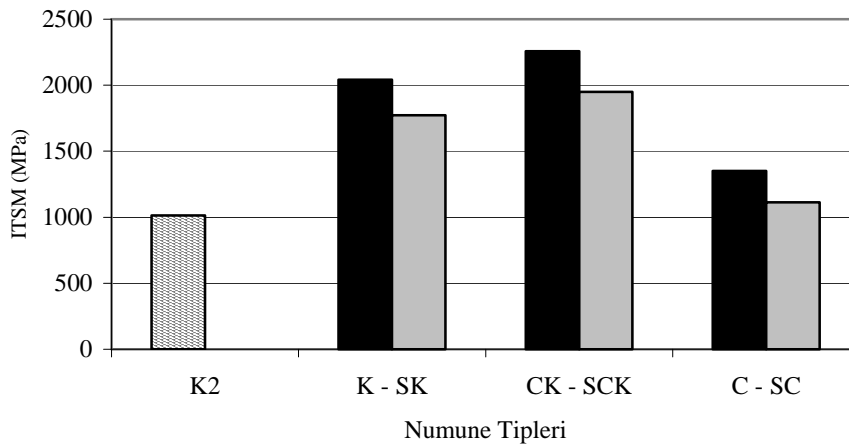
Burada F, maksimum dikey yük (N); H, 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon (mm); L, ortalama numune kalınlığı (mm); R ise poisson oranıdır (0,35).

Deney, 20°C sıcaklıkta deformasyon kontrollü olarak yapılmıştır. Maksimum deformasyon 6 µm, yükleme periyodu 3 sn, yük artış süresi 0,124 sn olarak alınmıştır. Deneye başlamadan önce numuneler 2 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Daha sonra numuneler yükleme başlıkları arasına yerleştirilerek yatay deformasyonu ölçecek sensörler (LVDT) ayarlanmış, numune yüksekliği, çapı ve poisson oranı (0,35) bilgisayara girilmiş, kabin içinde, referans numunesinin

içinde ve yanında bulunan sıcaklık ölçen sensörlerin aynı değeri göstermesinden sonra deneye başlanmıştır. Yükleme başlığı pnömatik olarak çalışan cihaz (Şekil 4) , ilk önce numunede 6 µm deformasyon oluşturacak yük değerini ayarlamak için 5 adet deneme yüklemesi yapmaktadır. Deneme yüklemesinden sonra gerekli olan yükü ayarlayan cihaz, gerçek yüklemeleri yapmakta ve her darbeye 6 µm deformasyon oluşması için gerekli yük değerini kaydetmektedir. Sonuçta 5 yüklemenin ortalama değerini ve standart sapmaları vermektedir. Deneylede standart sapması %10'dan fazla olan numuneler iptal edilmiştir. Deneyde her bir karşım tipi için üçer numune test edilmiştir. Karışımların indirek çekme rijitlik modülü değerleri (üç numunenin ortalaması) Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4. İndirek Çekme Rijitlik modülü (ITSM) deney aleti ve düzeni.



Şekil 5. Numune tipleri- ITSM ilişkisi.

Şekil 5'te görüldüğü gibi en yüksek rijitlik modülü değerine CK numuneleri sahip olmuştur. Karışımlarda kaba agrega olarak ferrokrom cürufu kullanılması rijitlik modülünde kontrol numunesine (K) göre %10 oranında bir iyileştirme sağlamıştır. Agregasının tamamı ferrokrom cürufu olan karışımlar ise düşük rijitlik modülü sergilemiştir. PMB<sub>3</sub> ile hazırlanan SK karışımının rijitlik modülü, saf B 160/220 bağlayıcısı ile hazırlanan K2 karışımının rijitlik modülünden %75 daha fazla çıkmıştır.

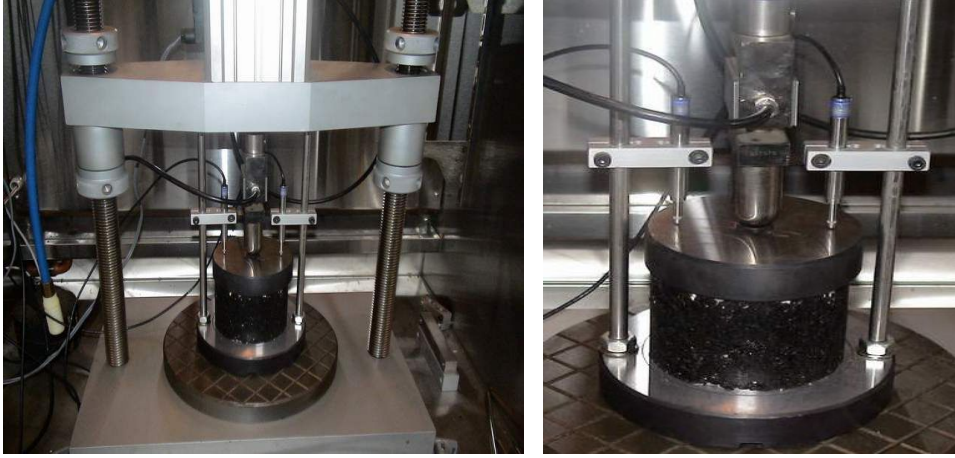
Yine PMB<sub>3</sub> ile hazırlanan fakat kaba agrega olarak ferrokrom cürufunun kullanıldığı SCK karışımının rijitlik modülü değeri K2 karışımından %92 daha yüksek çıkmıştır. Yani karışımlarda bağlayıcı olarak %3 SBS modifiyeli bağlayıcı kullanılması %75 iyileştirme yaparken buna ilave olarak kaba agreganın ferrokrom cürufu olarak kullanılması karışımın rijitlik modülü değerinde %92 oranında bir iyileştirme yapmaktadır.



### Statik Yüklemeli Sünme Rijitliği Deneyi

Bitümlü sıcak karışımları kalıcı deformasyon davranışı çerçevesinde karakterize eden, karışımların tekerlek izi oluşumu hakkında bilgi veren bu deney, BS DD 185

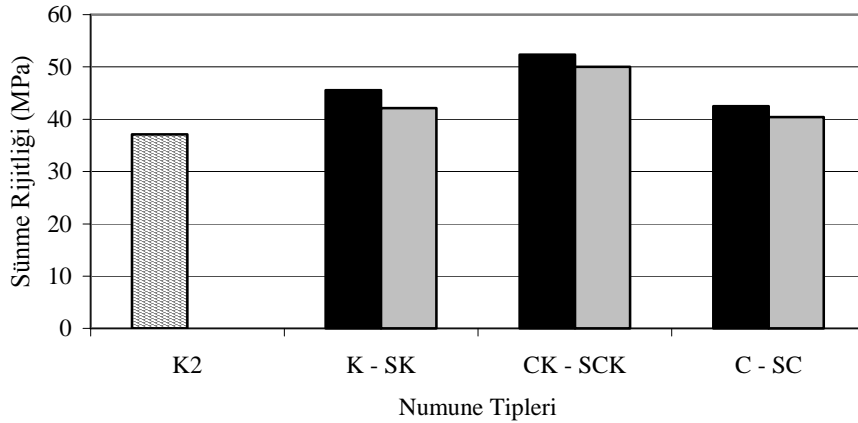
standardına uygun olarak yapılmıştır. Deney, statik ve yük kontrollü olarak 40°C sıcaklıkta yapılmıştır. Şekil 6'da sünme rijitliği deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 6. Statik Yüklemeli Sünme Rijitliği deney düzeneği.

Deneye başlamadan önce numuneler 2 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Daha sonra numuneler yükleme başlıkları arasına yerleştirilerek düşey deformasyonu ölçecek sensörler (LVDT) ayarlanmış, numune çapı ve yüksekliği bilgisayara girilmiş, kabin içinde referans numunesinin içinde ve yanında bulunan sıcaklık ölçen sensörlerin aynı değeri göstermesinden sonra deneye başlanmıştır. Cihaz, ilk önce numunede 10 kPa gerilme oluşturacak yükleme ile 10 dakika hazırlık

yüklemesi yapmıştır. Bu süre sonunda sensörlerde meydana gelen değişim, bilgisayar tarafından otomatik olarak sıfırlanıp ve gerilme değeri 100 kPa'a çıkartılıp 1 saat sürecek deney başlamaktadır. 1 saat süre içerisinde bilgisayar her 4 saniyede düşey deformasyonları kaydetmekte ve sonuçta sünme rijitliği değerini vermektedir. Şekil 7'de karışımların ortalama sünme rijitliği değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 7. Numune tipleri – Sünme Rijitliği ilişkisi.

Şekil 7'de en yüksek sünme rijitliği değerine CK numunelerinin sahip olduğu görülmektedir. Saf B 50/70 bağlayıcısı ve kaba agrega olarak ferrokrom cürufunun kullanılması kontrol numunesine (K) göre, sünme rijitliği değerinde %15 oranında iyileştirme sağlamıştır. Aynı yüksek sıcaklık performans derecesine sahip B 50/70 ve PMB<sub>3</sub> bağlayıcıları ile hazırlanan karışımlar beklendiği gibi benzer sünme özellikleri sergilememiş ancak PMB<sub>3</sub> ile hazırlanan ve ferrokrom cürufu içermeyen karışımın (SK) sünme rijitliği değeri kontrol numunesinden (K2) %22, yine PMB<sub>3</sub> ile hazırlanan ve kaba agregası ferrokrom cürufu olan karışımın (SCK) sünme rijitliği

değeri ise kontrol numunesinden (K2) %35 oranında yüksek çıkmıştır.

### İndirek Çekme Mukavemeti Deneyi

Bitümlü sıcak karışımlarda ferrokrom cürufunun kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla dördüncü olarak indirek 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 2 bağıntısı ile ITS (kPa) değerleri hesaplanmıştır.

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

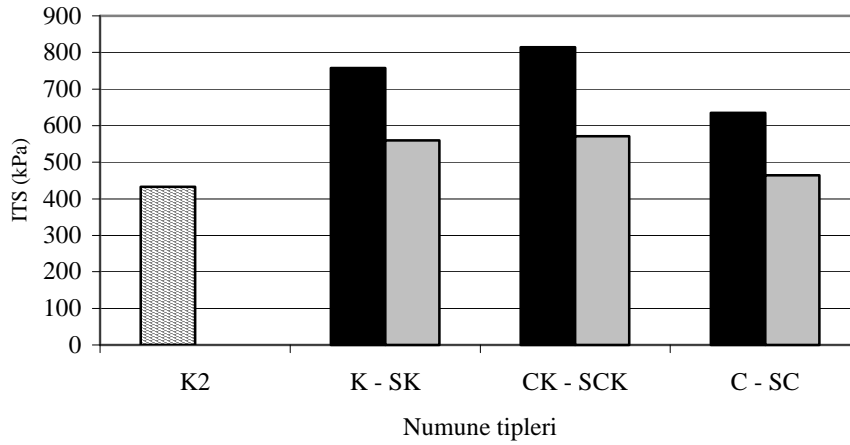
Burada P, kırılmaya neden olan maksimum yük (kN); t, ortalama numune yüksekliği (m); d, numune çapıdır (m).

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 (Şekil 8) kullanılmıştır.

ITS deneyinde her bir karışım tipinden üçer adet numune deneye tabi tutulmuştur. Şekil 9'da numunelerin ortalama indirek çekme mukavemeti değerleri verilmiştir.



Şekil 8. İndirek çekme mukavemeti deney düzeneği.



Şekil 9. Numune tipleri – ITS ilişkisi.

Bu deneyde de en iyi sonucun kaba agregası ferrokrom cürufundan oluşan numunelere ait olduğu görülmektedir. Saf B 50/70 bağlayıcısı ve kaba agrega olarak ferrokrom cürufunun kullanılması (CK) kontrol numunesine (K) göre, indirek çekme mukavemeti değerinde %7 oranında iyileştirme sağlamıştır. Bu deneyde aynı yüksek sıcaklık performans derecesine sahip B 50/70 ve PMB<sub>3</sub> bağlayıcıları ile hazırlanan karışımların farklı performans sergilediği daha açık bir şekilde görülmektedir. PMB<sub>3</sub> ile hazırlanan ve ferrokrom cürufu içermeyen karışımın (SK) ITS değeri kontrol numunesinden (K2) %29, yine PMB<sub>3</sub> ile hazırlanan ve kaba agregası ferrokrom cürufu olan karışımın (SCK) ITS değeri ise kontrol numunesinden %32 oranında yüksek çıkmıştır.

## Sonuçlar

Çalışmada ferrokrom cürufunun bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla ferrokrom cürufu hem kaba agrega olarak hem de karışımın bütün agregası olarak 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 (K2), en yüksek stabilite değerine ise kaba agrega olarak cüruf ve bağlayıcı olarak B 50/70 kullanılarak hazırlanan karışımların (CK) sahip olduğu belirlenmiştir. Marshall oranı (MQ) değerlerinden ise en yüksek değere agregasının tamamı ferrokrom cürufundan oluşan ve B 50/70 bağlayıcısı ile hazırlanan karışımların (C), en düşük değere ise K2 karışımlarının sahip olduğu tespit edilmiştir. İndirek çekme rijitlik modülü deney sonuçlarından en yüksek değere CK numunelerinin en düşük değere ise K2 numunelerinin sahip olduğu belirlenmiştir. Statik yüklemeli sünme rijitliği deneylerinde en yüksek değere CK numuneleri sahip olmalarına rağmen karışım numunelerinin sünme değerleri arasında fazla bir fark bulunmadığı tespit edilmiştir. %3 oranında SBS kullanılan polimer modifiye bağlayıcılar kullanılarak hazırlanan karışım numunelerinin Marshall stabilite, Marshall oranı (MQ),



indirek çekme rijitlik modülü, sünme rijitliği ve indirek çekme mukavemeti değerleri B 160/220 saf bağlayıcısı ile hazırlanan karışımlara göre yüksek olmasına rağmen, aynı yüksek sıcaklık performans derecesi değerine sahip olan B 50/70 saf bağlayıcısı ile hazırlanan karışım numunelerine göre daha düşük çıkmıştır.

Elde edilen bütün sonuçlar değerlendirildiğinde ferrokrom cürufunun bitümlü sıcak karışım yol esnek üstyapılarında agrega malzemesi olarak kullanılabilmesi belirlenmiştir. Agregası olarak tamamen cüruf kullanılması yerine kaba agrega yerine ferrokrom cürufunun kullanılmasının daha uygun olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bitüm modifikasyonunda SBS kullanılması ile bitümlü sıcak karışımların performansının arttığı, ancak aynı performans derecesine sahip saf bağlayıcı ile SBS modifiyeli bağlayıcılarla hazırlanmış karışımların benzer performans sergilemediği tespit edilmiştir.

## Kaynaklar

- Aglan, H., Othman, A., Figueroa, L. and Rollings, R. 1993. Effect of Styrene-Butadiene-Styrene Block Copolymer on Fatigue Crack Propagation Behavior of Asphalt Concrete Mixtures. Transportation Research Record, 1417, 178-186.
- Airey, G.D. 2003. Rheological Properties of Styrene Butadiene Styrene Polymer Modified Road Bitumens, Fuel, 14, 1709-1719.
- Emery, J.J. 1982. Slag Utilization in Pavement Construction, Extending Aggregate Resources, ASTM STP 774, American Society for Testing and Materials.
- Erdem, M., Altundoğan, H.S., Turan, M.D. and Tümen, F. 2005. Hexavalent Chromium Removal by Ferrochromium Slag. Journal of Hazardous Materials, 126, 176-182.
- Huang, Y., Bird, R.N., Heidrich, O. 2007. A Review of the use of Recycled Solid Waste Materials in Asphalt Pavements. Resources Conservation and Recycling, 52, 58-73.
- JMO.2006.[http://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/7ffc95363387c\\_ek.doc?tipi=25&turu=X&sube=0%20](http://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/7ffc95363387c_ek.doc?tipi=25&turu=X&sube=0%20).
- Kandhal, P.S. 1992. Waste Materials in Hot Mix Asphalt-an Overview. NCAT Report no:92-6. National Center for Asphalt Technology, Auburn University.
- Khattak, M.J. and Baladi, G.Y. 1998. Engineering Properties of Polymer – Modified Asphalt Mixtures. Transportation Research Record, 1638, 12 – 22.
- Lind, B.B., Fallman, A.M., Larsson, L.B. 2001. Environmental impact of Ferrochrome Slag in Road Construction. Waste Management, 21, 255-264.
- Lu, X. and Isacsson, U. 2000. Laboratory Study on the Low Temperature Physical Hardening of Conventional and Polymer Modified Bitumens. Construction and Building Materials, 14, 79-88.
- Wu, S., Xue, Y., Ye, Q., Chen, Y. 2007. Utilization of Steel Slag as Aggregates for Stone Mastic Asphalt (SMA) Mixtures. Building and Environment, 42, 2580-2585.
- Xue, Y., Wu, S., Hou, H., Zha, J. 2006. Experimental Investigation of basic oxygen Furnace Slag Used as Aggregate in Asphalt Mixture. Journal of Hazardous Materials, 138, 261-268.
- Yazıcıoğlu, S., Gönen, T., Çobanoğlu, Ö.Ç. 2005. Elazığ Ferrokrom Cürufunun Betonun Basınç Dayanımı ve Çarpma Enerjisi Üzerine Etkisi. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17(4), 681, 685.
- Zaniewski, J.P., Pumphrey, M.E. 2004. Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol. Asphalt Technology Program, 107.
- Zoorob S.E., Suparna L.B. 2000. Laboratory Design and Investigation of the Properties of Continuously Graded Asphaltic Concrete Containing Recycled Plastics Aggregate Replacement (Plastiphalt). Cement and Concrete Composites, 22, 233-242.