

BETON YOL KAPLAMASI YANGIN ESNASINDA TÜNEL GÜVENLİĞİNE KATKI SAĞLAR

- TÜNELLERİN GÜVENLİĞİ
- YANGINDA, BITÜMLÜ KARIŞIMLAR VE BETONUN DAVRANIŞI
- TÜNELLERDE BETON KAPLAMALARININ DİĞER AVANTAJLARI VE BETON KAPLAMA YAPIMI



1. Giriş	4
2. Yangın Esnasında Kaplamaların Davranışları	5
3. Tünellerde Yangın Eğrileri	7
4. Tünellerde Güvenlik Kuralları	8
5. Bitümlü Karışımların Yangın Davranışı	9
5.1 Yakma Deneyi ile Bitümlü Karışımların Bağlayıcı Miktarlarının Belirlenmesi	9
5.2 Cergy-Pontoise Üniversitesi (Fransa)	11
5.3 Almanya Federal Karayolları Araştırma Enstitüsü (BASt)	14
5.4 Fransa Bilimsel ve Teknolojik Yapı Merkezi (CSTB)	14
5.5 SAMARIS Projesi (Yolların Altyapısı için Sürdürebilir ve Gelişmiş Malzemeler)	14
5.6 Edinburgh Üniversitesi Yapı Araştırmaları Kurumu (BRE) Yangın Mühendisliği Merkezi	15
5.7 Gerçek Yangınlarda Bitümlü Karışımların Davranışı	16
6. Yangın - Kavlama Olayında Betonun Davranışı	17
7. Tünellerde Beton Yol Kaplamalarının Diğer Avantajları	20
8. Tünellerde Beton Yol Kaplamalarının Yapımı	21
8.1 Ekipmanlar	21
8.2 Tünellerde Beton Kaplamaların Özellikleri	22
8.2.1 Beton Temini	24
8.2.2 Yan Alan Sınırlamaları	25
8.2.3 Sürekli Donatılı Beton Kaplamalar	26
8.3 Tünel Kaplamalarında Beton	27
8.4 Düzgün Yüzey Elde Edebilmek İçin Gerekli Koşullar	27
9. Özet ve Sonuçlar	28
Kaynaklar	30

BETON YOL KAPLAMALARI YANGIN ESNASINDA TÜNELLERİN GÜVENLİĞİNİ ARTIRIR

Carlos Cofré
İnşaat Mühendisi
Teknik Yönetici
E mail: tecnico@ieca.es

Joaquin Romero
İnşaat Mühendisi
Kanarya Adaları Bölge Yöneticisi
E mail: ieacanarias@ieca.es

Rafael Rueda
İnşaat Mühendisi
Levante Bölge Yöneticisi
E Mail: iecalevante@ieca.es

ÖZET

Avrupa’da yaşanan büyük tünel yangınları, trafik akışını güvenilir kılmak ve güvenliği sağlamak için tünel inşaatında en uygun malzeme seçiminin gerekliliğini ortaya koymuştur. Yangın halinde yanmayan ve toksik olmayan beton gibi bir yol kaplaması insanların (yolcular ve kurtarma timleri), tünel ekipman ve yapısının güvenliğine katkı sağlamaktadır. Bu dokümanda, birçok ülkede kaplamalarda kullanılan asfalt ve beton üzerinde gerçekleştirilen yangın deneylerinin sonuçları analiz edilmiştir. Asfaltın daha yüksek kalorifik değere sahip olduğu, ısıtıldıktan sonra hızlıca yanmaya başladığı ve etrafa toksik gaz yaydığı bilinmektedir. Ayrıca yangında asfalt tüm mekanik özelliklerini kaybetmektedir. (Yanmaya maruz kaldıktan sonra yalnızca asfaltla bağlı olmayan agregalar kalır). Buna karşılık beton, yüksek ısıya maruz kaldığında yanmaz, zehirli gaz sızıntısı yapmaz ve şekil değiştirmekle beraber mekanik özelliklerinin büyük bir bölümünü korur. Kavlama olayı, kaplamalarda çok uygun olmayan bazı betonlarla sınırlıdır. Sonuç olarak diğer kaplama alternatifleriyle karşılaştırıldığında beton kaplamalar, yangın çıkması durumunda tünelin güvenliği açısından daha fazla katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler

Yangın, tünel, kaplama, beton, bitümlü karışım, güvenlik, kavlama

1. GİRİŞ

Avrupa'da ulaşım amaçlı kullanılan tünellerin toplam uzunluğu 15.000 km'yi aşmaktadır. Tüneller ulaşım altyapısını sağlama konusunda önemli rol oynamakta, hatta bazı durumlarda hayati önem taşımaktadırlar.

Yol ağının kendine özgü özellikleri olan bir parçası durumundaki yol tünellerine özel olarak dikkat edilmesi gerekmektedir. Tünellerdeki kaza oranı, karayolları üzerindeki diğer noktalara göre daha fazla değildir. Fakat tünelleri etkileyen ciddi bir kaza, sosyal bir alarma sebep olup kazanın gerçekleştiği yerde kurtarma ve boşaltma faaliyetlerinde güçlüklerle, ciddi hasarın meydana gelmesi ya da yolun tıkanması durumunda, yolun tamamının kapatılmasına

Yakın zamanda Avrupa'daki bazı tünellerde meydana gelen yangınlar, gerek insan gerekse altyapı konusunda oluşacak riskleri en alt seviyeye indirmek için bazı önlemler alınması gerektiğini ortaya koymaktadır (Tablo 1) [1, 2].

Yangın sırasında insan davranışları üzerine yapılan araştırmalar başlangıçta insanların çoğunun çevresinde olanların ve içinde bulundukları durumun farkında olduğunu, fakat birkaç dakika sonra gözlere zarar veren dumanın yayılması sonucunda görüşün kısıtlandığını ve yanan bölgeden kaynaklanan yüksek sıcaklığın strese sebep olduğunu göstermektedir.

Şekil 1: St Gotthard (solda) ve Mont-Blanc (sağda) Tünel yangınları



veya bu durumda tali yolların kullanılmasına ya da alternatif yol kullanılamaması gibi zorluklara sebep olabilir.

Hızlı gelişen yangın ortaya çıkmadan önce, tünel kullanıcıları sadece şiddetli ses ve ışığa tepkide bulunmaktadır. Durum, özellikle turistik bölgelerde ve sınırlarda, yabancı sürücüler tarafından güçlükle anlaşılmakta ve kısa zaman içinde karar vermek zorunda kalmaktadırlar [3].

TABLO 1 - AVRUPA'DA YAKIN ZAMANDA YOL TÜNELLERİNDE ÇIKAN YANGINLAR

Yer	Tünel Çeşidi, Uzunluğu	Yıl	Süre Sıcaklık	Yaralı ve Ölü Sayısı	Hasarlı Araçlar
Fréjus Fransa-İtalya	Yol tüneli (Tek tüplü) 12.9 km	2005	6 saat 1200° C	2 ölü	9 otomobil
St Gotthard İsviçre	Yol tüneli (Tek tüplü) 16.3 km	2001	24 saat 1200° C	11 ölü 35 zehirlenme	10 otomobil 13 kamyon
Gleinalm Avusturya	Yol tüneli (Tek tüplü) 8.3 km	2001	37 dakika	5 ölü	2 otomobil
Tauern Avusturya	Yol tüneli (Tek tüplü) 6.4 km	1999	14 saat 1200° C	12 ölü	24 otomobil 16 kamyon
Mont-Blanc Fransa-İtalya	Yol tüneli (Tek tüplü) 11.6 km	1999	53 saat 1000° C	39 ölü	32 otomobil 2 kamyon
Palermo İtalya	Yol tüneli	1999	—	5 ölü	19 otomobil 1 otobüs

2. YANGIN ESNASINDA KAPLAMALARIN DAVRANIŞLARI

Önceki paragraflarda da bahsedildiği üzere, tünelin yapımında kullanılan tüm malzemelerin yangına karşı en yüksek güvenliği sağlayacak nitelikte olması gerekir. Bu anlamda tünel kesitinin önemli bir bölümünü kaplama oluşturmaktadır. Beton ve bitümlü karışımlar, kaplamanın üst tabakasında kullanılan iki malzemedir. Beton yanmaz özelliğe sahipken, petrolün rafine edilmesiyle ortaya çıkan bitümlü karışımlar yüksek miktarda yanıcı özelliğe sahiptir. Ayrıca bitüm maddesi, yangın çıkması durumunda, yangın etkilerini artırıp, etrafa zehirli duman yayar ve malzemenin yapısı bozularak kısmen ya da tamamen dağınık, kararsız agrega parçacıklarına dönüşür.

Bitümlü karışımların, birçok laboratuvar deneyi ve gerçek yangına maruz kaldığı durumlarda tutuştuğu gözlenmiştir. Aşağıda detaylı olarak belirtilen, kızdırmayla bitümlü karışımların bağlayıcı miktarının belirlenmesine yönelik test metodları, ABD ve Avrupa'da standardize edilmiştir. Gerçek yangınlar düşünüldüğünde, St.Gotthard-Mont Blanc (1,2 km), Fréjus (800 m) gibi tünellerdeki bitümlü kaplamalar, ciddi hasar görmüş ve yangın büyük alanlara yayılıp, tünellerin yeniden inşa edilmesine sebep olmuştur. Mont-Blanc tünelinin bazı noktalarında 10 cm kalınlığındaki bitümlü karışımlar ateşten dolayı tahrip olmuş, kaplamayı destekleyen betonarme döşemeyi dahi etkilemiştir [4].

Fréjus Tünelinde 2005 yılında meydana gelen yangında, yangın mahallindeki yol eridiğinden bitümlü kaplamanın davranışının itfaiye örgütünü engellediği bildirilmiştir.

Bitümlü karışımların yanmasıyla ortaya çıkan yüksek sıcaklığın yanı sıra karşılaşılan diğer bir problem ise yanma sırasında oluşan toksik gazlar ve dumandır. Mont-Blanc yangınından sonra oluşturulan komisyon tarafından açıklanan rapora göre, çıkan ısı o kadar büyük olmuştur ki bitümlü kaplama alev alarak, kaza anında orada bulunan insanların çoğunun boğularak ölmesine neden olmuştur.

Öte yandan, beton çok yüksek sıcaklıklarda dahi yapısal kapasitesinin önemli bir bölümünü koruyan ve yangına maruz kaldığında zehirli gazlar yaymayan, yanmaz bir maddedir. Gerçekten, yangına maruz kalan beton yapılarının yanmaz özelliği en iyi şekilde ispatlanmış olsa da, çok sayıda laboratuvar deneyi de bu durumu doğrulamıştır. Örneğin 2005'te Madrid'de Windsor binasında çıkan yangında 24 saatten fazla süren alevler ve 1000 °C' in üstüne çıkan sıcaklığa rağmen, yapı zarar görmemiştir. [7]

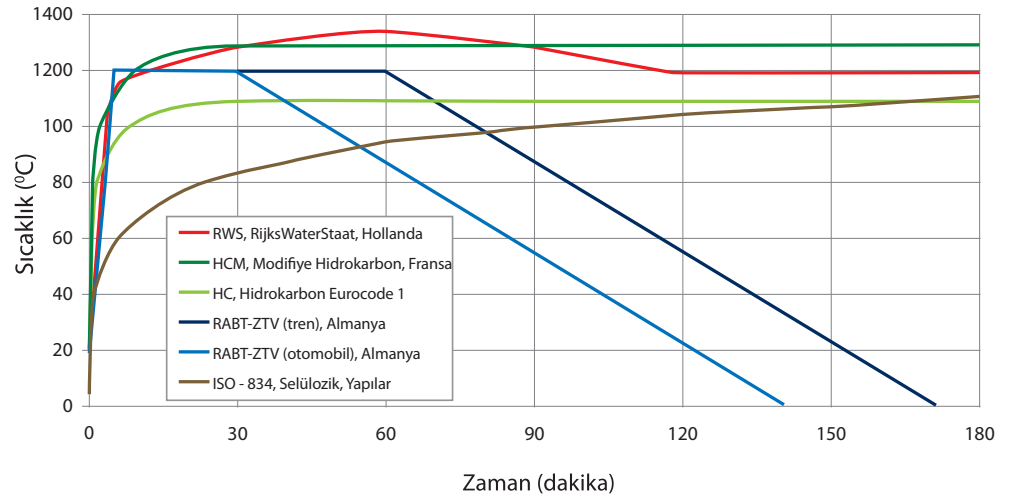
Yangında beton kaplamaların iyi davranışına en güzel örnek, dünyada bu konuda en iyi özelliklere sahip olan San Pedro de Anes (İspanya)'de Tünel Havalandırma ve Yangın Deneyleri Merkezi'nde bulunan deney tünelidir. Burada 2005 Haziran ayında açılışından bu yana, kontrollü araç yangınları da dahil olmak üzere beton yapı üzerinde birçok yangın testi yapılmış ve beton bu yangınlardan ciddi bir zarar görmemiştir. (Şekil 2)

Laboratuvar ortamında, bir malzemenin yandığında davranışını gerçekçi bir şekilde karakterize etmek için, malzemenin yangın esnasında ortaya çıkabilecek ortalama sıcaklığa, en azından yaklaşık olarak, maruz kalması gerekir. Bu nedenle, farklı şartnamelerdeki yangın eğrileri olarak adlandırılan zaman-sıcaklık değişimi eğrileri hakkında bir miktar bilgi vermek faydalı olacaktır.

Şekil 2: San Pedro de Anes (İspanya)'de Tünel Havalandırma ve Yangın Deneyleri Merkezi'nde bulunan deney tüneli



Şekil 3: Yangın eğrileri. Yangın türüne göre sıcaklık değişimi



3. TÜNELLERDE YANGIN EĞRİLERİ

Son yıllarda, tünellerde ve yeraltında meydana gelen yangın türlerini saptamak amacıyla uluslararası birçok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalar gerek laboratuvar şartlarında gerekse hizmete açık veya kapalı tünellerde gerçekleştirilmiştir.

Bu deneylerden elde edilen verilere göre, bir dizi sıcaklık-zaman eğrisi geliştirilmiştir. [8]

Binalarda meydana gelen standart yangın testleri, ISO 834 yangın eğrisinde belirtilen, selülozik zaman-sıcaklık eğrisi kullanımına dayanmaktadır.

Selülozik eğri yıllardır kullanılmasına rağmen, petrol, gaz, kimyasallar gibi malzemelerin yanma oranlarının, ahşabın yanma derecesinden daha yüksek oranlarda olduğu ancak yakın geçmişte anlaşılmıştır. Bu nedenle, petro-kimya endüstrisinde kullanılan malzemeler ve yapılar üzerinde uygulanacak olan yangın testleri için alternatif bir yöntem ihtiyacı duyularak, hidrokarbon eğrisi geliştirilmiştir.

Hidrokarbon eğrisi, araba yakıt deposu, petrol, gaz ve çeşitli kimyasalları taşıyan tankerler gibi olası petrol yangınlarında kullanılabilir.

Yukarıda değinilen hidrokarbon eğrisinden yola çıkarak, Fransız Yönetmeliği daha şiddetli yangınlar için Modifiye Hidrokarbon Eğrisi'ni (HCM) önermektedir.

Maksimum sıcaklık, standart hidrokarbon eğrisinde (HC) 1100 °C iken, modifiye hidrokarbonu eğrisinde 1300 °C'dir.

RABT-ZTV eğrisi, Almanya'da, bir Avrupa projesi olan FIRETUN (Taşıt Tünellerinde Yangınlar) gibi bir dizi deney programının sonucunda geliştirilmiştir. Bu eğride sıcaklık artışı çok yüksek olup, 5 dakikada 1200 °C'ye kadar çıkmaktadır. Bu süre otomobil yangınlarında 30 dakika olan sıcaklık azalması süresine göre çok kısadır. Tren yangınlarındaki sıcaklığın azalmaya başlama süresi ise 60 dakikadır. 110 dakikalık soğuma süresi her iki yangın eğrisi için de aynıdır.

RWS Eğrisi, Hollanda'da Ulaştırma Bakanlığı, Rijkswaterstaat tarafından geliştirilmiştir. Bu eğri, en kötü senaryo düşünüldüğünde, 50 m³ yakıt, petrol ya da yağ tankerinde çıkan yangın sonucunda 300 MW'lık yangın yüküyle, yangının 120 dakikaya kadar süreceği düşüncesine dayanmaktadır.

RWS yangın eğrisinin güvenilirliği Norveç'teki Runehamar tüneline, gerçek boyutlu yapılan deneylerle doğrulanmıştır. RWS eğrisi, bir yakıt tankerinde meydana gelen yangının aniden büyümesi ve yakıt yükü yandıkça sıcaklığının yavaş yavaş düşmesine benzemektedir.

Yakın zamanda tünellerin güvenliği hakkında İspanya'da yapılan düzenlemeye göre; havalandırma sistemleri, minimum 120 m³ alana yayılmış ve 30 MW'lık standart yangının dumanını dışarı atabilme gerekliliği getirilmiştir. Bu duruma, Tablo 2'de gösterildiği gibi bir kamyonun yangını örnek verebiliriz [9].

TABLO 2 - TÜNELLERDEKİ YANGIN YÜKÜ

Araç	Termal Isı (MW)	Tünel Duvarlarında Maksimum Sıcaklık (°C)	Toksik Gaz Salınımı (m3/s)
Otomobil	2,5 – 5	400	20
2-3 Otomobil	8	—	30
Kamyonet	15	—	50
Otomobil	20	800	60 – 90
Kamyon	20 - 30	1000	60 – 90
Tanker	100 - 300	1200 - 1400	> 100

4. TÜNELLERDE GÜVENLİK KURALLARI

Bitümlü karışımların yangın hassasiyeti hususundaki kaygılardan ötürü, 2001 yılında Avusturya'da 1km'den uzun tünellerde bitümlü kaplama yasaklanmıştır. [10]

Bunun ardından, Avrupa Parlamentosu'nun 2004/54/EC sayılı direktifi ve Avrupa Birliği Konseyi'nin 29 Nisan 2004 tarihinde Trans-Avrupa Karayolu Ağı üzerindeki tüneller için aldığı karar benimsenerek, AB standartlarında tünellerin güvenliği için minimum güvenlik tedbirleri saptanmıştır. [11]

Bu direktif, tünellerdeki güvenlik, tünelin geometrisi, tasarımı, trafik işaretleri ve yönetimi, acil servislerin eğitimi, olay yönetimi, kullanıcılara tünelde en iyi şekilde nasıl davranacakları hakkında bilgi verilmesi, yetkililer ve kurtarma timleri, polis, itfaiye gibi acil durum araçlarıyla daha etkili bir iletişim ağının kurulması gibi birçok önlemin alınmasını gerekli kılmaktadır. (Şekil 4).

İspanya'da, özellikle tünellerde olmak üzere yollardaki güvenliğin artırılmasına yönelik alınan karar ve Avrupa Direktifi'nin yasalaşmasıyla, eyalet yollarındaki tünellerin işleyişi ve dizaynını kapsayan 06 Mayıs 2006/635 No'lu Kraliyet Kararnamesi yayınlanmıştır. Bu kararname, sadece Trans-Avrupa Karayolu Ağı üzerinde değil, tüm eyalet tünellerinde uygulanacaktır.

Kararnamede yer alan güvenlik tedbirleri arasında şu hüküm yer almaktadır:

“Geçerli sebepler gösterilmediği takdirde, 1.000 m'den uzun tünellerde beton kaplama kullanılacaktır.”

Kararnamede belirtilenden farklı çözüm önerileri ancak belirtilen hükümlerin uygulanmasının olanaksız olduğu veya ilgili uygulamaların aşırı masraflara yol açtığı ve hükümdeki uygulamalarla eşit ya da daha fazla koruma sağlayabilecek bir alternatif olması koşuluyla kabul edilebilmektedir. Bu tür önlemlerin etkinliği, risk analiziyle gösterilmelidir.

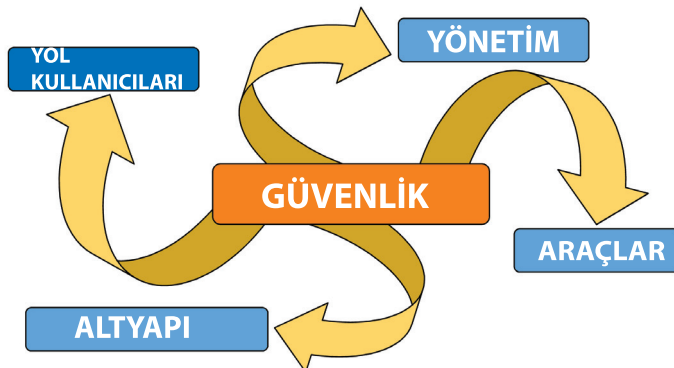
Güvenlik önlemi olarak beton kaplama ve beton kaplamanın bitümlü karışımlar gibi diğer alternatiflere tercih edilmesine ilişkin kararnamede şu ifadeler yer almaktadır;

- Tünellerdeki beton kaplamalar her zaman uygulanabilir bir çözüm olmuştur. Beton kaplamaların kullanımı, bazen tünellerin iç kısmında ve tünelin dışarıda kalan kısımlarında iki farklı kaplamanın bir arada kullanılması gerekliliğinden dolayı, yapımcı açısından zorluk ya da sıkıntılı bir durum teşkil etmez.
- Beton kaplamalar, aşırı maliyetli değildir. Aksine, 30 ya da 40 yılda yapılacak harcamalar göz önünde bulundurulduğunda, minimum bakım ihtiyaçlarıyla, en ucuz seçenektir.

Yukarıda da belirtildiği gibi bitümlü aşınma katmanı gibi diğer alternatif kaplamalar, beton kaplamayla eşit güvenliği sağladığı veya güvenilir bir ortam yarattığı takdirde kullanılabilir.

Yangında bitümlü karışımlar ve betonun davranışını karşılaştırmak amacıyla yapılan deneyler ve birçok gerçek vakadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki paragraflarda özetlenmiştir.

Şekil 4: Tünellerde güvenliğin artırılmasında rol oynayan faktörler



5. BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN YANGIN DAVRANIŞI

Bitümlü karışımlarda olduğu gibi, petrol ürünlerinin rafine edilmesiyle oluşmuş alt ürünlerin kullanıldığı karışımlar, yangın esnasında kolayca yanabilir ve ciddi zarar görebilir.

Bu gerçeği destekleyen birçok deney ve gerçek vaka sonucu aşağıda verilmiştir.

5.1. YAKMA DENEYİ İLE BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN BAĞLAYICI MİKTARLARININ BELİRLENMESİ

Yıllardır bitümlü karışımların yanabilirliği, bağlayıcı içeriğini tespit etmek için kullanılmıştır. 1970 yılında Birleşik Devletler Ulaştırma Araştırma Kurulu bütan yakma metodunu geliştirmiştir. 1990'lı yılların başlarında yine ABD'de Bitümlü Karışım Teknolojisi Ulusal Merkezi tarafından, geleneksel çözücü ekstraksiyon yöntemine alternatif olarak, karışımın bir numunesini yakarak, bağlayıcı maddeyi agregalarından ayırma metodu geliştirilmiştir. Bitümün tamamen yanmasından dolayı, bu metot karışımların bileşenlerinin değerlendirilmesinde de kullanılmaktadır. Parçacık boyutları ve ağırlıklarına göre oranları, agreganın yüksek sıcaklıkta ayrışmaması koşuluyla belirlenebilmektedir.

Bu metot ASTM D6307 standardı ve Avrupa'da EN 12697-39 standardı kapsamındadır. [16]

Bitümlü karışımın türüne bağlı olarak, yapılacak olan deney ısınma başladığı andan itibaren 40 dakika sürer. Genelde fırın içindeki sıcaklık 400'den 550°C'ye kadar ulaşmaktadır.

Bu deney, bitümlü karışımlarının tünellerde çıkan yangınlar için standardize edilmiş yangın eğrilerinde oluşan maksimum sıcaklıktan daha düşük değerlerde yandığına kanıt oluşturmaktadır.

Genellikle bağlayıcı içerik, sıkıştırılmamış numuneler üzerindeki uygulamalar sonucunda belirlenmektedir. Fakat yangın sırasında kaplamanın durumunun benzerini gerçekleştirebilmek için bu kitapçığın yazarları tarafından, deneyler Şekil 5'te de görüldüğü gibi tekerlek izi deneylerinde kullanılan benzeri bir sistemle sıkıştırılmış numuneler üzerinde yapılmıştır. Daha sonra bu numuneler, yanma sırasında bitümlü karışımların kütle kaybını sürekli olarak ölçmek için entegre ağırlık ölçme sistemi ve fırının iç üst kısmındaki kızılötesi ısıtıcılarla özel bir fırına verilir. Bağlayıcı maddenin tamamının yanmasından dolayı kütle kaybı sabit hale geldiğinde deney otomatik olarak durmaktadır. Isı ve kütle kaybı kayıtları elektronik olarak depolanmakta ve içindeki cihaz aracılığıyla yazdırılmaktadır.

Deney sonrasında, numuneler bağlayıcı madde tarafından sağlanan kohezyonunu kaybedip, üzeri kolayca kırılabilen, bitümün yanmasıyla oluşan kalıntılarla kaplı bir grup dağınık parçacıklar haline gelmektedirler.

Bir deneyde elde edilen kütle kaybı ve sıcaklığın değişim grafiğini gösteren eğriler, Şekil 6'da verilmiştir.



(a) Deney öncesinde bitümlü karışım numunesi



(b) Numunenin fırına verilmesi

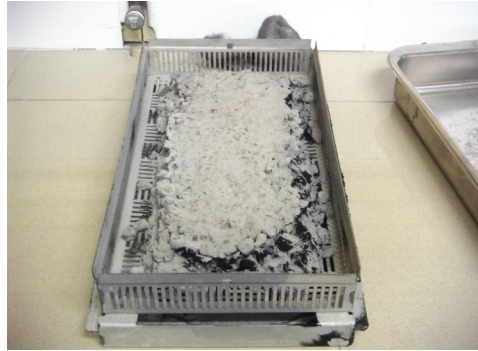
Şekil 5: Bitümlü karışımların bağlayıcı içeriğinin saptanması amacıyla yapılan yakma deneyi



(c) Fırının iç üst kısmındaki kızılötesi ısıtıcılar



(d) Bitümlü karışımın deney esnasında kızdırılması

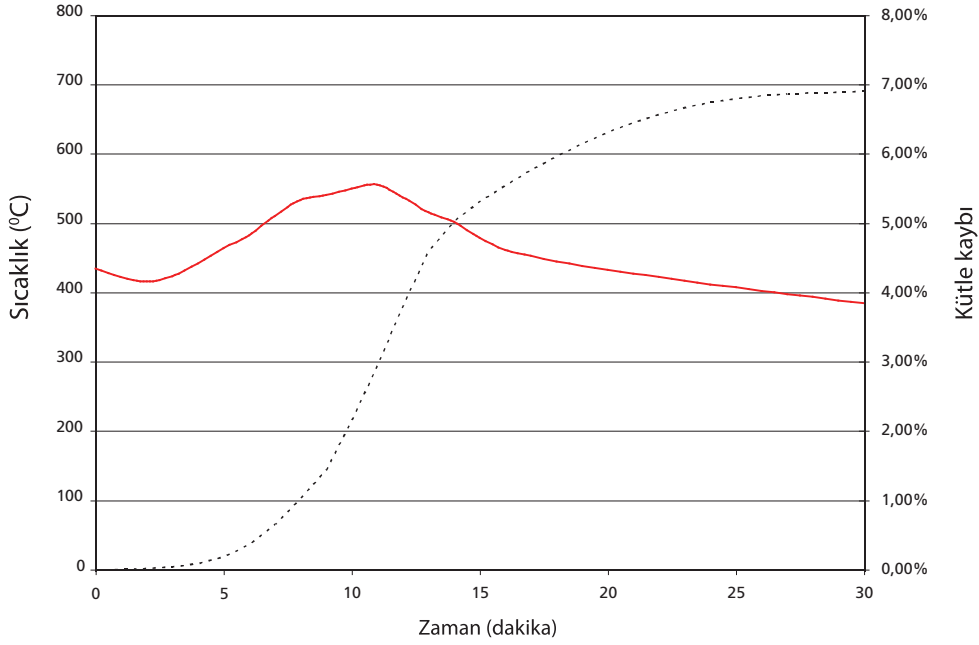


(e) Deney sonrası numunelerin görünüşü



(f) Deney sonrasında numuneler bağlayıcı madde tarafından sağlanan kohezyonunu kaybedip üzeri kolayca kırılabilen hale gelmektedir.

Yakma deneyi ile bitümlü karışımların bağlayıcı içeriğinin saptanması için yapılan deney



Şekil 6: Bitümlü karışımın yakma deneyinde kütle kaybı ve sıcaklık değişim eğrileri

5.2 CERGY-PONTOISE ÜNİVERSİTESİ (FRANSA)

Cergy-Pontoise Üniversitesi (Fransa) Malzeme Bilimi ve Yapı Laboratuvarı, bitümlü karışım ve betondan alınan birçok numunenin yangına karşı davranışı üzerine deneysel bir çalışma yürütmüştür. Bu çalışmaya ait sonuçlar da 2003 yılında yayınlanmıştır.

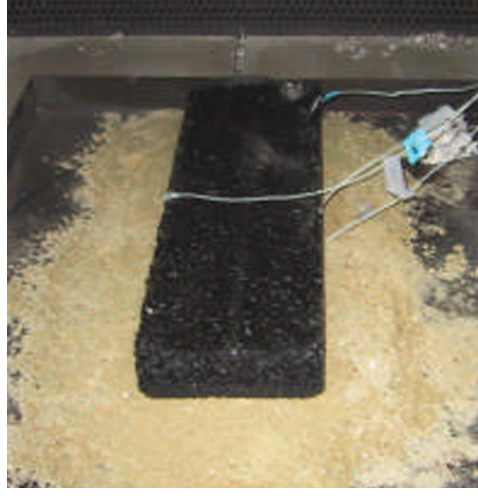
Bu çalışma; bitümlü karışımların yangındaki davranışını ölçmek amacıyla standart yangın eğrisinin (ISO 834) kullanıldığı ve çeşitli yüksekliklerdeki sıcaklığın ısı çiftler aracılığıyla ölçüldüğü ilk kontrollü çalışmadır. Karşılaştırma amacıyla aynı deneyler beton numuneler üzerinde de yürütülmüştür. [17]

Bu çalışma kullanılan malzemelerin (bağlayıcı içerik ve diğer özellikler) özelliklerini, numunelerin boyutlarını (numunelerin çoğu 50 x 18 x 5 cm boyutlarındadır), numuneleri ısıtmak için kullanılan fırın, ısı çiftlerinin açısı ve numunelerdeki ısı değişimini detaylandırmaktadır.

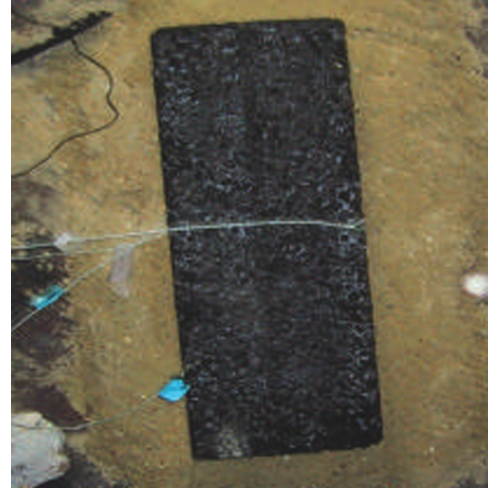
Bitümlü karışımın yanmasıyla yayılan gazlar da analiz edilmiştir. Elde edilen veriler birçok fotoğraf ve grafikte Şekil 7-11'de gösterilmiştir.

Yürütülen çalışmanın en önemli sonuçları aşağıda verilmiştir:

- Bileşenlerinden dolayı, yangın esnasında beton oldukça karardır. Bu yüzden beton, tünellerdeki yangın riskini, büyüklüğünü ve bunun sonuçlarının belirleyicisi olan yangın yüküne sebep olmamaktadır.
- Bitümlü karışımlar, yangın esnasında ısı ve yangın yükünü artıran yüksek kalorifik değere sahiptir. 428°C ile 530°C arasında yanmaktadırlar.
- Bitümlü karışımlar yangın esnasında, mekanik özelliklerini kaybetmektedir. Yangın sonucunda bitümlü karışımlar parçalanmakta, bütünlüklerini kaybetmekte ve bitümün bağlayıcı etkisi ortadan kalkmaktadır.



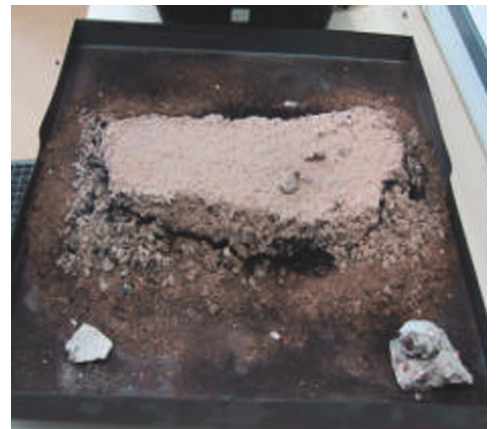
Şekil 7: Deneyden önce bitümlü karışım numunesi
(Cergy – Pontoise Üniversitesi)

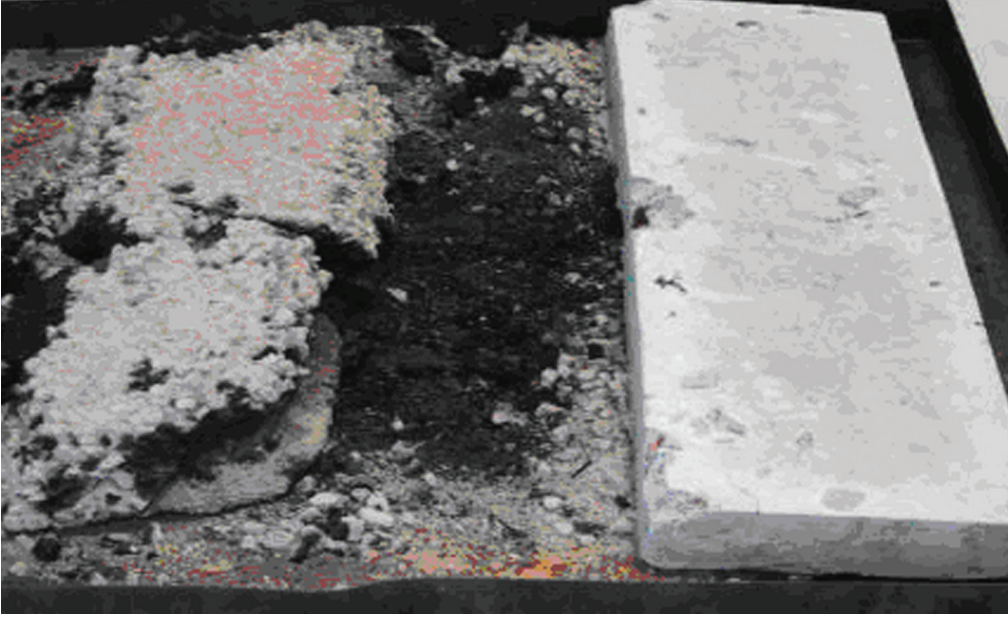


Şekil 8: Yanma esnasında bitümlü karışım
(Cergy – Pontoise Üniversitesi)



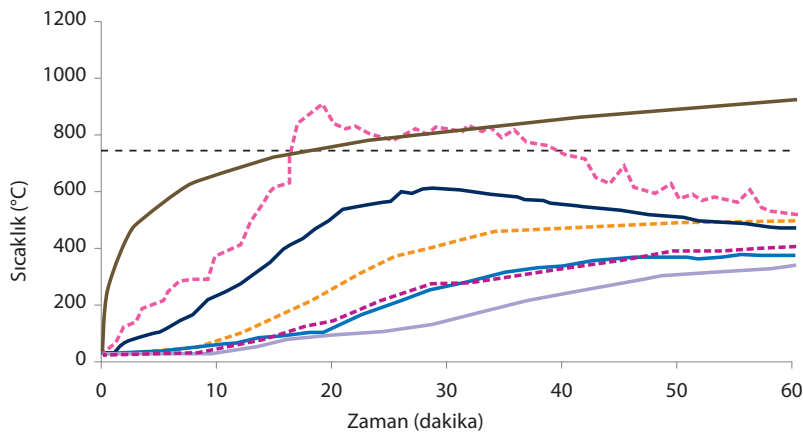
Şekil 9: Yanma deneyinden sonra bitümlü karışım
(Cergy – Pontoise Üniversitesi)





Şekil 10: Yanma deneyinden sonra bitümlü karışım (solda) ve beton (sağda)
(Cergy – Pontoise Üniversitesi)

- Beton kaplamayla karşılaştırıldığında, bitümlü kaplamalar yüksek sıcaklığa çok çabuk ulaşmaktadır.
- Bitümlü karışımlar, ısıtıldıktan 5 dakika sonra boğucu ve zehirli gazlar yaymaya başlamaktadır (Karbon monoksit, karbon dioksit, aldehit, metanol, propanol-2, aseton, benzen, toluen, sülfür dioksit, asetik asit vb.). Bu durum yangın etkisini daha da kötüleştirmektedir.
- Bitümlü karışım numunelerinin görünümü, bağlayıcı içeriği tespit etmek için yapılan deneylerdeki numunelerin görünümüyle benzerdir.



Şekil 11: ISO 834 standart yangın eğrisine maruz kalan beton ve bitümlü karışım numunelerinde ölçülen sıcaklıklar
(Cergy – Pontoise Üniversitesi)

5.3 ALMANYA FEDERAL KARAYOLLARI ARAŞTIRMA ENSTİTÜSÜ (BASt)

Almanya Federal Karayolları Araştırma Enstitüsü (Bundesanstalt für Straßenwesen BASt), 2003 yılında, tünel yangınlarında bitümlü karışımlar ve beton üzerine bir bibliyografik çalışma yayınladı. Bu çalışmada sadece Alman dokümanları incelenmiştir.

Yayınlanan çalışmada 1949 ve 2000 yılları arasında yol tünellerinde çıkan yangınların detayları verilmiştir. Bitümlü tabakalar üzerindeki tehlikenin, oldukça fazla olduğu vurgulanmıştır.

Mont-Blanc yangınından sonra yapılan bazı araştırma sonuçlarına göre, İtalya bölgesinde çıkan yangından 300 m uzaklıkta bulunan sekiz aracın neden yandığı hala netleşmemiştir. 300 metrelik mesafede zarar görme olasılığı az olduğu için, yüksek sıcaklıkta yanan bitümlü karışımdan çıkan ateşin, araçların yanmasına sebep olabileceği düşünülmektedir.

Almanya'da bitümlü kaplamalar üzerine bazı deneyler yapılmıştır. Yangının uygulanış biçiminden dolayı (örneğin, tahta kasaların yanmasıyla kaplama üzerinde yığıntı oluşmuştur), bitümlü karışımın yüzeyindeki sıcaklık 400°C'yi aşmamıştır. Bu yüzden bu deney sonuçları oldukça şüphe uyandırmaktadır. Bu deney sonucunda bitümlü karışımın sadece 1cm kalınlığındaki kısmı zarar görmüştür. Sonuç olarak bu durum gerçek yangınlarda gözlenen durumla bağdaşmamaktadır.

5.4 FRANSA BİLİMSEL VE TEKNOLOJİK YAPI MERKEZİ (CSTB)

Fransa Bilimsel ve Teknik Yapı Merkezi (Centre Scientifique et Technique du Batiment, CSTB), yol tünellerindeki yangınlarda bitümlü kaplamaların davranışı üzerine bibliyografik analiz ve deneysel bir çalışma başlatmıştır. [20], [21], [22].

Deneylerde 60 x 40 x 10 cm uzunluğundaki bitümlü numuneler, 60 x 60 cm uzunluğundaki plakalı ısıtıcı üzerine yerleştirilerek, 20 ila 50 kW/m² lik ısı akışına maruz bırakılmıştır.

Numunenin üst yüzeyinin 15 mm altına yerleştirilen ısı çifti 300°C'yi gösterdiğinde, tüm deneyler sonlandırılmıştır. Bu sıcaklık, bitümün yanmasıyla oluşan sıcaklıktan düşük olduğu için yapılan deneyler, yol tünellerinde çıkan yangınlarda oluşan durumu temsil etmemektedir.

Düşük sıcaklıklarda bile numunelerin çoğu iç bütünlüğünü kaybedip küçük parçalı taneler haline gelmiştir. Yanan malzemenin yüzeyinde ise tortu oluşmuştur. Gözlenen davranış, bağlayıcı içeriği tespit etmek için yapılan yakma deneyi (Şekil 5) ve Cergy-Pontoise Üniversitesi'nde yapılan deneylerdeki sonuçlarla aynıdır. Sonuç olarak oluşan tortu, bitümlü kaplamanın geriye kalan kısmını korumaz, aksine tamamının yanmasına sebep olmaktadır.

Deneyler sırasında, numunenin yanmasının haricinde, koyu renkli, yoğun ve ağır kokulu duman oluşumu gözlenmiştir.

Ciddi olmayan durumlarda dahi, inert tortu tarafından sağlanan yetersiz koruma, kanıtlanabilir bir niteliklidir. Örneğin; araba yangınının ardından yol kaplamasının gördüğü zarar Şekil 12'de gösterilmiştir.

5.5 SAMARIS PROJESİ (YOLLARIN ALTYAPISI İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR VE GELİŞMİŞ MALZEMELER)

Finansal desteği Avrupa Birliği tarafından sağlanan SAMARIS Projesi, 23 ortakla yürütülen bir Avrupa araştırma projesidir. 2002 ile 2005 yılları arasında geliştirilen proje, yapılar ve kaplamalar olmak üzere iki temel konudan oluşmaktadır. Projenin en önemli hedeflerinden birisi, kaplamalarda geri dönüşümlü ve alternatif malzemelerin, işlevsel ve çevresel açıdan tatmin edici davranışlarını elde edebilmek için nasıl test edilip seçileceğinin tanımlanması ve kullanımlarını teşvik etmektir.

Projedeki görevlerden birisi de, kaplamalarda kullanılan malzemelerin ateşe karşı tepkilerini ölçmektir. 2002 yılında EN 13501-1 "İnşaat ürünleri ve yapı elemanlarının yangınla ilgili sınıflandırılması'nın" 1. bölümünde yer alan yangın deneylerindeki reaksiyonlardan elde

edilen bilgilerle sınıflandırma yapılmasının, kaplama çeşitlerini ayırt etmek için yeterli bilgi sağlayacağı konusunda şüpheler vardı. Bu yüzden üç farklı bitümlü karışım (gözenekli bitümlü karışım, yoğun bitümlü makadam, mastik bitümlü karışım) aşağıdaki standartlara göre iki deneye tabi tutulmuştur:

- EN ISO 9239-1 “Yer kaplamalarında yangın deneylerine karşı tepkime”- Bölüm 1: EN 13501-1 standardında da değinilen, radyant ısı kaynağı kullanılarak yanma özelliğinin belirlenmesi.
- ISO 5660-1 “Yangın deneylerine karşı tepkime- Isı salımı, duman oluşumu, kütle kaybı oranı- Bölüm 1: Isı salınımı hızı (Konik Kaloriölçer Metodu)” [26]. (Şekil 13)

Projenin bitiminde aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmıştır:

- Yoğun bitümlü karışımın aralıksız yakılmasıyla başlayan kritik ısı akışı, 21 kW/m^2 civarında tespit edilmiştir. Bu değer açıkta araba yangını deneylerinde elde edilen değer aralığında yer almaktadır.
- Bu değer, EN ISO 9239-1 kaplama testinde sağlanan ısıtım etkisinin iki katı kadardır. Bu yüzden, yapılan deney kaplamanın yangındaki performansı hakkında ayırt edici bilgi vermemektedir. Deney cihazında herhangi bir değişiklik yapılmaz ise, bu deneyden elde edilen sonuçlar, yangın esnasında bitümlü karışımların davranışını değerlendirmek amacıyla kullanılamaz.
- Alevlenme, ısıtım derecesi 35 kW/m^2 'ye yükseldiğinde başlatılırsa, 10 dakikadan fazla, 75 kW/m^2 'de başlatılırsa 1 dakikadan az sürmektedir.

Yol tüneli gibi kapalı bir alanda yapılan bu çalışmada, tünel duvarları ve sıcak duman tabakalarından yayılan ısı akışı, kaplamanın yanma olasılığını artırabilmekte ve bu durum, açık yol üzerinde meydana gelen yangınlardan daha fazla etki yaratarak, yangının geniş alanlara yayılmasına sebep olabilmektedir.



Şekil 12: Otomobil yangınında, kaldırımda meydana gelen hasar



Şekil 13: Konik kaloriölçer metodu ile bitümlü karışım numunesinin kızdırılması

5.6 EDİNBURGH ÜNİVERSİTESİ YAPI ARAŞTIRMALARI KURUMU (BRE) YANGIN MÜHENDİSLİĞİ MERKEZİ

Edinburg Üniversitesi Yangın Güvenlik Mühendisliği Merkezi, yol kaplamalarında bitümlü karışımların yangın esnasında davranışı üzerine bir araştırma projesi geliştirmiştir. Projede, tünel yangınlarının tam olarak benzerini sağlamak ve elde edilen sonuçları Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği modelleri ile birleştirmek amacıyla konik kaloriölçer metodu kullanılmıştır. Mastik bitümlü karışımın silindir numuneleri, 60,50,40 ve 30 kW/m^2 lik ısı akışına maruz bırakılmıştır. Numunelerin bitüm içeriği kütlece % 6,3 oranındadır. Silindirin boyutları ise $100 \times 100 \times 60 \text{ mm}$ uzunluğundadır.

Deneyin temel sonuçları;

- Bitümlü karışımın yanmasını sağlayan kritik ısı akışı 40 kW/m^2 den azdır. Bu büyüklükteki ısı akışları deneylerde ve tünellerdeki yangın kazalarında oluşmaktadır.

- Malzemenin yapısal özellikleri deney sırasında bozulmuştur. Malzemenin geri kalanı parçalanmış ve kolayca kırılacak bir hal almıştır.
- Rastlantı sonucu ısı akışının artmasıyla, ısı salınım oranı önemli derecede artmıştır. Rastlantısal ısı akışı 60kW/m^2 değerindeyken, ısı salınım oranı yaklaşık 100kW/m^2 olarak ölçülmüştür. Daha fazla ısı akışıyla bu oranın yükselmesi beklenmektedir.
- Tipik bitümlü karışımlar, tünel yangınlarında yanma potansiyeline sahiptir. Ürettiği ısı salımı ise tünellerdeki araç yakıtlarından yayılan ısı ile karşılaştırılabilmektedir.

Çalışma sonuçlarının sadece 60 mm uzunluğundaki numunelerden elde edildiği unutulmamalıdır. Gerçek yangın durumları düşünüldüğünde, malzeme daha fazla zarar görebilir ve buna bağlı olarak ısı salım oranı artabilir.

Çalışmanın sonuç raporuna göre 2003 yılında Norveç'te Runehamar Tüneli'nde yapılan yangın deneyleri esnasında, yangın kaynaklarına (benzetilmiş ağır yük kamyonuna), çeşitli uzaklıktaki yerlerde ısı akışları kaydedilmiştir. İlk üç deneyde, (birincisinde araca, ahşap ve plastik paletler, ikincisinde ahşap palet ve döşekler, sonuncusunda ise mobilya yüklenmiştir) kritik ısı akışı, yol üzerinde yangının akışı yönündeki yerlerde sınırı aşarak, ilkinde 280kW/m^2 , ikincisinde 200 kW/m^2 ve sonuncusunda 75 kW/m^2 olarak kaydedilmiştir. Kritik sınırın üzerindeki ısı akışları, ilk deneyde yangına 5 m mesafede kaydedilmiş, maksimum akım hemen hemen 100 kW/m^2 'ye kadar ulaşmıştır.

Sonuç olarak, bitümlü karışımın yanması, yangının çıktığı ağır yük aracının hemen yakınında meydana gelse de, karayolunun 50m^2 'den daha fazla kısmını kaplayabilmektedir. Bu yüzden bitümlü karışımın ısı salım oranı 5mW ya da daha yüksek olabilmektedir. Bu oran en az bir ya da iki araba yangınındaki ısı salım oranına denk gelmektedir. Daha ağır vakalarda, aracın altındaki, bitişiğindeki ve ilerisindeki bitümlü karışım etkilenebilmektedir.

5.7 GERÇEK YANGINLARDA BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN DAVRANIŞI

Deneylerden elde edilen sonuçlar, bitümlü karışımların gerçek yangın durumlarındaki davranışını doğrulamaktadır. Bitümlü karışımların, gerçek yangınlarda, yanan aracın uzağında olsa dahi, araçtan yayılan ısının etkisiyle yanmaya başladığı gözlenmiştir.

Yol tünelleri gibi kapalı alanlarda sıcak duman tabakaları ve tünel duvarlarından çıkan, yayılan ısı akışının, kaplamanın yanma riskini artırdığı dile getirilmiştir. Bu açıdan bakıldığında, St. Gotthard, Mont-Blanc (1,2 km) ve Fréjus (800 m) tünellerinde yaşanan yangınlarda, bitümlü karışımlar ciddi oranda hasar görmüştür. 1999 yılında meydana gelen Mont-Blanc Tüneli yangınında, 1200 m'lik taşıt yolu etkilenmiştir. Ayrıca bu yangın, 32 araba ve 2 kamyonunun yanmasına sebep olmuştur. Araçların toplam uzunluğu 250 m kadardır.

Mont-Blanc yangınında, yangından 300 m uzaklıkta park eden araçların da yandığı dikkat çekmektedir. Tünel tavanından dolayı 300 m uzaklıkta tahribat yaratamayacağı için, araçlardaki yangının, yüksek ısıda yanan bitümlü karışımdan çıkan ateşin yayılması sonucu çıktığı düşünülmektedir.

Bitümlü karışımın yanma özelliği olmasa da, yüksek sıcaklıklar, kaplama üzerinde aşırı yumuşamaya neden olabilmektedir. 2005 yılındaki Fréjus Tüneli yangınında, itfaiyecilerin açıklamalarına göre, yangın civarındaki asfalt kaplamanın ayaklarının altında eriyerek, kendilerini engellediği belirtilmiştir.

6. YANGIN- KAVLAMA OLAYINDA BETONUN DAVRANIŞI

Beton yanmayan ve yapı malzemeleri içinde ateşe karşı en dayanıklı malzemedir. Madrid'de Windsor binasında çıkan yangın gibi birçok örnek bunu kanıtlamaktadır. Bu yangında betonun yapısı zarar görmeyerek daha büyük bir felaketi önlemiş ve yıkımı oldukça güç ve masraflı olmuştur. Bu durum betonun, yangından sonra büyük ölçüde dayanımını koruduğuna kanıt oluşturmaktadır.

Yangına karşı betonun bu davranışı sadece binalarda değil, tünel gibi diğer yapılarda da gözlenmektedir. Birçok gerçek vakadan elde edilen sonuçlar; beton kaplamalı tünellerin (ön dökümlü, kalıplanmış veya püskürtmeli) ateşe karşı daha güvenli yapıya sahip olduklarını göstermektedir. Tünellerde yapısal çöküntü ya da yapısal tahribattan kaynaklanan ölümler yaşanmamıştır.

Beton yüksek sıcaklığa maruz kaldığında, betonun bileşenleri önemli özellikler göstermektedir [29]:

- 100°C'ye ulaşıldığında, kütledeki serbest ya da kapiler su buharlaşmaya başlar ve daha fazla ısınmaya engel olmaktadır.
- 200°C ve 300°C arasında, betonun dayanımında önemli bir düşüş ya da hidrate çimento yapısında bir değişiklik olmadan, su kaybı tamamlanmaktadır.
- 300°C ve 400°C arasında çimento hamuru su kaybeder. Beton dayanımında önemli bir düşüş gözlenmekte ve betonun yüzeyinde ilk çatlaklar oluşabilmektedir.
- 400°C'de, çimento silikatlarının hidratasyonu ile oluşan kalsiyum hidroksit bir bölüme sönmemiş kirece dönüşür.
- 600°C civarında agregalar genleşmeye başlamaktadır. Bu durum, betonun ufalanmasına sebep olan iç gerilmelere yol açar. Isıl genleşme katsayısı ortalama %35'in üzerinde olduğundan silisli agrega içeren betondaki hacim artışı, kalkerli agregalardan daha yüksektir.

Sıcaklık artışına bağlı olarak dayanımın azalması betonun türüne bağlı olmasına rağmen (kalkerli agregalarda daha azdır), 500°C'ye kadar sıcaklıklarda, dayanımda önemli bir düşüş gözlenmemektedir. Bu yüzden İspanyol Yapısal Beton Şartnamesi EHE-08 yalnızca sıcaklığın 500°C'nin üzerine çıktığı kısımların düşülerek küçültülmüş kesitlerin kullanımını öngörmektedir.

Önceki paragraflarda bahsedilen sıcaklıkların çevrenin ya da alevlerin sıcaklığı değil, gerçek beton sıcaklığı olması büyük önem taşımaktadır. Bu yüzden, yangının betonun dayanımı ve yapısal kapasitesi üzerindeki etkisi beklenenden daha azdır.

Diğer yandan beton, ısı iletkenlik katsayısı düşük bir malzemedir. Bir beton elemanın enkesiti doğrultusunda sıcaklık artış hızı düşüktür ve betonun iç kısmı, yangına maruz kalan dış yüzeyi ile aynı sıcaklık değerine ulaşmamaktadır. Beton yüzeyinden birkaç santimetre derinliklerdeki sıcaklıklar beton dayanımını çok fazla etkileyici düzeyde değildir. Bu da yangınlarda beton yapıların mükemmel davranışının diğer bir sebebidir.

Ayrıca, kaplama içerisindeki sıcaklığın ilerlemesi, aynı anda birçok yüzü ısınabilen kiriş ve kolon gibi diğer yapısal öğelerde olduğundan daha azdır. Şekil 15'te, daha önce bahsi geçen EHE-08'e göre, beton parçasının 2cm derinliğinde sıcaklık 300°C ya da 400°C, 4 cm derinliğinde ise 500°C ile 600°C düşük olabilmektedir. Yüzey sıcaklığı 850°C'ye ulaştığında, betonun yalnızca ilk iki santimetresindeki sıcaklıklar 500°C'yi aşmaktadır. Bu bağlamda, EHE-08 Şartnamesi, Şekil 14'teki eğrilerin oldukça emniyetli tarafta olduğunu göstermektedir.

Bu nedenle, birçok vakada yangının yol açtığı tahribat, ince bir yüzey tabakasıyla sınırlıdır.

Beton dayanımının kaybolması dışında yangın sırasında ortaya çıkan diğer bir problem ise, yüzeyin parçalanması ya da tabakaların çatlaması şeklinde oluşan kavlamadır.

Kavlamanın meydana gelmesini açıklamak üzere bir kaç teori geliştirilmiştir [31]:

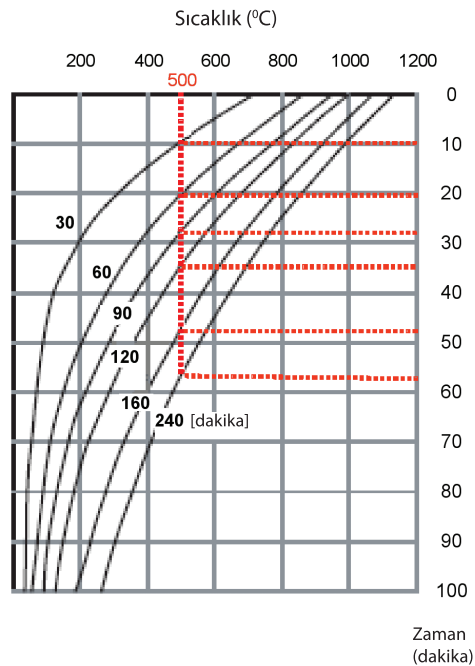
- Sıcaklık yükseldiğinde, suyun buharlaşmasına bağlı olarak boşluk basıncı da artmaktadır. Bunun sonucundaki genleşme, su ve buharın dışarıya hareketinde olduğu gibi, yüksek dayanımlı betonlarda, yapının daha yoğun olması nedeniyle daha çok kısıtlanmaktadır.
- Kısıtlanan ısı genleşmenin etkisiyle ısınan yüzey üzerinde basınç oluşup yüksek basınç gerilmeleri elde edilmektedir.

Birçok vakada kavlamaya yol açan bu mekanizmaların birleşik etkisi, göz ardı edilmemelidir.

Yüksek dayanımlı betonlar, yangına bağlı kavlamaya karşı daha hassastır ve bazı durumlarda patlamayla sonuçlanmaktadır. 160°C' de eriyen, beton içindeki rutubetin dışarı atılması için gereken kanalları sağlayan ve bu yüzden boşluk basıncı ve kavlama riskini azaltan polipropilen liflerinin kullanılmasının yararlı etkileri çok sayıda deneyle ispatlanmıştır. Önerilen diğer bir alternatif ise, çok sayıda mikroskopik hava hücresi yaratmalarından dolayı hava sürükleyici katkı maddelerinin kullanılmasıdır. Bu maddeler, suyun ilerlemesi için küçük hazneler oluşturarak, beton içindeki iç basıncın azalmasını sağlamaktadır. Bu, donmaya maruz kalan betonların, buz haline döndüğünde su hacminin artmasıyla oluşan iç basınçlara karşı direncini artırmak için bilinen yaygın bir uygulamadır.

Kavlamaya etki eden diğer bir faktör, donatılarla beton arasındaki ısı genleşme farkıdır. Bu durum genellikle kaplamalar için önemli bir durum değildir. Çünkü kaplamalar demirsiz betonlardan yapılmakta ya da sürekli donatılı beton yol kaplamalarında donatı orta derinliğe yerleştirilmektedir. Bu sebepten, donatılı beton yol kaplamaları, donatı seviyesindeki sıcaklık değişikliklerini en aza indirecek ve çeliğin genleşmesiyle oluşan iç basınca dayanıklılığı sağlayacak yeterli pas payına sahiptir (kalınlığı genelde 8 ile 13 cm arasındadır). Aynı sebepten, yangının bir sonucu olarak beton yapısında ortaya çıkabilecek bir problemin (beton ve donatı arasındaki bağın kaybolması), donatılı beton yol kaplamalarında görülmesi çok daha düşük ihtimaldir.

Şekil 14: Yangında beton plaka içerisinde meydana gelen sıcaklık değişim eğrileri



Ayrıca kaplamalarda, kavlamaya katkıda bulunacak bir çevre zemin basma ya da çekme etkisi bulunmamaktadır.

Mekanik dayanımın, kavlamaya karşı betonun davranışı üzerindeki etkisi, laboratuvar deneyleri ve gerçek yangınlarda doğrulanmıştır. Karayolu tüneli olmamasına rağmen yapımında yüksek dayanımlı betonun (80MPa) kullanıldığı Manş Tüneli'nde 1996'da meydana gelen yangında, kaplama üzerinde kavlama oluşmuştur. Öte yandan, yıllar önce, büyük ihtimalle daha düşük kaliteli beton kaplama kullanılarak yapılan Mont-Blanc ve St. Gotthard Tünellerindeki kavlamanın şiddeti çok daha az olmuştur.

Diğer gerçek vakalar, beton yol kaplamasının, 28 günde 30MPa'lık basınç dayanımı ile normal dayanımlı beton kavlamasına yeterli derecede dirençli olduğunu göstermektedir.

Konuyla ilgili laboratuvar deneyleri, sonuçları 2006 yılında yayımlanan Feu-Béton (Yangın-Beton) araştırma projesi kapsamında Fransa'da yapılmıştır. ISO 834 standart yangın eğrisine maruz bırakıldığında, basınç dayanımı 60 MPa'ya kadar olan betonlarda, ciddi kavlama görülmemiştir.

Beton kaplamalar için basınç dayanımı, 25 ile 45 MPa arasında, yani 60MPa'nın altında bir değere sahiptir. Bu yüzden, yangın sonucunda oluşan kavlama, beton yol kaplamaları için problem olmamaktadır.

Bu kitabın yazarları tarafından, bitümlü karışımların bağlayıcı içeriğini yakma ile tespit etmekte kullanılan bir fırın ile, beton kaplamaların yangına karşı davranışları üzerine deneyler yapılmıştır. Deney numuneleri 30 x 5 x 5 cm boyutlarındadır. Numuneler deneye tabi tutulmadan önce doymuş duruma gelmeleri için bir kaç hafta



kür odasında bekletilmiştir. 40 dakika boyunca 350°C ve 450°C arasındaki sıcaklıklara maruz kalan numuneler üzerinde kavlama görülmemiştir (Şekil 15). Sadece emilmiş suyun buharlaşması sonucunda, numunede kütle kaybı görülmüştür.

Şekil 15: Kür odasında bekletildikten sonra, fırında 350°C ve 450°C arasındaki sıcaklıklara maruz kalan numuneler

Yapılan deneylerden, beton yol kaplamalarında yangın sonucunda oluşan kavlamanın şiddetinin, tünelin kaplaması ya da tavanı gibi diğer bölümlerde oluşan kavlamalardan çok daha az olduğu sonucu çıkartılabilir.

Yüksek ısı ya da kavlamadan etkilenmeyen beton, pratikte dayanımını koruyarak bir alt katman oluşturmaktadır. Bu yüzden, oluşan hasarlar, geri kalan kısımla ya da ihtiyaç duyulduğunda kaplamanın birkaç santimetresi traşlandıktan sonra ince bir beton tabakasıyla kaplanarak giderilebilmektedir.

7. TÜNELLERDE BETON YOL KAPLAMALARININ DİĞER AVANTAJLARI

Tünellerdeki beton yol kaplamalarının, güvenlik açısından birçok avantajı bulunmaktadır:

- Beton yol kaplamasının aydınlık olması (Şekil 16), yol kullanıcılarına daha iyi görüş imkanı sunmaktadır. Ayrıca daha az ışıklandırma gerektirdiğinden, enerji tüketimini azaltmaktadır.
- Yol üzerinde sürtünmeden dolayı fren mesafesini azaltmaktadır.
- Beton yollar üzerinde çok sık bakım çalışması yapılmadığından, çalışmalar esnasında meydana gelen olası kazalar azalmaktadır.

Ayrıca, beton yol kaplamalarının yakıt tüketimini azaltma üzerindeki olumlu etkisini vurgulamak gerekir. İsveç'te yapılan deneylerde otomobillerde %1 oranında, diğer ülkelerde yapılan birçok deneyde ise kamyonlarda %6,5 oranında yakıt tüketimini azalttığı belirlenmiştir. Bitümlü yol kaplamaları üzerindeki daha fazla yakıt tüketimi, kaplamanın yüksek yuvarlanma direncinden kaynaklanmaktadır [34].

Şekil 16: Juan Carlos Tüneli (İspanya)



8. TÜNELLERDEKİ BETON YOL KAPLAMALARININ YAPIMI



Şekil 17: Silindir finişer

8.1 EKİPMANLAR

Esas olarak, dış mekanlarda beton yol kaplaması inşaatında kullanılan tekniklerin hepsi, tünellerde de kullanılabilir.

Tünellerdeki beton kaplamaların yapımında titreşimli beton masterlarının yanı sıra, en çok kullanılan ekipman;

- Köprü döşemesi ve kanal kaplamalarında kullanılan ve sabit bir şekilde çalışan silindir finişerler, (Şekil 17)
- Kaldırım taşı ve güvenlik bariyeri gibi beton öğelerinin inşaatında kullanılan, aynı zamanda 6m genişliğine kadar kaplama yapabilen çok amaçlı makineler,
- Kayar kalıp finişerlerdir.



Şekil 18: Yarı genişlikte yol kaplaması



Şekil 19: Tam genişlikte yol kaplaması

Kayar kalıp finişerler, maksimum 6 m genişliğine kadar çalışanlar, anayolun genellikle yarısını kaplamada kullanılanlar (Şekil 18), 2,5-3 m'den maksimum 8,5-10 m'ye (Şekil 19) kadar kaplama yapabilenler olarak ayrılmaktadır. 16m'lik genişliğe kadar olan anayol ve havaalanı yol kaplamalarında kullanılan daha büyük makineler de mevcuttur.

Çok amaçlı makineler ve kayar kalıp finişerler, palet zincirleri üzerinde çalışmaktadır. Bu araçlar genellikle yola düzenli aralıklarla çakılan kot kazıklarına çekilen eşit aralıklı iplerle bağlantılı olarak, direksiyon sensörleri ve eğim tarafından yönlendirilmektedir. Bu makineler otomatik 3 boyutlu sistemler tarafından da kontrol edilmektedir.

8.2 TÜNELLERDE BETON KAPLAMALARIN ÖZELLİKLERİ

Temel kısıtlamalar, betonun ve şerit çizgilerinde kullanılan kot kazıkları gibi diğer öğelerin teminini etkileyen düşey gabari ve yan boşluktan kaynaklanmaktadır.

Bazen tüneli araç trafiğine açmak gerekmektedir. Bu durum yolun yarısında kaplama yapmayı ve nadir olarak hızlı beton kaplama sistemlerini kullanmayı gerektirmektedir.

Şekil 20: Yandan yüklemeli / boşaltmalı kamyon



Şekil 21: Ejektör kamyonu



8.2.1 BETON TEMİNİ

Beton temin edebilmede en hızlı sistem, finişerin önüne direkt olarak betonu dökabilen damperli kamyonların kullanımıdır. Bu işlem gerçekleştirilirken, alt temelde aracın hareketini kısıtlayacak herhangi bir durumun bulunmaması gerekmektedir. Genellikle bu durum sürekli donatılı yol kaplamalarında yaşanmaktadır.

Yol üzerindeki mevcut açıklıktan dolayı damperli kamyon kullanımının mümkün olmadığı zamanlarda, kullanılabilecek alternatif çözümler;

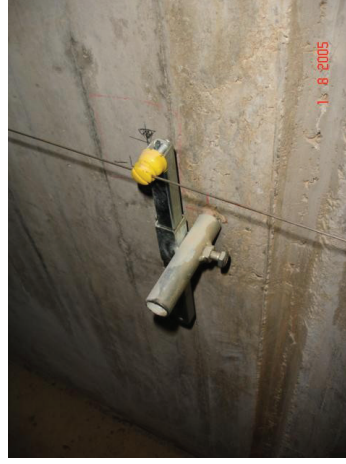
- Beton mikserleri (Çıktısı az olsa da, uzun beton dökme oluklarına ihtiyaç duyulduğunda, 8 m³ kapasiteli aracın boşaltım süresi, 10 dakikayı aşabilmektedir.)
- Yandan boşaltma kepçeleri, (Şekil 20)
- Betonunu finişere boşaltan, bir itici pistonlu kamyonlardır. (Şekil 21)

Damperli kamyonların, boşaltım yaparken kasalarını tamamıyla kaldırmamaları, boşaltım işlemini kolaylaştırmak amacıyla kazıcı yükleyiciler de kullanılabilir.

Betonu finişerin önünde bulunan demir gibi malzemelerin üzerinden geçirmeye olanak sağlayan taşınabilir transfer konveyörleri de diğer sistemlere alternatif olarak kullanılabilir. Ayrıca kaplamanın iki tabakası da aynı anda inşa edilirken, üst tabaka için arka finişere beton temini sağlamak için ön finişer üzerinde taşıyıcı bant kullanılabilir.

Şekil 22: İki tabakalı kaplamalarda, üst tabaka beton temininin sağlanması





Şekil 23: Yol çizgilerinin çizilmesinde kullanılan kot kazıkları

8.2.2 YAN ALAN SINIRLAMALARI

Finişerler, üzerinde hareket ettikleri paletli kamyonlar ve yönlendirici parçaları ayarlamak için yeterli yan alana ihtiyaç duymaktadırlar. Bu parçalar, kayar kalıp finişerler üzerindeki tel ya da elektrik kabloları, silindir finişerler düşünüldüğünde üzerinde flanşlı tekerleğin döndüğü raylar olabilmektedir.

Yol tünellerinde sıklıkla kaldırımlar bulunmaktadır. Bu da yol çizgileri için tel çekmede kullanılan kot kazıklarının yerleştirilmesinde güçlük yaratmaktadır. Bu duruma olası çözüm, kazıkların duvara çakılmasıdır (Şekil 23). Silindir finişerler kullanıldığında, rayların tekerlekleri yönlendirebilmesi için de benzer sistem uygulanabilmektedir.

Tel çekmeye gerek olmadığı durumlarda, 3 boyutlu sistemler diğer bir olasılık olarak karşımıza çıkar. Bu yöntem hem tünel içleri hem de dış mekanlarda kullanılmaktadır.

Nadiren kaldırımlar boruların geçirilebilmesine olanak sağlayacak şekilde boş olur. Eğer paletli araçların borular üzerinden geçmek zorunda kalırsalar, çatlamaları önlemek için tam anlamıyla korunaklı olmaları gerekmektedir.

Şekil 24: Yarı genişlikte sürekli donatılı beton yol kaplaması



8.2.3 SÜREKLİ DONATILI BETON KAPLAMALAR

Sürekli donatılı beton yol kaplamaları, doğru bir şekilde yapıldığında oldukça düşük bakım giderlerinden dolayı, trafiğin çok yoğun olduğu otoyollar üzerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Kaplamanın dayanıklılığı, donatısından kaynaklanan ekstra maliyet artışını telafi etmektedir.

Kamyonlar, donatı üzerinden geçemedikleri için, aşağıda bazı alternatif çözümler verilmiştir:

- Kaplamanın, bağ çubuklarıyla bağlantılı olması gereken yarı genişlikte yapılması, (Şekil 24)

- Mekanik çelik dökümü (tüple beslenme). Bu durumda, uygun sayıda boyuna çubuk donatıları, zemin üzerinde birbirlerine eklenerek finişer üzerine monte edilmiş yatay tüp takımı içerisinde geçirilir. Borular arasında betonun yer aldığı gibi, boyuna çubuk donatılar da yatay ve dikey pozisyonlarda tutulmaktadır. (Şekil 25) Yeterli boşluğu ve beton dökme kamyonların zemin üzerinde hareket edebilmelerini sağlamak için beton demirleri finişerin ya ortasında ya da kenar kısımlarında toplanır. Beton bir ya da iki şarj silosu ile besleme ekipmanına boşaltılır ve buradan bir ya da iki taşıma bandına aktarılmaktadır. Beton daha sonra kayar kalıp finişerin önüne boşaltılır. Konveyörlerin uzunluğu ve yüksekliği, beton demirlerinin ilk konumlarından borulara aktarıldığı yer olan geçiş alanından geçebilmeleri için seçilmektedir.

Şekil 25: Sürekli donatılı beton yol kaplamasında, mekanik çelik döşemesi



8.3 TÜNEL KAPLAMALARINDA BETON

Prensip olarak tünel kaplamalarında kullanılan betonun gereklilikleri, dış mekanlarda kaplama için kullanılan beton kaplamalarından farklı değildir. Fakat betonun yangında davranışını optimize edebilmek için bazı önlemler almak faydalı olacaktır:

- Genleşme katsayısı silislilerden daha düşük olan kireç agregalarının kullanımı. Dayanıklı kaymaz özellikler elde edebilmek için araç tekerlekleriyle temas halinde olan agregaların, yeterli aşınma direncine sahip olması gerekmektedir. Zemin yapısı taze betonun fırçalanarak yada pürüzlendirilerek elde edilmesi, %35'ten az olmamak koşulu ile silisli parçacık içeren kum kullanılarak sağlanabilmektedir. Eğer kaplama görünür agregalı yüzeye sahip ise, kireç agregaları alt tabakada kalmıştır. Üst tabakadaki iri taneli agregaların yüzey parlaklık değeri ise (ya da kaplama bir katmanda yapılıyor ise tüm tabakanın içinde) 0,50'nin üzerinde olması gerekmektedir.
- Yangında artan sıcaklıktan kaynaklanan iç basıncı azaltan genleşme hazneleri olarak hareket eden gözenekler yaratan hava sürükleyicilerin kullanımı.

Hava sürükleyicileri betonun işlenebilirliği açısından da katkı sağlamaktadır. Tünel kaplaması için yapılan betonun karışım hesabı, kazı malzemesinin kırılmasından elde edilen ince agrega kullanılıyorsa, yol kaplamaları için uygun olmayabilir. Çünkü bu tür kumlar, betonun kaplama masterlarına ya da diğer aletlere yapışmasına neden olan aşırı miktarda ince tanecikler içermektedir. Bu durum yüzeyin düzgünlüğü açısından sorun yaratabilmektedir.

- Kaplamanın kısa bir süre içerisinde kullanıma açılması ya da üzerinden yapı ekipmanlarının geçmesi gereken durumlarda, betonun, birkaç gün ya da birkaç saatte gerekli dayanıma ulaşan hızlandırılmış sertleşme süreciyle kullanımı mümkün olmaktadır.

8.4 DÜZGÜN YÜZEY ELDE EDEBİLMEK İÇİN GEREKLİ KOŞULLAR

Beton kaplamalarda iyi bir yüzey elde edebilmek için gereken şartlar, öncelikle uygun bir karışım tasarımına, daha sonra üretim ve yerleştirilmesi proseslerindeki tutarlılık ve dikkate bağlıdır. Diğer önemli etkenler:

- Kıvamında değişiklik olmayan homojen beton,
- İyi durumda olan finişerler,
- Beklenileni karşılayacak kalitede beton üretimi,
- Fabrika çıkışından kullanılacağı alana kadar betonun uygun bir şekilde nakledilmesi,
- Kesintilerden sakınarak, döküleceği yüksekliğe bağlı olarak, sürekli temininin sağlanması.
- Finişerin doğru bir şekilde yönlendirilmesi,
- Finişerin geçmesi için sabit yolların sağlanması,
- Finişerin düzenli ilerlemesi,
- Finişerin ardından elle bitirme işlemlerinden sakınılmasıdır.

9. ÖZET VE SONUÇLAR

Önceki bölümlerde iki yol kaplama malzemesi olan bitümlü karışımlarla betonun yangın karışındaki davranışları, tünel yangınlarındaki güvenliklerinin karşılaştırılması açısından, analiz edilmiştir.

Beton, yanmayan, duman ve toksik gazsalınımına yol açmayan ve yangın şiddetini artırmayan bir malzemedir. Yangın sonucunda önemli dayanım kayıplarının meydana gelebileceği kalınlık bir kaç santimetreyi geçmez. Çok yüksek dayanımlı betonların kullanıldığı durumlar dışında, yüzeydeki kavlama kaplama betonları açısından önemli bir sorun değildir.

Öte yandan, bitümlü karışımlar, içerdikleri petrol rafinasyon yan ürünü nedeniyle son derece yanıcı olup aşağıda belirtilen ciddi bazı sorunlara yol açar. Bu sorunlar ve gerek gerçek yangınlardan gerekse laboratuvar testlerinden elde edilen çözüm yolları belirtilmiştir:

Bitümlü karışımlar yanar mı?

Evet. Karışımın sıcaklığı bitümün yanma sıcaklığına (400-500°C) erişmesiyle yanmaya başlar. Karışımın bu özelliği kullanılarak bitümlü karışımlardaki bağlayıcı miktarının belirlenmesi amacıyla geliştirilmiş deney yöntemleri bulunmaktadır.

Bitümlü karışımların yanmasına yol açan sıcaklıklara tünel yangınlarında erişilir mi?

Hem tünelde hem de yol kaplamasında daha yüksek sıcaklıklara erişilir. Bir yol tüneli gibi kapalı alanlarda sıcak duman tabakasından ve tunel duvarlarından yayılan ısı akısı yol kaplamasının tutuşması olasılığını artırır ve yangının bir açık yoldakine göre daha kolay yayılmasına yol açar.

Bitümlü karışımın yanmasının etkileri nelerdir?

Bitümün yüksek kalorifik değeri yangın şiddetinin artmasına neden olur. Öte yandan, yanma başladıktan kısa bir süre sonra yayılan duman ve toksik gazlar insanların boğulmalarına yol açabilir. Bitümlü karışımlar yüksek sıcaklık etkisiyle kohezif özelliğini kaybederek bağlanmamış agrega taneleri şeklini alarak bozulur.

Bitümlü karışımların yanması yalnızca kaplamaların yüzeyini mi etkiler?

Yanma için gerekli sıcaklığın erişildiği derinlik bir kaç santimetredir. Mont Blanc tüneli yangınında bazı yerlerde bitümlü karışımın yanmış olan derinliği 10 cm'yi bulmuştur. Etkilenen derinlik ne kadar fazlaysa, yangının şiddeti ve zehirli gazlar ve dumanın etkisi de o kadar fazla olmaktadır.

Bitümlü karışımın yanması yanan aracın hemen altındaki kısım mı sınırlıdır?

Havalandırma ve tünel tavanı ve duvarlarından ısı yansımaları gibi nedenlerden dolayı yangının odağından daha uzak mesafelerde de sıcaklığın tutuşma için gerekli yüksekliğe ulaşması mümkündür. Bu nedenle etkilenen alan yanan araçtan çok daha büyük olabilir. Mont Blanc tüneli yangınında 32 otomobil ve 2 kamyon tahrip olmuştur. Bunların toplam uzunluğu 250 m'den az olmasına karşın kaplamanın 1200 m'lik kısmı zarar görmüştür. İlave her 50 m²'lik bir alanın yanması iki ila üç otomobilin yanmasının neden olduğu kadar bir ısı açığa çıkarır.

Bitümlü kaplamalar yangının odak bölgesinden uzaktaki diğer araçlara sıçramasına yol açar mı?

Mont Blanc tüneli yangınında yaklaşık 300 m uzakta park etmiş olan sekiz araç da yangından zarar görmüştür. Bu bölgedeki galerinin tavanında bir bozulma görülmemiş olması, bu araçların bitümlü karışımın yüksek sıcaklıkla alevleri yaymış olmasından etkilendikleri ihtimalini artırmaktadır.

Yangın esnasında açığa çıkan ısıdan dolayı bitümlü karışımlarda başka hangi etkiler görülür?

Karışım tutuşmasa dahi sıcaklık artışı bitümlü karışımların yumuşamasına yol açarak, kurtarma ve/ya da itfaiye ekiplerinin ulaşımını güçleştirir. Fréjus tüneli yangınından sonra itfaiyeciler bitümlü kaplamanın ayaklarının altında eridiğini rapor etmişlerdir.

Tünellerde bitümlü karışımların kullanılmasına gerekçe olarak yangında ince bir yüzey tabakasının alev aldığı ve sonrasında oluşan kabuğun yangının daha derinleri etkilemesini önlediği gösterilir. Oysa gerçekte durum bu değildir. Gerçekte bir kaç santimetrelik bir derinlik tutuşmakta ve yanma sonundaki kalıntılar hiç bir kohezyonu olmayan bir tabaka oluşturmaktadır.

Özet olarak, tünellerde bir yangın durumunda beton kaplamalar bitümlü karışımlara göre çok daha yüksek bir güvenliğe sahiptir.

Bitümlü karışımların kolay yanabilirliği nedeniyle Avusturya 2001 yılında 1 km'den daha uzun tünellerde bitümlü kaplama kullanılmasını yasaklamıştır.

İspanya'da 26 Mayıs 2006 tarihli ve 635 numaralı Kraliyet Kararnamesinde 1000 m'den uzun karayolu tünellerinde, geçerliliği tam olarak kanıtlanmadığı sürece, beton kaplama dışında bir kaplama kullanılamayacağı belirtilmiştir. Diğer seçenekler ancak eşdeğer veya daha yüksek bir koruma sağlayabildikleri kanıtlandığı takdirde kullanılabilir. Daha önceki değerlendirmelerin sonucunda beton kaplamanın yerine bitümlü karışımların kullanılması bu gereği yerine getirmemektedir.

Benzer şekilde, Fransız İtfaiyeciler Federasyonu'na göre " basit mantık dahi bitümlü karışımlar yerine beton gibi tamamiyle nötr malzemelerin kullanılmasını öngörmelidir" [35].

Sayıları beş milyonu aşan dünya itfaiyecilerinin temsilcisi olan Yangında Korunma ve Söndürme Uluslararası Teknik Komitesi (CTIF) "yol kaplamalarının yanmaz, toksik gaz ve duman çıkarmayan ve görüşü iyileştiren açık renkte olması gerekir. Bu nedenle yanıcı olan ve toksik gazlar çıkaran geleneksel bitümlü kaplamalar yerine beton tercih edilmelidir" önerisinde bulunmaktadır.

- [1] "Improving fire safety in tunnels: The concrete pavement solution". BIBM – Cembureau - ERMCO, Brussels, April 2004
- [2] "Incendie dans le tunnel de Fréjus : 2 morts". Downloadable from <http://lci.tf1.fr/france/2005-06/incendie-dans-tunnel-frejus-morts-4859236.html>
- [3] Romana Ruiz, M. : "Incendios en túneles". Curso teórico-práctico sobre incendios en túneles. San Pedro de Anes (Asturias), 6, 7 and 8 May 2009. Organized by Servicios Técnicos de Mecánica de Rocas S. L. (STMR), Madrid
- [4] "Mission administrative d'enquête technique sur l'incendie survenu le 24 mars 1999 au tunnel routier du Mont Blanc. Rapport d'étape du 13 Avril 1999". Ministère de l'Intérieur and Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, Paris, 1999
- [5] "Tunnel stays shut after blaze". The Guardian, London, 6 June 2005. Downloadable from <http://www.guardian.co.uk/world/2005/jun/06/france.italy/print>
- [6] Secretariat du Grand Conseil de la République et canton de Genève: "Rapport M 1375-A de la Commission des affaires communales, régionales et internationales chargée d'étudier la proposition de motion pour un tunnel du Mont-Blanc moins dangereux et moins polluant". Geneva, 18 September 2001. Downloadable from www.ge.ch/grandconseil/data/texte/M01375A.pdf
- [7] Calavera, J. et al: "El incendio del Edificio Windsor de Madrid. Investigación del comportamiento al fuego y de la capacidad resistente residual de la estructura tras el incendio". Nota de Información Técnica NIT-2 (05), Intemac, Madrid, 2005
- [8] "Fire Curves". Promat Tunnel, Tisselt (Belgium). Downloadable from <http://www.promat-tunnel.com/en/hydrocarbon-hcm-hc-rabt-rws.aspx>
- [9] Fuentes Cantillana, J. L.: "Tipos de ventilación en túneles. Comportamiento del humo". Curso teórico-práctico sobre incendios en túneles. San Pedro de Anes (Asturias), 6, 7 and 8 May 2009. Organized by Servicios Técnicos de Mecánica de Rocas S. L. (STMR), Madrid
- [10] RVS 9.234 "Tunnel / Bauliche Gestaltung / Innenausbau". Forschungsgemeinschaft Strasse und Verkehr (FSV), Vienna, 2001
- [11] European Parliament and Council of the European Union: "Directive 2004/54/CE on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network". Official Journal of the European Union, 30 April 2004
- [12] Ministerio de Fomento: "Real Decreto 635/2006 de 26 de mayo sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado". Boletín Oficial del Estado, Madrid, 27 May 2006
- [13] "Rapid Test Methods for Field Control of Highway Construction". NCHRP Report 103, Highway Research Board, Washington D.C., 1970
- [14] "Asphalt Content Test Offers Improvement Over Solvents". TR News n° 180, September – October 1995
- [15] "ASTM D6307 - 05 Standard Test Method for Asphalt Content of Hot-Mix Asphalt by Ignition Method". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2005
- [16] "EN 12697-39 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Binder content by ignition". CEN, Brussels, 2004
- [17] Noumowé, A.: "Characterisation of Asphalt Exposed to High Temperature: Application to Fire Case of Asphalt Pavement". Université de Cergy-Pontoise, Paris, 2002
- [18] Noumowé, A.: "Analysis of the Gases Emitted During the Combustion of the Asphalt: Application to Fire Case of Asphalt Pavement". Université de Cergy-Pontoise, Paris, 2002
- [19] Roder, C. and Decker, W.: "Verhalten von Asphalt-und Betonbelägen bei Tunnelbauwerken

insbesondere im Brandfall". Projekt 02 231 / B3, Bundesanstalt für Strassenwesen (BASt), Bergisch Gladbach, Germany, October 2003

[20] Demouge, F. et al : "Comportement au feu des enrobés bitumineux. Volet expérimental – Partie n° I". Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB), Paris, October – November 2005

[21] Demouge, F.: "Comportement au feu des chaussées bitume en cas d'incendie en tunnel routier. Rapport d'étude bibliographique" Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB), Paris, September 2004

[22] Avenel, R. et al : "Comportement au feu des enrobés bitumineux. Volet expérimental – Partie n° II". Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB), Paris, November - December 2005

[23] Colwell, S. et al: "Test Methodologies for Reaction to Fire of Pavement Materials". Document SAM-04-D20, SAMARIS (Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure) Research Project, 2005. Downloadable from www.fehrl.org/?m=32&mode=download&id_file=802

[24] "EN 13501-1:2007+A1:2009 Fire classification of construction products and building elements. Classification using test data from reaction to fire tests". CEN, Brussels, 2007 and 2009

[25] "EN ISO 9239-1 Reaction to fire tests. Horizontal surface spread of flame on floor-covering systems. Determination of the burning behaviour using a radiant heat source". CEN, Brussels, 2002

[26] "ISO 5660-1:2002 Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate -- Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) ". ISO, Geneva, 2002

[27] Carvel, R.O. and Torero, J.L.: "The contribution of asphalt road surfaces to fire risk in tunnel fires: preliminary findings". Proceedings Int. Conf. Risk and Fire Engineering for Tunnels, Stations and Linked Underground Spaces, 19-20 April 2006, Hong Kong. Organized by Tunnel Management International, Tenbury Wells, Worcs., United Kingdom. Downloadable from <http://www.era.lib.ed.ac.uk/bitstream/1842/895/1/Carvel%20Torero%20Hong%20Kong%202006b.pdf>

[28] Romana Ruiz, M.: "El comportamiento del hormigón de los túneles frente al fuego". IV Simposio de Túneles, Andorra, 26 to 28 October 2005. Organized by Asociación Técnica de Carreteras, Madrid

[29] Khoury, G.A.: "Passive fire protection in tunnels". Concrete, February 2003

[30] "Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. Anejo 6: Recomendaciones para la protección adicional contra el fuego de elementos estructurales". Ministerio de Fomento, Madrid, 2008

[31] Colina, H. et al : "La durabilité des bétons face aux incendies". In "La durabilité des bétons", Presses de l'E.N.P. et Ch., Paris, 2008

[32] Taylor, G.W., Farrel, P. and Woodside A.: "Effects of pavement structure on vehicle fuel consumption. Phase III". Technical Report CSTT-HVC-TR-068, Centre for Surface Transportation Technology , Ottawa (Canada), 2006

[33] Hultqvist, B.-Å.: "Measurements of fuel consumption on an asphalt pavement and a concrete pavement in Sweden". Proceedings, 11th International Symposium on Concrete Roads, Seville (Spain), 13 to 15 October 2010

[34] Yoshimoto, T., Kazato, T. and Hayakawa, I.: "Effect of pavement type on rolling resistance and fuel consumption of heavy-duty vehicles". Proceedings, 11th International Symposium on Concrete Roads, Seville (Spain), 13 to 15 October 2010

[35] "Les feux de tunnel". Soldats du Feu, Paris, 8 December 2009

Published by:

EUPAVE
European Concrete
Paving Association
Vorstlaan 68 boulevard du Souverain
1170 brussels
T + 32 2 790 42 06
F + 32 2 640 06 70
info@eupave.eu
www.eupave.eu

Authors:

Carlos Jofré, Joaquín Romero,
Rafael Rueda
Translated from « Pavimentos de hormigón en túneles. Su influencia en la seguridad frente al fuego »,
edited by IECA (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones)

January 2012



Tepe Prime A Blok Kat:18-19
Eskişehir Devlet Yolu
(Dumlupınar Bulvarı) 9. km
No:266 06800 Ankara / Turkey
T: 444 50 57 • F: (312) 265 09 06-05
www.tcma.org.tr• info@tcma.org.tr

Bu kitap EUPAVE Üyesi Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB)
tarafından Türkçeye çevrilerek bastırılmıştır.

