

Bitümlü sıcak karışımlarda tekerlek izi oluşumunu etkileyen faktörler ve azaltmaya yönelik öneriler

Sabit KUTLUHAN*, Emine AĞAR

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

Özet

Tekerlek izi oluşumu (oluklanma), esnek yol üstyapılarında görülen önemli bozulma türlerinden biridir. Taşıt tekerleklerinin yola değdiği bölümlerde, yol boyunca oluşan düşey kalıcı deformasyonlar olarak tanımlanır. Tekerlek izi oluşumu yolun enine düzgünlüğünün bozulmasına neden olur. Enine düzgünlüğü kabul edilebilir bir sınırın üzerinde bozulan bir yol, konfor ve güvenlik yönünden büyük sorunlar ortaya çıkarır. Ağır taşıt sayılarındaki artış, bunların taşıma sistemlerinin değişmesi, dingil ağırlıklarının ve lastik iç basınçlarının artması gibi değişmelere bağlı nedenlerle, yollar-daki bozulmalar hızla artmıştır. Yollarda görülen bozulma türleri; kalıcı deformasyonlar (tekerlek izi, çökme, kabarma, yığılma, ondülasyon), çatlamlar (yorulma ve termal) ve ayrılmalar (sökülme, soyulma)'dır. Bu bozulmalar arasında tekerlek izi oluşumu, son yıllarda dikkate alınması gereken en önemli sorun haline gelmiştir. Tekerlek izi oluşumuna neden olan başlıca faktörler, yukarıdaki gelişmelere ek olarak, ticari taşıtların yasal sınırın üzerinde yüklenmesi, bunların düşük hızla hareket etmesi, uzun süreli veya durağan yükler, aşırı yük tekrarı, trafik yüklerine ve iklim koşullarına uygun olmayan malzeme kullanımı, tasarım ve yapım hataları olarak sıralanabilir. Bu çalışmada, bitümlü sıcak karışımlardaki tekerlek izi oluşumunda etkili faktörler, dış faktörler ve iç faktörler olmak üzere iki grupta incelenmiştir. Dış faktörler; araç faktörleri, iklim koşulları ve yol geometrik parametreleridir. İç faktörler ise; agrega, bitümlü bağlayıcı, bitümlü sıcak karışım bileşimi ile tasarım ve yapım hatalarıdır. Çalışmanın sonunda tekerlek izi oluşumunu azaltmaya yönelik öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Tekerlek izi, kalıcı deformasyon, bitümlü sıcak karışım.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Sabit KUTLUHAN. skutluhan@ins.itu.edu.tr; Tel: (212) 285 70 27.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ulaştırma Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Bitümlü sıcak karışımlarda tekerlek izi oluşumunun modellenmesi " adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 14.07.2008 tarihinde dergiye ulaşmış, 23.09.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Factors effecting rutting in bituminous hot mixtures and suggestions to reduce rutting

Extended abstract

Rutting is one of the important distress types that occur in flexible pavements. It is described as vertical permanent deformation in contact area between wheel and road surface along the way, longitudinally. Rutting causes transversely unevenness in road surface. A road of which transversely unevenness is over an acceptable limit reveals many problems in point of comfort and safety. The passengers in a vehicle may be disturbed and control of vehicle gets difficult during changing line, water accumulates in wheel path in rainy days, water accumulated causes icing in cold weather and aquaplaning, consequently, braking distance gets longer. In this study, rutting mechanism, rutting types and effectual factors have been explained in detail. *Densification (decrease in volume, compaction) and shear deformation play important roles in rutting mechanism of bituminous hot mixtures. Rutting mechanism consist of two stage. In the first stage, permanent deformation below the tires is greater than the one at the edge of wheel path. In this stage, compaction effect (densification) of traffic is more effectual than shear deformation. And then, decreasing volume below the tires gets approximately equal to increasing volume at the edge of wheel path. This case that is the initial of second stage indicates to complete the compaction of pavement under traffic. And so, the reason of further rutting is shear deformation without volume change. It is difficult to determine that how much part of rutting is resulting from densification or shear deformation. However, shear deformation plays more important role in the part near the surface than the lower part of pavement. In addition, many scientific researches have indicated that shear deformation is more influential parameter than compaction in deformation behavior in the greater part of life of pavement. There are four types of rutting formation based on different reasons. These are structural rutting, flow (instability) rutting, wear rutting and consolidation (compaction) rutting. Structural rutting is resulted from deformations in one or more layer beneath the bituminous pavement layer. Because of this type of rutting formation is that stresses occurred in pavement layers exceed the materials resistance. The material rising is not appeared at the edge of the wheel path in this type of the rutting formation. Flow rutting is resulted from*

deformations in the bituminous pavement layer or layers. Because of this type of rutting formation is that stresses occurred in bituminous pavement layer(s) due to loading exceed the bituminous materials resistance. The material rising is appeared at the edge of the wheel path in this type of the rutting formation. Shear deformation plays an important role rather than densification (compaction) in this type of rutting. Wear rutting, that is named surface rutting type, is resulted from wearing the aggregates on the surface of pavement by the using of studded tires in winter. This type of rutting formation appears especially in the north Europe countries using studded tires. The parameter to be considered in wear rutting formation is aggregate toughness. Fourth type of rutting formation is consolidation (compaction) rutting, that is named surface rutting type too. Consolidation rutting has a same cross – section with that of wear rutting. This type of rutting formation occurs because of laying the bituminous mixture in cold weather and (or) insufficient compaction of pavement. Factors effecting rutting formation in bituminous hot mixtures are into two groups named external factors and internal factors. External factors consist of vehicle factors (axle load, tires inflation pressure, loading time etc.), climatic conditions (temperature, raining, freezing and thawing etc.) and geometrical standards of road (gradient, curb radius etc.). Internal factors consist of aggregate (shape, roughness, size etc.), bituminous binder (penetration, softening point, etc), bituminous hot mixtures composition (air void, bitumen content, void in mineral aggregate, void filled with asphalt, etc.), and design and construction wrong (inappropriate pavement thickness, insufficient compaction, laying pavement in cold weather etc.) An agregate gradation of which nominal maximum agregate size and coarse agregate percent are high should be preferred for resistance to rutting in bituminous hot mixtures. For example, stone mastic asphalt (SMA) mixture of which nominal maximum agregate size is bigger than 12.7 mm, coarse agregate percent is high and binder is modified bitumen provides high performance for rutting resistance. In addition to this, SMA mixtures can be used in two-layer system that is preferred in France. In this system, while the upper thin layer provides durability, impermeability and skid resistance, the lower thick layer provides resistance to rutting and fatigue cracking. SMA mixture should be the lower layer of this system

Keywords: Rutting, permanent deformation, bituminous hot mixture.

Giriş

Tekerlek izi oluşumu (oluklanma), esnek yol üstyapılarında görülen önemli bozulma türlerinden biridir. Taşıt tekerleklerinin yola değdiği bölümlerde, yol boyunca oluşan düşey kalıcı deformasyonlar olarak tanımlanır.

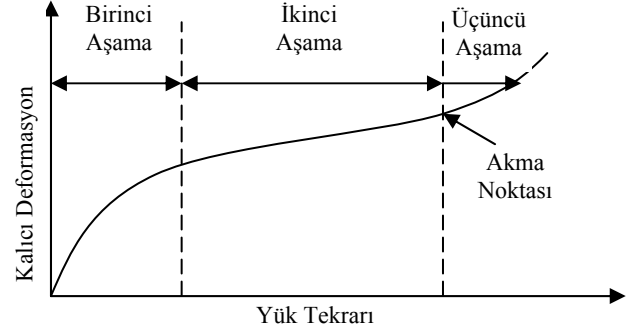
Ağır taşıt sayılarındaki artış, bunların taşıma sistemlerinin değişmesi, dingil ağırlıklarının ve lastik iç basınçlarının artması gibi değişmelere bağlı nedenlerle, yollardaki bozulmalar hızla artmıştır. Yollarda görülen bozulma türleri; kalıcı deformasyonlar (tekerlek izi, çökme, kabarma, yığılma, ondülasyon), çatlamlar (yorulma ve termal) ve ayrılmalar (sökülme, soyulma)'dır. Bu bozulmalar arasında tekerlek izi oluşumu, son yıllarda dikkate alınması gereken en önemli sorun haline gelmiştir.

Tekerlek izi oluşumuna neden olan başlıca faktörler, yukarıdaki gelişmelere ek olarak, ticari taşıtların yasal sınırın üzerinde yüklenmesi, bunların düşük hızla hareket etmesi, uzun süreli veya durağan yükler, aşırı yük tekrarı, trafik yüklerine ve iklim koşullarına uygun olmayan malzeme kullanımı, tasarım ve yapım hataları olarak sıralanabilir.

Tekerlek izi oluşumu yolun enine düzgünlüğünün bozulmasına neden olur. Enine düzgünlüğü kabul edilebilir bir sınırın üzerinde bozulan bir yol, konfor ve güvenlik yönünden büyük sorunlar ortaya çıkarır. Bu sorunlar; şerit değiştirme sırasında araç içindeki kişilerin rahatsız olması ve araç kontrolünün zorlaşması, yağışlı havalarda tekerlek izi oluşmuş kısımlarda su birikmesi, biriken suyun buzlanmaya veya tekerleğin su filmi üzerinde kaymasına neden olması ve dolayısıyla fren mesafesinin uzaması şeklinde sıralanabilir.

Tekerlek izi oluşumuyla ilgili olarak, dünyada birçok bilimsel çalışma yapılmış, performans ölçütleri belirlenmiş ve çeşitli tahmin modelleri geliştirilmiştir.

Bitümlü kaplama malzemelerinin yükleme ve çevre koşulları altındaki kalıcı deformasyon davranışlarında üç farklı aşama bulunmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Kaplama malzemelerinin tipik tekrarlı yüklemeli kalıcı deformasyon davranışı (Witczack ve El-Basyouny, 2004)

Birinci aşamada, hacimsel değişimden kaynaklanan yüksek bir başlangıç deformasyonu görülür. Yük tekrar sayısı arttığında, kalıcı deformasyon da artar. Ancak bu artış, her bir yük tekrarında oluşan plastik deformasyonun azalması nedeniyle azalan bir artıştır. İkinci aşamada, yine hacimsel değişimden kaynaklanan sabit bir artış görülür. Bununla birlikte kayma deformasyonları da artar. Üçüncü aşamada ise, hacimsel değişimden kaynaklı olarak, yalnızca plastik kayma deformasyonları nedeniyle yüksek oranlı kalıcı deformasyon oluşur (Witczack ve El-Basyouny, 2004). Aşamaları sınırlayan yük tekrar sayıları bitümlü karışımların tipine göre değişir.

Asfalt betonu kaplamalardaki tekerlek izi derinliği, yük tekrar sayısı ile artar. Genellikle araç tekerleklerinin yola değdiği bölümlerde boyuna yönde çökmeler, kenarlarda ise küçük miktarlarda yükselmeler şeklinde görülür. Tekerlek izi oluşumunda yoğunlaşma (sıkışma, hacimde azalma) ve kayma deformasyonunun önemli rolleri vardır. AASHO deney yolunda gerçekleştirilen hendek çalışmaları ile Hofstra ve Klomp tarafından 1972'de yapılan çalışmalar, tekerlek izi oluşumunda kayma deformasyonunun yoğunlaşmadan daha etkili olduğunu göstermiştir (Sousa vd., 1991).

Eisenmann ve Hilmer 1987'de tekerlek izi oluşumunun ana nedeninin, hacim değişimi olmaksızın kayma deformasyonları olduğunu belirlemişlerdir. Yaptıkları çalışmada yük tekrar sayısı-

nın tekerlek izi oluşumu üzerindeki etkisini incelemişlerdir (Sousa vd., 1991).

Eisenmann ve Hilmer tekerlek izi oluşumunun iki aşamada gerçekleştiği sonucuna varmışlardır. Birinci aşamada, tekerlek altındaki kısımda oluşan kalıcı deformasyon, kenarlardaki yükselmelerden oldukça büyüktür. Bu aşamada trafiğin sıkıştırması tekerlek izi oluşumunda daha etkilidir. İkinci aşamada, tekerlek altında azalan hacim miktarı ile kenarlarda artan hacim miktarı yaklaşık olarak eşittir. Bu durum, kaplamanın trafik altında sıkışmasını tamamladığını ve artan tekerlek izi derinliğinin, kayma deformasyonundan kaynaklandığını göstermektedir (Sousa vd., 1991).

Tekerlek izinin ne kadarının sıkışmadan, ne kadarının kayma deformasyonundan kaynaklandığını belirlemek zordur. Bununla birlikte yüzeye yakın kısımlarda kayma deformasyonu daha önemli bir rol oynar. Kaplama yüzeyinden aşağıya inildikçe, kayma deformasyonu sıkışmaya göre önemini kaybeder (Archilla ve Madanat, 2001a).

Tekerlek izi oluşum şekilleri

Farklı nedenlere bağlı olarak dört çeşit tekerlek izi oluşum şekli vardır. Bunlar;

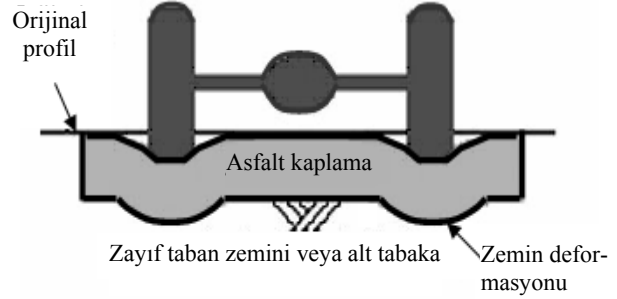
- 1) Yapısal tekerlek izi,
- 2) Akma tekerlek izi,
- 3) Aşınma tekerlek izi,
- 4) Oturma (konsolidasyon – sıkışma) tekerlek izi

Yapısal tekerlek izi

Bitümlü tabakanın altındaki (taban zemini dahil) bir veya daha fazla tabakanın kendi içlerindeki deformasyonlarının sonucudur. Bunun nedeni, yükten dolayı oluşan gerilmelerin malzeme dayanımını aşmasıdır. Bu durumda, tekerlek izinin etrafında kabarmalar oluşmaz (Şekil 2) (Verstraeten, 1995).

Bu tip tekerlek izi oluşumu genellikle gerçekteki trafik koşullarına uygun tasarlanmamış üst-yapılarda görülür. Aynı zamanda uygun olmayan (düşük kaliteli) malzemenin kullanılmasın-

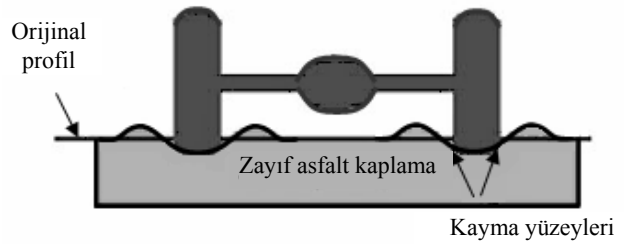
dan, malzemenin iyi sıkıştırılmamasından, kötü drenajdan, donma ve çözülme etkilerine karşı önlem alınmamasından da kaynaklanabilir (Verstraeten, 1995).



Şekil 2. Yapısal tekerlek izi

Akma tekerlek izi

Bitümlü tabaka veya tabakaların kendi içlerindeki deformasyonların sonucudur. Bunun nedeni, yükten dolayı oluşan gerilmelerin bitümlü malzemenin dayanımını aşmasıdır. Tekerlek izi etrafında kabarmalar oluşur. Akma tekerlek izi, en çok, çıkış eğimli kesimlerde, kavşak yaklaşımlarında ve kurbalarda, yani ağır taşıtların hızlarını azalttığı kesimlerde ve lastik ile kaplama arasındaki değme alanında ortaya çıkan teğetsel gerilmelerin yüksek olduğu kesimlerde oluşur (Şekil 3) (Verstraeten, 1995).



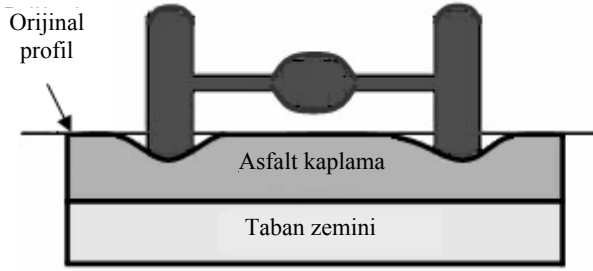
Şekil 3. Akma tekerlek izi

Bu tip tekerlek izi oluşumunda etkili faktörler, bitümlü karışımdaki bileşenlerin özellikleri ve karışım oranlarıdır (Verstraeten, 1995).

Aşınma tekerlek izi

Yüzeysel tekerlek izi tiplerinden olan aşınma tekerlek izi, kışın çivili tekerleklerin kullanılmasından dolayı, yüzeydeki agregaların aşınması nedeniyle oluşur (Şekil 4). Özellikle çivili tekerleklerin kullanıldığı kuzey Avrupa ülkelerinde

görülmektedir. Bu tip tekerlek izinde göz önüne alınacak parametre agrega sertliğidir (Verstraeten, 1995).



Şekil 4. Aşınma ve oturma tekerlek izi

Aşınma tekerlek izinin görülmesi nedeniyle, diğer Avrupa ülkelerine göre, kuzey ülkelerinde daha iri tane boyutlu agrega gradasyonları kullanılmaktadır. Örneğin, İsveç ve Finlandiya'da TMA 16 ve 20 kullanılmaktadır (Bowskill vd., 1999).

Oturma (konsolidasyon – sıkışma) tekerlek izi

Dördüncü tip, oturma nedeniyle oluşan tekerlek izidir. Bu da yüzeysel tekerlek izi sınıfına girer. Aşınma tekerlek iziyle aynı şekle sahiptir (Şekil 4). Kaplama yapımı sırasındaki sıkıştırmanın yetersizliği nedeniyle oluşur. Yetersiz sıkıştırılmış bir karışım, özellikle sıcak havalarda, duran veya yavaş hareket eden trafiğin mevcut olduğu kavşaklarda, trafik etkisiyle oturmaya meyillidir. Bu tip tekerlek izinde kenarlarda kabarma oluşmaz (Verstraeten, 1995).

Tekerlek izi oluşumunda etkili faktörler

Monismith (1976) tekerlek izi oluşumunun nedenlerini, trafiğe bağlı nedenler ve trafiğe bağlı olmayan diğer nedenler olarak ikiye ayırmıştır. Trafiğe bağlı nedenler; tekil veya oldukça aşırı yükler, uzun süreli veya statik yükler ve aşırı yük tekrarıdır. Diğer nedenler ise; taban zeminin genişmesi, kaplama yapısındaki sıkışabilir malzeme ve alt tabakalarda donmaya hassas malzeme olarak belirtmiştir.

Krugler ve diğerleri 1985'te tekerlek izinin nedenlerini üçe ayırmışlardır. Bunlar; aşırı trafik-

ten dolayı kaplamanın üst kısmında oturma, yeterli olmayan karışım stabilitesinden dolayı plastik deformasyon ve yüzeyde asfaltın soyulmasıdır. New Mexico (Hanson, 1984), Florida (Page, 1984) ve Wyoming (Materials Lab., 1982)'de belirlenen faktörler ise; düşük sıcaklıkta işletilen karışım plantleri, karışımında aşırı nem, yüksek oranda ince (kum boyutlu) tanecikler, sıcaklığa duyarlı bağlayıcı kullanımı, yuvarlak agregalar veya kırılmamış taneler, yüksek bağlayıcı oranı ve düşük birim hacim ağırlığa yol açan soğuk havada dökümdür (Button vd., 1990).

Sousa ve diğerleri (1991)'nin raporunda, asfalt betonu karışımlarda tekerlek izi oluşumunu etkileyen faktörler Tablo 1'de özet olarak verilmiştir. Tabloda, faktörlerdeki değişimin tekerlek izi dayanımına etkisi görülmektedir.

Bitümlü sıcak karışımlardaki tekerlek izi oluşumunda etkili faktörler, dış faktörler ve iç faktörler olmak üzere iki gruba ayrılmıştır.

Dış faktörler:

- Araç faktörleri
- İklim koşulları
- Yol geometrik parametreleri

İç Faktörler:

- Agrega
- Bitümlü bağlayıcı
- Bitümlü sıcak karışım bileşimi
- Tasarım ve yapım hataları

Araç faktörleri

Üstyapıların tasarımında göz önünde bulundurulmuş ana faktörlerden biri trafiktir. Son yıllarda, ticari taşıtların geometrik özellikleri hızlı gelişim göstermiş ve ağırlıkları oldukça artmıştır. Ticari taşıt sayısının artması ve bunların yasal sınırın üzerinde yüklenmesi, trafiğin yolda oluşturduğu bozucu etkiyi büyük ölçüde arttırmıştır.

Belçika'da yapılan bir araştırmada dingil yükleri dağılımları ve bunların yolda oluşturdukları hasarlar incelenmiştir. 1970 ve 1992 yıllarında yüksek hacimli yollarda gözlenen dingil yükü dağılımlarının karşılaştırılması yapılmıştır. 1970'ten 1992'ye gelindiğinde, hafif ve çok ağır

Tablo 1. Asfalt betonu karışımlarda tekerlek izi oluşumunu etkileyen faktörler
(Sousa vd., 1991)

	Faktör	Faktördeki Değişim	Faktördeki Değişimin Tekerlek İzi Dayanımına Etkisi
Agrega	Yüzey Dokusu	Düzgün → Pürüzlü	Artma
	Gradasyon	Açık → Yoğun	Artma
	Tane Şekli	Yuvarlak → Köşeli	Artma
	Tane Boyutu	Maksimum boyutta artma	Artma
Bağlayıcı	Rijitlik ^a	Artma	Artma
Karışım	Bağlayıcı Oranı	Artma	Azalma
	Boşluk Oranı ^b	Artma	Azalma
	VMA	Artma	Azalma ^c
	Sıkıştırma Yöntemi	- ^d	- ^d
Deney Koşulları	Sıcaklık	Artma	Azalma
	Gerilme - Şekil Değişirme	Lastik değme basıncında artma	Azalma
	Yük Tekrarı	Artma	Azalma
	Su	Kuru → Su içerisinde	Karışım suya duyarlı ise azalma

^a Tekerlek izi oluşumunun belirlendiği sıcaklıktaki rijitlik

^b Boşluk oranı % 3'den küçük olduğunda tekerlek izi potansiyeli artar.

^c % 10 gibi çok küçük VMA değerlerinden kaçınılmalıdır.

^d Sıkıştırma yöntemi sistemin yapısını ve tekerlek izi potansiyelini etkileyebilir.

dingil yüklerinin oluşma frekansları azalmış, buna karşılık orta ağırlıktaki dingil yüklerinin frekansı (yolu kullanma oranı) artmıştır. Ticari taşıt başına ortalama dingil sayısı 1970'ten 1992'ye 2.57'den 3.82'ye yükselmiştir. Bu gelişmelerin sonucu olarak, eşit sayıdaki ticari taşıtın 1992'deki yüklenme koşullarının hasar oluşturma etkisi 1970 yılındakinden hemen hemen 2 kat fazla olduğu görülmüştür (Verstraeten, 1995).

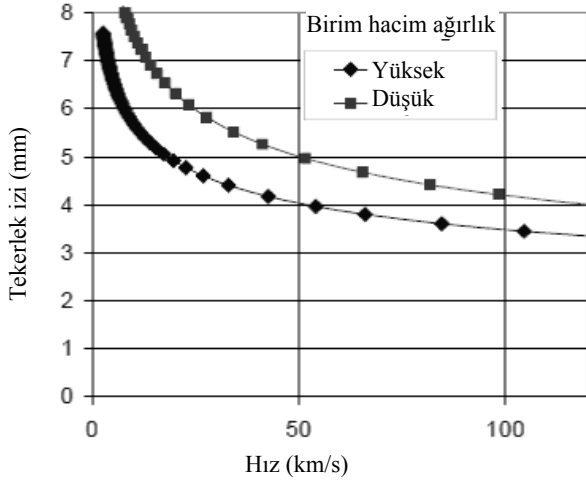
Fransa'da yapılan bir çalışmada, tek tekerlekli üçlü dingilli 400 kN (40 t) ağırlığındaki bir taşıt ile çift tekerlekli tek dingilli 190 kN (19 t) ağırlığındaki diğer bir taşıtın yola verdiği zarar tekerlek izi açısından karşılaştırılmış ve üçlü dingilli taşıtın 4 kat daha fazla zarar verdiği görülmüştür. Bunun nedeni, yükün ağır olması ve yüksek lastik iç basınçlarına sahip geniş tabanlı tek tekerleğin kullanılmasıdır. Yüksek lastik iç basıncına sahip tek tekerleğin yol yüzeyindeki değme alanı çift tekerleğinkinden daha küçük-

tür. Dolayısıyla aynı yüke sahip olsalar dahi, yüksek lastik iç basıncına sahip tek tekerlek yola değme noktasında daha büyük gerilme oluşturacağı için, yola verdiği zarar daha fazla olacaktır (Verstraeten, 1995).

ABD'de yapılan bir çalışmada da, geniş tabanlı tek tekerleğin neden olduğu tekerlek izi hasarı incelenmiştir. Sonuçta geniş tabanlı tek tekerleğin, çift tekerleğin oluşturduğu tekerlek izi derinliğinin, yaklaşık iki katı derinliğe neden olduğu görülmüştür (Verstraeten, 1995). Fransa (LCPC Laboratoire Central des Ponts et Chaussees)'da hızlandırılmış yüklemelerin uygulandığı dairesel test kesiminde, çift tekerlekli ve geniş tabanlı tek tekerlekli iki yüklenme grubunun aynı anda uygulanmasıyla (farklı yarıçaplarda), trafik hızındaki (yüklenme hızındaki) farkın etkisi değerlendirilmiştir. Yüklenme hızının daha düşük olduğu küçük yarıçaplarda daha fazla tekerlek izi oluşmuştur. Aynı sayıda dingil yükü için tekerlek izi derinliği oranları (geniş

tabanlı tek / çift tekerlek) 1.1 – 1.6 arasında olduğu saptanmıştır (Corte vd., 1994).

Şekil 5'te trafik hızının tekerlek izi oluşumuna etkisi görülmektedir. Yüksek hızlarda daha az tekerlek izi oluşmaktadır.

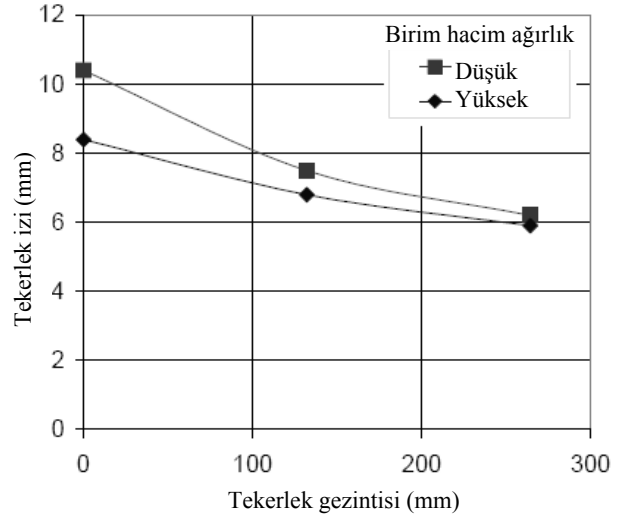


Şekil 5. Trafik hızının tekerlek izi oluşumuna etkisi (White vd., 2003)

Taşıt tekerleklerinin trafik şeridi içerisinde takip ettikleri izin genişliği olarak tanımlanan “gezinti” miktarı da tekerlek izi oluşumuna etki eder. Taşıtların büyük bir kısmının aynı noktalardan geçmesi, gezinti miktarının az olduğunu gösterir. Gezinti miktarı arttığında yük daha geniş bir alana yayıldığı için, tekerlek izi derinliği azalır (Şekil 6).

Trafiğin durma noktasına geldiği, dolayısıyla yüklem sürelerinin çok fazla olduğu kavşak noktalarında da tekerlek izi oluşumu görülmektedir. Taşıtların yavaşlaması ve hızlanması nedeniyle yüzeyde oluşan teğetsel gerilmelerin de tekerlek izine katkısı vardır. Bu konuda yapılan bir çalışmada, kavşak duruş çizgisine olan mesafeye bağlı olarak oluşan tekerlek izi derinlikleri Tablo 2’de görülmektedir (Juhasz, 2005).

Kandhal ve diğerleri (1998), yolun diğer kısımlarına göre kavşak bölgelerinde daha fazla tekerlek izi oluştuğunu belirlemişlerdir. Washington’un bazı bölgelerinde tekerlek izi oluşumunu önlemek için, yalnızca kavşak kollarında çimento betonu kullanılmıştır (FOSSC Materials Lab, 2001).



Şekil 6. Gezinti miktarının tekerlek izi oluşumuna etkisi (White vd., 2003)

Tablo 2. Kavşak yaklaşım kolunda ölçülen tekerlek izi derinlikleri (Juhasz, 2005)

Kavşak Duruş Çizgisine Olan Mesafe (m)	Sol Tekerlek İzi (mm)	Sağ Tekerlek İzi (mm)
0	22	17
10	25	33
20	23	34
30	23	24
40	17	23
50	14	18
60	14	18
70	10	14
80	10	12

İklim koşulları

Yüksek sıcaklık, yağış, nem ve donma-çözülme gibi iklim koşullarına bağlı değişkenler tekerlek izi oluşumunda önemli faktörlerdir.

Bilindiği gibi sıcaklık, bitümlü bağlayıcının davranışını belirleyen en önemli etkenlerden biridir. Yüksek sıcaklıklarda bitümlü bağlayıcının yumuşaması sonucu, trafiğin de etkisiyle tekerlek izi oluşum eğilimi artar. Brosseau ve diğerleri (1993) yaptıkları testlerde, 50 °C’de 100.000 devirde oluşan tekerlek izi oranı ile 60 °C’de 10.000 devirdeki tekerlek izi oranının yaklaşık eşit olduğunu saptamışlardır.

Aschenbrenner (1994), farklı sıcaklıklara sahip 3 bölge için, sıcaklığa karşı kaplamanın tekerlek izi davranışını daha iyi temsil etmesi bakımından, 3 farklı test sıcaklığı (40, 50 ve 60 °C) önermiştir. Collins ve diğerleri (1996) de tekerlek izi deneylerinde bu üç sıcaklığı kullanmışlardır. Choubane ve diğerleri (2000) 46 °C'deki deney sonuçlarının, arazi verileriyle iyi bir ilişkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir.

Herhangi bir dingil yükünün üstyapıda oluşturduğu bozucu etki sıcaklığa göre çok fazla değişkenlik gösterebilir. Sıcaklık arttıkça, aynı dingil yükü daha büyük bozulmalara neden olur. Bu nedenle, trafik hesabı sonucunda bulunan standart dingil yükü değerlerinin, farklı sıcaklıklar için belirli ağırlık katsayıları kullanılarak dönüştürülmesi ve dolayısıyla eşdeğer hale getirilmesi gerekir. Powell (2008), SHRP sıcaklık bölümlerinin orta noktalarını temel alarak, farklı sıcaklıklardaki eşdeğer dingil yükü ağırlık katsayısını belirlemiştir.

Yağış ve nem, üstyapıdaki suya hassas malzemelerin, donma ve çözülme etkileri de zeminin zayıflamasına ve dolayısıyla kalıcı deformasyonlara neden olur.

Yol geometrik parametreleri

Boyuna eğim ve kurba yarıçapı gibi yol geometrik parametreleri, tekerlek izi oluşumunda dolaylı bir etkiye sahiptir. Boyuna eğimin yüksek olduğu yol kesimlerinde özellikle ağır taşıtların hızları düşer. Dolayısıyla, yükleme süresinin artması, yolun yüksek eğimli bölgelerinde diğer kısımlarına göre daha fazla tekerlek izi oluşmasına neden olur.

Benzer durum küçük yarıçaplı kurbalar için de söz konusudur. Bu bölgelerde de taşıt hızları düşük, yükleme süreleri yüksektir. Buna ek olarak, küçük yarıçaplı kurbalarda yüzeyde oluşan teğetsel gerilmeler de tekerlek izi oluşumunda oldukça etkilidir.

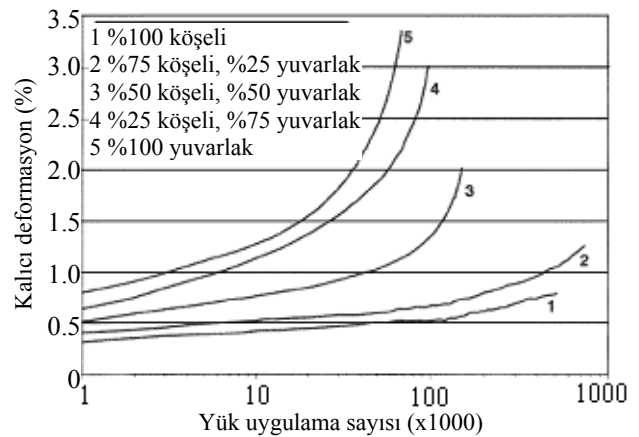
Agrega

Yol kaplamalarının taşıma gücü ve sıkışabilirliği üzerine etkiyen en önemli faktör agregadır. Bu nedenle agregaların sert ve dayanıklı olması,

yabancı madde içermemesi ve tane şekillerinin bir kenetlenme yaparak direnci arttıracak şekilde olması istenir. Keskin köşeli ve ayrıtlı (mikropürüzlülüğü yüksek) malzemenin varlığı, hazırlanan karışımın makaslama ve iç sürtünme direncini arttırmaktadır. Agregaların kırılmış yüzeylerinin fazla olması istenir. Yuvarlak taneli, pürüzlülüğü az, kırılmamış ve biçimsiz (yası) agregaların aşınma tabakalarında kullanılması, tekerlek izine dayanımı azaltır (Ağar, 1999).

Button ve diğerleri (1990) kırılmış taneler ile doğal (kırılmamış, yuvarlak) agregatanelerinin, laboratuvar numunelerinde oluşan plastik deformasyona katkılarını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Doğal kum tanelerinin yerine kırılmış tanelerin kullanılması, asfalt kaplamanın kalıcı deformasyona karşı dayanımını arttırmıştır. Brosseau ve diğerleri (1993)'nin çalışmasında, 0/14 karışımında % 28 oranında kırılmış kum yerine, aynı tipten kırılmamış (doğal) kum kullanıldığında, tekerlek izi oranında % 50 artış görülmüştür. Kırılmışlık oranı % 30'dan % 100'e çıkarıldığında tekerlek izinde % 30 - % 50 azalma meydana gelmiştir.

Vanelstraete ve Francken (1995) agregat şekline bağlı olarak, karışımların kalıcı deformasyon davranışlarını dinamik üç eksenli basınç deneyi ile incelemişlerdir (Şekil 7). En az kalıcı deformasyon, % 100 köşeli agregaların kullanıldığı karışımda oluşmuştur.



Şekil 7. Agregat köşeliliğinin kalıcı deformasyona etkisi (Vanelstraete ve Francken, 1995)

Birçok çalışma, bitümlü sıcak karışımların tekerlek izi potansiyeli üzerinde, agrega gradasyonunun, şeklinin ve dokusunun yanında cinsinin de etkisi olduğunu göstermiştir. Farklı cins agregalı karışımlar, aynı gradasyona sahip olsalar bile tekerlek izi potansiyeli yönünden önemli farklılıklar gösterebilirler. Deney sonuçlarından, genel olarak agrega tipi kireçtaşı olan karışımlarda, granite göre daha fazla tekerlek izi oluştuğu gözlenmiştir (Kandhal ve Mallick, 2001).

İri agrega oranının yüksek olması agrega taneleri arasında kenetlenmeyi sağlar ve böylece iri agrega bir iskelet yapı oluşturur. Karışımın akmaya ve kalıcı tekerlek izi oluşumuna karşı direncinde önemli bir artış meydana gelir (Ağar, 1999). Hensley ve Leahy (1989), iri agrega oranı % 60 – 70 olan TMA kaplamanın tekerlek izi direncinin yoğun gradasyonlu karışımlara göre daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Brown ve Bassett (1990) de, maksimum agrega tane boyutunun ($3/8$, $1/2$, $3/4$, 1 ve $1\ 1/2$ inç), karışımların tekerlek izi potansiyeli üzerindeki etkilerini incelemişler ve maksimum agrega tane boyutu daha büyük olan ($1-1\ 1/2$ inç) karışımların doğru tasarlandığında daha iyi performans göstereceğini saptamışlardır. Tarafder ve Zaman (2001), nominal maksimum agrega tane boyutu 19 mm olan iri karışımlarda, incelere (12.5 mm ve 9.5 mm) göre daha az tekerlek izi oluştuğunu belirlemişlerdir [Nominal maksimum agrega tane boyutu, üzerinde agrega tanelerinin kaldığı en büyük elek açıklığıdır (Önal ve Kahramangil, 1993)].

Geleneksel (modifiye edilmemiş) bağlayıcının kullanıldığı bitümlü temel karışımında %10 deformasyona neden olan yük tekrar sayısı, aynı bağlayıcının kullanıldığı yüzey karışımına göre daha yüksektir. Bu sonuç, nominal maksimum agrega tane boyutunun arttırılmasının tekerlek izi duyarlılığını azalttığını gösterir (Sherwood vd., 1998). Deneyimler, rijit binder tabakalarının, daha ince agregaya ve daha yüksek bağlayıcı oranına sahip olan esnek aşınma tabakalarına göre, daha düşük tekerlek izi potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur (Kandhal ve Mallick, 2001).

Filler, karışımda iri ve ince agregalar arasındaki boşlukları doldurmasının yanında, bağlayıcı film kalınlığını azaltması nedeniyle tekerlek izi açısından önemlidir.

Superpave'de gradasyonların yasaklanmış (sınırlandırılmış) bölgeden geçmesi tavsiye edilmemektedir. Bu bölgeden geçen gradasyonların düşük stabilite ve düşük tekerlek izi dayanımına sahip olabileceğine inanılmaktadır. Oysa yasaklanmış bölgeye uymayan gradasyonlara sahip karışımlarda, bu bölgeye uyan karışımlara nazaran daha fazla tekerlek izi derinliği oluşmamıştır (Kandhal ve Mallick, 2001). Benzer durum Tarefder ve Zaman (2001)'in çalışmalarında da görülmüştür. Bu şekilde bir sınırlandırmaya gereksinim duyulmadığı sonucuna varılmıştır.

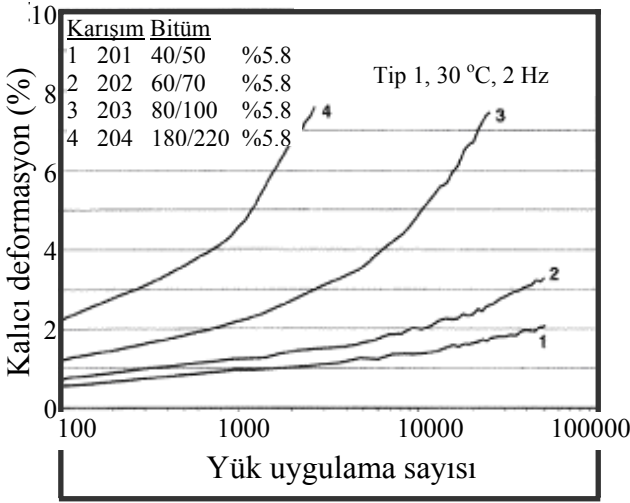
Modifiye bitüm kullanarak tekerlek izine karşı direnci arttırmak mümkündür. Ancak bazı durumlarda agrega, bağlayıcıdan daha etkindir (bağlayıcı tipi ve oranı ne olursa olsun). Tekerlek izini azaltmak için ilk adım, agrega tipinde ve gradasyonunda değişimler yaparak bir optimizasyona gitmek olmalıdır (Brosseau vd., 1993).

Bitümlü bağlayıcı

Penetrasyonu düşük, bir başka ifadeyle sert bitümlü bağlayıcının kullanılması, asfalt betonu karışımının stabilitesinin ve rijitliğinin önemli derecede artmasını sağlar. Sert bağlayıcı kullanılması, sıcak havalarda kalıcı tekerlek izi oluşmasına karşı kaplamanın direncini artırır (Ağar, 1999). Corte ve diğerleri (1994)'nin çalışmasında 10/20 penetrasyonlu bağlayıcının kullanıldığı karışım, 50/70 ve SBS modifiyeli karışımlara göre daha düşük tekerlek izi deformasyonu vermiştir. Ancak, sıcaklığın düşmesi halinde, trafikten gelen gerilmelerin de etkisi altında yolda çatlaklar oluşabilir. Bu nedenle bağlayıcı penetrasyonu çok fazla düşürülemez. Bu durumun bağlayıcı penetrasyonu seçiminde dikkate alınması gerekir.

Vanelstraete ve Francken (1995), karışımların kalıcı deformasyon davranışlarını, bitüm penetrasyonuna bağlı olarak da dinamik üç eksenli basınç deneyi ile incelemişlerdir (Şekil 8). En az

kalıcı deformasyon, 40/50 penetrasyonlu bitümün kullanıldığı karışımda oluşmuştur.



Şekil 8. Bitüm penetrasyonunun kalıcı deformasyona etkisi
(Vanelstraete ve Francken, 1995)

Yumuşama noktası yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumunda etkili olan faktörlerin başında gelir. Yumuşama noktası yüksek bağlayıcıların kullanıldığı karışımlarda, trafik etkisiyle oluşan deformasyonlar daha azdır.

Tekerlek izine duyarlı olan karışımlarda yumuşama noktası sıcaklığı, tekerlek iziyle oldukça ilişkilidir. Yumuşama noktasındaki 5 – 6 °C'lik bir azalma % 20 daha fazla tekerlek izine yol açmaktadır (Brosseaud vd., 1993).

Karışımdaki asfalt filminin ince olması durumunda ($<10^2\mu$) asfalt moleküllerinin birbiri üzerinde kayma yapmadan gerçek kohezyona sahip olması, çekme direncini ve dolayısıyla kalıcı deformasyona dayanımı artırır. Orta kalınlıktaki asfalt filmi ($10^2\mu$ - $10^3\mu$) ince filme göre daha fazla deformasyona neden olur. Kalın film ($>10^3\mu$) halinde ise plastik deformasyonlar çok fazladır (Ağar, 1999).

Karışımdaki bağlayıcı oranı optimumdan çok fazla ise karışımın stabilitesi ve rijitliği çok düşüktür. Bu durumda, trafik yüklerinin etkisiyle kaplamada derin tekerlek izi oluşur. Button ve diğerleri (1990) sıkıştırmayı kolaylaştırmak için,

bağlayıcı oranının keyfi olarak arttırılmaması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Sherwood ve diğerleri (1998), Superpave bağlayıcı şartnamesinde tekerlek izine dayanımı temsil ettiği düşünülen $G^*/\text{Sin}\delta$ parametresi ile tekerlek izi sonuçları arasında iyi bir ilişki olduğu sonucuna varmışlardır. Yüksek $G^*/\text{Sin}\delta$ değerleri için daha az tekerlek izi elde etmişlerdir. Mohammad ve diğerleri (2001) de bağlayıcının performans sınıfı arttıkça, tekerlek izi dayanımının arttığını belirtmişlerdir.

Bağlayıcının modifikasyonu sayesinde, servisteki durumu gösteren elasto – plastik halin sınırlarını belirleyen kırılma noktası ve yumuşama noktası arasındaki sıcaklık aralığı genişletilir. Bir başka deyişle, düşük sıcaklıklarda termal çatlakların oluşması önlenirken, yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyona dayanım sağlanır (Ağar, 1999).

Mogawer ve Stuart (1995), Oliver ve diğerleri (1997), Mohammad ve diğerleri (2001) ile Novak (2007)'in çalışmalarında, modifiye bitümlü karışımlarda daha az tekerlek izi görülmüştür.

Bir bağlayıcı modifiye edilmiş olsa bile, granüler iskelet yapıdaki bir bozulmayı telafi edemez. Ancak uygun agrega granülometrisiyle kullanıldığında, modifiye bitümler karışımın performansını arttırlar (Verstraeten, 1995).

Bitümlü sıcak karışım bileşimi

Boşluk oranı (V_a), bağlayıcı oranı (V_b), asfaltla dolu boşluk yüzdesi (VFA), agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA), gradasyon indeksi (GI) gibi karışım bileşimini oluşturan elemanlar, performansı belirleyen önemli parametrelerdir.

Brown ve Bassett (1990), performansa birincil etkiyi VFA, boşluk oranı ve bağlayıcı oranının, ikincil etkiyi ise kırılmış yüzey ve VMA parametrelerinin gösterdiğini belirlemişlerdir.

Karışımda yeterli boşluk bırakılmaması halinde, sıcaklığın artmasıyla, bağlayıcı tabakanın üst kısmına doğru genişler ve terlemeye neden olur.

Trafığın de etkisiyle agregaların bağlayıcı içerisine gömülmesi sonucunda tekerlek izi oluşabilir.

Boşluk oranı, malzemenin sünmeye duyarlılığını en çok etkileyen faktörlerden biridir. Genel olarak, boşluk oranıyla tekerlek izi oranı arasındaki ilişki parabolik şekildedir. Malzemenin en stabil olduğu boşluk oranı sınırları genellikle % 3 - % 7 arasındadır (Brosseaud vd., 1993).

Verilen bir stabilite sınırı için tekerlek izinin, bağlayıcı oranı yüksek olan karışımlarda daha fazla olduğu genellikle kabul edilir. Bağlayıcı oranı 5.5'in üzerine çıkarıldığında, oluşan tekerlek izi derinliklerinde açık bir artış olduğu görülmüştür (Archilla ve Madanat, 2001b).

Agregalar arasındaki boşlukların gereğinden fazla bağlayıcıyla doldurulması sakıncalıdır. Çünkü iskelet yapı bu durumda yük transferindeki etkinliğini kaybeder. Bağlayıcının sıcaklığa duyarlılığı yüksekse stabilite bozulur ve tekerlek izine dayanım azalır.

Boşlukların bağlayıcıyla doldurulmasının kritik bir oranı vardır. Bu oranın üstünde karışım stabil olmaz. Bu değer üstündeki her artış tekerlek izinde artışa yol açar (Brosseaud vd., 1993).

İnce gradasyonlu karışımlar için, VFA'nın %85 değerinden sonra, tekerlek izinin önemli derecede arttığı görülmüştür. Benzer bir artış kaba gradasyonlu karışım için % 60 – 70'den sonra başlamaktadır (Archilla ve Madanat, 2001b).

VMA'nın tekerlek izi üzerindeki etkisi, bağlayıcı film kalınlığının etkisiyle birlikte ele alınmalıdır. VMA ve film kalınlığındaki artış, granit ve kireçtaşı karışımları için tekerlek izinde artışa neden olur (Kandhal ve Mallick, 2001).

Farklı gradasyonların etkisiyle ilgili olarak bir genelleme yapılamayacağı sonucuna varılmıştır (Brosseaud vd., 1993). Hangi gradasyonun tekerlek izine dayanımda en iyi sonuç verdiği üzerinde tam bir uzlaşma yoktur. Ancak yoğun gradasyonlu karışımlar için, gradasyon indeksinin tekerlek izi performanslarına göre doğru bir sıralama sağladığı görülmüştür. Buna göre, bir

karışım maksimum yoğunluk çizgisinden ne kadar uzaksa, tekerlek izi duyarlılığı o kadar fazladır (Archilla ve Madanat, 2001b). Gradasyon eğrisinde bir boşluğun olması (2/4 veya 4/6) genel olarak tekerlek izini arttırmıştır (Brosseaud vd., 1993).

Tasarım ve yapım hataları

Yapım tekniklerinin, tasarım yönteminin, yolda kullanılacak malzemelerin ve iklim koşullarının uygun olmalarına karşın, yanlış tasarım ve hatalı yapım tekerlek izi oluşumunu kaçınılmaz hale getirebilir.

Trafik hacminin ve yüklerin gerçeğe yakın olarak öngörülememesi, üstyapı tabaka kalınlıklarının gerekenden az veya fazla olması, diğerlerine göre zayıf bir ara tabakanın kullanılması tasarım hataları olarak sıralanabilir. Yapım hataları olarak da; karışımın serilmesinin ve sıkıştırılmasının uygun sıcaklıkta yapılamaması, yeterince sıkıştırılmaması veya aşırı sıkıştırılması, tabakaların tasarımda belirlenen kalınlıklarda serilememesi sayılabilir.

Hensley ve Leahy (1989) bir yolda görülen yapısal tekerlek izinin nedenlerini, yapısal tasarım hatası (zeminden daha zayıf alttemel kullanılması), trafik hacminin ve yüklerin doğru olarak saptanamaması ve daha sonra yapılan takviye tabakalarında düşük hava boşluğu ve yüksek filler/asfalt oranı kullanılması olarak belirlemişlerdir. Diğer bir yolda görülen tekerlek izinin nedenlerinin ise, yüksek bitüm oranının kullanılması, aşırı sıkıştırmanın yapılması, düşük hava boşluğu (aşınma % 2.6, binder % 2.4), yüksek filler/asfalt oranı (aşınma 1.9, binder 1.4) olduğunu belirtmişlerdir.

Asfalt kaplama kalınlığının gereğinden az yapılması taşıma gücü eksikliğine neden olacağı için, üstyapıda daha fazla deformasyon oluşur. Gereğinden fazla kalın yapılması durumunda ise, daha rijit bir yapıya sahip olacağı için yükleri kendi bünyesinde taşıma eğilimi artar. Bu nedenle, asfalt kaplama tabakasında daha fazla tekerlek izi oluşur. Asfalt kaplama kalınlığı ile tekerlek izi arasındaki ilişki konusunda, yapılan araştırmalarda tam bir uyum yoktur. Ancak be-

lirli bir sınıra kadar kalınlık arttıkça tekerlek izinin arttığı belirlenmiştir.

Tekerlek izini azaltmaya yönelik çözüm önerileri

Tekerlek izini azaltmaya yönelik çözüm önerileri aşağıda sıralanmıştır:

- Tekerlek izi oluşumunda büyük bir etkiye sahip olan ticari taşıtlar, yasal sınırın üzerinde yüklenmemeli, yüklenmesine izin verilmemelidir.
- Taşıtların durma noktasına geldiği, dolayısıyla yükleme sürelerinin fazla olduğu, yavaşlama ve hızlanma nedeniyle teğetsel gerilmelerin olduğu kavşak, kurba, tırmanma şeridi vb. bölgelerde, tekerlek izine dayanımı yüksek karışımlar veya çimento betonu kullanılmalıdır.
- Kullanılacak agregalar, sert, dayanıklı, keskin köşeli, ayrıtlı (mikro pürüzlülüğü yüksek) ve kırılmış yüzeyli olmalı, yuvarlak taneli, pürüzsüz, kırılmamış ve biçimsiz (yasası) olmamalıdır. Sıcak bölgelerde sert (düşük penetrasyonlu) veya modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı kullanılmalıdır. (Modifiye bitümlerin, ancak uygun agrega granülo-metrisiyle kullanıldığında, karışımın performansını arttırdığı unutulmamalıdır). Bağlayıcı oranı optimum olmalı, sıkılaşmayı kolaylaştırmak için keyfi olarak arttırılmamalıdır.
- Kaplama tabakası gereğinden fazla kalın yapılmamalıdır. (Tekerlek izi miktarı, yaklaşık 10 cm'ye kadar) kalınlıkla birlikte artmaktadır.)
- Tekerlek izine dayanım yönünden, nominal maksimum agrega tane boyutu ve iri agrega oranı yüksek olan gradasyonlar tercih edilmelidir. Örneğin, nominal maksimum agrega tane boyutu 12.7 mm'den büyük, iri agrega oranı yüksek olan ve modifiye edilmiş TMA karışımının, daha yüksek tekerlek izi performansı sağlayabileceği düşünülmektedir. Bununla birlikte, bu karışım, Fransa'da tercih edilen iki tabakalı sistem içerisinde uygulanabilir. Bu sistemde, üstteki ince tabaka durabilite, geçirimsizlik ve kayma di-

renci sağlıyorken, alttaki daha kalın tabaka, tekerlek izine ve yorulma çatlamasına dayanımı sağlamaktadır. Bu sistemde, iri gradasyona sahip TMA karışımı, alttaki tabakayı oluşturmaktadır.

Kaynaklar

- Ağar, E., (1999). İleri kaplama teknolojisi, Lisansüstü ders notu, İstanbul.
- Archilla, A.R. ve Madanat, S., (2001a). Estimation of rutting models by combining data from different source, *Journal of Transportation Engineering*, **127**, i5, 379-389.
- Archilla, A.R. ve Madanat, S., (2001b). Statistical model of pavement rutting in asphalt concrete mixes, *Transportation Research Record*, **1764**, 70-77.
- Aschenbrenner, T., (1994). Comparison of results obtained from the LCPC rutting tester with pavements of known field performance, *Transportation Research Record*, **1454**, 66-73.
- Bowskill, G., Herbst, G. ve Said, S., (1999). *Choice of materials and design of flexible pavements for severe traffic and climates*, PIARC Technical Committee on Flexible Roads, UK.
- Brosseaud, Y., Delorme, J.L. ve Hiernaux, R., (1993). Use of LPC wheel – tracking rutting tester to select asphalt pavements resistant to rutting, *Transportation Research Record*, **1384**, 59-68.
- Brown, E.R. ve Bassett, C.E., (1990). Effects of maximum aggregate size on rutting potential and other properties of asphalt – aggregate mixtures, *Transportation Research Record*, **1259**, 107-119.
- Button, J.W., Perdomo, D. ve Lytton, R.L., (1990). Influence of aggregate on rutting in asphalt concrete pavements, *Transportation Research Record*, **1259**, 141-152.
- Choubane, B., Page, G.C. ve Musselman, J.A., (2000). Suitability of asphalt pavement analyzer for predicting pavement rutting, *Transportation Research Record*, **1723**, 107-115.
- Collins, R., Shami, H. ve Lai, J.S., (1996). Use of georgia loaded wheel tester to evaluate rutting of asphalt samples prepared by superpave gyratory compactor, *Transportation Research Record*, **1545**, 161-168.
- Corte, J.F., Brosseaud, Y., Simoncelli, J.P. ve Caroff, G., (1994). Investigation of rutting of asphalt surface layers: Influence of binder and axle loading configuration, *Transportation Research Record*, **1436**, 28-37.

- FOSSC Materials Lab., (2001). Design and construction of concrete intersection, *Tech Notes*, Washington State Department of Transportation, Washington, USA.
- Hensley, M.J. ve Leahy, R.B., (1989). Asphalt concrete mixtures as related to pavement rutting: case studies, *Transportation Research Record*, **1217**, 87-96.
- Juhasz, M., (2005). Rutted intersection treatment – highway 37, *TSB Newsletter Technical Standarts Branch*, **4**, i2, 3-5.
- Kandhall, P.S. ve Mallick, R.B., (2001). Effect of mix gradation on rutting potential of dense-graded asphalt mixtures, *Transportation Research Record*, **1767**, 146-151.
- Kandhal, P.S., Mallick, R.B. ve Brown, E.R., (1998). Hot mix asphalt for intersections in hot climates, NCAT Report 98-06, Auburn, USA.
- Mogawer, W.S. ve Stuart, K.D., (1995). Effect of coarse aggregate content on stone matrix asphalt rutting and draindown, *Transportation Research Record*, **1492**, 1-11.
- Mohammad, L.N., Huang, B. ve Cea, M., (2001). Rutting measurements of HMA mixtures with the asphalt pavement analyzer, 2nd International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Auburn, Alabama, USA, July 29-August 1.
- Monismith, C.L., (1976). Rutting prediction in asphalt concrete pavements, *Transportation Research Record*, **616**, 2-8.
- Novak, M., (2007). Creation of a laboratory testing device to evaluate instability rutting in asphalt pavements, *PhD Thesis*, University of Florida, USA.
- Oliver, J.W.H., Jameson, G.W., Sharp, K.G., Vertessy, N.J., Johnson-Clarke, J.R. ve Alderson, A.J., (1997). Evaluation of rut-resistant properties of asphalt mixes under field and laboratory conditions, *Transportation Research Record*, **1590**, 53-61.
- Önal, M.A. ve Kahramangil, M., (1993). Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı, KGM Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Powell, R.B., (2008). Modeling rutting performance on the NCAT pavement test track, TRB 87th Annual Meeting, Washington D.C., USA, January 13-17.
- Sherwood, J.A., Thomas, N.L. ve Qi, X., (1998). Correlation of superpave G*/Sinδ with rutting test results from accelerated loading facility, *Transportation Research Record*, **1630**, 53-61.
- Sousa, J.B., Craus, J. ve Monismith, C.L., (1991). *Summary report on permanent deformation in asphalt concrete*, SHRP-A/IR-91-104, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington D.C., USA.
- Tarefder, R.A. ve Zaman, M., (2001). Evaluating rut potential of selected asphalt mixes for improved pavement performance, 2nd International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Auburn, Alabama, USA, July 29 - August 1.
- Vanelstraete, A. ve Francken, L., (1995). Ormierage: Synthese des principaux constats et resultats, *Bulletin CRR, Bruxelles*, **25**, 9-16.
- Verstraeten, J., (1995). *Bituminous materials with a high resistance to flow rutting*, PIARC Technical Committee on Flexible Roads, Belgium.
- White, T.D., Hua, J. ve Galal, K., (2003). Analysis of accelerated pavement tests, Transportation Research Board Annual Meeting, Paper CS8-7, Washington D.C., USA.
- Witzack, M.W. ve El-Basyouny, M.M., (2004). Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures, final document, *Appendix GG-1: Calibration of permanent deformation models for flexible pavements*, prepared for NCHRP, submitted by ARA Inc. ERES Division, Champaign, Illinois, USA.