

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA
TEKERLEK İZİ OLUŞUMUNUN MODELLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Sabit KUTLUHAN

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ULAŞTIRMA MÜHENDİSLİĞİ

TEMMUZ 2008

**BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA
TEKERLEK İZİ OLUŞUMUNUN MODELLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Sabit KUTLUHAN
(501982011)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 Haziran 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Temmuz 2008**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Emine AĞAR
Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Abdullah H. LAV (İ.T.Ü.)
Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN (S.D.Ü.)
Prof. Dr. Zekai ŞEN (İ.T.Ü.)
Prof. Dr. İlhan SÜTAŞ (Akdeniz Ü.)

TEMMUZ 2008

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında vermiş olduğu destek ve teşvik, yapmış olduğu değerli katkı ve yönlendirme nedeniyle, akademik hayatımın gelişimi ve bu yöndeki kazanımlarım üzerinde büyük etkisi olan hocam Prof. Dr. Emine Ağar'a,

Tez çalışması sırasında yüksek ilgi ve desteğini gördüğüm tez izleme komitesindeki hocalarım Prof. Dr. Mustafa Karaşahin'e ve Prof. Dr. Abdullah H. Lav'a,

Ufuk açıcı görüşleri ve yüksek bilgileriyle bilimsel düşünce yapıma büyük katkı sağlayan Prof. Dr. Zekai Şen'e ve Prof. Dr. Mehmetçik Bayazıt'a,

Karayolları Genel Müdürlüğü'nün laboratuvar imkanlarının kullanılması hususunda destek olan Teknik Araştırma Dairesi Başkanı Münevver Atasaral'a ve Üstyapı Şube Müdürü Ahmet Gürkan Güngör'e,

İsfalt A. Ş.'nin laboratuvar imkanlarının kullanılması hususunda destek olan Mehmet Tahir Deniz'e ve Seyit Ali Yıldırım'a,

Numunelerin araziden alınmasında destek olan Ahmet Taner Hergüner'e, Mehmet Tahir Deniz'e, Aysun Çalışkol'a, Tuncer Topaloğlu'na ve Ömer Baylan'a,

KGM'deki laboratuvar çalışmalarına tecrübeleriyle katkı sağlayan Cengiz Yıldırım'a, Mustafa Özyürek'e, Ali Haydar Eren'e, Mehmet Bellikli'ye ve Cihan Yıldız'a,

İsfalt'taki laboratuvar çalışmalarına katkı sağlayan Muhittin Ergün'e ve Servet Han'a

Çalışmanın birçok aşamasında yakın desteğini gördüğüm Mustafa Tanış'a, Doç. Dr. Kemal Selçuk Ögüt'e, Uğur Şahin'e, Selman Uğuz'a, Aydın Topçu'ya ve Gönül Yönter'e,

Tez çalışması sırasında ortak zaman geçirdiğimiz Pamukkale ve İstanbul Teknik Üniversiteleri'ndeki bütün çalışma arkadaşlarıma,

Manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim, sabır ve hoşgörüyle beni daima iyiye ve doğruya teşvik eden sevgili anneme, babama, abilerime ve tüm aileme,

En kalbi hislerimle teşekkür ederim.

Haziran 2008

Sabit Kutluhan

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	x
SEMBOL LİSTESİ	xv
ÖZET	xvi
SUMMARY	xviii
1. GİRİŞ	1
2. TEKERLEK İZİ OLUŞUMU	3
2.1. Giriş	3
2.2. Tekerlek İzi Oluşum Şekilleri	5
2.2.1. Yapısal tekerlek izi	5
2.2.2. Akma tekerlek izi	7
2.2.3. Aşınma tekerlek izi	9
2.2.4. Oturma (konsolidasyon - sıkışma) tekerlek izi	10
2.3. Tekerlek İzi Oluşumunda Etkili Faktörler	10
2.3.1. Dış faktörler	12
2.3.1.1. Araç faktörleri	12
2.3.1.2. İklim koşulları	17
2.3.1.3. Yol geometrik parametreleri	18
2.3.2. İç faktörler	19
2.3.2.1. Agrega	19
2.3.2.2. Bitümlü bağlayıcı	21
2.3.2.3. Bitümlü sıcak karışım bileşimi	24
2.3.2.4. Tasarım ve yapım hataları	25
2.4. Tekerlek İzini Azaltmaya Yönelik Dünyadaki Bazı Uygulamalar	27
2.5. Tekerlek İzinin Ölçümü	29
2.6. Tekerlek İzinin Onarımı	30
2.7. Tekerlek İzi Tahmini İçin Yapılan Çalışmalar	30
2.7.1. Laboratuvar benzeşim çalışmaları	31
2.7.1.1. Georgia tekerlek izi cihazı	31
2.7.1.2. Hamburg tekerlek izi cihazı	33
2.7.1.3. Fransız (LCPC) tekerlek izi	35
2.7.1.4. Tekerlek izi cihazlarının değerlendirilmesi	39
2.7.2. Tam ölçekli çalışmalar	41

2.7.2.1. Hızlandırılmış yükleme sistemleri	41
2.7.2.2. Deney yolları	42
2.8. Tekerlek İzi Tahmin Modelleri	43
3. ARAZİ ÇALIŞMALARI	53
3.1. Tekerlek İzi Numunelerinin Ve Karotların Alınması	53
3.1.1. Aşınma ve binder tabakalarından numunelerin alınması	53
3.1.2. TMA (Taş Mastik Asfalt) kaplamadan numunelerin alınması	56
3.1.3. Modifiye bitümlü aşınma tabakasından numunelerin alınması	59
3.2. Numunelerin Alındığı Kesimlerdeki Tekerlek İzi Ölçümleri	62
3.2.1. Aşınma ve binder numunelerinin alındığı kesimdeki tekerlek izi ölçümleri	62
3.2.2. TMA numunelerinin alındığı kesimdeki tekerlek izi ölçümleri	63
3.2.3. Modifiye bitümlü aşınma numunelerinin alındığı kesimdeki tekerlek izi ölçümleri	63
3.3. Numunelerin Alındığı Kesimlerdeki Malzeme Ve Karışım Özellikleri	64
3.3.1. Aşınma numunelerinin alındığı kesimdeki malzeme ve karışım özellikleri	64
3.3.2. Binder numunelerinin alındığı kesimdeki malzeme ve karışım özellikleri	66
3.3.3. TMA numunelerinin alındığı kesimdeki malzeme ve karışım özellikleri	67
3.3.4. Modifiye bitümlü aşınma numunelerinin alındığı kesimdeki malzeme ve karışım özellikleri	68
3.4. Numunelerin Alındığı Kesimlere Ait Trafik Değerleri	70
3.4.1. Aşınma ve binder numunelerinin alındığı kesime ait trafik değerleri	70
3.4.2. TMA numunelerinin alındığı kesime ait trafik değerleri	71
3.4.3. Modifiye bitümlü aşınma numunelerinin alındığı kesime ait trafik değerleri	72
4. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI	73
4.1. Tekerlek İzi Numunelerine Uygulanan Deneyler	73
4.1.1. Boyutların ve Dp (pratik birim hacim ağırlık)’lerin belirlenmesi	74
4.1.2. Tekerlek izi deneyleri	74
4.2. Karotlara Uygulanan Deneyler	82
4.2.1. Statik sünme deneyleri	83
4.2.2. Dinamik (tekrarlı) sünme deneyleri	86
4.2.3. Dolaylı çekme modülü deneyleri	89
5. TEKERLEK İZİ OLUŞUM MODELLERİNİN KURULMASI	93
5.1. Regresyon Analizi İle Modelleme	93
5.1.1. Aşınma numunelerine ait regresyon modeli	93

5.1.2. Binder numunelerine ait regresyon modeli	99
5.1.3. TMA numunelerine ait regresyon modeli	103
5.1.4. Modifiye bitümlü aşınma numunelerine ait regresyon modeli	107
5.1.5. Regresyon modellerinin irdelenmesi	111
5.1.6. Regresyon ile tahmin edilen tekerlek izi miktarlarının irdelenmesi	114
5.2. Kovaryans Analizi	115
5.3. Bulanık Mantık İle Modelleme	118
5.3.1. Aşınma numunelerine ait bulanık mantık modeli	120
5.3.2. Binder numunelerine ait bulanık mantık modeli	121
5.3.3. TMA numunelerine ait bulanık mantık modeli	122
5.3.4. Modifiye bitümlü aşınma numunelerine ait bulanık mantık modeli	123
5.4. Regresyon Ve Bulanık Mantık Modellerinin Karşılaştırılması	124
6. ARAZİ VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	127
6.1. Karışım Tiplerinin Tekerlek İzi Oluşma Potansiyellerinin Karşılaştırılması	127
6.2. Arazideki ve Laboratuvardaki Tekerlek İzi Oluşma Uyumunun Değerlendirilmesi	131
6.3. Laboratuvar Sonuçlarına Göre Kaplama Performansının (Ömrünün) Tahmini	133
6.4. Tekerlek İzi İle Statik ve Dinamik (Tekrarlı) Sünme Uyumunun Değerlendirilmesi	135
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	137
KAYNAKLAR	145
EKLER	152
ÖZGEÇMİŞ	163

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ALF	: Accelerated Loading Facility
ANCOVA	: Analysis Of Covariance
ANFIS	: Adaptive Network based Fuzzy Inference System
ANOVA	: Analysis Of Variance
APA	: Asphalt Pavement Analyzer
BRRC	: Belgian Road Research Centre
CDOT	: Colorado Department Of Transportation
ESDY	: Eşdeğer Standart Dingil Yüğü
FHWA	: Federal Highway Administration
HVS	: Heavy Vehicle Simulator
JHRI	: Japan Highway Research Institute
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ	: Karayolu Teknik Şartnamesi
LCPC	: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
M-E PDG	: Mechanical – Empirical Pavement Design Guide
NCHRP	: National Cooperative Highway Research Program
RMSE	: Root Mean Square Error
SHRP	: Strategic Highway Research Program
SPSS	: Statistical Product and Service Solutions
TMA	: Taş Mastik Asfalt
UMATTA	: Universal Materials Testing Aparatus
YOGT	: Yıllık Ortalama Günlük Trafik

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1 : Tabakaların tekerlek izi oluşumundaki katkıları (Salama, 2005)...	7
Tablo 2.2 : Asfalt betonu karışımlarda tekerlek izi oluşumunu etkileyen faktörler (Sousa ve diğ., 1991).....	11
Tablo 2.3 : Kavşak yaklaşım kolunda ölçülen tekerlek izi derinlikleri (Juhasz, 2005).....	17
Tablo 2.4 : Tekerlek izi sınıflandırması (AASHTO, 1986).....	30
Tablo 2.5 : Kullanımı yaygın olan tekerlek izi cihazları ve özellikleri (Kutluhan ve Ağar, 2004).....	32
Tablo 2.6 : Çeşitli ülkelerde kullanılan tekerlek izi deneyleri ve performans ölçütleri (Bowskill ve diğ., 1999).....	40
Tablo 2.7 : Dünyada mevcut olan tam ölçekli çalışmalar (Metcalf, 1996).....	42
Tablo 3.1 : Aşınma ve binder numunelerinin alındığı kesimdeki tekerlek izi ölçümleri.....	62
Tablo 3.2 : TMA numunelerinin alındığı kesimdeki tekerlek izi ölçümleri.....	63
Tablo 3.3 : Modifiye bitümlü aşınma numunelerinin alındığı kesimdeki tekerlek izi ölçümleri.....	64
Tablo 3.4 : Karışım tane dağılımı ve şartname limitleri (Aşınma).....	65
Tablo 3.5 : Malzemelere ait deneysel değerler (Aşınma).....	65
Tablo 3.6 : Karışım bileşimine ait değerler (Aşınma).....	65
Tablo 3.7 : Karışım tane dağılımı ve şartname limitleri (Binder).....	66
Tablo 3.8 : Malzemelere ait deneysel değerler (Binder).....	66
Tablo 3.9 : Karışım bileşimine ait değerler (Binder).....	67
Tablo 3.10 : Karışım tane dağılımı ve şartname limitleri (TMA).....	67
Tablo 3.11 : Malzemelere ait deneysel değerler (TMA).....	68
Tablo 3.12 : Karışım bileşimine ait değerler (TMA).....	68
Tablo 3.13 : Karışım tane dağılımı ve şartname limitleri (Mdf. Bit. Aşınma)....	69
Tablo 3.14 : Malzemelere ait deneysel değerler (Mdf. Bit. Aşınma).....	69
Tablo 3.15 : Karışım bileşimine ait değerler (Mdf. Bit. Aşınma).....	69
Tablo 3.16 : İzmit – Adapazarı kesiminin sağ şeridindeki toplam eşdeğer standart dingil hesabı.....	70
Tablo 3.17 : Avcılar – Mahmutbey (Tekstilkent mevki) kesiminin sağ şeridindeki toplam eşdeğer standart dingil hesabı.....	71
Tablo 3.18 : Kartal E-5 kesiminin sağ şeridindeki toplam eşdeğer standart dingil hesabı.....	72
Tablo 4.1 : Aşınma numunelerinde oluşan tekerlek izi derinlikleri (mm).....	75
Tablo 4.2 : Aşınma numunelerinde oluşan tekerlek izi değerleri (%).....	75
Tablo 4.3 : Binder numunelerinde oluşan tekerlek izi derinlikleri (mm).....	75
Tablo 4.4 : Binder numunelerinde oluşan tekerlek izi değerleri (%).....	76
Tablo 4.5 : TMA numunelerinde oluşan tekerlek izi derinlikleri (mm).....	76

Tablo 4.6	: TMA numunelerinde oluşan tekerlek izi değerleri (%).....	76
Tablo 4.7	: Modifiye bitümlü aşınma numunelerinde oluşan tekerlek izi derinlikleri (mm).....	77
Tablo 4.8	: Modifiye bitümlü aşınma numunelerinde oluşan tekerlek izi değerleri (%).....	77
Tablo 4.9	: Aşınma numunelerinde oluşan ortalama tekerlek izi değerleri.....	78
Tablo 4.10	: Binder numunelerinde oluşan ortalama tekerlek izi değerleri.....	79
Tablo 4.11	: TMA numunelerinde oluşan ortalama tekerlek izi değerleri.....	80
Tablo 4.12	: Modifiye bitümlü aşınma numunelerinde oluşan ortalama tekerlek izi değerleri.....	81
Tablo 4.13	: Farklı yükleme koşullarındaki dolaylı çekme modülü (esneklik modülü, elastik modül) değerleri.....	91
Tablo 5.1	: Tanımlayıcı istatistikler (aşınma).....	94
Tablo 5.2	: Değişkenler arasındaki korelasyonlar (aşınma).....	94
Tablo 5.3	: Model özeti (aşınma).....	94
Tablo 5.4	: Varyans analizi (aşınma).....	95
Tablo 5.5	: Model katsayıları (aşınma).....	95
Tablo 5.6	: Doğrusal bağımlılık durumu (aşınma).....	96
Tablo 5.7	: Tanımlayıcı istatistikler (binder).....	99
Tablo 5.8	: Değişkenler arasındaki korelasyonlar (binder).....	99
Tablo 5.9	: Model özeti (binder).....	99
Tablo 5.10	: Varyans analizi (binder).....	100
Tablo 5.11	: Model katsayıları (binder).....	100
Tablo 5.12	: Doğrusal bağımlılık durumu (binder).....	101
Tablo 5.13	: Tanımlayıcı istatistikler (TMA).....	103
Tablo 5.14	: Değişkenler arasındaki korelasyonlar (TMA).....	103
Tablo 5.15	: Model özeti (TMA).....	103
Tablo 5.16	: Varyans analizi (TMA).....	104
Tablo 5.17	: Model katsayıları (TMA).....	104
Tablo 5.18	: Doğrusal bağımlılık durumu (TMA).....	105
Tablo 5.19	: Tanımlayıcı istatistikler (mdf. bit. aşınma).....	107
Tablo 5.20	: Değişkenler arasındaki korelasyonlar (mdf. bit. aşınma).....	107
Tablo 5.21	: Model özeti (mdf. bit. aşınma).....	107
Tablo 5.22	: Varyans analizi (mdf. bit. aşınma).....	108
Tablo 5.23	: Model katsayıları (mdf. bit. aşınma).....	108
Tablo 5.24	: Doğrusal bağımlılık durumu (mdf. bit. aşınma).....	109
Tablo 5.25	: Aynı miktarda tekerlek izine neden olan devir sayılarının sıcaklıkla değişimi (aşınma).....	111
Tablo 5.26	: Aynı miktarda tekerlek izine neden olan devir sayılarının sıcaklıkla değişimi (binder).....	112
Tablo 5.27	: Aynı miktarda tekerlek izine neden olan devir sayılarının sıcaklıkla değişimi (TMA).....	112
Tablo 5.28	: Aynı miktarda tekerlek izine neden olan devir sayılarının sıcaklıkla değişimi (mdf. bit. aşınma).....	113
Tablo 5.29	: Regresyon modelleri ile tahmin edilen tekerlek izi miktarları (%).	114
Tablo 5.30	: Sıcaklık karşılaştırmaları (tek yönlü kovaryans analizi).....	116
Tablo 5.31	: Grup karşılaştırmaları (iki yönlü kovaryans analizi).....	116
Tablo 5.32	: Sıcaklık karşılaştırmaları (iki yönlü kovaryans analizi).....	117
Tablo 5.33	: Kovaryans analizi sonucunda oluşan alt gruplar (sıcaklığa göre)...	117

Tablo 5.34	: Kovaryans analizi sonucunda oluşan alt gruplar (gruplara göre)...	118
Tablo 5.35	: Deney sonuçları ile model sonuçlarının karşılaştırılması (aşınma).	124
Tablo 5.36	: Deney sonuçları ile model sonuçlarının karşılaştırılması (binder)..	124
Tablo 5.37	: Deney sonuçları ile model sonuçlarının karşılaştırılması (TMA)...	125
Tablo 5.38	: Deney sonuçları ile model sonuçlarının karşılaştırılması (mdf. bit. aşınma).....	125
Tablo 6.1	: Karışımların sıcaklıklara göre tekerlek izi oluşum eğimleri (a)....	132
Tablo 6.2	: Arazideki tekerlek izi oluşum eğimlerinin hesaplanması.....	132
Tablo 6.3	: Arazi koşullarını en iyi yansıtan deney sıcaklıkları.....	133
Tablo 6.4	: Aynı miktarda tekerlek izine neden olan T8,2 ve devir sayıları....	134
Tablo 6.5	: Tekerlek izi üst sınırına karşılık gelen devir sayıları ve T8,2 değerleri.....	134
Tablo B.1	: Aşınma numunelerinin boyutları ve Dp - pratik birim hacim ağırlıkları.....	159
Tablo B.2	: Binder numunelerinin boyutları ve Dp - pratik birim hacim ağırlıkları.....	160
Tablo B.3	: TMA numunelerinin boyutları ve Dp - pratik birim hacim ağırlıkları.....	161
Tablo B.4	: Modifiye bitümlü aşınma numunelerinin boyutları ve Dp – pratik birim hacim ağırlıkları.....	162

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Kaplama malzemelerinin tipik tekrarlı yüklemeli kalıcı deformasyon davranışı (Witczack ve El-Basyouny, 2004).....	3
Şekil 2.2 : Yük tekrar sayısının kalıcı deformasyon üzerindeki etkisi (Eisenmann ve Hilmer'in çalışması, 1987) (Sousa ve diğ.,1991)	4
Şekil 2.3 : Üstyapıda görülen bozulma şekilleri (Hadley, 1994).....	5
Şekil 2.4 : Yapısal tekerlek izi.....	6
Şekil 2.5 : Esnek üstyapı tabakalarının tekerlek izi oluşumundaki katkıları (Deney yolu, Taiwan) (Chen ve diğ., 2004).....	6
Şekil 2.6 : Akma tekerlek izi.....	7
Şekil 2.7 : Geçiş sayılarına göre oluşan ortalama tekerlek izi enkesiti (HVS, 50 °C) (Novak, 2007).....	8
Şekil 2.8 : Tekerlek izi enkesitinde oluşan alanlar (HVS, 50 °C) (Novak, 2007).....	8
Şekil 2.9 : Alan oranının geçiş sayısına göre değişimi (HVS, 50 °C) (Novak, 2007).....	9
Şekil 2.10 : Aşınma ve oturma tekerlek izi.....	10
Şekil 2.11 : Dingil yükü dağılımları (Belçika) (Verstraeten, 1995).....	12
Şekil 2.12 : Dingil yüklerinin bozulmaya etkileri (Belçika) (Verstraeten, 1995).....	12
Şekil 2.13 : Tek ve çift tekerleğin tekerlek izi üzerindeki etkileri (89 mm asfalt) (Hızlandırılmış test, ALF, FHWA, Washington D.C.) (Verstraeten, 1995).....	13
Şekil 2.14 : Tek ve çift tekerleklerin tekerlek izi üzerindeki etkileri (178 mm asfalt) (Hızlandırılmış test, ALF, FHWA, Washington D.C.) (Verstraeten, 1995).....	14
Şekil 2.15 : Tek ve çift tekerleklerin akma tekerlek izi üzerindeki etkileri (Hızlandırılmış test, LCPC) (Verstraeten, 1995).....	14
Şekil 2.16 : Lastik iç basıncının tekerlek izi üzerindeki etkisi (White ve diğ., 2003).....	15
Şekil 2.17 : Trafik hızının tekerlek izi oluşumuna etkisi (White ve diğ., 2003)	15
Şekil 2.18 : Gezinti miktarına göre tekerlek izi oluşumu (Witczack ve El-Basyouny, 2004).....	16
Şekil 2.19 : Gezinti miktarına göre tekerlek izi oluşumu (enkesit) (White ve diğ. 2003).....	16
Şekil 2.20 : Gezinti miktarının tekerlek izi oluşumuna etkisi (White ve diğ., 2003).....	16
Şekil 2.21 : 37 oC'den yüksek kaplama sıcaklıklarına göre eşdeğer dingil yükü ağırlık katsayıları (Powell, 2008).....	18
Şekil 2.22 : Küçük yarıçaplı kurbada oluşan tekerlek izi (www.asphaltwa.com).....	19

Şekil 2.23	: Agrega köşeliliğinin kalıcı deformasyona etkisi (Vanelstraete ve Francken, 1995).....	20
Şekil 2.24	: Bitüm penetrasyonunun kalıcı deformasyona etkisi (Vanelstraete ve Francken, 1995).....	22
Şekil 2.25	: Bağlayıcı sınıfı duyarlılık analizi (Schwartz, 2007).....	23
Şekil 2.26	: Kaplama kalınlığının tekerlek izi oluşumuna etkisi (Witczack ve El-Basyouny, 2004).....	26
Şekil 2.27	: Numune kalınlığının tekerlek izi oluşumuna etkisi (Pirabarooban ve diğ., 2003).....	26
Şekil 2.28	: Dinamik stabilitenin belirlenmesi (Poulidakos ve diğ., 2004).....	29
Şekil 2.29	: Tekerlek izi derinliğinin ölçülmesi.....	29
Şekil 2.30	: Georgia tekerlek izi cihazı (Kandhal ve Cooley, 2002).....	31
Şekil 2.31	: APA Tekerlek izi cihazı ve yakından görünüşü (Kandhal ve Cooley, 2002).....	33
Şekil 2.32	: Hamburg tekerlek izi cihazı (www.fhwa.dot.gov).....	33
Şekil 2.33	: Hamburg tekerlek izi deneyinde oluşan deformasyon eğrisi (www.fhwa.dot.gov).....	34
Şekil 2.34	: Fransız (LCPC) tekerlek izi cihazı.....	36
Şekil 2.35	: Fransız LCPC tekerlek izi cihazında numunenin yakından görünüşü.....	36
Şekil 2.36	: LCPC tabaka sıkıştırıcısı.....	36
Şekil 2.37	: Tekerlek izi ölçümü ve ölçüm alınan standart 15 nokta.....	37
Şekil 2.38	: WesTrack deney yolunda hızlandırılmış yükleme yapan araç (www.pavetrack.com).....	43
Şekil 3.1	: Aşınma ve binder tekerlek izi numunelerinin alınması (ölçeksiz plan).....	54
Şekil 3.2	: Kemirici makina ile blok kenarlarının zayıflatılması.....	54
Şekil 3.3	: Blokların tahrip edilmeden kaldırılması.....	55
Şekil 3.4	: Blokların asfalt kesme makinası ile kesilmesi.....	55
Şekil 3.5	: Aşınma ve binder karotlarının alınması (ölçeksiz plan).....	56
Şekil 3.6	: Aşınma ve binder karotlarının alınması.....	56
Şekil 3.7	: Uygun trafik işaretleriyle sağ şeridin trafiğe kapatılması (TMA)...	57
Şekil 3.8	: Kesilecek kısımların yol üzerinde işaretlenmesi (TMA).....	57
Şekil 3.9	: Plakların kesilmesi ve kenarlarının zayıflatılması (TMA).....	57
Şekil 3.10	: Kesilen plakların tahrip edilmeden alınması (TMA).....	58
Şekil 3.11	: TMA kaplamadan karotların alınması.....	58
Şekil 3.12	: Numune alınan kısımların boşaltılıp temizlenmesi (TMA).....	59
Şekil 3.13	: Yapılan yamanın sıkıştırılması (TMA).....	59
Şekil 3.14	: Uygun trafik işaretleriyle sağ şeridin trafiğe kapatılması (mdf. bit. aşınma).....	59
Şekil 3.15	: Kesilecek kısımların yol üzerinde işaretlenmesi (mdf. bit. aşınma).....	60
Şekil 3.16	: Plakların kesilmesi ve kenarlarının zayıflatılması (mdf. bit. aşınma).....	60
Şekil 3.17	: Kesilen plakların tahrip edilmeden alınması (mdf. bit. aşınma)....	61
Şekil 3.18	: Modifiye bitümlü aşınma tabakasından karotların alınması.....	61
Şekil 3.19	: Tekerlek izi derinliğinin ölçülmesi.....	62
Şekil 4.1	: Tekerlek izi numunelerinin deney boyutlarına getirilmesi.....	73

Şekil 4.2	: Aşınma numunelerinde devir sayısına ve sıcaklığa bağlı tekerlek izi oluşumu.....	78
Şekil 4.3	: Tekerlek izi deneylerinden sonra aşınma numunelerinden alınan kesitler.....	78
Şekil 4.4	: Binder numunelerinde devir sayısına ve sıcaklığa bağlı tekerlek izi oluşumu.....	79
Şekil 4.5	: Tekerlek izi deneylerinden sonra binder numunelerinden alınan kesitler.....	79
Şekil 4.6	: TMA numunelerinde devir sayısına ve sıcaklığa bağlı tekerlek izi oluşumu.....	81
Şekil 4.7	: Tekerlek izi deneylerinden sonra TMA numunelerinden alınan kesitler.....	81
Şekil 4.8	: Modifiye bitümlü aşınma numunelerinde devir sayısına ve sıcaklığa bağlı tekerlek izi oluşumu.....	82
Şekil 4.9	: Tekerlek izi deneylerinden sonra modifiye bitümlü aşınma numunelerinden alınan kesitler.....	82
Şekil 4.10	: Statik sünme deney düzeneği ve numunenin yüklenmesi.....	83
Şekil 4.11	: Statik sünme deneyinde yükleme süresine göre kalıcı deformasyon artışı.....	84
Şekil 4.12	: Statik sünme deneyinde aşınma numunelerinde oluşan kalıcı deformasyon.....	84
Şekil 4.13	: Statik sünme deneyinde binder numunelerinde oluşan kalıcı deformasyon.....	85
Şekil 4.14	: Statik sünme deneyinde TMA numunelerinde oluşan kalıcı deformasyon.....	85
Şekil 4.15	: Statik sünme deneyinde modifiye bitümlü aşınma numunelerinde oluşan kalıcı deformasyon.....	85
Şekil 4.16	: Statik sünme deneylerinde numunelerde oluşan ortalama kalıcı deformasyonlar.....	86
Şekil 4.17	: Dinamik (tekrarlı) sünme deneyinde yükleme sayısına göre kalıcı deformasyon ve esneklik modülü değişimi.....	87
Şekil 4.18	: Dinamik sünme deneyinde aşınma numunelerinde oluşan deformasyonlar.....	87
Şekil 4.19	: Dinamik sünme deneyinde binder numunelerinde oluşan deformasyonlar.....	88
Şekil 4.20	: Dinamik sünme deneyinde TMA numunelerinde oluşan deformasyonlar.....	88
Şekil 4.21	: Dinamik sünme deneyinde modifiye bitümlü aşınma numunelerinde oluşan deformasyonlar.....	88
Şekil 4.22	: Dinamik (tekrarlı) sünme deneylerinde numunelerde oluşan ortalama kalıcı deformasyonlar.....	89
Şekil 4.23	: Dolaylı çekme modülü deneyinin şematik görünümü.....	90
Şekil 4.24	: Dolaylı çekme modülü deney düzeneği ve numunenin yüklenmesi.....	90
Şekil 4.25	: Dolaylı çekme modülü deneyinde yükleme durumu (5 vuruş).....	90
Şekil 5.1	: Standartlaştırılmış kalıntıların histogramı (aşınma).....	97
Şekil 5.2	: Standartlaştırılmış kalıntıların normal P-P grafiği (aşınma).....	97
Şekil 5.3	: Gerçek değerlere karşılık tahmin edilen değerler (aşınma).....	98
Şekil 5.4	: Standartlaştırılmış kalıntıların dağılımı (aşınma).....	98

Şekil 5.5	: Standartlaştırılmış kalıntıların histogramı (binder).....	101
Şekil 5.6	: Standartlaştırılmış kalıntıların normal P-P grafiği (binder).....	101
Şekil 5.7	: Gerçek değerlere karşılık tahmin edilen değerler (binder).....	102
Şekil 5.8	: Standartlaştırılmış kalıntıların dağılımı (binder).....	102
Şekil 5.9	: Standartlaştırılmış kalıntıların histogramı (TMA).....	105
Şekil 5.10	: Standartlaştırılmış kalıntıların normal P-P grafiği (TMA).....	105
Şekil 5.11	: Gerçek değerlere karşılık tahmin edilen değerler (TMA).....	106
Şekil 5.12	: Standartlaştırılmış kalıntıların dağılımı (TMA).....	106
Şekil 5.13	: Standartlaştırılmış kalıntıların histogramı (mdf. bit. aşınma).....	109
Şekil 5.14	: Standartlaştırılmış kalıntıların normal P-P grafiği (mdf. bit. aşınma).....	109
Şekil 5.15	: Gerçek değerlere karşılık tahmin edilen değerler (mdf. bit. aşınma).....	110
Şekil 5.16	: Standartlaştırılmış kalıntıların dağılımı (mdf. bit. aşınma).....	110
Şekil 5.17	: Sıcaklık farkı ile devir sayısı oranının değişimi (aşınma).....	111
Şekil 5.18	: Sıcaklık farkı ile devir sayısı oranının değişimi (binder).....	112
Şekil 5.19	: Sıcaklık farkı ile devir sayısı oranının değişimi (TMA).....	113
Şekil 5.20	: Sıcaklık farkı ile devir sayısı oranının değişimi (mdf. bit. aşınma)	113
Şekil 5.21	: Bulanık çıkarım sisteminin modeli.....	119
Şekil 5.22	: Sıcaklığın üyelik fonksiyonları (Bütün karışım tipleri için).....	119
Şekil 5.23	: Devir sayısı (LOGD)'nın üyelik fonksiyonları (aşınma).....	120
Şekil 5.24	: Bulanık mantık model yüzeyi (aşınma).....	120
Şekil 5.25	: Devir sayısı (LOGD)'nın üyelik fonksiyonları (binder).....	121
Şekil 5.26	: Bulanık mantık model yüzeyi (binder).....	121
Şekil 5.27	: Devir sayısı (LOGD)'nın üyelik fonksiyonları (TMA).....	122
Şekil 5.28	: Bulanık mantık model yüzeyi (TMA).....	122
Şekil 5.29	: Devir sayısı (LOGD)'nın üyelik fonksiyonları (mdf. bit. aşınma).	123
Şekil 5.30	: Bulanık mantık model yüzeyi (mdf. bit. aşınma).....	123
Şekil 6.1	: Karışımların 45 °C'deki tekerlek izi performansları.....	127
Şekil 6.2	: Tekerlek izi deneylerinden sonra numunelerden alınan kesitler (45 °C).....	128
Şekil 6.3	: Karışımların 50 °C'deki tekerlek izi performansları.....	128
Şekil 6.4	: Tekerlek izi deneylerinden sonra numunelerden alınan kesitler (50 °C).....	128
Şekil 6.5	: Karışımların 55 °C'deki tekerlek izi performansları.....	129
Şekil 6.6	: Tekerlek izi deneylerinden sonra numunelerden alınan kesitler (55 °C).....	129
Şekil 6.7	: Karışımların 60 °C'deki tekerlek izi performansları.....	129
Şekil 6.8	: Tekerlek izi deneylerinden sonra numunelerden alınan kesitler (60 °C).....	130
Şekil 6.9	: Karışımların 65 °C'deki tekerlek izi performansları.....	130
Şekil 6.10	: Tekerlek izi deneylerinden sonra numunelerden alınan kesitler (65 °C).....	130
Şekil 6.11	: Karışımların sıcaklığa bağlı tekerlek izi performansları (5000 devirde).....	131
Şekil 6.12	: Karışımların tekerlek izi oluşum eğimlerinin sıcaklığa bağlı değişimi.....	132
Şekil A.1	: Deney yolu -Waterloo Kanada.....	153
Şekil A.2	: Deney yolu – Japonya.....	153

Şekil A.3	: Deney yolu – NCAT.....	153
Şekil A.4	: Deney yolu - MnROAD Minnesota.....	153
Şekil A.5	: Deney yolu-WesTrack Nevada.....	153
Şekil A.6	: HYS-Porto Alegre, Brezilya.....	154
Şekil A.7	: HYS-Çin.....	154
Şekil A.8	: HYS-Güney Afrika (HVS).....	154
Şekil A.9	: HYS-Avustralya.....	154
Şekil A.10	: HYS-Yeni Zelanda.....	154
Şekil A.11	: HYS-Güney Kore.....	154
Şekil A.12	: HYS-Hollanda.....	154
Şekil A.13	: HYS-Finlandiya-İsveç.....	154
Şekil A.14	: HYS-Japonya.....	155
Şekil A.15	: HYS-Fransa.....	155
Şekil A.16	: HYS-Lozan, İsviçre.....	155
Şekil A.17	: HYS-Zürih, İsviçre.....	155
Şekil A.18	: HYS-Danimarka.....	156
Şekil A.19	: HYS-İspanya.....	156
Şekil A.20	: HYS-Romanya.....	156
Şekil A.21	: HYS-Slovakya.....	156
Şekil A.22	: HYS-TRL, İngiltere.....	156
Şekil A.23	: HYS-Uni. of Ulster, İngiltere.....	156
Şekil A.24	: HYS-California (CAL-APT).....	156
Şekil A.25	: HYS-California (CAL-APT)2.....	156
Şekil A.26	: HYS-Kansas State Uni.....	157
Şekil A.27	: HYS-Texas (MLS).....	157
Şekil A.28	: HYS-Louisiana (ALF).....	157
Şekil A.29	: HYS-WES.....	157
Şekil A.30	: HYS-Florida (HVS).....	157
Şekil A.31	: HYS-FHWA (ALF).....	157
Şekil A.32	: HYS-FAA NAPTF.....	158
Şekil A.33	: HYS-CRREL.....	158
Şekil A.34	: HYS- Ohio (APLF).....	158
Şekil A.35	: HYS- Purdue University.....	158
Şekil A.36	: HYS-Illinois (ATLaS).....	158
Şekil A.37	: HYS-Almanya (BASt).....	158

SEMBOL LİSTESİ

C_v	: Hız düzeltme katsayısı
C_w	: Trafik düzeltme katsayısı
C_θ	: Sıcaklık düzeltme katsayısı
d_{60}	: 60. dakikadaki tekerlek izi derinliği (mm)
d_{45}	: 45. dakikadaki tekerlek izi derinliği (mm)
D	: Devir sayısı
D_p	: Pratik birim hacim ağırlık (g/cm^3)
DS	: Dinamik stabilite (geçiş/mm)
f_i	: P_i dingil yükünün yolu kullanma frekansı
G_I	: Gradasyon (tane dağılımı) indeksi
G^*	: Kompleks modül (kPa)
h	: Bitümlü kaplama kalınlığı
N	: Standart dingil geçiş sayısı
N_{15}	: Son 15 dakikadaki geçiş sayısı ($15 \cdot 42 = 630$)
P_i	: Dingil yükü ağırlığı
R	: Tahmin edilecek tekerlek izi miktarı (mm)
R_0	: Referans deney koşullarındaki (T_0, N_0) referans tekerlek izi miktarı (mm)
S	: Deney sıcaklığı ($^{\circ}C$)
S_b	: Bitüm rijitliği (Pa)
S_m	: Karışım rijitliği (Pa)
t	: Geçiş (yükleme) süresi (sn)
T	: Sıcaklık ($^{\circ}C$)
TI	: Tekerlek izi (%)
V_a	: Boşluk oranı (%)
V_b	: Bağlayıcı oranı (%)
VFA	: Asfaltla dolu boşluk yüzdesi (%)
VMA	: Agregalar arası boşluk yüzdesi (%)
W	: Toplam trafik (eşdeğer dingil) yükü
Δh	: Tabaka kalınlığındaki azalma
ΔRD_{it}	: t zamanında i bölgesindeki tekerlek izi derinliği
ΔRD_{it}^{AC}	: t zamanında i bölgesinde asfalt betonundaki tekerlek izi derinliği
ΔRD_{it}^u	: t zamanında i bölgesinde alt tabakalardaki tekerlek izi derinliği
β_{ri}	: Asfalt karışımlar için tekerlek izi modeli düzeltme katsayıları
δ	: Faz açısı
ε_p	: Kalıcı deformasyon (birim şekil değiştirme)
ε_r	: Geri dönen şekil değiştirme
γ_p	: Maks. kalıcı kayma deformasyonu
λ	: Birinci bölgedeki kalıcı deformasyon oranı
η	: Bitüm viskozitesi (Pa.s)
σ_{av}	: Ortalama gerilme

BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA TEKERLEK İZİ OLUŞUMUNUN MODELLENMESİ

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 oluşumuyla ilgili olarak, dünyada birçok bilimsel çalışma yapılmış, performans ölçütleri belirlenmiş ve çeşitli tahmin modelleri geliştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda belirlenen performans ölçütlerinin, yalnızca mevcut deney koşulları için geçerli olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, belirlenen performans ölçütlerinin ve geliştirilen modellerin farklı koşullarda kullanılması uygun olmamaktadır.

Bu çalışmada, karayollarımızda kullanılan bitümlü kaplama tiplerinin (asfalt betonu aşınma, binder, TMA aşınma ve modifiye bitümlü aşınma) tekerlek izi oluşma potansiyellerinin incelenmesi, Türkiye koşulları için geçerli olabilecek performans ölçütlerinin belirlenmesi ve tahmin modellerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçlara yönelik olarak, karayollarımızda kullanılan bitümlü kaplama tiplerinin arazideki tekerlek izi performansları, laboratuvar koşullarında incelenip değerlendirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, ilk olarak konuya giriş yapılmış ve bitümlü sıcak karışımların tekerlek izi performanslarının ölçülmesinde izlenecek yöntem açıklanmıştır.

İkinci bölümde, tekerlek izi oluşum süreci, oluşum şekilleri ve etkili faktörler ayrıntılı olarak anlatılmış, ölçümü ve onarımı genel çerçevesiyle ortaya konulmuştur. Ayrıca, tekerlek izini azaltmaya yönelik dünyadaki bazı uygulamalardan söz edilmiştir. Yine bu bölümde, tekerlek izi tahmini için yapılan çalışmalar incelenmiş, geliştirilen deney cihazları, hızlandırılmış yükleme sistemleri ve deney yolları tanıtılmıştır. Bu bölümün sonunda, çeşitli tekerlek izi tahmin modellerine yer verilmiştir.

Üçüncü bölüm arazi çalışmalarından oluşmaktadır. Bu bölümde, tekerlek izi numunelerinin ve karotların alınması anlatılmış, numunelerin alındığı kesimlerdeki tekerlek izi ölçümleri ile bu kesimlere ait malzeme ve karışım özellikleri verilmiştir. Ayrıca, bu kesimlere ait trafik değerleri de hesaplanmıştır.

Çalışmanın deneysel kısmının yer aldığı dördüncü bölümde, tekerlek izi numunelerine uygulanan tekerlek izi deneyleri, karotlara uygulanan statik sünme, dinamik (tekrarlı) sünme, dolaylı çekme modülü deneyleri ve bunların sonuçları sunulmuştur.

Beşinci bölümde, tekerlek izi oluşumu, regresyon analizi ve bulanık mantık modelleme yöntemleriyle modellenmiştir. Kurulan regresyon modelleri irdelenmiş

ve bulanık mantık modelleriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, kovaryans analizi de yapılmıştır.

Altıncı bölümde, yapılan arazi ve laboratuvar çalışmaları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu bölümde, karışımların tekerlek izi oluşma potansiyelleri karşılaştırılmış, arazideki ve laboratuvardaki tekerlek izi oluşma uyumu incelenmiş, laboratuvar sonuçlarına göre kaplama performansının (ömrünün) tekerlek izi yönünden tahmini yapılmıştır. Ayrıca, tekerlek izi ile statik ve dinamik (tekrarlı) sünme uyumu değerlendirilmiştir.

Çalışma, yedinci bölüm olan sonuçlar ve öneriler kısmıyla tamamlanmıştır.

MODELING OF RUTTING IN BITUMINOUS HOT MIXTURES

SUMMARY

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.

Many scientific researches have been done about rutting, performance criteria have been determined and various rutting prediction models have been developed in the world. As known, the performance criteria determined at the result of experimental studies are valid at the current experimental conditions only. Consequently, to use same performance criterion and prediction model under different conditions is not reasonable.

In this study, investigation of the rutting potential of bituminous pavement types practiced in our highways (conventional wearing course, binder course, SMA (Stone Mastic Asphalt) wearing course and modified bituminous wearing course), determination of performance criteria and development of rutting prediction model for conditions in Turkey are aimed. To attain these purposes, field rutting performances of bituminous pavement types practiced in our highways have been investigated and evaluated in laboratory conditions.

In the scope of this study, firstly, introduction to rutting has been done and the method for evaluating rutting performances of bituminous hot mixtures has been explained.

In the second chapter, rutting mechanism, types and effectual factors have been explained in detail and rutting measurement and repairing have generally been expressed. Besides, some practices devoted to reduce rutting have been mentioned. In addition, researches carried out for rutting prediction have been investigated. Rutting test equipments, accelerated loading facilities and test roads have been introduced. At the last of this chapter, various rutting prediction models have been presented.

The third chapter has consisted of field studies. In this chapter, cutting out of the rutting specimens and cores have been explained, rut depth measured on the pavement surface from where specimens have been cut out and material - mixture properties of pavement types have been presented. As well, the traffic values belonging to these parts of road have been calculated.

In the fourth chapter, that is experimental part of this study, the results of rutting tests performed at the rutting specimens and static creep, dynamic (repeated) creep and indirect tensile modulus tests performed at the cores have been presented.

In the fifth chapter, rutting has been modeled by using of regression analysis and fuzzy logic. Regression models developed have been examined and compared with fuzzy logic models. Besides, covariance analysis has been done.

In the sixth chapter, the laboratory studies have been compared with the field studies and the results have been evaluated. The rutting potential of pavement types has been compared with the others, the rutting compliance in laboratory and field has been investigated, and the pavement performance (life of the pavement) in point of rutting has been predicted according to laboratory test results. As well, rutting test results have been compared with the result of static and dynamic (repeated) creep tests.

This study has been completed with seventh chapter that consisted of conclusions and suggestions.

1. GİRİŞ

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. Yapılan deneysel çalışmalarda belirlenen performans ölçütlerinin, yalnızca mevcut deney koşulları için geçerli olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, belirlenen performans ölçütlerinin ve geliştirilen modellerin farklı koşullarda kullanılması uygun olmamaktadır.

Bu çalışmada, karayollarımızda kullanılan bitümlü kaplama tiplerinin (asfalt betonu aşınma, binder, TMA (Taş Mastik Asfalt) aşınma ve modifiye bitümlü aşınma)

tekerlek izi oluşma potansiyellerinin incelenmesi, Türkiye koşulları için geçerli olabilecek performans ölçütlerinin belirlenmesi ve tahmin modellerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçlara yonelik olarak, karayollarımızda kullanılan bitümlü kaplama tiplerinin arazideki tekerlek izi performansları, laboratuvar koşullarında incelenip değerlendirilmiştir.

Herhangi bir kaplamanın arazideki tekerlek izi performansı ile laboratuvardaki tekerlek izi deney sonuçlarının karşılaştırılmasında üç durum söz konusudur (Aschenbrener, 1994):

Birinci durumda, yeni yapılmış bir kaplamadan alınan numunelere laboratuvarda tekerlek izi deneyleri uygulanır. Aynı zamanda, kaplamanın arazideki tekerlek izi performansı gözlenmeye başlanır. Bu durumda, kaplamanın laboratuvardaki ve arazideki tekerlek izi performansının karşılaştırılması için uzun süre gereklidir. Bu durumun diğer bir olumsuz yanı, laboratuvar numunelerinin araziye uygun olarak yaşlanmamış olmasıdır (Aschenbrener, 1994).

İkinci durumda, daha önce yapılıp trafiğe açılmış ve arazideki tekerlek izi performansı bilinen kaplamayla, bu kaplamanın bileşimindeki malzemelerin ve aynı karışım formülünün kullanılmasıyla elde edilen laboratuvar numunelerinin tekerlek izi performansı karşılaştırılabilir. Bu durumun olumsuz yönleri, laboratuvar numunelerinin, arazideki gerçek yapım ve yükleme koşulları ile malzemeye ilgili oluşabilecek değişimleri yansıtamaması, araziye uygun olarak yaşlanmamış olması ve dolayısıyla arazideki kaplamayı temsil edememesidir (Aschenbrener, 1994).

nc durumda ise, yine daha önce yapılıp trafiğe açılmış ve arazideki performansı bilinen kaplamayla, bu kaplamadan alınan numunelerin tekerlek izi performansları karşılaştırılabilir. Bu durumun olumsuz yönü, araziden alınan numunelerin yaşlanmış olmasıdır. Bitümlü bağlayıcının yaşlanması ve daha rijit hale gelmesi, tekerlek izi oluşumunun temel nedenleri arasında değildir (Aschenbrener, 1994).

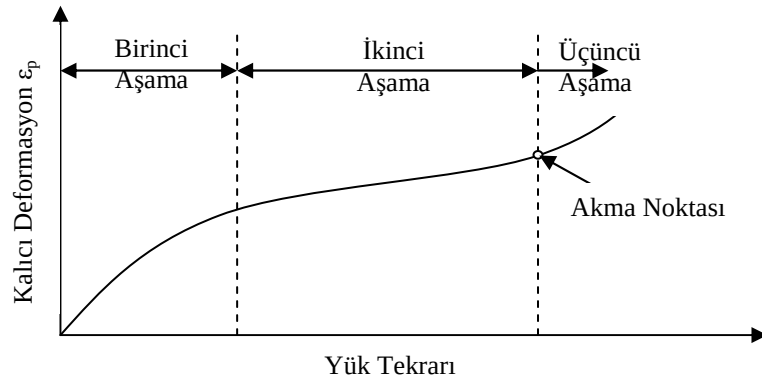
Laboratuvar koşullarının araziye yansıması bakımından, üçüncü durumdaki hatanın en az olduğu dşnlmştır (Aschenbrener, 1994). Dolayısıyla bu çalışma kapsamında da yukarıda sözü edilen üçüncü durum dikkate alınmıştır.

2. TEKERLEK İZİ OLUŞUMU

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.

2.1 Giriş

Bitümlü kaplama malzemelerinin yükleme ve çevre koşulları altındaki kalıcı deformasyon davranışlarında üç farklı aşama bulunmaktadır (Şekil 2.1).

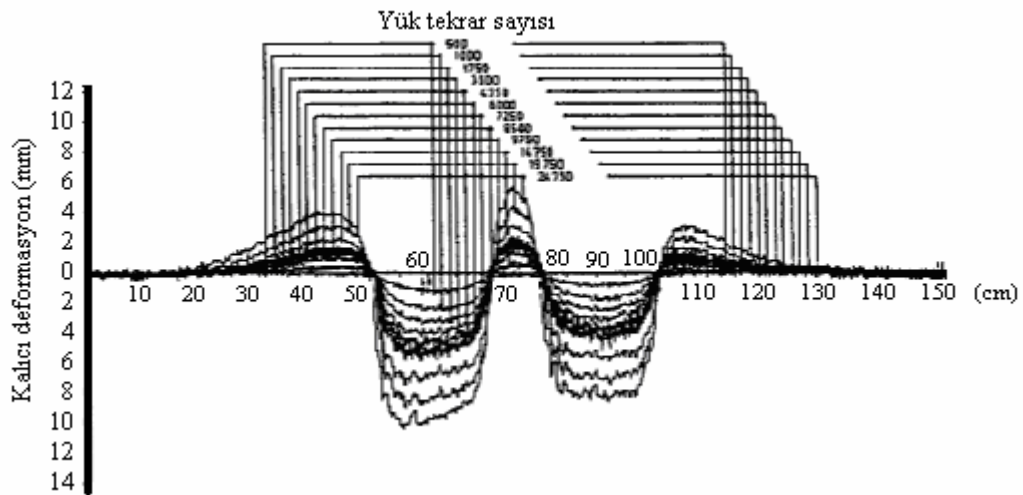


Şekil 2.1: Kaplama malzemelerinin tipik tekrarlı yüklemeli kalıcı deformasyon davranışı (Witczack ve El-Basyouny, 2004)

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 değişim olmaksızın, 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

Eisenmann ve Hilmer 1987’de tekerlek izi oluşumunun ana nedeninin, hacim değişimi olmaksızın kayma deformasyonları olduğunu belirlemişlerdir. Yaptıkları çalışmada yük tekrar sayısının tekerlek izi oluşumu üzerindeki etkisini incelemişlerdir (Şekil 2.2) (Sousa ve diğ.,1991). Elde ettikleri sonuçlara bağlı olarak oluşturdukları model, tahmin modelleri kısmında verilmiştir.

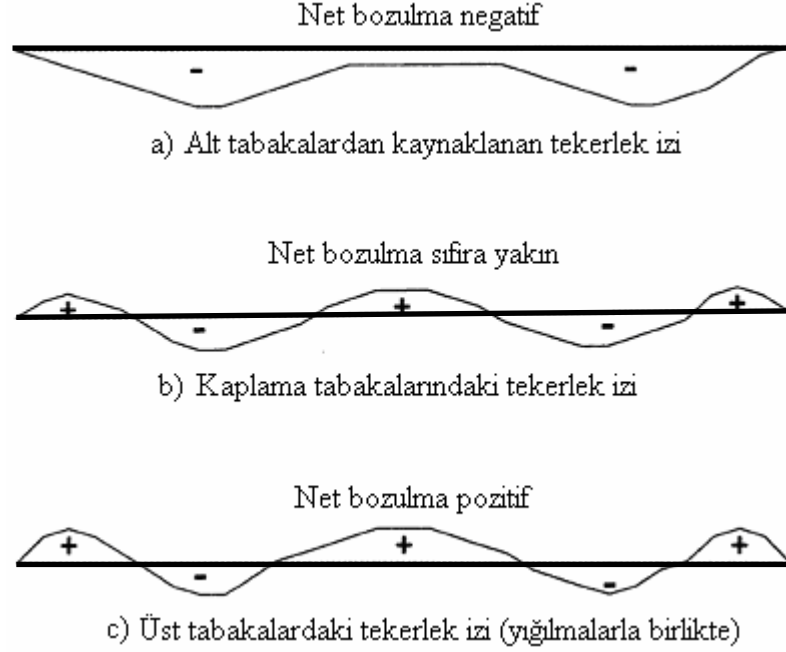


Eisenmann ve Hilmer tekerlek izi oluşumunun iki aşamada gerçekleştiği sonucuna varmışlardır. Birinci aşamada, tekerlek altındaki kısımda oluşan kalıcı deformasyon, kenarlardaki yükselmelerden oldukça büyüktür. Bu aşamada trafiğin sıkıştırması tekerlek izi oluşumunda daha etkilidir. İkinci aşamada, tekerlek 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 ve diğ.,1991).

4

2.2 Tekerlek İzi Oluşum Şekilleri

Esnek yol üstyapılarında görülen ve farklı nedenlerle oluşan bozulma türleri Şekil 2.3.a,b,c’de basit olarak görülmektedir. Zamanla oluşan farklı deformasyonlar, yolun yapımından sonraki üst yüzeyi referans alınarak, “net bozulma” ile ifade edilmiştir.



Şekil 2.3.a,b,c: Üstyapıda görülen bozulma şekilleri (Hadley, 1994)

Net bozulmanın negatif olması çökmelerin, pozitif olması ise kabarmaların daha fazla olduğunu göstermektedir. Net bozulma, bozulmanın nedeni hakkında (kesin olmamakla birlikte) genel bir bilgi vermektedir.

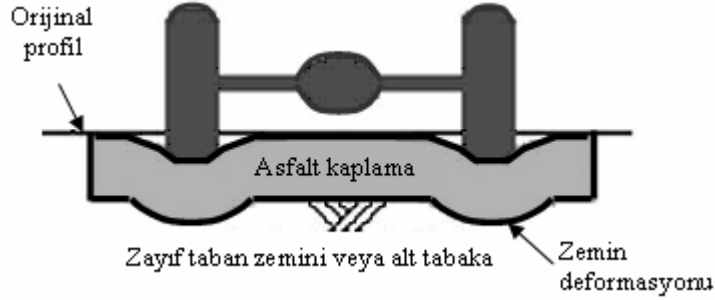
Farklı nedenlere bağlı olarak dört çeşit tekerlek izi oluşum şekli vardır. Bunlar;

- yapısal tekerlek izi,
 - akma tekerlek izi,
 - aşınma tekerlek izi,
 - oturma (konsolidasyon -sıkışma) tekerlek izi
- } Yüzeysel tekerlek izi

2.2.1 Yapısal Tekerlek İzi

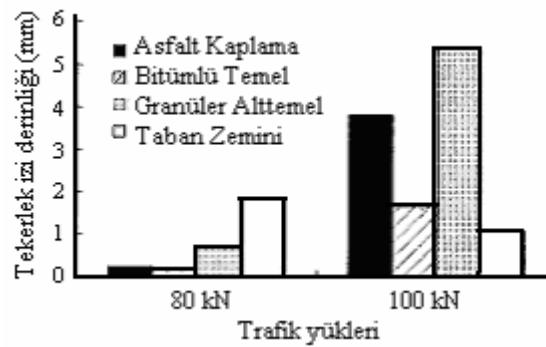
Bitümlü tabakanın altındaki (taban zemini dahil) bir veya daha fazla tabakanın kendi içlerindeki deformasyonlarının sonucudur. Bunun nedeni, yükten dolayı oluşan gerilmelerin malzeme dayanımını aşmasıdır. Bu durumda, tekerlek izinin etrafında kabarmalar oluşmaz (Şekil 2.4) (Verstraeten, 1995).

Bu tip tekerlek izi oluşumu genellikle gerçekteki trafik koşullarına uygun tasarlanmamış üstyapılarda görülür. Aynı zamanda uygun olmayan (düşük kaliteli) malzemenin kullanılmasından, malzemenin iyi sıkıştırılmamasından, kötü drenajdan, donma ve çözülme etkilerine karşı önlem alınmamasından da kaynaklanabilir (Verstraeten, 1995).



Şekil 2.4: Yapısal tekerlek izi

Şekil 2.5'te esnek üstyapıyı oluşturan tabakaların (15 cm asfalt betonu, 20 cm bitümlü temel, 30 cm granüler alttemel) tekerlek izi oluşumundaki katkıları görülmektedir. Yük miktarı belirli bir sınırın üzerine çıktığında, yüzeydeki asfalt betonu tabakada tekerlek izi derinliği oldukça artmıştır. Bunun nedeni yüzeyde oluşan aşırı gerilme yoğunlaşmasıdır. Bitümlü temelde tekerlek izinin daha az görülmesi dikkat çekicidir (Chen ve diğ., 2004). Bunun nedeni, gerilmelerin çoğunun asfalt kaplama tarafından karşılanması ve aktarılan gerilmenin bitümlü temelin taşıyabileceği düzeye inmesi olarak açıklanabilir. Granüler alttemel tabakasında da ağır yükler altında oldukça fazla tekerlek izi oluşmuştur.



Şekil 2.5: Esnek üstyapı tabakalarının tekerlek izi oluşumundaki katkıları (Deney yolu, Taiwan) (Chen ve diğ., 2004)

Benzer bir durum, daha önce AASHO yol deneyinde de gözlenmiştir. Ullidtz, taban zemininde oluşan tekerlek izinin, toplam tekerlek izi miktarının yalnızca %9'u olduğunu belirtmiştir. Diğer tabakaların katkıları ise Tablo2.1'de verilmiştir (Salama, 2005).

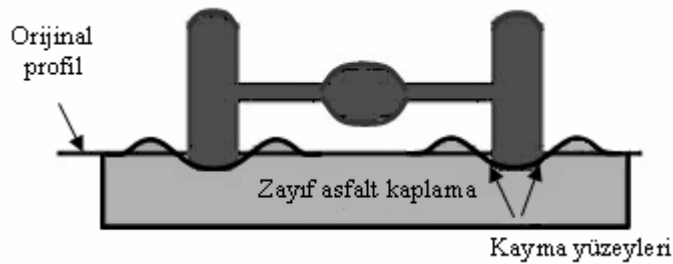
Tablo 2.1: Tabakaların tekerlek izi oluşumundaki katkıları (Salama, 2005)

Tabaka	Tekerlek İzi Miktarı (%)
Asfalt Betonu	32
Granüler Temel	14
Alttemel	45
Taban Zemini	9

Salama (2005), toplam tekerlek izi miktarının %57'sinin asfalt betonunda, %27'sinin granüler temel tabakasında ve %16'sının da taban zemininde oluştuğunu belirlemiştir.

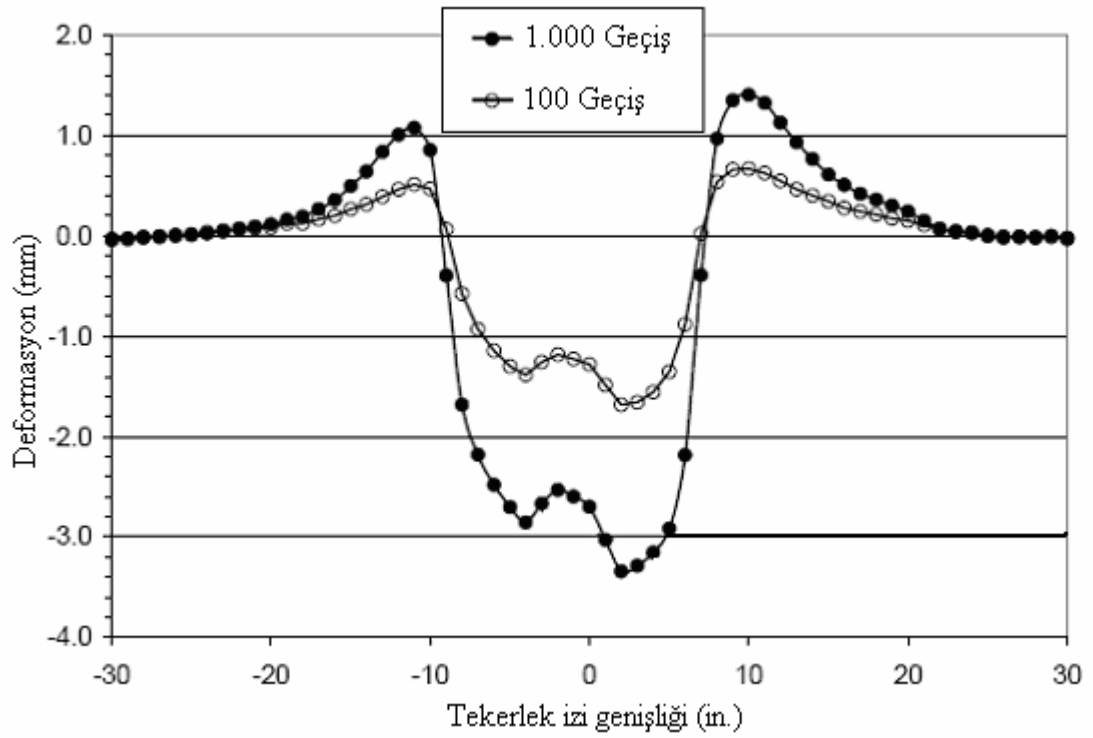
2.2.2 Akma Tekerlek İzi

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



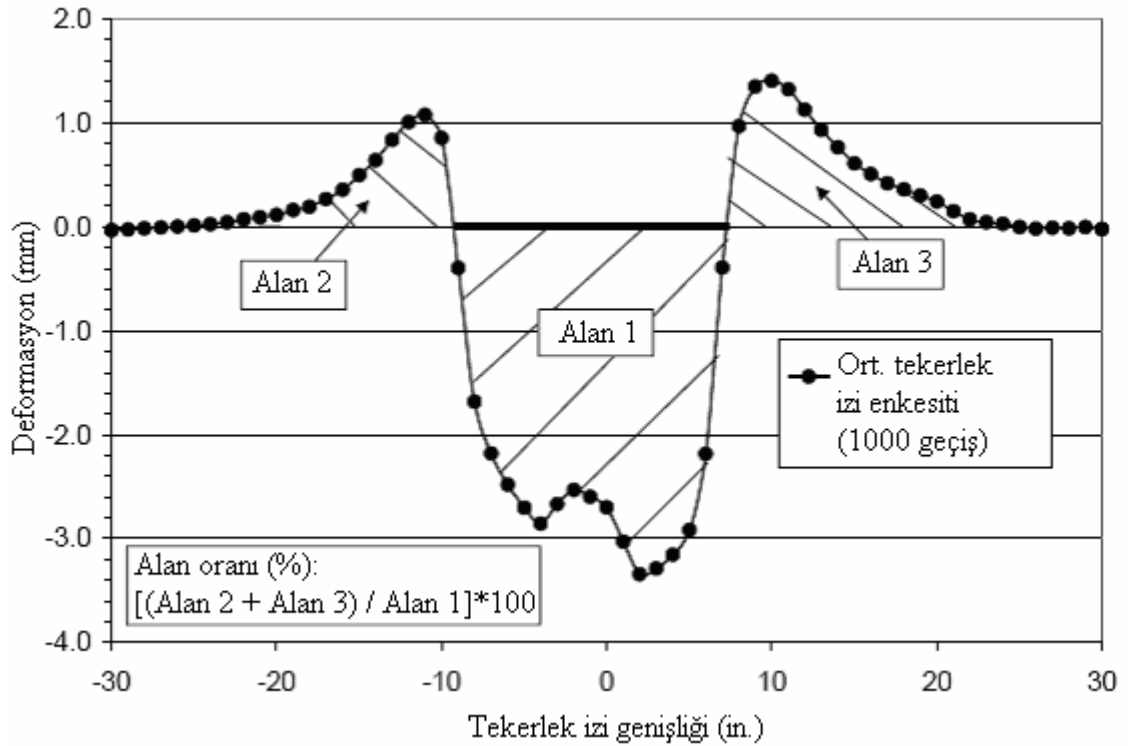
Şekil 2.6: Akma tekerlek izi

Yük tekrarının artmasıyla deformasyonların ilerlemesi ve dolayısıyla akma tekerlek izinin oluşum süreci Şekil 2.7'de görülmektedir. Yük tekrar sayısı arttığında, tekerleğin altındaki kısımlarda çökmeler, kenarlarda ise yükselmeler artar.



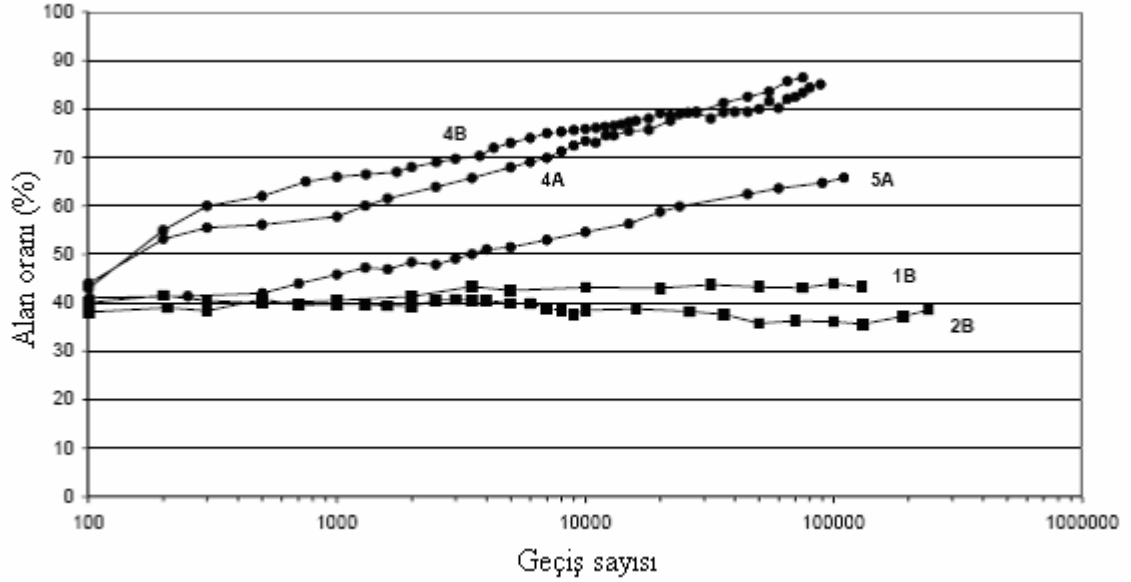
Şekil 2.7: Geçiş sayılarına göre oluşan ortalama tekerlek izi enkesiti (HVS, 50 °C) (Novak, 2007)

Belirli bir geçiş sayısına karşılık oluşan ortalama tekerlek izi enkesitinde, referans yol yüzeyine göre oluşan çökme ve kabarma alanları Şekil 2.8’de görülmektedir.



Şekil 2.8: Tekerlek izi enkesitinde oluşan alanlar (HVS, 50 °C) (Novak, 2007)

Alan oranı, yükselme alanlarının toplamının çökme alanına oranı olarak tanımlanır. Geçiş sayısına bağlı olarak alan oranının değişimi Şekil 2.9'da görülmektedir. Modifiye edilmemiş karışımlarda (4A, 4B, 5A), geçiş sayısının artmasıyla alan oranı artmaktadır. Bu durum, akma tekerlek izi oluşumunda kayma deformasyonlarının daha etkili olduğunun bir göstergesidir.



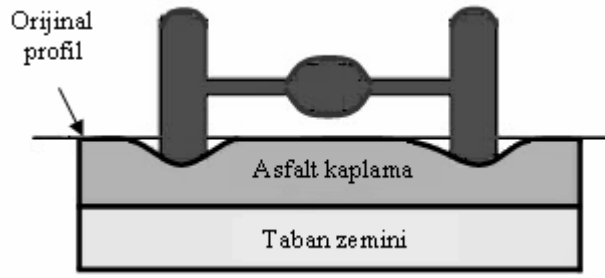
Şekil 2.9: Alan oranının geçiş sayısına göre değişimi (HVS, 50 °C) (Novak, 2007)

2.2.3 Aşınma Tekerlek İzi

Yüzeysel tekerlek izi tiplerinden olan aşınma tekerlek izi, kışın çivili tekerleklerin kullanılmasından dolayı, yüzeydeki agregaların aşınması nedeniyle oluşur (Şekil 2.10). Özellikle çivili tekerleklerin kullanıldığı kuzey Avrupa ülkelerinde görülmektedir. Bu tip tekerlek izinde göz önüne alınacak parametre agrega sertliğidir (Verstraeten, 1995).

Çivili tekerlekler, Finlandiya, Norveç ve Romanya'da ağır taşıtlarda kullanılmaktadır (Bowskill ve diğ., 1999). Olumsuz etkisi görüldükten sonra, bu tekerleklerin kullanılması sınırlandırılmış veya yasaklanmıştır (Verstraeten, 1995). Norveç, İsveç ve Finlandiya daha hafif çivilerin kullanılmasına izin vermişlerdir. Romanya'da metal çivilerden lastik çivilere geçiş yapılmıştır. ABD'de ise bazı eyaletlerde yalnızca hafif çivilerin kullanılmasına izin verilmiştir (Bowskill ve diğ., 1999).

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 ve diğ., 1999).



Şekil 2.10: Aşınma ve oturma tekerlek izi

2.2.4 Oturma (Konsolidasyon – Sıkışma) Tekerlek İzi

Dördüncü tip, oturma nedeniyle oluşan tekerlek izidir. Bu da yüzeysel tekerlek izi sınıfına girer. Aşınma tekerlek iziyle aynı şekle sahiptir (Şekil 2.10). 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 eğilimlidir. Bu tip tekerlek izinde kenarlarda kabarma oluşmaz (Verstraeten, 1995).

2.3 Tekerlek İzi 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 zemini 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 trafikten 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 plentleri, karışımda 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 ve diğ., 1990).

Sousa ve diğ. (1991)' nin raporunda, asfalt betonu karışımlarında tekerlek izi oluşumunu etkileyen faktörler Tablo 2.2'de özet olarak verilmiştir. Tabloda, faktörlerdeki değişimin tekerlek izi dayanımına etkisi görülmektedir.

Tablo 2.2: Asfalt betonu karışımlarda tekerlek izi oluşumunu etkileyen faktörler (Sousa ve diğ., 1991)

	Faktör	Faktördeki Değişim	Faktördeki Değişimin Tekerlek İzi Dayanımına Etkisi
Agrega	Yüzey Dokusu	Düzgün → Pürüzlü	Artma
	Tane Dağılımı	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 Değiştirme	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.

Bu tez çalışmasında, bitümlü sıcak karışımlardaki tekerlek izi oluşumunda etkili faktörler, dış faktörler ve iç faktörler olmak üzere iki gruba ayrılmıştır.

Dış faktörler:

- Araç faktörleri (dingil yükü, tekerlek lastiği iç basıncı, yükleme hızı vb.)
- İklim koşulları (sıcaklık, yağış, donma ve çözülme)
- Yol geometrik parametreleri (eğim, kurb yarıçapı)

İç Faktörler:

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

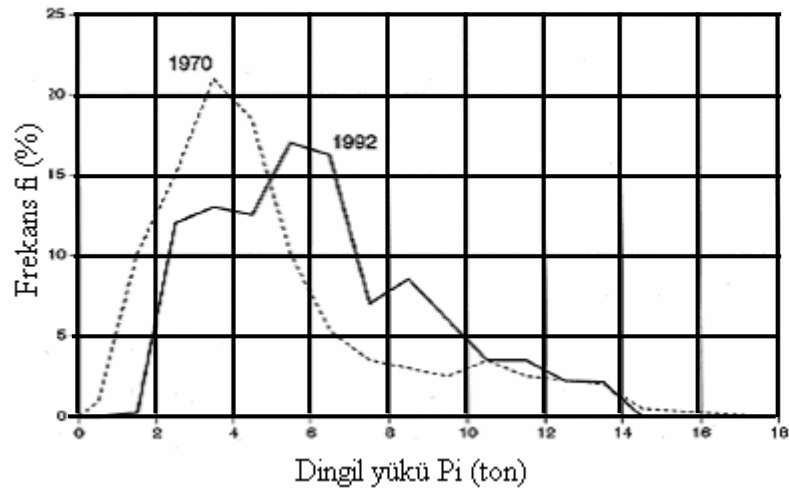
2.3.1 Dış Faktörler

Araç faktörleri, iklim koşulları ve yol geometrik parametreleri dış faktörlerdir.

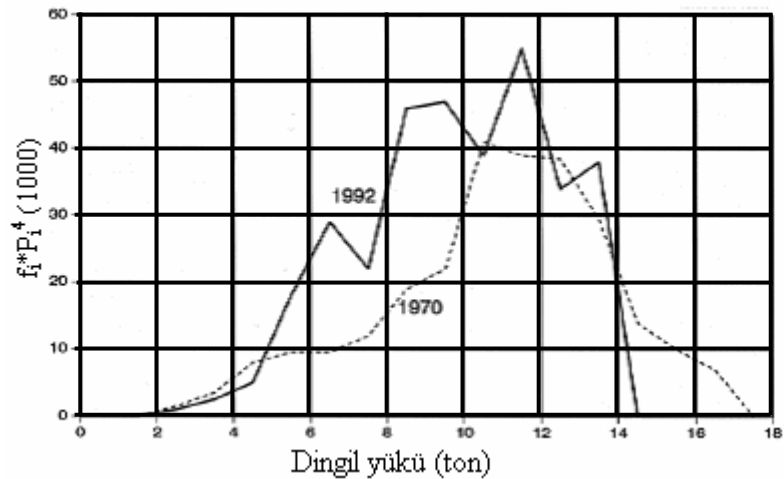
2.3.1.1 Araç Faktörleri

Üstyapıların tasarımında göz önünde bulundurulana 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 artırmıştır.

Belçika’da yapılan bir araştırmada dingil yükleri dağılımları ve bunların yolda oluşturdukları hasarlar incelenmiştir. Şekil 2.11’de 1970 ve 1992 yıllarında yüksek hacimli yollarda gözlenen dingil yükü dağılımlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 2.12’de de, aynı yıllar için bu yüklere karşılık gelen hasar etkileri gösterilmiştir (Verstraeten, 1995).



Şekil 2.11: Dingil yükü dağılımları (Belçika) (Verstraeten, 1995)

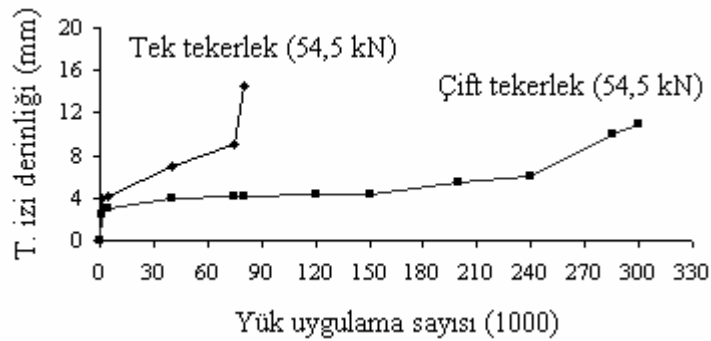


Şekil 2.12: Dingil yüklerinin bozulmaya etkileri (Belçika) (Verstraeten, 1995)

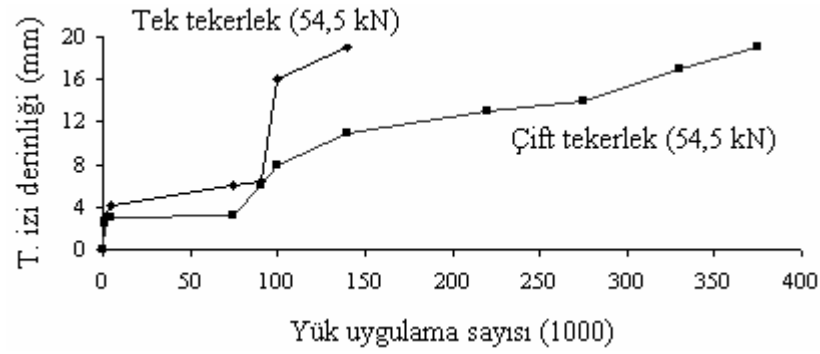
Burada bozulma $f_i * P_i^4$ ile hesaplanır. f_i ; P_i dingil yükünün yolu kullanma frekansıdır. Şekil 2.11’de görüleceği üzere, 1970’ten 1992’ye gelindiğinde, hafif ve çok ağır dingil yüklerinin oluşma frekansları azalmış, buna karşılık orta ağırlıktaki dingil yüklerinin frekansı (yolu kullanma oranı) 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 yükleme koşullarının hasar oluşturma etkisi 1970 yılındakinden hemen hemen 2 kat daha fazla olduğu $f_i * P_i^4$ lerin toplamından görülmektedir (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 (19t) 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 küçüktür. 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 (Şekil 2.13, Şekil 2.14) (Verstraeten, 1995).

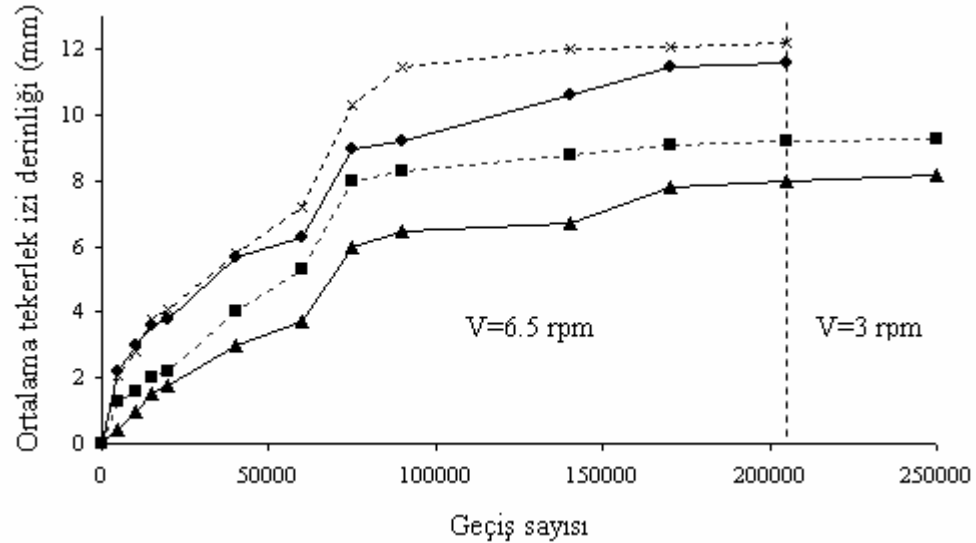


Şekil 2.13: Tek ve çift tekerleğin tekerlek izi üzerindeki etkileri (89 mm asfalt) (Hızlandırılmış test, ALF, FHWA, Washington D.C.) (Verstraeten, 1995)



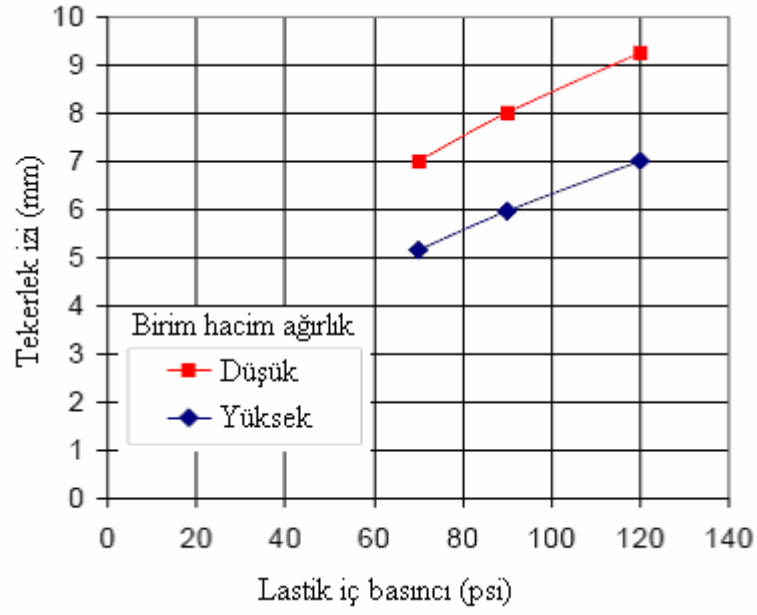
Şekil 2.14: Tek ve çift tekerleklerin tekerlek izi üzerindeki etkileri (178 mm asfalt) (Hızlandırılmış test, ALF, FHWA, Washington D.C.) (Verstraeten, 1995)

Fransa (LCPC Laboratoire Central des Ponts et Chaussées)'da hızlandırılmış yüklemelerin uygulandığı dairesel test kesiminde, çift tekerlekli ve geniş tabanlı tek tekerlekli iki yükleme grubunun aynı anda uygulanmasıyla (farklı yarıçaplarda), trafik hızındaki (yükleme hızındaki) farkın etkisi değerlendirilmiştir. Yükleme 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 ve diğ., 1994) (Şekil 2.15).



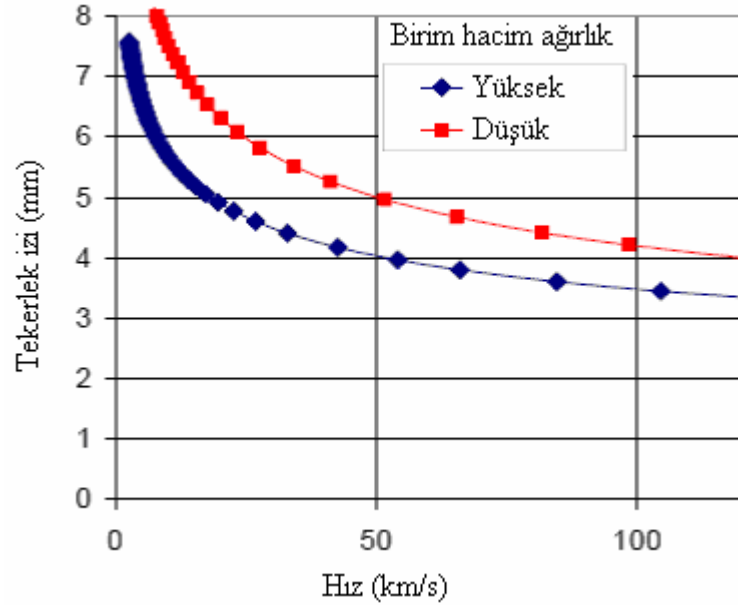
Şekil 2.15: Tek ve çift tekerleklerin akma tekerlek izi üzerindeki etkileri (Hızlandırılmış test, LCPC) (Verstraeten, 1995)

Yukarıda da belirtildiği gibi, lastik iç basıncındaki artış tekerlek izini artırır (Şekil 2.16). (Şekildeki birim hacim ağırlıklar arasında yaklaşık 64 kg/m^3 'lük fark vardır.)



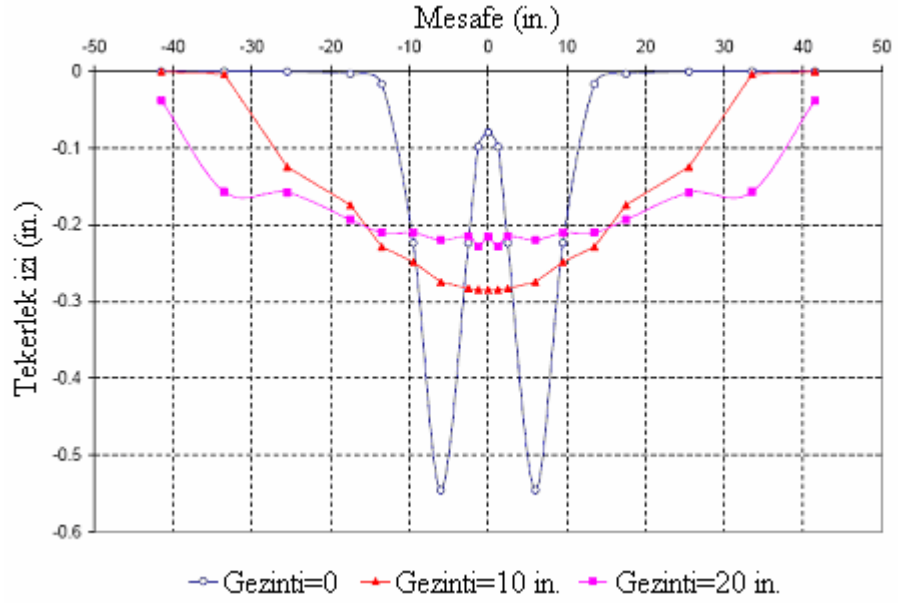
Şekil 2.16: Lastik iç basıncının tekerlek izi üzerindeki etkisi (White ve diğ., 2003)

Şekil 2.17’de de trafik hızının tekerlek izi oluşumuna etkisi görülmektedir. Yüksek hızlarda daha az tekerlek izi oluşmaktadır.



Şekil 2.17: Trafik hızının tekerlek izi oluşumuna etkisi (White ve diğ., 2003)

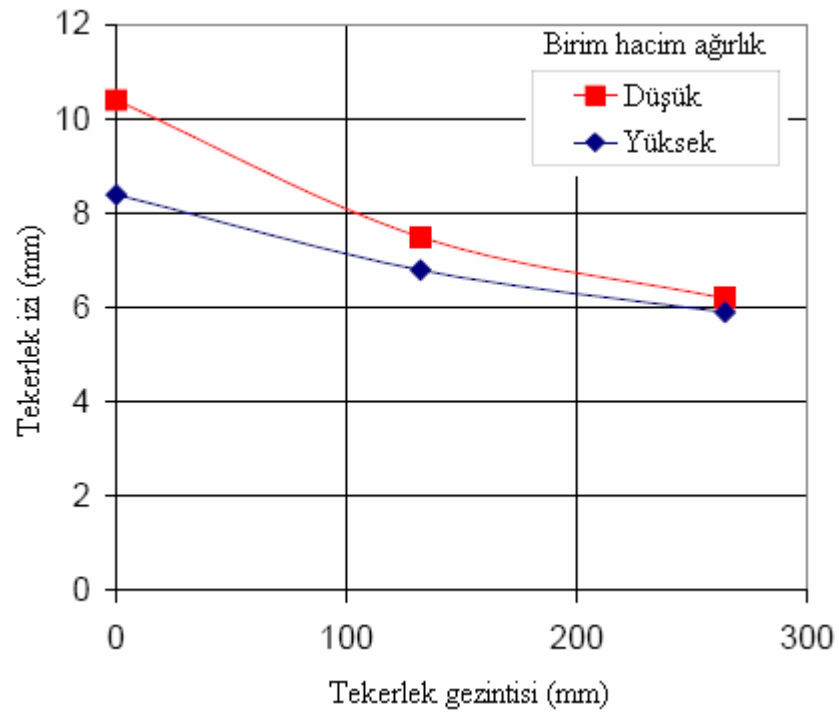
Taşıt tekerleklerinin trafik şeridi içerisinde takip ettikleri izin genişliği olarak tanımlanan “gezinti” miktarı da tekerlek izi oluşumuna etki eder. Taşıtların büyük bir kısmının aynı noktalardan geçmesi, gezinti miktarının az olduğunu gösterir. Gezinti miktarı arttığında yük daha geniş bir alana yayıldığı için, tekerlek izi derinliği azalır (Şekil 2.18, Şekil 2.19 ve Şekil 2.20).



Şekil 2.18: Gezinti miktarına göre tekerlek izi oluşumu (Witczack ve El-Basyouny, 2004)



Şekil 2.19: Gezinti miktarına göre tekerlek izi oluşumu (enkesit) (White ve diğ. 2003)



Şekil 2.20: Gezinti miktarının tekerlek izi oluşumuna etkisi (White ve diğ. 2003)

Trafiğin durma noktasına geldiği, dolayısıyla yükleme 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 2.3'te görülmektedir (Juhasz, 2005). Kandhal ve diğ. (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).

Tablo 2.3: 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

2.3.1.2 İklim Koşulları

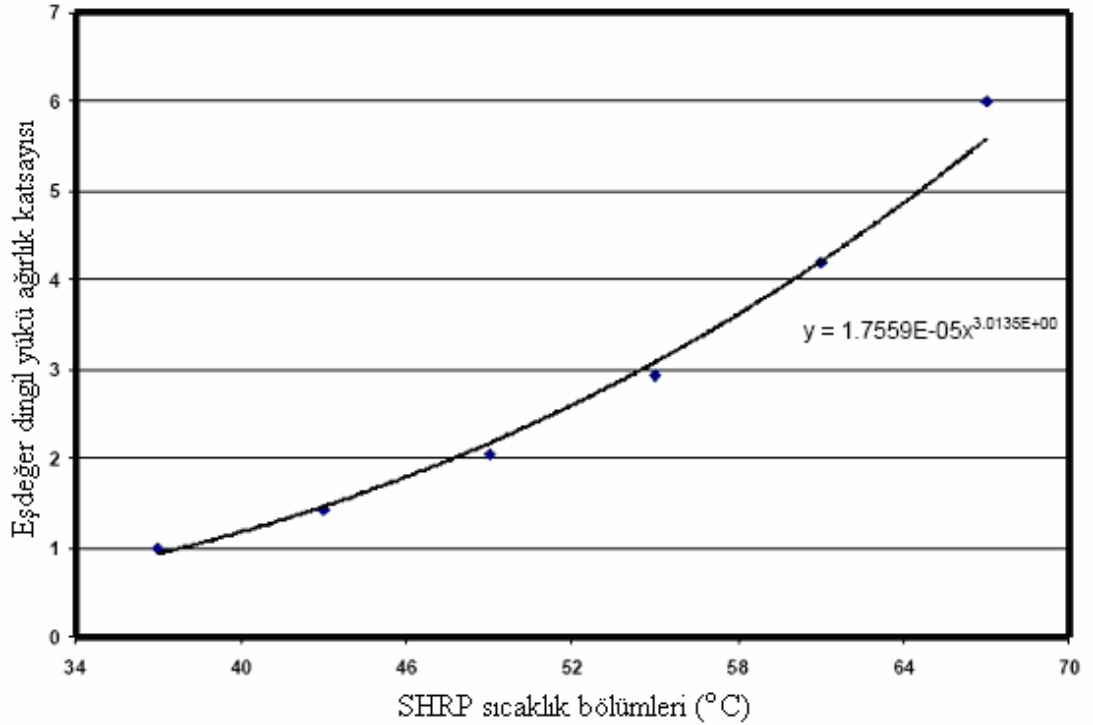
Yüksek sıcaklık, yağış, nem ve donma - çözülme gibi iklim koşullarına bağlı değişkenler tekerlek izi oluşumunda önemli faktörlerdir.

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. Brosseaud ve diğ. (1993) yaptıkları deneylerde, 50⁰C'de 100.000 devirde oluşan tekerlek izi oranı ile 60⁰C'de 10.000 devirdeki tekerlek izi oranının yaklaşık eşit olduğunu saptamışlardır.

Aschenbrener (1994), farklı sıcaklıklara sahip 3 bölge için, sıcaklığa karşı kaplamanın tekerlek izi davranışını daha iyi temsil etmesi bakımından, 3 farklı deney

sıcaklığı (40, 50 ve 60°C) önermiştir. Collins ve diğ. (1996) de tekerlek izi deneylerinde bu üç sıcaklığı kullanmışlardır. Choubane ve diğ. (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. SHRP sıcaklık bölümlerinin orta noktaları temel alınarak, farklı sıcaklıklardaki eşdeğer dingil yükü ağırlık katsayıları belirlenmiştir (Şekil 2.21) (Powell, 2008).



Şekil 2.21: 37 °C'den yüksek kaplama sıcaklıklarına göre eşdeğer dingil yükü ağırlık katsayıları (Powell, 2008)

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

2.3.1.3 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.

Şekil 2.22’de küçük yarıçaplı bir kurbada oluşan tekerlek izi görülmektedir. Gidiş yönündeki iki şeritte de tekerlek izinin görülmesi, ağır taşıtlardan çok teğetsel gerilmelerin daha etkili olduğunu göstermektedir (www.asphaltwa.com).



Şekil 2.22: Küçük yarıçaplı kurbada oluşan tekerlek izi (www.asphaltwa.com)

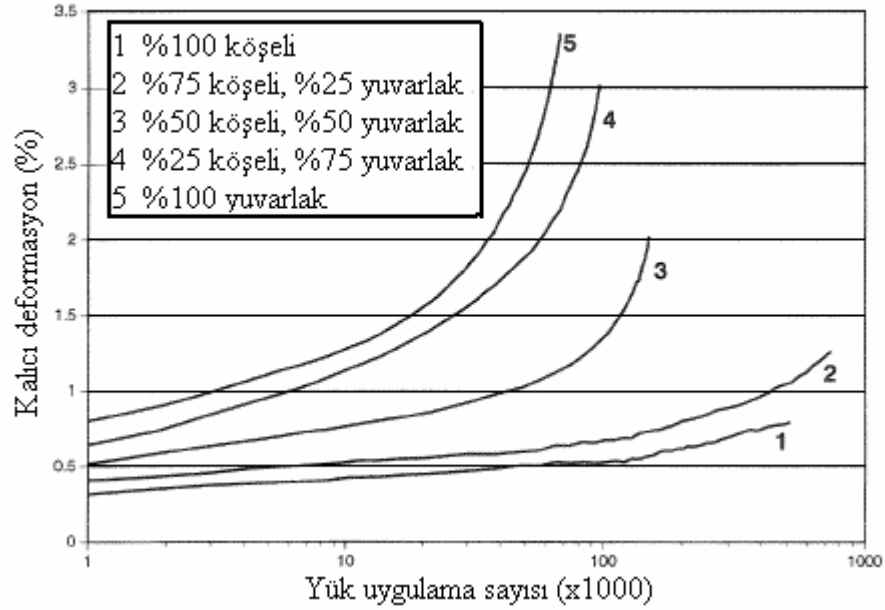
2.3.2 İç Faktörler

Agrega, bitümlü bağlayıcı, bitümlü sıcak karışım bileşimi ile tasarım ve yapım hataları iç faktörler olarak incelenmiştir.

2.3.2.1 Agregas

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 (yassı) agregaların aşınma tabakalarında kullanılması, tekerlek izine dayanımı azaltır (Ağar, 1999).

Vanelstraete ve Francken (1995) agrega şekline bağlı olarak, karışımların kalıcı deformasyon davranışlarını dinamik üç eksenli basınç deneyi ile incelemişlerdir (Şekil 2.23). En az kalıcı deformasyon, %100 köşeli agregaların kullanıldığı karışımda oluşmuştur.



Şekil 2.23: Agrega köşeliliğinin kalıcı deformasyona etkisi (Vanelstraete ve Francken, 1995)

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

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 tane dağılımlı 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. Tarefder 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 artırılmasının tekerlek izi duyarlılığını azalttığını gösterir (Sherwood ve diğ., 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, karışımında iri ve ince agregalar arasındaki boşlukları doldurmasının yanında, bağlayıcı film kalınlığını azaltması nedeniyle tekerlek izi açısından önemlidir.

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

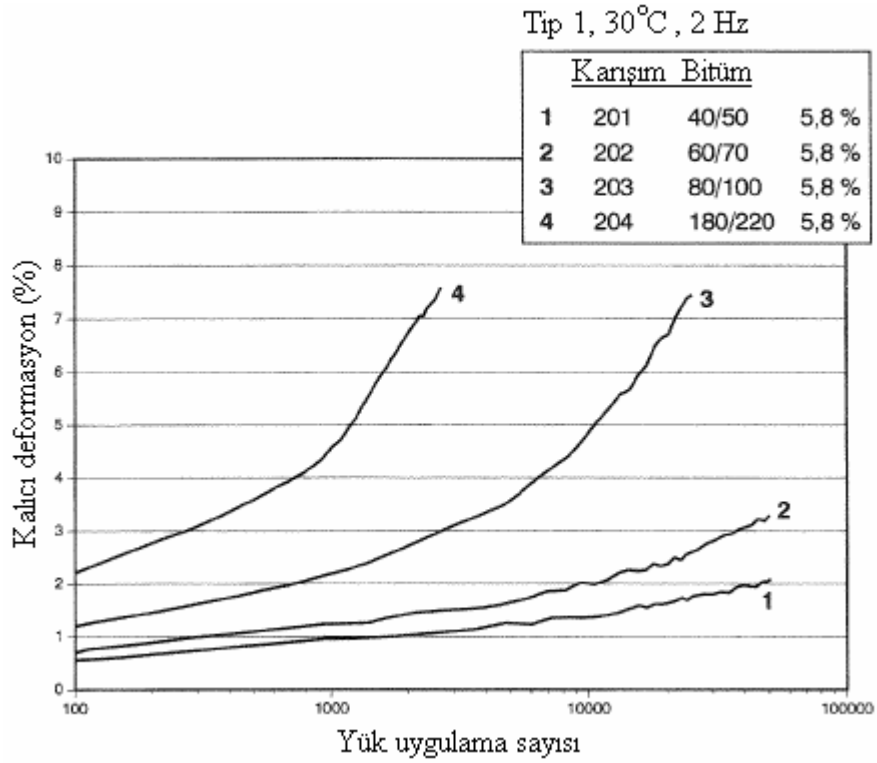
Modifiye bitüm kullanarak tekerlek izine karşı direnci arttırmak mümkündür. Ancak bazı durumlarda agrega, bağlayıcıdan daha etkindir (bağlayıcı tipi ve oranı ne olursa olsun). Tekerlek izini azaltmak için ilk adım, agrega tipinde ve tane dağılımında değişimler yaparak bir optimizasyona gitmek olmalıdır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

2.3.2.2 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 diğ. (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 incelemiştir (Şekil 2.24). En az kalıcı deformasyon, 40/50 penetrasyonlu bitümün kullanıldığı karışımında oluşmuştur.



Şekil 2.24: Bitüm penetrasyonunun kalıcı deformasyona etkisi (Vanelstraete ve Francken, 1995)

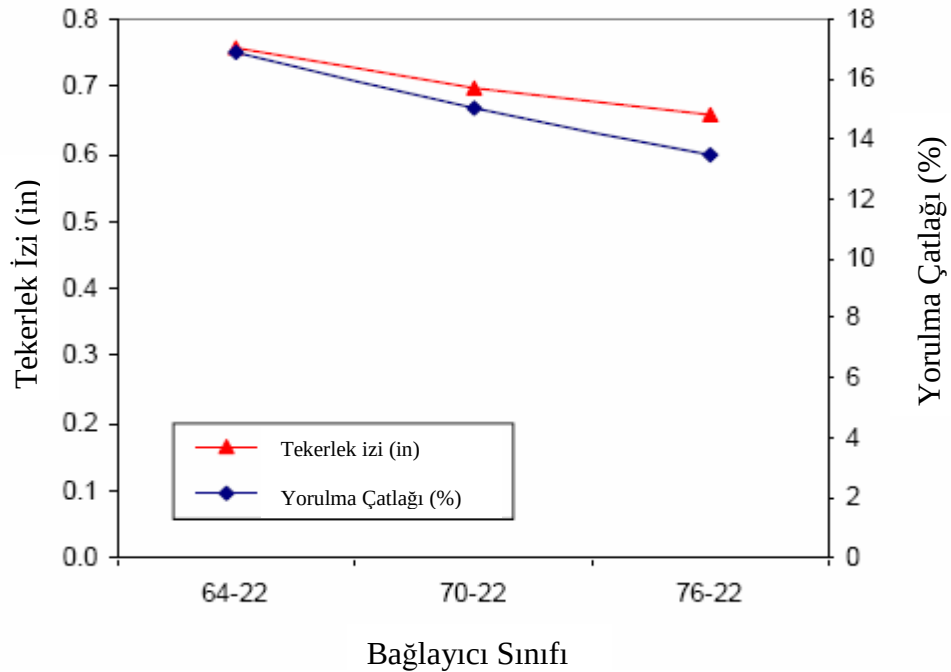
Yumuşama noktası yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumunda etkili olan faktörlerin başında gelir. Yumuşama noktası yüksek bağlayıcıların kullanıldığı karışımlarda, trafik etkisiyle oluşan deformasyonlar daha azdır.

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 ve diğ., 1993).

Karışımdaki asfalt filminin ince olması durumunda ($<10^2\mu$) asfalt moleküllerinin birbirini 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 diğ. (1990) sıkıştırmayı kolaylaştırmak için, bağlayıcı oranının keyfi olarak artırılmaması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Sherwood ve diğ. (1998), Superpave bağlayıcı şartnamesinde tekerlek izine dayanımı temsil ettiği düşünülen $G^*/\sin\delta$ parametresi ile tekerlek izi sonuçları arasında iyi bir ilişki olduğu sonucuna varmışlardır. Yüksek $G^*/\sin\delta$ değerleri için daha az tekerlek izi elde etmişlerdir. Mohammad ve diğ. (2001) de bağlayıcının performans sınıfı arttıkça, tekerlek izi dayanımının arttığını belirtmişlerdir. Schwartz (2007) tarafından M-E PDG yazılımından elde edilen bağlayıcı sınıfı duyarlılık analizi sonucu Şekil 2.25'te görülmektedir.



Şekil 2.25: Bağlayıcı sınıfı duyarlılık analizi (Schwartz, 2007)

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 çatlama

oluşması önlenirken, yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyona dayanım sağlanır (Ağar, 1999).

Mogawer ve Stuart (1995), Oliver ve diğ. (1997), Mohammad ve diğ. (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 artırırlar (Verstraeten, 1995).

2.3.2.3 Bitümlü Sıcak Karışım Bileşimi

Boşluk oranı (V_a), bağlayıcı oranı (V_b), asfaltla dolu boşluk yüzdesi (VFA), agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA), tane dağılımı 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.

Karışımında yeterli boşluk bırakılmaması halinde, sıcaklığın artmasıyla, bağlayıcı tabakanın üst kısmına doğru genişir ve terlemeye neden olur. Trafiğin 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 (Brosseau ve diğ., 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 değerin üstündeki her artış tekerlek izinde artışa yol açar (Brosseau ve diğ., 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 tane dağılımlarının etkisiyle ilgili olarak bir genelleme yapılamayacağı sonucuna varılmıştır (Brosseau ve diğ., 1993). Hangi tane dağılımının tekerlek izine dayanımda en iyi sonuç verdiği üzerinde tam bir uzlaşma yoktur. Ancak yoğun tane dağılımlı karışımlar için, tane dağılımı 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). Tane dağılımı eğrisinde bir boşluğun olması (2/4 veya 4/6) genel olarak tekerlek izini arttırmıştır (Brosseau ve diğ., 1993).

2.3.2.4 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.

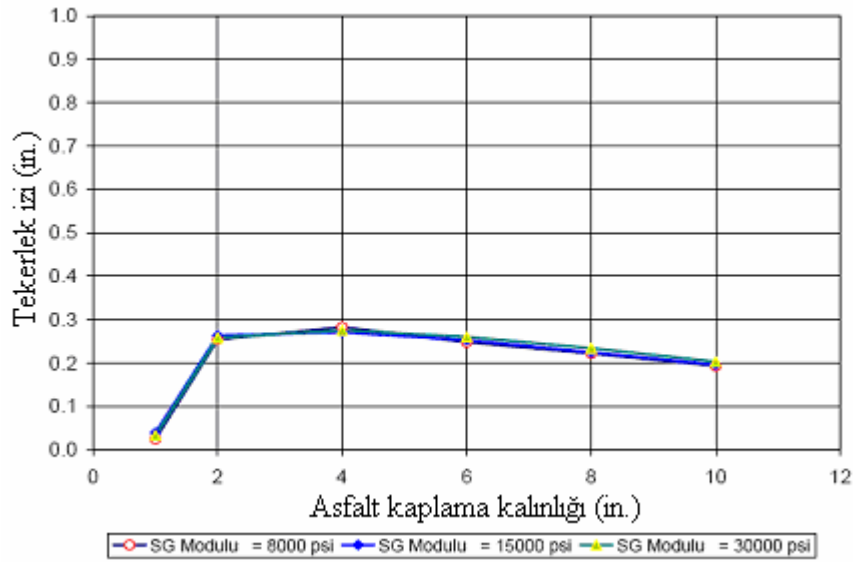
Trafik hacminin ve yüklerin gerçeğe yakın olarak öngörülememesi, üstyapı tabaka kalınlıklarının gerekenden az veya fazla olması, diğerlerine göre zayıf bir ara tabakanın kullanılması tasarım hataları olarak sıralanabilir.

Yapım hataları olarak da; karışımın serilmesinin ve sıkıştırılmasının uygun sıcaklıkta yapılamaması, yeterince sıkıştırılamaması veya aşırı sıkıştırılması, tabakaların tasarımı belirlenen kalınlıklarda serilememesi sayılabilir.

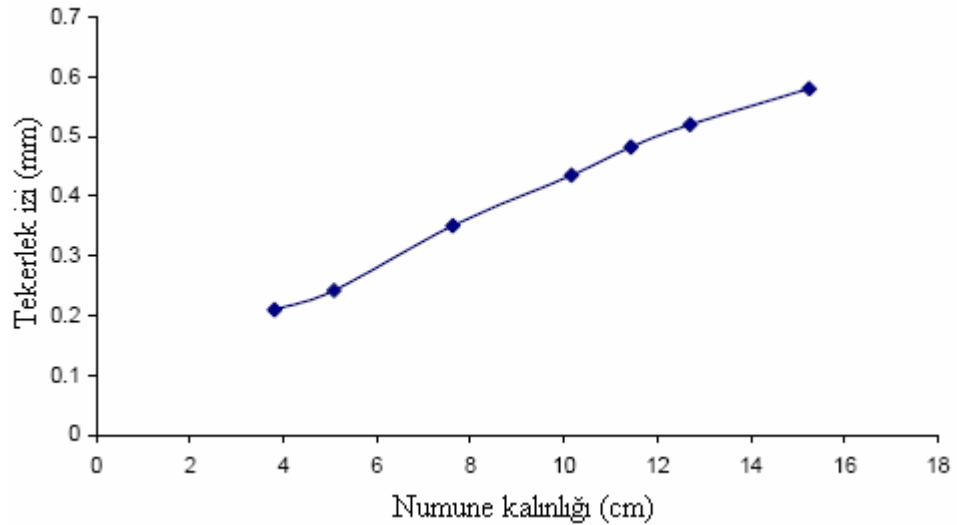
Hensley ve Leahy (1989) bir yolda görülen yapısal tekerlek izinin nedenlerini, yapısal tasarım hatası (zeminden daha zayıf alttemel kullanılması), trafik hacminin ve yüklerin doğru olarak saptanamaması ve daha sonra yapılan takviye tabakalarında düşük hava boşluğu ve yüksek filler/asfalt oranı kullanılması 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 belirli bir sınıra kadar kalınlık arttıkça tekerlek izinin arttığı belirlenmiştir. (Şekil 2.26, Şekil 2.27)



Şekil 2.26: Kaplama kalınlığının tekerlek izi oluşumuna etkisi (Witczack ve El-Basyouny, 2004)



Şekil 2.27: Numune kalınlığının tekerlek izi oluşumuna etkisi (Pirabarooban ve diğ., 2003)

2.4 Tekerlek İzini Azaltmaya Yönelik Dünyadaki Bazı Uygulamalar

Çeşitli ülkeler durabiliteyle ilgili özellikleri olumsuz yönde etkilemeksizin, tekerlek izine dayanımda mineral iskeletin rolünü arttırmak için şartnamelerini tekrar gözden geçirmişlerdir. Farklı iklim ve trafik koşullarına sahip bu ülkeler, doğal olarak farklı karışım bileşimleri kullanmışlardır (Verstraeten, 1995).

Almanya’da aşınma tabakalarında 1960’lı yılların ortalarında geliştirilen taş mastik asfalt (TMA) (stone mastic asphalt – splittmastixasphalt – SMA) kullanılır (Verstraeten, 1995). İlk olarak, çivili lastikler nedeniyle oluşan aşınmayı önlemek amacıyla geliştirilmiştir. 1970’lerde Almanya’da çivili lastiklerin yasaklanması ile yüksek malzeme ve yapım maliyetlerinden dolayı TMA karışımların kullanımı azalmıştır. Ancak ağır dingil yükleri ve yüksek lastik iç basınçları nedeniyle, 1980’lerde Almanya’da, bitümlü sıcak karışımlarda tekerlek izi oluşumu büyük bir sorun olmuştur. Bu nedenle TMA karışımların kullanımına tekrar başlanmıştır (Ağar, 1999). Taş mastik asfalt iri agregaya dayalı iskelet yapısına sahiptir. İri agregalar ve harç (kum – filler – bitüm) yönünden zengindir. Hem yüksek stabiliteye hem de yüksek durabiliteye sahiptir. 2.5 – 5 cm kalınlığında yapılır. Agregalar arası boşlukların harçla aşırı doldurulmasından kaçınılmalıdır. Üretim, taşıma, serme ve sıkıştırma sırasında segregasyon ve akmaya karşı selüloz fiber katkı olarak kullanılır. Karışım bileşimi aşağıdaki gibidir:

- İri agregalar mineral iskeletin %70 – 80’ini oluşturur. Maksimum dane büyüklüğü 5 – 22 mm arasındadır, en çok 11 – 16 mm kullanılır.
- İnce agregalar mineral iskeletin %12 – 17’sini, filler ise %8 – 13’ünü oluşturur.
- Akmayı önlemek için %0,3 – 1,5 oranında katkı maddesi eklenir.
- Bitüm miktarı kuru agregalar ağırlığının %6,5 – 8’i , filler / bitüm oranı ise 1,2’dir.
- Boşluk yüzdesi %6’dan düşüktür (Verstraeten, 1995).

Fransa’da tekerlek izini azaltmak için çalışmalar 1969’da başlamıştır. Orta ve iri boyutlu agregaların kullanıldığı bitümlü kaplamalar tasarlanmıştır. Yüzeydeki aşınma tabakalarının iyileştirilmesi ve bakımı için 1978’de ince, 1980’de çok ince tabakalar geliştirilmiştir. Orta büyüklükteki iri agregaların kullanıldığı bitümlü karışımlar gereken stabilite ve durabiliteyi sağlayacak şekilde yüzey ve temel

tabakalarında kullanılmıştır. Oldukça rijit olan bu karışım %4 – 8 boşluğa sahiptir. Maksimum agrega tane büyüklüğü 10 mm olan 6 cm'lik ve maksimum agrega tane büyüklüğü 14 mm olan 8 cm'lik iki tabakadan oluşur. 80'lerin sonuna doğru iyi sonuçlar elde etmek için çok ince tabakalar kullanılmıştır. Bitümlü karışımın üstüne ince bir tabaka halinde yapılan yüzeysel kaplama, yalnızca tek tabaka yapılan bitümlü karışımlara tercih edilmiştir. Sonuçta üstteki ince tabaka durabilite, geçirimsizlik ve kayma direnci sağlarken, alttaki daha kalın tabaka tekerlek izine ve yorulma çatlamasına dayanımı sağlamaktadır (Verstraeten, 1995).

İngiltere'de aşınma ve binder tabakalarında boşluklu tane dağılımına sahip kum iskelete dayanan bitümlü sıcak karışım kullanılır. %35 kırma taş, %55 kum ve %10 filler içerir. 50 penetrasyonlu bitüm kullanılır. Bitüm oranı aşınma tabakasında %8, binder tabakasında %5,6, temel tabakasında ise %3,5'tir (Verstraeten, 1995).

İtalya'da modifiye bağlayıcıların kullanımı yaygındır. Agregada olarak bazalt ve kalker kullanılır. Temel tabakasında bazalt kullanıldığında bağlayıcı oranı %4,5'tir. Aşınma tabakasında agregaların maksimum tane büyüklüğü 10-15 mm, bitüm miktarı %6, boşluk oranı %2-3'tür (Verstraeten, 1995).

Belçika'da ise, eski şartnamelerde, yüksek bağlayıcı oranı ve düşük boşluk yüzdesi ile sağlanan durabiliteye, stabiliteden daha fazla önem verilmiştir. Daha sonra şartname tekrar gözden geçirilerek bazı değişiklikler yapılmıştır. Filler miktarı azaltılmış, iri agrega oranı artırılmıştır. İzin verilen minimum boşluk oranı %0'dan %2'ye yükseltilmiş, ince agreganın kırılmalılık oranı artırılmıştır. 80/100 penetrasyonlu bağlayıcıların kullanımından vazgeçilmiş, modifiye bağlayıcılar kullanılmaya başlanmıştır. Yüzey suyunu hızla drene etmesi (güvenlik), gürültüyü azaltması (konfor) ve aynı zamanda tekerlek izine de iyi dayanım göstermesi nedeniyle geçirimli asfalt karışımlar da uygulanmıştır (Verstraeten, 1995).

Geçirimli kaplamalar, tekerlek izine dayanımı yüksek olan kaplamalardandır. Başlangıçta %20 civarında boşluk oranı istenir. Bu yüksek boşluk oranı az sıkıştırma ile değil, agreganın granülometrik bileşimi ayarlanarak yapılmalıdır. %75 civarında iri agrega, %20-25 ince agrega ve %2-3 filler kullanılır. Bağlayıcı oranı ise %4-5 arasındadır. Yüksek boşluk oranına sahip bulunmalarına karşın, geçirimli kaplamaların plastik deformasyona karşı dirençleri yüksektir (Ağar ve diğ., 1996).

Sıcak bölgelerde tekerlek izini en aza indirmek için, asfalt karışım tasarımında düşük bağlayıcı oranı, iri tane dağılımı, köşeli, pürüzlü ve iri boyutlu agregası, yüksek filler oranı, yüksek boşluk oranı ve sert bağlayıcı kullanılmalıdır. Takviye tabakası kalınlığı düşük tutulmalı ve kaplama tabakaları arasında yapışma sağlanmalıdır (Kandhal ve diğ., 1998).

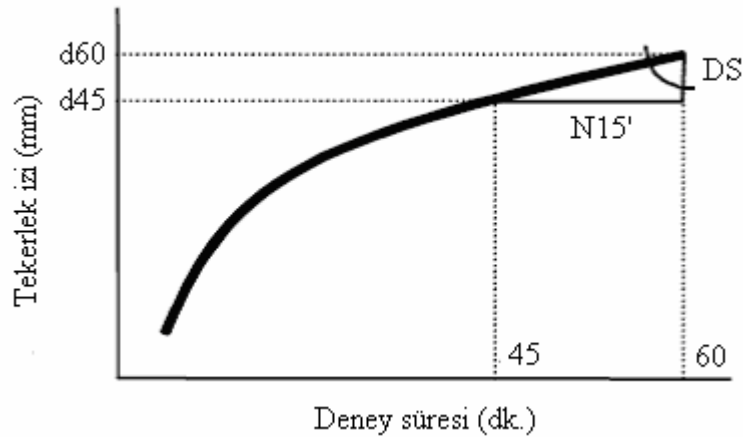
Japonya (JHRI)'da, düşük ve orta hacimli trafik için dinamik stabilite (DS) ≥ 800 , yüksek hacimli trafik için DS ≥ 3000 olması önerilmiştir. Japonya'da kullanılan dinamik stabilite (Şekil 2.28), tekerlek izi deneyinden şu şekilde ölçülmektedir (Poulidakos ve diğ., 2004):

$$DS(\text{geçiş} / \text{mm}) = N15' / (d60 - d45) \quad (2.1)$$

DS: Dinamik stabilite (geçiş/mm)

N15': Son 15 dakikadaki geçiş sayısı (15*42=630)

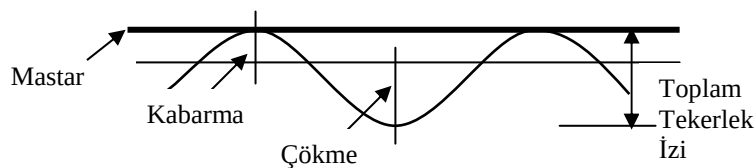
d60,d45: 60. ve 45. dakikalardaki tekerlek izi derinlikleri (mm)



Şekil 2.28: Dinamik stabilitenin belirlenmesi (Poulidakos ve diğ., 2004)

2.5 Tekerlek İzinin Ölçümü

Tekerlek izi derinliğini belirlemek için 1.2 m veya 1.8 m uzunluğunda düz bir master kullanılır. Bu master, gidiş yönüne dik olarak, tekerlek izi üzerine enlemesine yerleştirilir ve maksimum derinlik ölçülür (Şekil 2.29). Tekerlek izi boyunca 6 m (20 feet)'de bir ölçümler alınır ve ortalaması tekerlek izi derinliği olarak bulunur.



Şekil 2.29: Tekerlek izi derinliğinin ölçülmesi

Daha hassas çalışmalar için, yol yüzeyinin enine profilini çıkaran cihazlar ve araçlar geliştirilmiştir.

AASHTO'ya göre tekerlek izi sınıflandırması Tablo 2.4'te görülmektedir.

Tablo 2.4: Tekerlek izi sınıflandırması (AASHTO, 1986)

Tekerlek İzi Sınıfı	Ortalama Tekerlek İzi Derinliği
Düşük	¼ - ½ inç (6 – 13 mm)
Orta	1 – ½ inç (13 – 25 mm)
Yüksek	> 1 inç (> 25 mm)

2.6 Tekerlek İzinin Onarımı

Onarım yöntemi tekerlek izinin oluşum türüne bağlıdır.

Konsolidasyon veya aşınma tekerlek izi oluşmuşsa, yüzeyin kazınması gerekmeyebilir. Ancak uygun drenajı sağlamak ve yüzeyde oluşmuş bozulmalardan (çatlak, sökülme vb.) kurtulmak için yüzey kazınır. Kazınmış yüzey tesviyesi uygun ise takviye tabakası serilir (Rosenberger ve Buncher, 1999).

Akma tekerlek izi oluşmuşsa, etkilenen kaplama tabakaları kazınır. Yeni sıcak karışım asfalt serilmeden önce, tekerlek izinden etkilenen granüler tabakalar tekrar sıkıştırılır (Rosenberger ve Buncher, 1999).

Yapısal tekerlek izi oluşmuşsa veya alt tabakalardan kaynaklanan yapısal bir sorun söz konusuysa, kapsamlı bir onarım yapılmalıdır. Asfalt kaplama tabakası tamamen kaldırılmalıdır. Taban zemini ve temel tabakaları güçlendirilmeli, uygun drenaj koşulları sağlanmalıdır. Yeni bitümlü sıcak karışım serilmeden önce uygun sıkıştırma yapılmalıdır (Rosenberger ve Buncher, 1999).

2.7 Tekerlek İzi Tahmini İçin Yapılan Çalışmalar

Tekerlek izi tahmini için yapılan çalışmalar, laboratuvar benzeşim çalışmaları ve tam ölçekli çalışmalar olmak üzere iki gruba ayrılır.

2.7.1 Laboratuvar Benzeşim Çalışmaları

Bitümlü karışımların tekerlek izi performanslarını laboratuvar koşullarında değerlendirmek için farklı özelliklere sahip çeşitli laboratuvar cihazları geliştirilmiştir. Bunların yaygın olarak kullanılanları; Hamburg, Georgia (yeni modeli APA Asphalt Pavement Analyzer), İngiliz ve Fransız tekerlek izi cihazlarıdır. Bu cihazların ayrıntılı özellikleri Tablo 2.5'te verilmiştir.

Bu cihazlar, sabit bir sıcaklıkta sabit bir yük uygularlar. Trafik, sıcaklık ve çevre koşullarındaki mevsimsel değişimler hesaba katılmaz (Romero ve Stuart, 1998). Veriler mekanik (analitik) kaplama tasarımında ve AASHTO kalınlık tasarımında kullanılan tabaka katsayıları veya karışım modülünün belirlenmesinde kullanılamaz. Bunun nedeni, numune içerisindeki gerilme durumunun karmaşık olması ve bilinmemesidir (www.fhwa.dot.gov).

2.7.1.1 Georgia Tekerlek İzi Cihazı

Georgia tekerlek izi cihazı da bitümlü karışım numunelerinin tekerlek izine duyarlılığını ölçer. Çelik tekerlek, numune üzerine boyuna yerleştirilmiş elastik bir malzeme üzerinde hareket eder. Cihaz Georgia DOT tarafından geliştirilmiştir (Romero ve Stuart, 1998) (Şekil 2.30).

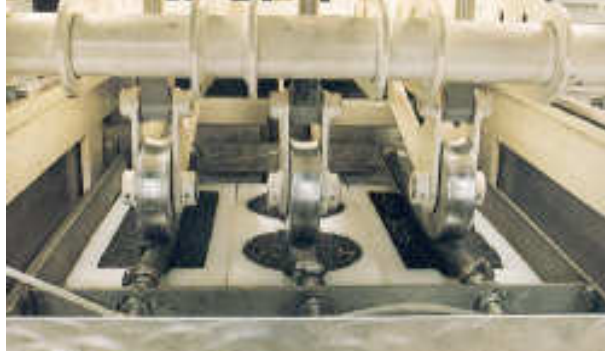


Şekil 2.30: Georgia tekerlek izi cihazı (Kandhal ve Cooley, 2002)

Bu cihazın yeni modeli APA (Asphalt Pavement Analyzer) adıyla anılmaktadır (Şekil 2.31).

Tablo 2.5: Kullanımı yaygın olan tekerlek izi cihazları ve özellikleri (Kutluhan ve Açar, 2004)

		LCPC Fransız Tekerlek İzi	Hamburg Tekerlek İzi	APA Tekerlek İzi	İngiliz Tekerlek İzi
Yükleme Durumu	Uygulanan Yük	5.000 ± 50 N (1124 lb) (510 kg)	685 N (154 lb) (70 kg)	445 – 1.112 N (100–250 lb) (45-113kg)	1.000 N (225 lb) (102 kg)
	Tek. İç Basıncı Değme Basıncı	0,60 ± 0,03 MPa (87 PSI)	Ort. Değme Basıncı: 0,73 MPa (106 PSI)	Silindir Basıncı: 0,69-1,38MPa (100-200PSI)	80 IRHD (Int. Rubber Hardness Degree) (Lastik Sertlik Derecesi)
	Tek.Ortalama Geçiş Hızı	7 km/s (67 devir/dk - 380 mm)	1,1 km/s (53 devir/dk – 230 mm)	2,2 km/s	10-30 devir/dk – 230mm
Tekerlek Tipi		Basıncılı Lastik Tekerlek	Çelik Tekerlek	Basıncılı Silindir Üzerinde Konkav Çelik Tekerlek	Lastik Bandajlı Çelik Tekerlek
Tekerlek Boyutları		Çap : 415 mm Genişlik: 110 mm	Çap : 204 mm Genişlik: 47 mm	Basıncılı Silindirin Çapı: 25 – 38 mm	Çap : 203 mm Genişlik: 50 mm
Numune Tipi		Prizmatik (Plak)	Prizmatik (Plak) Silindirik	Prizmatik (Plak) Silindirik	Prizmatik (Plak) Silindirik
Numune Boyutları		500x180x20 ~ 100 mm	320x260x40 ~ 120 mm Sil. Çap: 250 mm	300x125x75 mm Sil. Çap: 115-150 mm	305x305x50 ~ 80 mm Sil. Çap: 200 mm
Sıcaklık Sınırları		30 – 70 °C	25 – 70 °C	4 – 72 °C	20 – 70 °C
Deney Ortamı		Kuru	Kuru ve Suda	Kuru ve Suda	Kuru
Kontrol ve Veri Toplama		Otomatik Kontrol Veri Toplama: Elle ölçüm	Bilgisayar kontrollü Veri Toplama: Otomatik	Bilgisayar kontrollü Veri Toplama: Otomatik	Bilgisayar kontrollü Veri Toplama: Otomatik
Numune Hazırlama veya Sıkıştırma		Numune hazırlayıcı var Sıkıştırma: Lastik tekerlekle	Numune hazırlayıcı var Sıkıştırma: Yoğ. Sıkıştırıcı	Numune hazırlayıcı var Yoğ. Marshall, Titr. Sıkıştırıcı	30 kg lık silindirle laboratuvarda sıkıştırma
Aynı Anda Test Edilebilen Numune Sayısı		2 Prizmatik (Plak)	2 Prizmatik (Plak) veya 2 Silindirik	3 Prizmatik (Plak) veya 6 Silindirik	1 Prizmatik (Plak) veya 1 Silindirik
Yapılan Deneyler		Tekerlek İzi	Tekerlek İzi	Tekerlek İzi, Yorulma, Nem Hassasiyeti	Tekerlek İzi



Şekil 2.31: APA Tekerlek izi cihazı ve yakından görünüşü (Kandhal ve Cooley, 2002)

2.7.1.2 Hamburg Tekerlek İzi Cihazı

Hamburg tekerlek izi cihazı, sıcak su içerisinde batırılmış asfalt betonu numunelerinin yüzeyleri boyunca, çelik bir tekerleğin hareketiyle oluşan tekerlek izi ve su hasarının birleştirilmiş etkilerini ölçer. Tekerlek geçiş sayısı 10 000'den hemen sonra bazı karışımların sudan dolayı hasara uğradığı görülmüştür. Cihaz 1970'de Esso A.G. tarafından Hamburg'da geliştirilmiştir (Romero ve Stuart, 1998) (Şekil.2.32).



Şekil 2.32: Hamburg tekerlek izi cihazı (www.fhwa.dot.gov)

Hamburg tekerlek izi deneyinde numuneler, tekrar kullanılabilir çelik kalıplar içerisinde, alçı kullanılarak yerleştirilirler. Her bir numune, kalıbın üst kenarıyla aynı yükseklikte olmalıdır. İhtiyaç duyulursa, numunenin altına konulması için çelik plakalar kullanılabilir. Kalıplar çelik plaka üzerine konulur (www.fhwa.dot.gov).

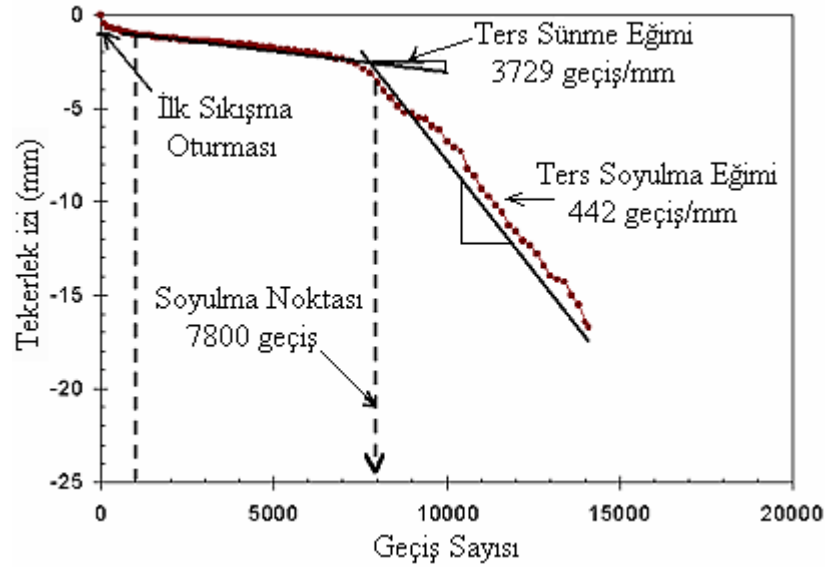
Hamburg tekerlek izi deneyinde en çok kullanılan deney sıcaklığı 50 °C'dir. Temelde kullanılacak karışımlar için 40 °C kullanılır. Su sıcaklığı 45 dk.'da 50 °C'ye ulaşır

Numuneler en az 30 dk. deney sıcaklığında koşullandırılır. Suyun sıcaklığı sabit tutulur (www.fhwa.dot.gov).

Colorado DOT (CDOT) yoğun gradasyonlu sıcak karışımlar için, izin verilen maksimum tekerlek izi derinliğini, 10 000 geçişte 4 mm veya 20 000 geçişte 10 mm olarak önermiştir. Hamburg'da ise 19 200 geçişte 4 mm'dir (www.fhwa.dot.gov).

Tekerlek izi derinliği otomatik ve sürekli olarak 0,01 mm hassasiyetle ölçülür. Her bir 20, 50, 100 veya 200 geçişte oluşan tekerlek izi derinlikleri alınabilir. 20 000 tekerlek geçişi yaklaşık 6,5 saat sürer. Bununla birlikte, numunelerin birindeki tekerlek izi derinliği 30 mm'yi aşarsa, cihaz otomatik olarak durur (www.fhwa.dot.gov).

Hamburg tekerlek izi deneyinde, sıkışma sonrasındaki oturma, sünme eğimi, soyulma büküm noktası ve soyulma eğimi de incelenebilir (Şekil 2.33). Sıkışma sonrasındaki oturma, 1000 tekerlek geçişindeki deformasyondur. İlk 1000 geçiş karışımın pekleşmesini, yoğunlaşmasını sağlar (www.fhwa.dot.gov).



Şekil 2.33: Hamburg tekerlek izi deneyinde oluşan deformasyon eğrisi (www.fhwa.dot.gov)

Sünme eğimi tekerlek izi hassasiyetini ölçmek için kullanılır. Sünme eğimi suyun neden olduğu hasardan çok, esas olarak yükün neden olduğu kalıcı deformasyonun toplamını belirtir. Bu eğim, sıkışma sonrasındaki oturma ile soyulma büküm noktası arasındaki doğrusal bölgenin eğiminin tersidir (www.fhwa.dot.gov).

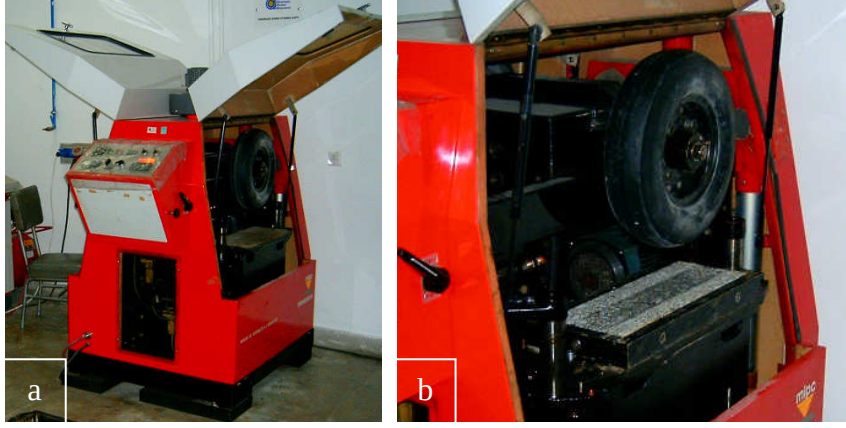
Soyulma büküm noktası ve soyulma eğimi suyun neden olduğu hasarı ölçmek için kullanılır. Soyulma büküm noktası, sünme eğimi ile soyulma eğiminin kesiştiği noktadaki geçiş sayısıdır. Bu nokta, suyun etkisinin performans üzerinde baskın olmaya başladığı noktadır. CDOT'a göre 10 000 geçişin altındaki büküm noktası su hassasiyetini gösterir. Soyulma eğimi, soyulma büküm noktasından sonraki deformasyonların oranının tersidir (Her 1 mm tekerlek izi derinliği için geçiş sayısıdır) (www.fhwa.dot.gov).

Sünme eğiminin, soyulma büküm noktasının ve soyulma eğiminin büyük olması, deformasyonun veya hasarın küçük olduğunu gösterir. Eğri, sünme ve tekrarlı yükleme deneylerinden elde edilen tipik kalıcı deformasyon eğrilerinin tersine benzer. Bu deneylerden elde edilen eğriler üç bölüme ayrılır. Üçüncü bölümde numune hızlı bir şekilde bozulmaya uğrar. Hamburg cihazından elde edilen eğrilerin son bölümlerindeki bu hızlı bozulma, viskoz akma türü kalıcı deformasyondan daha çok suyun etkisiyle oluşur. Suya duyarlı karışımlar, soyulma büküm noktası civarında ince agregalarını kaybetmeye başlar ve dolayısıyla, iri agrega taneleri yerlerinden kopabilir. Bununla birlikte, viskoz akma deformasyonu su etkisiyle oluşan deformasyonu birbirinden ayırmak için bir yöntem yoktur. Çünkü deney kuru olarak yapılamaz. Yine, çelik tekerlek tarafından kırılan agreganın ve bu nedenle oluşan deformasyonun miktarını belirlemek için de bir yöntem yoktur (www.fhwa.dot.gov).

2.7.1.3 Fransız (LCPC) Tekerlek İzi Cihazı

Fransız tekerlek izi cihazı, belirli bir sıcaklıkta, hareketli lastik tekerleğin etkisiyle numunelerde oluşan kalıcı deformasyonları belirler. Tekerlek izine neden olabilecek ve ağır trafiğe maruz kalacak karışımları değerlendirmek için Fransa'da (LCPC) geliştirilmiştir. Aynı anda 2 numuneyi test edebilecek şekilde 2 hareketli tekerleğe sahiptir (Romero ve Stuart, 1998) (Şekil 2.34.a,b, Şekil 2.35).

Fransız tekerlek izi cihazında, laboratuvar da hazırlanan numunelerin yanında, bir kaplamadan kesilen numunelerle de deneyler yapılabilir. Ancak kesilen numune kalıp boyutlarına uygun olmalıdır. Kesilen numune boyutu ile kalıp boyutu arasında izin verilen sapma miktarı ± 5 mm'dir. 100 mm kalınlıktaki numunenin ağırlığı yaklaşık 22 kg'dır. Laboratuvar da hazırlanacak numunelerin sıkıştırılmasında "Fransız Tabaka Sıkıştırıcısı" kullanılır (www.fhwa.dot.gov) (Şekil 2.36).



Şekil 2.34.a,b: Fransız (LCPC) tekerlek izi cihazı



Şekil 2.35: Fransız LCPC tekerlek izi cihazında numunenin yakından görünüşü



Şekil 2.36: LCPC tabaka sıkıştırıcısı

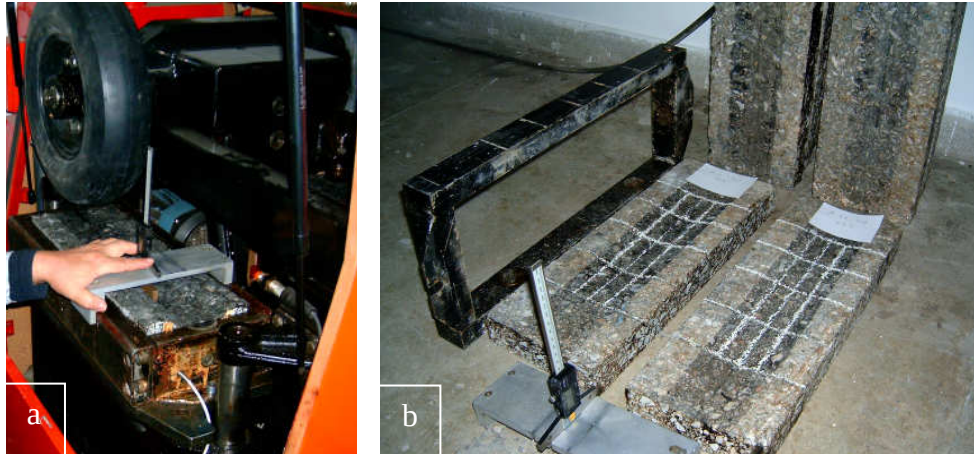
Sıkıştırma için bir veya iki adet düz yüzeyli, hareketli lastik tekerlek kullanılır. Bu tekerlek, deneyde kullanılan tekerlek ile aynı özelliklere sahiptir. Sıkıştırma işleminin başlangıcında, gevşek karışımın içine konulduğu kalıbın derinliği gerekli numune kalınlığından daha fazla olmalıdır. Çünkü gevşek karışım daha büyük hacme sahiptir. Kalıbın kenarları ve altı çeliktir, alt plakası hareketlidir. Gerekli tabaka kalınlığını elde etmek için, sıkıştırma sırasında bu alt plakayı yukarı iten bir hidrolik

kriko kullanılır. İşlemin sonunda, numune yüzeyi ile kalıbın üst yüzeyi aynı seviyeye gelmelidir (www.fhwa.dot.gov).

Numuneyi sıkıştırmak için farklı düşey kuvvetler, tekerlek iç basınçları ve genişliğe bağlı olarak farklı tekerlek pozisyonları kullanılır. Bu parametreler gerekli boşluk oranına ve numune kalınlığına bağlıdır. Gevşek karışımın kalıptan dışarı dökülmesini önlemek için, başlangıçta uygulanan düşey kuvvet ve tekerlek iç basıncı düşük tutulur. Birkaç geçişten sonra her ikisi de artırılır. Sıkıştırma tamamlandıktan sonra karışımın üzerine çelik bir plaka yerleştirilir. Yüzeyi daha düzgün hale getirmek için birkaç tekerlek geçişi yapılır. Bununla birlikte maksimum dane boyutu 20 mm'den büyük olan karışımlar, sıkıştırmadan sonra kaba bir yüzeye sahip olabilirler. Sıkıştırma işlemi 20 – 25 dk. sürer. Sıkıştırma sırasında ısıtma işlemi uygulanmaz (www.fhwa.dot.gov).

Sıkıştırılmış numuneler 7 gün oda sıcaklığında bekletilirler. Deneye başlamadan önce numunelerin birim hacim ağırlıkları hesaplanır. Deneyde iki numuneye uygulanacak tekerlek yükleri, asimetrik basınçlardan kaçınmak için eşit olmalıdır. Bununla birlikte, iki numunenin de aynı özelliklere sahip olması gerekmez. Karışımların rastgele sırayla test edilmesi önerilir (www.fhwa.dot.gov).

Başlangıçta karışımın sıkışması ve düzgün bir yüzeye sahip olması için 15~25 °C'de 1.000 devir uygulanır (yaklaşık 15 dk.). Bu işlemten sonra, referans yüzeyi belirlemek için, hassasiyeti 0,1 mm olan bir ölçerle 15 standart noktadan ölçüm alınır. Numuneler 12 saat 60±2 °C'ye kadar ısıtılır. (Fransa'da temel tabakaları için bazen 50±2 °C'lik deney sıcaklığı kullanılır.) Gerekli sıcaklığa ulaşıldığında deneye başlanır ve ortalama tekerlek izi derinlikleri elle ölçülür (Şekil 2.37a,b).



Şekil 2.37.a,b: Tekerlek izi ölçümü ve ölçüm alınan standart 15 nokta

Bu ölçümler;

50 mm kalınlık için 30, 100, 300, 1.000 ve 3.000 devirde,

100 mm kalınlık için 300, 1.000, 3.000, 10.000 ve 30.000 devirde alınır.

100 mm kalınlık için numunenin 3.000 devirden önce bozulma durumu varsa, 30 ve 100 devirlerde de tekerlek izi derinliği ölçümü yapılır. Numunenin başlangıç kalınlığına göre, oluşan tekerlek izi derinliğinin ortalama yüzdesi hesaplanır (www.fhwa.dot.gov).

3.000 devrin uygulanması 1,5 saat sürmesine karşın, 30.000 devrin uygulanması 9 saat sürer. Cihaz 3.000 devri 45 dk.'da uygulayabilir ancak, tekerlek izi derinliği ölçümleri alındıktan sonra deneye devam edebilmek için, numunelerin tekrar deney sıcaklığına getirilmesi gerekmektedir (www.fhwa.dot.gov). (Tekerlek izi derinliği elle ölçüldüğü için numunelerin bulunduğu odacığın açılması gerekir. Bu nedenle sıcaklık düşer.)

Fransız şartnamesine göre;

50 mm'lik numune için 1.000 devirde ort. tekerlek izi derinliği $\leq \%10$

3.000 devirde ort. tekerlek izi derinliği $\leq \%20$

100 mm'lik numune için 30.000 devirde ort. tekerlek izi derinliği $\leq \%10$

kabul edilebilir düzeydedir (www.fhwa.dot.gov).

Logaritmik ölçekteki devir sayısına göre tekerlek izi derinliği grafiğinden, farklı karışımlar için elde edilen eğimler de karşılaştırılabilir. Tekerlek izine duyarlı karışımlar genellikle daha yüksek eğimlere sahiptir (www.fhwa.dot.gov).

Bu deney yöntemi, nominal maksimum agrega boyutu 20 mm'den büyük karışımlar için uygun değildir. 180 mm'lik numune genişliği, 110 mm'lik tekerlek genişliğine göre yeterli değildir. Numunenin her iki kenarında, kalıpla tekerlek arasında yalnızca 35 mm'lik bir boşluk kalır. Bu nedenle 20 mm'den büyük boyutlu agregaya sahip karışımlarda dış kenara ve yukarı doğru kaymalar engellenebilir. 20 mm'den büyük agregalar tekerleği de yıpratır ve çoğu kez uygun şekilde sıkıştırılmaz (www.fhwa.dot.gov).

2.7.1.4 Tekerlek İzi Cihazlarının Değerlendirilmesi

Tekerlek izi cihazlarının geliştirilmesindeki amaçlar; karışımların tekerlek izi oluşum potansiyellerini incelemek, farklı karışımların performanslarını karşılaştırmak, performans ölçütlerini belirlemek ve arazide oluşabilecek tekerlek izi miktarlarını tahmin etmektir (Kutluhan ve Ağar, 2004).

Bu cihazlar, bitümlü karışımların tekerlek izi performansını yalnızca sınırlı koşullar içerisinde değerlendirebilir. Bir başka deyişle, bulunan sonuçlar yalnızca deney koşulları için geçerlidir. Dolayısıyla arazide oluşabilecek tekerlek izinin tahmini oldukça zordur. Bu durumda yapılması gereken, servisteki performansı bilinen karışımların, laboratuvar koşulları altında tekerlek izi cihazlarıyla test edilmesi ve elde edilen sonuçlar arasındaki ilişkilerin kurulmasıdır. Bu ilişkilerden yola çıkılarak kabul edilebilir performans ölçütleri belirlenebilir. Deney koşullarının, malzemelerin ve bölgesel şartların farklı olmasından dolayı, her ülke kendine ait farklı bir performans ölçütü belirlemiştir (APA: 8mm / 8000 dev.; Hamburg:10mm/20000 dev.; LCPC:10mm/30000 dev.) (Kutluhan ve Ağar, 2004). Çeşitli ülkelerin kullandıkları tekerlek izi deneyleri ve performans ölçütleri Tablo 2.6'da verilmiştir.

Deneylerden elde edilen sonuçların geçerli olabilmesi için, aynı laboratuvardaki tekrarlanabilirlik ve farklı laboratuvarlardaki tekrar üretilebilirlik değerlerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalması gerekmektedir (Lai, 1993).

Tekerlek izi cihazlarının, gerçek trafik koşullarını tam olarak yansıtmaları söz konusu değildir. Ancak, arazi koşullarına kısmen benzeşim sağlanmıştır. Bununla birlikte, tekerlek izi performansları bakımından karışımları iyiden kötüye, doğru şekilde sıraladıkları gözlenmiştir. Tekerlek izi cihazlarının arazi koşullarına uygunluğunun değerlendirilmesinde göz önünde bulundurulacak temel hususlar; yükleme durumu, tekerlek tipi ve boyutları, numune tipi ve boyutlarıdır (Kutluhan ve Ağar, 2004).

Cihazların yükleme durumları ele alındığında, uygulanan yük, lastik iç basıncı (veya değme basıncı) ve tekerlek ortalama geçiş hızı yönünden, arazi koşullarına en yakın olan cihazın LCPC Fransız tekerlek izi cihazı olduğu görülmektedir. Kullanılan tekerlek tipi yönünden de, basınçlı lastik tekerlek kullanan LCPC Fransız tekerlek izi cihazı en uygundur. Ancak 110 mm tekerlek genişliğine sahip olan bu cihazın numune genişliğinin 180 mm ile sınırlı olması cihazın olumsuz yönüdür (Kutluhan ve Ağar, 2004).

Tablo 2.6: Çeşitli ülkelerde kullanılan tekerlek izi deneyleri ve performans ölçütleri (Bowskill ve diğ., 1999)

Ölçütler	Soğuk İklimler		Anakara İklimleri							Ilıman	Sıcak İklimler	
	Quebec	Finlandiya	Avusturya	Fransa	Almanya	Macaristan	Japonya	Romanya	İsviçre	İngiltere	Avustralya	İspanya
Sistem	LCPC	PANK	LCPC	LCPC	TPA-Stb	LCPC	TRRL	LCPC	LCPC	TRRL	TRRL	TRRL
Sıcaklık (°C)	60	30	60	60	50	60	60	60	60	60(45)	60	60
Kalınlık d (mm)	100	60	100	100	50-80	100	34-50	100	100	45±10	75±5	50-100
Devir sayısı	30000	14000	30000	30000	20000 veya 20mm t. izi 53dev/dk	30000	-	30000	30000		≥10000 veya 15 mm t.izi 21dev/dk	5040 =2 saat 42dev/dk
Hız (devir/dk)												
Sınır (%d) (Ağır Trafik)	10	6,7	7 (5-pmb)	5	-	5	-	8	10	-	-	-
mm/toplam devir	10	4	7 (5-pmb)	5	3,5 Yalnız Hamburgda	5	-	8	10	-	-	-
devir/mm	3000	3500	4296 (6000)	6000	-	6000	5000	3750	3000	-	5000	-
Wtr Tekerlek İzi Oranı	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7mm/45dk (5 mm/s)	0,2mm/1000 devir	0,9/1,2 mm/s (Son 15dk)
Tekerlek Yüğü (kN)	5	10	5	5	0,7	5	0,7	5	5	0,5	0,7	9 kg/cm ²
Tekerlek Tipi	Lastik	Lastik	Lastik	Lastik	Çelik	Lastik	Lastik	Lastik	Lastik	Lastik	Lastik	Lastik
Lastik İç Basıncı (bar)	6	6	6	6	-	6	dolu	6	6	dolu	dolu	-

Türkiye’de, yalnızca TMA kaplama tipi için şartname sınırı minimum %6’dır. (LCPC cihazı, 60 °C, 30000 devir, 100 mm kalınlık) (KTŞ, 2006)

Tekerlek tipi yönünden uygun sayılabilecek diğer bir cihaz ise APA (Asphalt Pavement Analyzer) tekerlek izi cihazıdır. Bu cihazda kullanılan basınçlı silindir, basınçlı lastik tekerleğin yerini almıştır. Silindir küçük boyutlu olmasına karşın, iç basıncı lastik tekerlekle hemen hemen aynıdır. Uygulanan yük de basınçlı silindir çapına uygun olarak daha azdır. Bu cihazın olumsuz yönü, uygulanan yük ve değme alanının gerçek koşullardan çok küçük olmasıdır. Hamburg tekerlek izi ve İngiliz tekerlek izi cihazlarında değme basınçları daha yüksek, tekerlek hızları daha düşüktür. Çelik tekerleğin kullanılması arazi koşullarını yansıtmamaktadır. Ayrıca agrega kırılmalarına sebep olmaktadır. Hamburg cihazının yeni tiplerinde tekerlek yükü, genişliği, tipi ve devir hızı değiştirilebilmektedir (Kutluhan ve Ağar, 2004).

Deneylerin kuru ve su içerisinde yapılabilmesi, silindirik ve plak numunelerin kullanılabilmesi, APA ve Hamburg tekerlek izi cihazlarının üstün yönleridir. Tekerlek izi deneyinin yanında, nem duyarlılığı ve yorulma deneylerinin de yapılmasına olanak sağlaması, APA tekerlek izi cihazını daha da ön plana çıkarmaktadır (Kutluhan ve Ağar, 2004).

2.7.2 Tam Ölçekli Çalışmalar

Bitümlü karışımların tekerlek izi performanslarının değerlendirilmesinde tam ölçekli çalışmaların önemi büyüktür. Arazi koşullarındaki gerçek performansın belirlenmesi için değişik tiplerde ALF (Accelerated Loading Facility) tam ölçekli hızlandırılmış yükleme sistemleri geliştirilmiş ve ayrıca deney yolları inşa edilmiştir. Dünyada yaygın olarak kullanılan tam ölçekli hızlandırılmış yükleme sistemleri ve deney yolları Ek A'da verilmiştir.

Karışımların tekerlek izi performanslarının değerlendirilmesinde, laboratuvar koşullarında yapılan incelemelerle birlikte, tam ölçekli çalışmaların da yapılması gerekmektedir. Laboratuvar sonuçlarından elde edilen tekerlek izi tahmin modelleri, tam ölçekli çalışmalarla kalibre edilmektedir.

2.7.2.1 Hızlandırılmış Yükleme Sistemleri

Tam ölçekli hızlandırılmış yükleme sistemleri gerçeğe oldukça yakın koşullara sahiptir. Bu nedenle karışımların gerçek performansları daha hassas bir şekilde gözlenebilmektedir. Çeşitli ülkelerde, farklı tiplerde doğrusal ve dairesel hızlandırılmış yükleme sistemleri bulunmaktadır (Tablo 2.7).

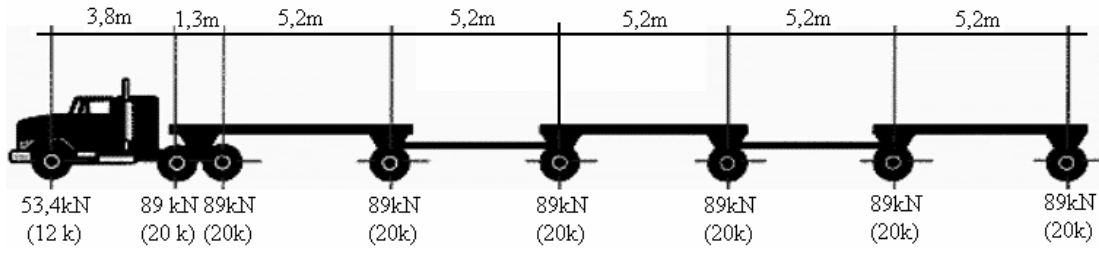
2.7.2.2 Deney Yolları

Farklı bileşen ve bileşim özelliklerine sahip karışımların servisteki gerçek performanslarını gözlemleyebilmek için, çeşitli ülkelerde deney yolları yapılmıştır (Tablo 2.7).

Tablo 2.7: Dünyada mevcut olan tam ölçekli çalışmalar (Metcalf, 1996)

Kısaltma	Yer	Yıl	Kısaltma	Yer	Yıl
Dairesel Yükleme Sistemleri			Doğrusal Yükleme Sistemleri		
C - TIC	Saskatchewan	1978	ALF	Avustralya	1984
CAPTIF ¹	Yeni Zelanda	1987	FHWA – PTF	Washington D.C.	1986
ISETH	İsviçre	1979	RIOH – ALF	Çin	1990
IUT	Illinois	1963	PRF – LA	Louisiana	1995
JHPC	Japonya	1979	DRTM	Danimarka	1973
LCPC	Fransa	1978	EPFL	İsviçre	1977
Road Machine ²	İngiltere	1963	INDOT PURDUE	Indiana	1992
RRT	Romanya	1982	CAL – APT	California	1994
Shell	Hollanda	1967	LINTRACK	Hollanda	1991
S – KSD	Slovakya	1994	Minne - ALF	Minnesota	1990
UCF	Florida	1988	PTF	İngiltere	1984
UNAM	Meksika	1970	HVS	Güney Afrika	1971
WSU	Washington	1965	TxMLS	Texas	1995
Deney Yolları			CEDEX	İspanya	1987
Dairesel Yükleme Sistemleri			Diğer		
MnROAD	Minnesota	1993	BASt	Almanya	1963
NARDO	İtalya	1979	MSU	Michigan	1990
PTI	Pennsylvania	1971	PHRI	Japonya	1969
PWRI	Japonya	1979	¹ İlk yapım :1967, ² İlk yapım :1933		
Wetrack	Nevada	1995			

Deney yollarında bütün koşullar olabildiğince kontrol altında tutularak, dingil ağırlıkları belirli araçlarla (Şekil 2.38) hızlandırılmış yükleme yapılır.



Şekil 2.38: WesTrack deney yolunda hızlandırılmış yükleme yapan araç (www.pavetrack.com)

2.8 Tekerlek İzi Tahmin Modelleri

Esnek üstyapıların kalıcı deformasyon davranışını belirlemek için iki yaklaşım vardır. Birincisi; tekerlek izi oluşumunu, malzeme özellikleri, yükler ve çevre koşulları gibi değişkenlerle ilişkilendiren istatistiksel yaklaşımdır. Ampirik yöntem olarak ifade edilen bu yaklaşım yalnızca incelenen malzeme, yük ve çevre koşulları için geçerlidir. İkincisi, malzemenin yük altındaki davranışını belirlemeye dayanan mekanistik yaklaşımdır (Chen ve diğ., 2004).

Önceki mekanistik modeller (Shell 1978 ve Asphalt Institute 1982), tekerlek izinin büyük bir kısmının taban zeminindeki kalıcı deformasyonlardan kaynaklandığını varsaymaktadır. Daha sonraki çalışmalar, taban zemininin toplam tekerlek izine katkısının bulunduğunu, ancak kaplama, temel ve alttemel tabakalarının tekerlek izi oluşumunda daha büyük bir etkiye sahip olduklarını göstermiştir. Bilgi temelindeki bazı eksikliklerden dolayı, mekanistik yöntemler ampirik ilişkilerle desteklenmiştir. Bu yaklaşıma da mekanistik – ampirik yöntemler denilmektedir (Chen ve diğ., 2004).

Rauhut (1980), bitümlü karışımların kalıcı deformasyon davranışlarının, uzun süreli statik yüklemede, yükleme süresine bağlı olarak, kısa süreli tekrarlı yüklemede ise yük tekrarına bağlı olarak belirlendiğini, ayrıca gerilme ve malzeme rijitliği gibi değişkenler esas alınarak regresyon analizinin kullanıldığını ifade etmiştir.

Tekerlek izi oluşumu ile ilgili birçok model geliştirilmiştir:

➤ Shell Modeli (P. J. Van de Loo, 1976):

$$\Delta h = C * h * \sigma_{av} / S_m \quad (2.2)$$

$$S_b = 3\eta / N * t \quad (2.3)$$

Burada;

Δh : Tabaka kalınlığındaki azalma

S_b : Bitüm rijitliği (Pa)

C : Sabit

η : Bitüm viskozitesi (Pa.s)

h : Bitümlü kaplama kalınlığı

t : Geçiş (yükleme) süresi (sn)

σ_{av} : Ortalama gerilme

N : Standart dingil geçiş sayısı

S_m : Karışım rijitliği (Pa)

(yükleme tekrar sayısı)

➤ McLean ve Monishimith 1974'te aşağıdaki 3. derece polinom formunu geliştirmişlerdir (Monishimith, 1976). Bu model, Allen ve Deen (1986) tarafından da kullanılmıştır.

$$\text{Log} \varepsilon_p = C_0 + C_1(\text{Log} N) + C_2(\text{Log} N)^2 + C_3(\text{Log} N)^3 \quad (2.4)$$

Burada;

ε_p : Kalıcı deformasyon

C_i : Gerilme durumu, yükleme süresi ve sıcaklığa bağlı katsayılar

N : Yükleme tekrar sayısı

➤ Monishmith ve diğ. Modeli (1975) (Monishimith, 1976):

$$\varepsilon^p = A * N^b \quad (2.5)$$

Burada;

ε^p : Kalıcı deformasyon

N : Uygulanan gerilme sayısı (yükleme tekrar sayısı)

A, b : Ampirik katsayılar

➤ Eisenmann ve Hilmer Modeli (1987) (Sousa ve diğ., 1991)

$$y = a + b(N)^{0.5} \quad (2.6)$$

Burada;

y : Tekerlek izi derinliği (mm)

N : Yükleme tekrar sayısı

a, b : Regresyon katsayıları

- BRRC Modeli (Verstraeten, 1995):

$$\Delta d = \Delta h * f(N) \quad (2.7)$$

$$d = \sum \Delta h_i * f_i(N) \quad (2.8)$$

Burada;

Δh : Geri dönen deformasyon

d : Toplam kalıcı deformasyon

N : Standart dingil geçiş sayısı (yükleme tekrar sayısı)

<u>Malzeme</u>	<u>$f(N)$</u>
Bitümlü kaplamalar	$4,49 N^{0.25}$
Kırmataş temel	$2 N^{0.3}$ $h < 12 \text{ cm}$
	$2 N^{0.2}$ $h > 12 \text{ cm}$
Granüler alttemel	$2 N^{0.3}$
Taban zemini	$1 + 0,7 \log N$

- Bratislava Üniversitesi Modeli (Verstraeten, 1995):

BRRC ile aynı modeldir. Ancak, malzeme özellikleri farklıdır.

<u>Malzeme</u>	<u>$f(N)$</u>
Bitümlü kaplamalar	$4,49 N^{0.23}$
Bitümle stabilize edilmiş temel	$4,49 N^{0.25}$
Granüler malzeme	$2 N^{0.25}$
Taban zemini	$1,3 + 0,7 \log N$

- Mfinanga ve diğ. Modeli (1996):

Trafik yüklerinin ve çevresel etkilerin asfalt kaplamanın tekerlek izi davranışı üzerindeki etkilerini incelemişler ve aşağıdaki modelleri kurmuşlardır.

Trafik yüklerinin analizi:

$$RUT = a(EAL)^b \quad (2.9)$$

Burada;

RUT: Tekerlek izi (mm)

EAL : Japonya'da 10 ton standart kümülatif dingil yükü

$$a = 949,1 - 946 AGE^{0,001} \quad (2.10)$$

$$b = 0,119 + 0,00757 \text{ AGE} - 0,00000132\text{CBR}^4 \quad (2.11)$$

AGE: Kaplama yaşı (yıl)

Çevresel etkilerin analizi:

$$\text{RUT} = a.e^{b.AGE} \quad (2.12)$$

Burada;

$$a = 8,132 + 0,00333 \text{ EAL}^{0,5} - 0,00024 \text{ T}_A^3 \quad (2.13)$$

$$b = 0,05579 - 0,0029 \text{ CBR} \quad (2.14)$$

T_A : Kaplama kalınlığı (cm)

➤ Shami ve diğ. Modeli (1997):

Shami ve diğerleri (1997), farklı sıcaklık ve devir sayılarında oluşan tekerlek izi miktarları arasındaki oransal ilişkiye dayanan, sıcaklık etki modelini geliştirmişlerdir.

$$\left[\frac{R}{R_0} \right] = \left[\frac{T}{T_0} \right]^{2,625} \left[\frac{N}{N_0} \right]^{0,276} \quad (2.15)$$

Burada;

R : Tahmin edilecek tekerlek izi miktarı (mm)

R₀ : Referans deney koşullarındaki (T₀,N₀) referans tekerlek izi miktarı (mm)

T , N : Sıcaklık ve yük devir sayısı

T₀,N₀ : Referans sıcaklık ve referans yük devir sayısı

Bu model, 8.000 (N₀) devirde ve 50 °C (T₀)’de 5mm olan Georgia tekerlek izi sınır değerini, 8.000 (N) devirde ve 64 °C’deki sınır değere dönüştürmek için kullanılmıştır. Sınır değer 9,56 mm olarak bulunmuştur (Zhang ve diğ., 2002).

➤ Superpave (SHRP A-003A) Modeli:

(Model Shatnawi ve Lancaster (1997), Khosla ve Sadasivam (2002)’dan alınmıştır.)

$$\text{Tek.izi} = K * \gamma_p \quad (2.16)$$

Burada;

Tek.izi : Tekerlek izi derinliği (mm veya inç olarak)

K : Dönüştürme katsayısı (10-11 inç veya 254-279 mm)

γ_p : Maks. kalıcı kayma deformasyonu (Tekrarlı yüklemeli kayma testinden)

RSCH-Tekrarlı yüklemeli kayma testindeki yük uygulama sayısı, eşdeğer standart dingil yüküne aşağıdaki formülle dönüştürülür:

$$\text{Log}(\text{yükleme.say.}) = -4,36 + 1,24\text{Log}(\text{ESDY}) \quad (2.17)$$

➤ Archilla ve Madanat Modeli (2001a):

AASHO ve WesTrack yol testlerinden elde edilen verileri birleştirerek bir tekerlek izi modeli oluşturmuşlardır:

$$\Delta RD_{it} = \Delta RD_{it}^{AC} + \Delta RD_{it}^U \quad (2.18)$$

$$\Delta RD_{it}^U = a_{it} e^{bN_{it}} \Delta N_{it} \quad (2.19)$$

$$\Delta RD_{it}^{AC} = m_{it} e^{b'N_{it}'} \Delta N_{it}' \quad (2.20)$$

Burada;

ΔRD_{it} : t zamanında i bölgesindeki tekerlek izi derinliği

ΔRD_{it}^{AC} : t zamanında i bölgesinde asfalt betonundaki tekerlek izi derinliği

ΔRD_{it}^U : t zamanında i bölgesinde alt tabakalardaki tekerlek izi derinliği

a_{it} : Tabaka kalınlıkları ve donma-çözülmenin bir fonksiyonu

m_{it} : Karışım karakteristikleri(Gİ, VFA, AV), yükleme ve yüksek hava sıcaklıklarının bir fonksiyonu

b, b' : Negatif model parametreleri

N_{it} : Geçiş sayısı

➤ AASHTO 2002 Modeli:

(Bu model, Zhou ve diğ. (2004) yayınından alınmıştır.)

$$\text{Log} \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = \text{Log} C + 0,4262 \text{Log} N \quad (2.21)$$

Burada;

ε_p : Toplam kalıcı şekil değiştirme

ε_r : Geri dönen şekil değiştirme

N : Yükleme tekrar sayısı

$$C = T^{2,02755} / 5615,391 \quad (T: ^\circ\text{F}) \quad (2.22)$$

➤ NCHRP 2002 Modeli (Witczack ve El-Basyouny, 2004):

2002 NCHRP Kaplama Tasarım Klavuzu'nda, tekrarlı yüklemeli kalıcı deformasyon testlerinin istatistik analizine dayanan aşağıdaki model kullanılmaktadır.

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = aT^b N^c \quad (2.23)$$

Burada;

ε_p : Toplam plastik birim şekil değiştirme

ε_r : Geri dönen birim şekil değiştirme

N : Yükleme tekrar sayısı

T : Kaplama sıcaklığı

a, b, c : Regresyon katsayıları

Bu modelin gerçek yol koşullarına uygulanabilmesi için, kalibrasyon (düzeltme) katsayılarına (β_{ri}) gereksinim duyulmuştur. Düzeltme katsayıları kullanılarak model aşağıdaki duruma getirilmiştir:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = \beta_{r1} a T^{\beta_{r2} b} N^{\beta_{r3} c} \quad (2.24)$$

Bu genel model ilk olarak Leahy (1989) tarafından kullanılmış ve aşağıdaki model geliştirilmiştir. ($R^2=0,76$)

$$\log\left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r}\right) = -6,631 + 0,435 \log N + 2,767 \log T + 0,110 \log S + 0,118 \log \eta + 0,930 \log V_{beff} + 0,5011 \log V_a \quad (2.25)$$

Burada;

N : Yükleme tekrar sayısı

T : Karışım sıcaklığı ($^{\circ}\text{F}$)

S : Deviator gerilme (psi)

η : Viskozite (70F'ta) (10^6 poise)

V_{beff} : Efektif bitüm yüzdesi

V_a : Boşluk oranı

Modele uygulanan duyarlılık analizinden, en önemli değişkenin sıcaklık olduğu belirlenmiştir. Modelin diğer değişkenlere daha az duyarlı olduğu görülmüştür.

Aynı modeli Ayres de kullanmıştır. Leahy'nin deney verilerine eklemeler yapmış, ancak değişken sayısını azaltmıştır. Aşağıdaki modeli geliştirmiştir (Witczack ve El-Basyouny, 2004).

$$\log\left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r}\right) = -4,80661 + 2,58155 \log T + 0,429561 \log N \quad R^2=0,725 \quad (2.26)$$

NCHRP 9-19 “Superpave Models” projesi kapsamında, Leahy verileri ile birlikte “Superpave Models Task C” sonuçları da kullanılarak, Kaloush tarafından aşağıdaki modeller geliştirilmiştir (Witczack ve El-Basyouny, 2004).

$$\log\left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r}\right) = -3,15552 + 1,734 \log T + 0,39937 \log N \quad R^2=0,644 \quad (2.27)$$

$$\log\left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r}\right) = 0,3082 + 0,3534 \log N \quad R^2=0,550 \quad (2.28)$$

NCHRP 2002 Kaplama Tasarım Klavuzu'nda N (yük tekrar sayısı) ve T (karışım sıcaklığı)'nin birlikte bulunduğu model kullanılmıştır. Tasarım klavuzunda kullanılan bu modelin arazi koşulları için düzeltilmiş şekli aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = \beta_{r1} 10^{-3,15552} T^{1,734*\beta_{r2}} N^{0,39937*\beta_{r3}} \quad (2.29)$$

Burada;

$\beta_{r1}, \beta_{r2}, \beta_{r3}$: Asfalt karışımlar için tekerlek izi modeli düzeltme katsayılarıdır.

Yapılan çalışma sonucunda $\beta_{r2} = 0,9$ $\beta_{r3}=1,2$ olarak bulunmuştur. Modelin son hali aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = k_1 10^{-3,4488} T^{1,5606} N^{0,479244} \quad (2.30)$$

$$k_1 = (C_1 + C_2 * depth) * 0,328196^{depth} \quad (2.31)$$

$$C_1 = -0,1039 * H_{ac}^2 + 2,4868 * H_{ac} - 17,342 \quad (2.32)$$

$$C_2 = 0,0172 * H_{ac}^2 - 1,7331 * H_{ac} + 27,428 \quad (2.33)$$

Burada:

H_{ac} : Asfalt tabakanın toplam kalınlığı (in.)

$depth$: Deformasyonun hesaplandığı derinlik (in.)

- Fwa ve diğ. Modeli (2004):

$$\log(R) = a \log(N) + b \log(L) + c \log(T) + d \log(t) \quad (2.34)$$

Burada;

R : Tekerlek izi derinliği (mm)

N : Devir sayısı (yükleme tekrar sayısı)

L : Uygulanan yükün maksimum yüke oranı (taşıma kapasitesi (%))

T : Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)

t : Yükleme süresi (sn)

a, b, c, d : Regresyon katsayıları

- Rodriguez ve diğ. Modeli (2005):

$$T = C_{\theta} \alpha \left(\frac{C_w W}{1000 C_v} \right)^{\beta} + \delta \quad (2.35)$$

Burada;

T : Tekerlek izi derinliği (mm)

C_{θ} : Sıcaklık düzeltme katsayısı

α, β : Deneysel parametreler

C_w : Trafik düzeltme katsayısı

W : Toplam trafik (eşdeğer dingil) yükü

C_v : Hız düzeltme katsayısı

δ : Sabit

- Timm ve diğ. Modeli (2006):

$$RD = 41,46 - 0,413PG - 14,86FAC \quad (2.36)$$

Burada;

RD : Tekerlek izi (mm)

PG : Performans sınıfı

FAC : İri agreganın ince agregaya oranı

- Capitaio ve Picado-Santos Modeli (2006):

Tekerlek izi oluşumunu iki aşamada inceleyerek, iki model geliştirmişlerdir.

$\varepsilon_p < \% 2,84$ için,

$$\begin{aligned} \varepsilon_p = & -586,437 * 10^{-3} + 9,06 * 10^{-4} * Temp + 201,764 * 10^{-3} * \rho_m \\ & + 66,182 * 10^{-4} * V_b + 47,43 * 10^{-4} * V_v + 6,728 * 10^{-5} * rHD \end{aligned} \quad (2.37)$$

$\varepsilon_p \geq \% 2,84$

$$\begin{aligned} \varepsilon_p = & 33809,066 * 10^{-3} + 22,411 * 10^{-4} * Temp - 12,7334 * \rho_m \\ & - 204,863 * 10^{-3} * V_b - 35 * 10^{-2} * V_v - 40,748 * 10^{-3} * rHD \end{aligned} \quad (2.38)$$

Burada;

ε_p : Kalıcı deformasyon (3600 devirden sonra)(%)

$Temp$: Deney sıcaklığı ($^{\circ}C$)

ρ_m : Birim hacim ağırlık (gr/cm^3)

V_b : Bitüm oranı (%)

V_v : Boşluk oranı (%)

rHD : Numunenin yüksekliğinin çapına oranı

➤ Price ve diğ. Modeli (2007):

$$\varepsilon_p = b + D_1 N - D_2 e^{-\lambda N} \quad (2.39)$$

Burada;

ε_p : Kalıcı birim şekil değiştirme

b : Modelin doğrusal olan ikinci kısmının sabiti

D_1 : Modelin doğrusal olan ikinci kısmının eğimi

D_2 : Modelin üssel olan birinci kısmının sabiti

λ : Birinci bölgedeki kalıcı deformasyon oranı

➤ Seo ve diğ. Modeli (2007):

Üç eksenli tekrarlı yüklemeli kalıcı deformasyon deneylerinden aşağıdaki modeli geliştirmişlerdir.

$$\varepsilon_p = \varepsilon_r * k_1 * N^{[k_2 \ln(T) + k_3]} * e^{[k_4 T^{k_5} (\% AV)]} \quad (2.40)$$

Burada;

ε_p : Kalıcı birim şekil değiştirme

ε_r : Geri dönen birim şekil değıştirme

N: Yükleme tekrar sayısı

T: Sıcaklık $^{\circ}\text{C}$

%AV: Boşluk oranı

k_i : Regresyon katsayıları

3. ARAZİ ÇALIŞMALARI

Bu çalışmada, karayollarımızda yaygın olarak kullanılan farklı bitümlü sıcak karışım tiplerinin tekerlek izi oluşma potansiyellerinin incelenmesi amaçlandığı için, farklı bileşimlere sahip dört ayrı bitümlü sıcak karışım tipi seçilmiştir. Bunlar; TMA (taş mastik asfalt – stone mastic asphalt), normal ve modifiye bitümlü aşınma ile binder karışım tipleridir.

Tekerlek izi oluşumunda yolun boyuna eğiminin, yatay ve düşey kurb ile kavşakların dolaylı etkilerinin olabileceği düşünülerek, numunelerin eğimsiz ve düz (aliynman) yol kesimlerinden alınmasına dikkat edilmiştir.

3.1 Tekerlek İzi Numunelerinin ve Karotların Alınması

Çalışmanın kapsamını bitümlü tabakalarda görülen akma tekerlek izinin incelenmesi oluşturmaktadır. Deneyimler, akma tekerlek izinin oluşmasının yaklaşık 2-3 yıl sonunda görüldüğünü ortaya koymaktadır. Bu nedenle, numune alınacak yol kesiminin en az 2 yıl önce trafiğe açılmış (en az 2 yaz mevsimi geçirmiş) olması ve ayrıca, alt tabakalardan kaynaklanan herhangi bir kalıcı deformasyonun görülmemesi gerekmektedir. Bu konular göz önünde bulundurularak yapılan arazi incelemeleri sonucunda, farklı karışım tiplerine ait numunelerin alınacağı kesimler belirlenmiştir.

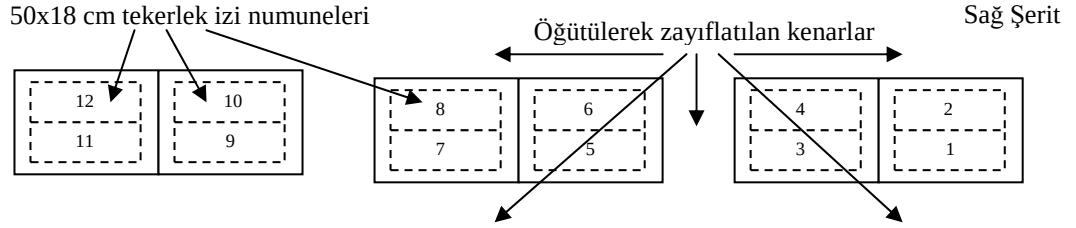
3.1.1 Aşınma ve Binder Tabakalarından Numunelerin Alınması

Aşınma ve binder numuneleri, Karayolları 1. Bölge Müdürlüğü'ne bağlı yol ağından, İstanbul – Ankara Otoyolu (Anadolu Otoyolu) Adapazarı mevki, 99+450 ile 99+500 kilometreleri arasındaki kesimden alınmıştır.

Tekerlek izi numuneleri sağ şeridin ortasından, gidiş yönüne paralel olarak Şekil 3.1 'de görüldüğü gibi alınmıştır. Öncelikle numunelerin alınacağı kısımlar yol üzerinde işaretlenmiştir. Kesilerek alınacak bloklar, tekerlek izi deneyi için gerekli numune boyutlarından daha büyük olarak belirlenmiştir. Bunun nedeni, bloklardan kesilerek

deney boyutlarına getirilecek numunelerin herhangi bir hasar görmemesi zorunluluğudur.

Emniyet Şeridi



Şekil 3.1: Aşınma ve binder tekerlek izi numunelerinin alınması (ölçeksiz plan)

Numunelerin aşınma ve binder tabakalarından tahrip edilmeden alınabilmeleri için, blokların kenarları yaklaşık 30 cm derinliğe kadar kemirici (trimmer) makine ile öğütülerek zayıflatılmıştır (Şekil 3.2.a,b,c,d).



Şekil 3.2.a,b,c,d: Kemirici makina ile blok kenarlarının zayıflatılması

Bitümlü temel, binder ve aşınma tabakalarından oluşan bloklar tahrip edilmeden kaldırılmıştır (Şekil 3.3.a,b). Yalnızca binder ve aşınma tabakası kalacak şekilde bitümlü temel tabakası da bloklardan sıyrılmıştır. Bloklar asfalt kesme makinası ile kesilerek daha küçük bloklar haline getirilmiştir (Şekil 3.4).



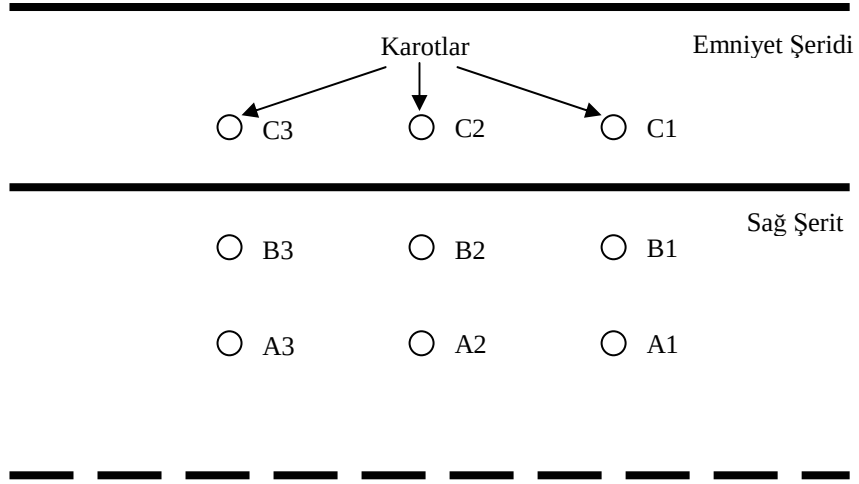
Şekil 3.3.a,b: Blokların tahrip edilmeden kaldırılması



Şekil 3.4: Blokların asfalt kesme makinası ile kesilmesi

6 blok, herbirinden 2 numune elde edilecek şekilde, İTÜ Maden Fakültesi Kaya Mekaniği Laboratuvarı'nda kesilmiş ve numuneler tekerlek izi deneyi için uygun boyutlara (50x18 cm) getirilmiştir.

Tekerlek izi numunelerinin alındığı yol kesiminden 9 adet de karot Şekil 3.5 'te görüldüğü gibi kesilerek alınmıştır. Bu numunelerin üçü sağ şerit ortasından, üçü tekerlek izi üzerinden ve diğer üçü de emniyet şeridinden alınmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.5: Aşınma ve binder karotlarının alınması (ölçeksiz plan)



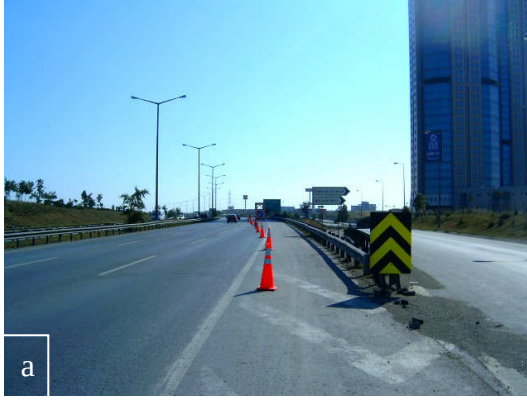
Şekil 3.6: Aşınma ve binder karotlarının alınması

Tekerlek izi numunelerinin ve karotların alındığı kısımlar, numune alımı tamamlandıktan sonra yama işlemi yapılarak onarılmıştır.

3.1.2 TMA (Taş Mastik Asfalt) Kaplamadan Numunelerin Alınması

Taş mastik asfalt (TMA) numuneleri, Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü'ne bağlı yol ağından, Mahmutbey Doğu Kavşağı mevki, Ankara yönündeki sağ şeritten alınmıştır.

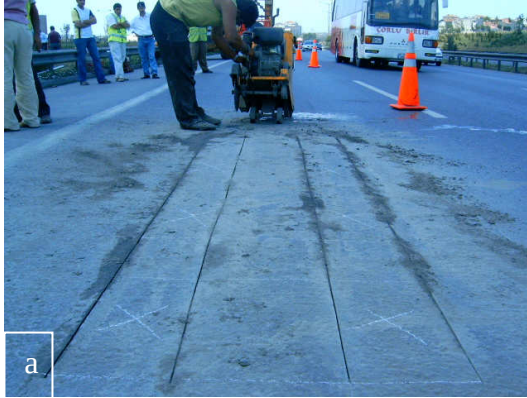
Öncelikle trafik ve çalışma güvenliğini sağlamak için, uygun trafik işaretlemesi kullanılarak sağ şerit trafiğe kapatılmıştır (Şekil 3.7.a,b). Daha sonra numunelerin alınacağı kısımlar yol üzerinde işaretlenmiştir (Şekil 3.8.a,b). Tekerlek izi numuneleri sağ şeridin ortasından, gidiş yönüne paralel olarak alınmıştır. Plakların tahrip edilmeden alınabilmeleri için, aralarındaki kısımlar kırıcı makina ile kırılarak boşaltılmış ve böylece kenarları zayıflatılmıştır (Şekil 3.9.a,b,c,d).



Şekil 3.7.a,b: Uygun trafik işaretleriyle sağ şeridin trafiğe kapatılması (TMA)



Şekil 3.8.a,b: Kesilecek kısımların yol üzerinde işaretlenmesi (TMA)



Şekil 3.9.a,b,c,d: Plakların kesilmesi ve kenarlarının zayıflatılması (TMA)

Kenarları zayıflatılmış plaklar tahrip edilmeden (kırıcının alttan ve yandan kuvvet uygulamasıyla) yerlerinden kaldırılmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10: Kesilen plakların tahrip edilmeden alınması (TMA)

Kesilerek alınan bu plaklar, tekerlek izi deneyi için gerekli numune boyutlarından daha büyük olarak belirlenmiştir. Daha sonra, bu plaklar laboratuvarında kenarlarından kesilerek uygun boyutlara (50x18x5 cm) getirilmiştir.

Karotların alınacağı yerler için 4 enine yol kesiti belirlenmiştir. Her kesitten 4'er adet olmak üzere toplam 16 karot kesilerek alınmıştır (Şekil 3.11.a,b). Karotların dördü emniyet şeridinden, dördü sağ şerit ortasından, dördü sağ tekerlek izi üzerinden, dördü de sol tekerlek izi üzerinden alınmıştır.



Şekil 3.11.a,b: TMA kaplamadan karotların alınması

Numunelerin alındığı kısımlar tamamen boşaltılarak temizlenmiştir (Şekil 3.12.a,b). Daha sonra bitümlü sıcak karışım kullanılarak yama yapılmış ve sıkıştırılmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.12.a,b: Numune alınan kısımların boşaltılıp temizlenmesi (TMA)

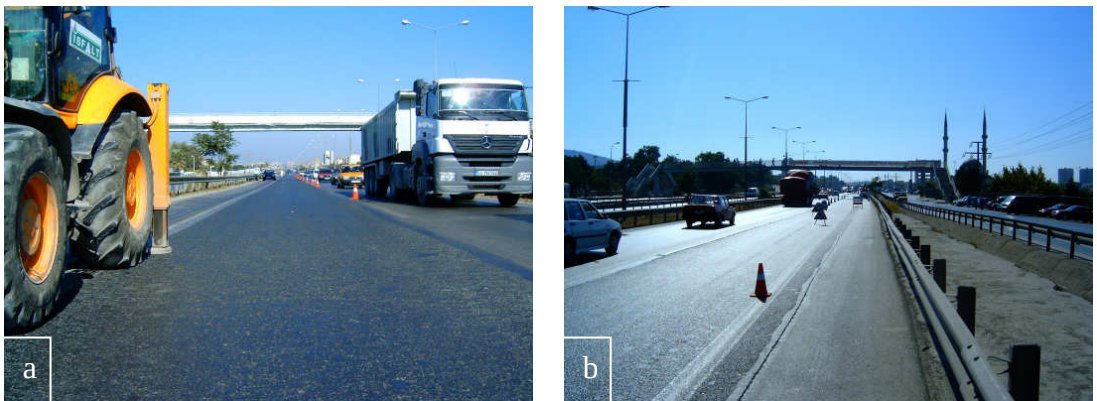


Şekil 3.13: Yapılan yamanın sıkıştırılması (TMA)

3.1.3 Modifiye Bitümlü Aşınma Tabakasından Numunelerin Alınması

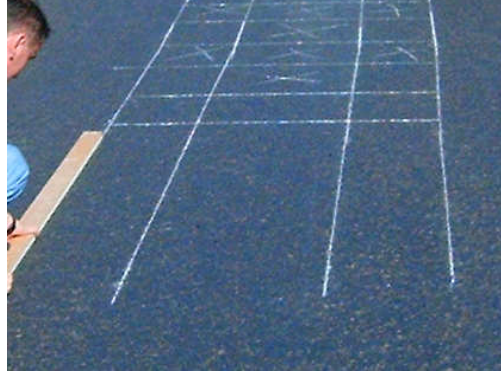
Modifiye bitümlü aşınma numuneleri ise, E-5 karayolu Kartal mevki, Ankara yönündeki sağ şeritten alınmıştır.

Taş mastik asfalt (TMA) kaplamada olduğu gibi burada da aynı yöntem kullanılmıştır. Öncelikle trafik ve çalışma güvenliğini sağlamak için, uygun trafik işaretlemesi kullanılarak sağ şerit trafiğe kapatılmıştır (Şekil 3.14.a,b).



Şekil 3.14.a,b: Uygun trafik işaretleriyle sağ şeridin trafiğe kapatılması (Modifiye)

Daha sonra numunelerin alınacağı kısımlar yol üzerinde işaretlenmiştir (Şekil 3.15). Tekerlek izi numuneleri sağ şeridin ortasından, gidiş yönüne paralel olarak alınmıştır. Plakların tahrip edilmeden alınabilmeleri için, aralarındaki kısımlar kırıcı makina ile kırılmış ve yerleri boşaltılarak kenarları zayıflatılmıştır (Şekil 3.16.a,b,c,d).



Şekil 3.15: Kesilecek kısımların yol üzerinde işaretlenmesi (Modifiye)



Şekil 3.16.a,b,c,d: Plakların kesilmesi ve kenarlarının zayıflatılması (Modifiye)

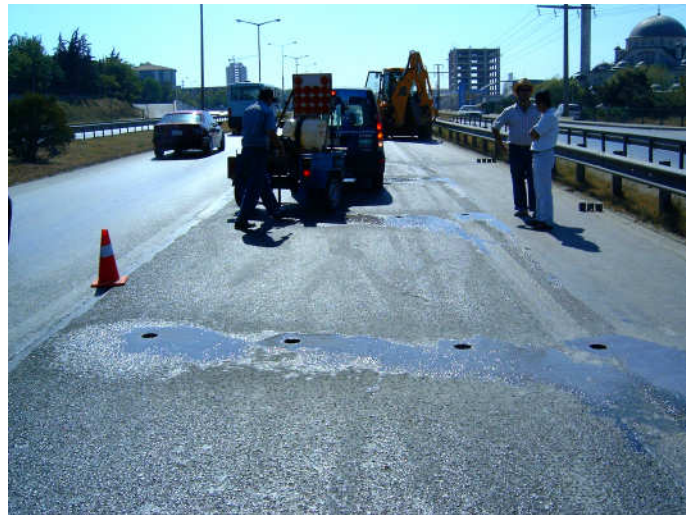
Kenarları zayıflatılmış plaklar tahrip edilmeden (kırıcının alttan ve yandan kuvvet uygulamasıyla) yerlerinden kaldırılmıştır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17: Kesilen plakların tahrip edilmeden alınması (Modifiye)

Kesilerek alınan bu plaklar, tekerlek izi deneyi için gerekli numune boyutlarından daha büyük olarak belirlenmiştir. Daha sonra, bu plaklar laboratuvarında kenarlarından kesilerek uygun boyutlara (50x18x5 cm) getirilmiştir.

Karotların alınacağı yerler için yine 4 enine yol kesiti belirlenmiştir. Her kesitten 4'er adet olmak üzere toplam 16 karot kesilerek alınmıştır (Şekil 3.18). Karotların dördü emniyet şeridinden, dördü sağ şerit ortasından, dördü sağ tekerlek izi üzerinden, dördü de sol tekerlek izi üzerinden alınmıştır.



Şekil 3.18: Modifiye bitümlü aşınma tabakasından karotların alınması

Numunelerin alındığı kısımlar tamamen boşaltılarak temizlenmiştir. Daha sonra bitümlü sıcak karışım kullanılarak yama yapılmış ve sıkıştırılmıştır.

3.2 Numunelerin Alındığı Kesimlerdeki Tekerlek İzi Ölçümleri

Tekerlek izi derinliğini ölçmek için 1,8 m uzunluğunda düz bir master kullanılmıştır. Bu master, gidiş yönüne dik, tekerlek izi üzerine enlemesine yerleştirilerek maksimum derinlik ölçülmüştür (Şekil 3.19). Tekerlek izi boyunca 6 m ‘de bir ölçümler alınmış ve ortalaması tekerlek izi derinliği olarak bulunmuştur.



Şekil 3.19: Tekerlek izi derinliğinin ölçülmesi

3.2.1 Aşınma ve Binder Numunelerinin Alındığı Kesimdeki Tekerlek İzi Ölçümleri

Aşınma ve binder numunelerinin alındığı kesimde yapılan tekerlek izi ölçümleri Tablo 3.1 ‘de görülmektedir.

Tablo 3.1: Aşınma ve binder numunelerinin alındığı kesimdeki tekerlek izi ölçümleri

Ölçüm No	Tekerlek İzi Derinliği (mm)	Ölçüm No	Tekerlek İzi Derinliği (mm)
1	16	12	3
2	13	13	3
3	2	14	2
4	3	15	4
5	2	16	0
6	2	17	6
7	5	18	9
8	8	19	4
9	2	20	10
10	2	21	12
11	5	22	6

$$\text{Ort. tekerlek izi derinliği} = \sum(\text{tekerlek izi derinlikleri}) / \sum(\text{ölçüm sayısı}) \quad (3.1)$$

$$= 119 / 22 = 5,41 \text{ mm}$$

3.2.2 TMA Numunelerinin Alındığı Kesimdeki Tekerlek İzi Ölçümleri

TMA numunelerinin alındığı kesimde yapılan tekerlek izi ölçümleri Tablo 3.2’de görülmektedir.

Tablo 3.2: TMA numunelerinin alındığı kesimdeki tekerlek izi ölçümleri

Ölçüm No	Tekerlek İzi Derinliği (mm)	Ölçüm No	Tekerlek İzi Derinliği (mm)
1	8	21	11
2	5	22	12
3	6	23	8
4	7	24	7
5	8	25	7
6	8	26	9
7	7	27	6
8	8	28	8
9	9	29	7
10	9	30	2
11	7	31	8
12	8	32	3
13	10	33	7
14	8	34	6
15	9	35	6
16	11	36	4
17	9	37	5
18	14	38	6
19	12	39	8
20	9	40	8

$$\text{Ort. tekerlek izi derinliği} = \Sigma(\text{tekerlek izi derinlikleri}) / \Sigma(\text{ölçüm sayısı}) \quad (3.2)$$

$$= 310 / 40 = 7,75 \text{ mm}$$

3.2.3 Modifiye Bitümlü Aşınma Numunelerinin Alındığı Kesimdeki Tekerlek İzi Ölçümleri

Modifiye bitümlü aşınma numunelerinin alındığı kesimde yapılan tekerlek izi ölçümleri Tablo 3.3’de görülmektedir.

Tablo 3.3: Modifiye bitümlü aşınma numunelerinin alındığı kesimdeki tekerlek izi ölçümleri

Ölçüm No	Tekerlek İzi Derinliği (mm)	Ölçüm No	Tekerlek İzi Derinliği (mm)
1	2	9	2
2	4	10	2
3	2	11	2
4	3	12	1
5	2	13	1
6	1	14	2
7	2	15	2
8	2	16	2

$$\begin{aligned}\text{Ort. tekerlek izi derinliği} &= \sum(\text{tekerlek izi derinlikleri}) / \sum(\text{ölçüm sayısı}) \quad (3.3) \\ &= 32 / 16 = 2,00 \text{ mm}\end{aligned}$$

3.3 Numunelerin Alındığı Kesimlerdeki Malzeme ve Karışım Özellikleri

Tekerlek izi numunelerinin ve karotların alındığı kesimlerdeki malzeme ve karışım özellikleri, kaplama tabakalarının yapımından önce hazırlanan karışım tasarım raporlarından alınmıştır. Aşınma, binder, TMA ve modifiye bitümlü aşınma numunelerinin alındığı kesimlerdeki malzeme ve karışım özellikleri aşağıda verilmiştir.

3.3.1 Aşınma Numunelerinin Alındığı Kesimdeki Malzeme ve Karışım Özellikleri

Aşınma numunelerinin alındığı kesimdeki malzeme ve karışım özellikleri KGM 1. Bölge Müdürlüğü tarafından hazırlanan “Anadolu Otoyolu İzmit Adapazarı Kesimi Üstyapı Takviyesi İşi Aşınma Dizayn Raporu” ndan alınmıştır.

Bu kesimde Geyve taşocağında üretilen kireçtaşı agregalar kullanılmıştır. Agregatane boyutu dağılımları, karışım oranları, karışım tane dağılımı ve şartname limitleri Tablo 3.4 ‘te verilmiştir.

Malzemelere ait deneysel değerler Tablo 3.5 ‘te, karışıma ait değerler ise Tablo 3.6 ‘da görülmektedir.

Tablo 3.4: Karışım tane dağılımı ve şartname limitleri (Aşınma)

Elek Açıklığı		%15 3/4"-1/2"	%45 1/2"-No.4	%40 No.4-0	Karışım	Toleranslar	Şartname Sınırları (Tip 2 -2002)
		%'de Geçen	%'de Geçen	%'de Geçen	%'de Geçen		
19	3/4"	100			100	100	100
12,7	1/2"	42,3	100		91,3	86-96	83-100
9,5	3/8"	4,6	87,8		80,2	75-85	70-90
4,75	No.4	0,9	24,2	100	51	46-55	40-55
2,00	No.10		4,7	68	29,3	25-33	25-38
0,425	No.40		1,6	35,7	15,6	12-20	10-20
0,177	No.80			25,9	11,1	7-15	6-15
0,075	No.200			16,7	6,7	5-9	4-10

Tablo 3.5: Malzemelere ait deneysel değerler (Aşınma)

Bitüm özgül ağırlığı	1,024	Bitüm penetrasyonu	70
Agreganın bitüm emme düzeyi	0,97	Kaba agrega hacim öz. ağı.	2,592
Agrega kar. efek. öz. ağı. (deneyle)	2,707	Kaba agrega zahiri öz. ağı.	2,723
Agrega kar. efek. öz. ağı. (hesapla)	2,666	İnce agrega hacim öz. ağı.	2,598
Agrega kar. hacim öz. ağı.	2,603	İnce agrega zahiri öz. ağı.	2,738
Agrega karışımının zahiri öz. ağı.	2,729	Filler zahiri öz. ağı.	2,709

Tablo 3.6: Karışım bileşimine ait değerler (Aşınma)

Optimum bitüm (%)	5,75±0,30
Karışımın pratik özgül ağırlığı	2,354
Maksimum teorik özgül ağırlık	2,452
Marshall stabilite değeri (Kg)	1150
Akma (mm)	3,18
Agregalar arası boşluk VMA (%)	14,5
Asfaltla dolu boşluk VFA (%)	72,4
Boşluk oranı (%)	4

3.3.2 Binder Numunelerinin Alındığı Kesimdeki Malzeme ve Karışım Özellikleri

Binder numunelerinin alındığı kesimdeki malzeme ve karışım özellikleri, KGM tarafından “Anadolu Otoyolu İzmit Adapazarı Kesimi Üstyapı İyileştirilmesi İşi” için hazırlanan binder tabakası karışım tasarımından alınmıştır.

Bu kesimde Çalıbayırı kalker taşocağında üretilen agregalar kullanılmıştır. Karışım tane dağılımı ve şartname limitleri Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.7: Karışım tane dağılımı ve şartname limitleri (Binder)

Elek Açıklığı		Karışım (%’de Geçen)	Toleranslar	Şartname Sınırları
mm	in.			
25,4	1	100	100	100
19,0	3/4”	91,9	86,9-96,9	80-100
12,7	1/2”	70,2	65,2-75,2	58-80
9,5	3/8”	57,4	52,4-62,4	48-70
4,75	No.4	41,3	36,3-46,3	30-52
2,00	No.10	25	21,0-29,0	20-40
0,425	No.40	10,8	6,8-14,8	8-22
0,177	No.80	7,5	3,5-11,5	5-14
0,075	No.200	4,8	2,8-6,8	2-8

Malzemelere ait deneysel değerler Tablo 3.8’de, karışıma ait değerler ise Tablo 3.9’da görülmektedir.

Tablo 3.8: Malzemelere ait deneysel değerler (Binder)

Bitüm özgül ağırlığı	1,030	Bitüm penetrasyonu	60
Agreganın bitüm absorpsiyonu	0,40	Kaba agrega hacim öz. ağı.	2,668
Agrega kar. efek. öz. ağı. (deneyle)	2,693	Kaba agrega zahiri öz. ağı.	2,720
Agrega kar. efek. öz. ağı. (hesapla)	2,687	İnce agrega hacim öz. ağı.	2,639
Agrega kar. hacim öz. ağı.	2,659	İnce agrega zahiri öz. ağı.	2,707
Agrega kar. zahiri öz. ağı.	2,715	Filler zahiri öz. ağı.	2,710

Tablo 3.9: Karışım bileşimine ait değerler (Binder)

Optimum bitüm (%)	4,15
Pratik özgül ağırlık	2,414
Maksimum teorik özgül ağırlık	2,525
Marshall stabilite değeri (Kg)	1070
Akma (mm)	3,18
Agregalar arası boşluk VMA (%)	12,8
Asfaltla dolu boşluk VFA (%)	65,7
Boşluk oranı (%)	4,4

3.3.3 TMA Numunelerinin Alındığı Kesimdeki Malzeme ve Karışım Özellikleri

TMA numunelerinin alındığı kesimdeki malzeme ve karışım özellikleri, KGM 17. Bölge Müdürlüğü tarafından “Kınalı – Mahmutbey Arası Tem Otoyolu ve Bağlantı Yolları Üstyapı İyileştirmesi ve Büyük Onarım İşi” için hazırlanan TMA aşınma tabakası karışım tasarımından alınmıştır.

Bu kesimde Karatepe taşocağında üretilen bazalt türü kaba ve ince agregalarla kalker türü filler kullanılmıştır. Karışım tane dağılımı ve şartname limitleri Tablo 3.10’da verilmiştir. Karışım ağırlığının %0,5’i oranında selülozik fiber karışıma katılmıştır.

Tablo 3.10: Karışım tane dağılımı ve şartname limitleri (TMA)

Elek Açıklığı		Karışım (%’de Geçen)	Toleranslar	Şartname Sınırları
mm	in.			
19,0	3/4”	100	100	100
12,7	1/2”	94,7	90,7-98,7	90-100
9,5	3/8”	62,3	58,3-66,3	50-75
4,75	No.4	36,4	33,4-39,4	25-40
2,00	No.10	22,8	20-25,8	20-30
0,425	No.40	14,6	12-17,6	12-22
0,177	No.80	11,7	9-14,7	9-17
0,075	No.200	8,6	8-10,6	8-14

Malzemelere ait deneysel değerler Tablo 3.11’de, karışıma ait değerler ise Tablo 3.12’de görülmektedir.

Tablo 3.11: Malzemelere ait deneysel değerler (TMA)

Bitüm özgül ağırlığı	1,023	Bitüm penetrasyonu	60
Agreganın bitüm absorpsiyonu	0,51	Kaba agrega hacim öz. ağı.	2,834
Agrega kar. efek. öz. ağı. (deneyle)	2,858	Kaba agrega zahiri öz. ağı.	2,910
Agrega kar. efek. öz. ağı. (hesapla)	2,861	İnce agrega hacim öz. ağı.	2,798
Agrega kar. hacim öz. ağı.	2,821	İnce agrega zahiri öz. ağı.	2,913
Agrega kar. zahiri öz. ağı.	2,901	Filler zahiri öz. ağı. (kalker)	2,804

Tablo 3.12: Karışım bileşimine ait değerler (TMA)

Optimum bitüm (%)	6,40
Pratik özgül ağırlık	2,511
Maksimum teorik özgül ağırlık	2,582
Marshall stabilite değeri (Kg)	880
Akma (mm)	3,04
Agregalar arası boşluk VMA (%)	16,4
Asfaltla dolu boşluk VFA (%)	83,1
Boşluk oranı (%)	2,76

3.3.4 Modifiye Bitümlü Aşınma Numunelerinin Alındığı Kesimdeki Malzeme ve Karışım Özellikleri

Modifiye bitümlü aşınma numunelerinin alındığı kesimdeki malzeme ve karışım özellikleri, İsfalt A. Ş. tarafından hazırlanan modifiye bitümlü aşınma tabakası karışım tasarımıından alınmıştır.

Bu kesimde Ömerli bölgesi taşocaklarında üretilen kalker türü agregalar kullanılmıştır. Karışım tane dağılımı ve şartname limitleri Tablo 3.13’de verilmiştir. Karışım ağırlığının %0,6’sı oranında modifiye katkı maddesi (Pr. Flex) karışıma katılmıştır.

Malzemelere ait deneysel değerler Tablo 3.14’te, karışıma ait değerler ise Tablo 3.15’te görülmektedir.

Tablo 3.13: Karışım tane dağılımı ve şartname limitleri (Mod. Bit. Aşınma)

Elek Açıklığı		Karışım (%’de Geçen)	Toleranslar	Şartname Sınırları (Tip 2 - 2004)
mm	in.			
19,0	3/4”	100	100	100
12,7	1/2”	88,8	84-94	83-100
9,5	3/8”	73,9	70-79	70-90
4,75	No.4	47,9	43-53	40-55
2,00	No.10	27,7	25-32	25-38
0,425	No.40	11,6	10-16	10-20
0,177	No.80	8,1	6-12	6-15
0,075	No.200	6,2	4-8	4-10

Tablo 3.14: Malzemelere ait deneysel değerler (Mod. Bit. Aşınma)

Bitüm özgül ağırlığı	1,019	Bitüm penetrasyonu	70
Agreganın bitüm absorpsiyonu	0,10	Kaba agrega hacim öz. ağı.	2,732
Agrega kar. efek. öz. ağı. (deneyle)	2,734	Kaba agrega zahiri öz. ağı.	
Agrega kar. efek. öz. ağı. (hesapla)		İnce agrega hacim öz. ağı.	2,705
Agrega kar. hacim öz. ağı.	2,727	İnce agrega zahiri öz. ağı.	
Agrega kar. zahiri öz. ağı.		Filler zahiri öz. ağı. (kalker)	2,835

Tablo 3.15: Karışım bileşimine ait değerler (Mod. Bit. Aşınma)

Optimum bitüm (%)	4,75±0,3
Pratik özgül ağırlık	2,466
Maksimum teorik özgül ağırlık	2,548
Marshall stabilite değeri (Kg)	1200
Akma (mm)	3,20
Agregalar arası boşluk VMA (%)	14,5
Asfaltla dolu boşluk VFA (%)	78
Boşluk oranı (%)	3,20

3.4 Numunelerin Alındığı Kesimlere Ait Trafik Değerleri

Numunelerin alındığı kesimlere ait trafik değerleri, bu kesimlerin trafiğe açıldığı tarih ile tekerlek izi numunelerinin alındığı tarih arasındaki sürede geçen toplam trafiği kapsamaktadır. YOGT değerleri esas alınarak, numunelerin alındığı sağ şeritten geçen toplam eşdeğer standart dingil yükü hesaplanmıştır.

3.4.1 Aşınma ve Binder Numunelerinin Alındığı Kesime Ait Trafik Değerleri

Numunelerin alındığı kesim Mayıs 2002’de trafiğe açılmıştır. Numuneler Haziran 2004’te alınmıştır. Dolayısıyla kaplama, 2002’de 245 gün, 2003’te 365 gün ve 2004’te 152 gün trafiğe hizmet vermiştir. Bu sürede geçen trafik, İzmit – Adapazarı kesiminin 2000, 2002, 2003 ve 2004 YOGT değerleri esas alınarak hesaplanmıştır (Tablo 3.16). 2000 yılına ait YOGT değerleri, 2002 yılına ait YOGT değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır.

Tablo 3.16: İzmit – Adapazarı kesiminin sağ şeridindeki toplam eşdeğer standart dingil hesabı

		YOGT #	
		Hafif Taşıt	Ağır Taşıt
Yıllar (Gün)	2002 *	8 252	6 027
	2003 *	9 832	6 002
	2004 *	11 528	6 726
	2002 (245)	2 021 740	1 476 615
	2003 (365)	3 588 680	2 190 730
	2004 (152)	1 752 256	1 022 352
Toplam Trafik		7 362 676	4 689 697
Eşdeğerlik Faktörleri +		0,5	3,0
Toplam Eşdeğer Standart Dingil		3 681 338	14 069 091
		17 750 429	
Hesap Şeridindeki Toplam Eşd. Stan. Dingil (Şerit Dağ. Faktörü = 0,80)		14 200 343	

* Düzce – Kaynaşlı kesiminin artış oranı kullanılmıştır.

KGM Ulaşım ve Trafik Bilgileri (KGM, 2000, 2002, 2003, 2004)

+ Ulaştırma Ana Planı Stratejisi Sonuç Raporu (2005)’ndan yararlanılmıştır.

3.4.2 TMA Numunelerinin Alındığı Kesime Ait Trafik Değerleri

Numunelerin alındığı kesim 15.09.2001 tarihinde trafiğe açılmıştır. Numuneler 12.06.2005 tarihinde alınmıştır. Dolayısıyla kaplama, 2001’de 107 gün, 2002’de 365 gün, 2003’te 365 gün, 2004’te 366 gün ve 2005’te 162 gün trafiğe hizmet vermiştir. Bu sürede geçen trafik, Avcılar – Mahmutbey kesiminin 2001, 2002, 2003, 2004 ve 2005 YOGT değerleri esas alınarak hesaplanmıştır (Tablo 3.17). (Tekstilkent mevkiinden geçen trafik, Avcılar – Mahmutbey kesiminden geçen trafiğin yaklaşık %40’ı olduğu sayımlarla belirlenmiştir.)

Tablo 3.17: Avcılar – Mahmutbey (Tekstilkent mevki) kesiminin sağ şeridindeki toplam eşdeğer standart dingil hesabı

		YOGT #	
		Hafif Taşıt	Ağır Taşıt
Yıllar (Gün)	2001	23 322	5 760
	2002	22 766	5 479
	2003	30 052	6 217
	2004	38 662	7 008
	2005	39 243	10 891
	2001 (107)	2 495 454	616 320
	2002 (365)	8 309 590	1 999 835
	2003 (365)	10 968 980	2 269 205
	2004 (366)	14 150 292	2 564 928
	2005 (162)	6 357 366	1 764 342
Toplam Trafik		42 281 682	9 214 630
Eşdeğerlik Faktörleri		0,5	3,0
Toplam Eşdeğer Standart Dingil		21 140 841	27 643 890
		48 784 731	
Hesap Şeridindeki Toplam Eşd. Stan. Dingil (Şerit Dağ. Faktörü = 0,80)		39 027 785	
Tekstilkent Kısımı (~%40)		15 611 114	

KGM Ulaşım ve Trafik Bilgileri (KGM, 2001,2002,2003,2004,2005)

3.4.3 Modifiye Bitümlü Aşınma Numunelerinin Alındığı Kesime Ait Trafik Değerleri

Numunelerin alındığı kesim 05.09.2004 tarihinde trafiğe açılmıştır. Numuneler 30.07.2006 tarihinde alınmıştır. Dolayısıyla bu sürede geçen trafik, Kartal E-5 kesiminin 2004, 2005 ve 2006 YOGT değerleri esas alınarak hesaplanmıştır (Tablo 3.18).

Tablo 3.18: Kartal E–5 kesiminin sağ şeridindeki toplam eşdeğer standart dingil hesabı

		YOGT [#]				
		Otomobil	Orta Yük. Tic. Taşıt	Otobüs	Kamyon	Kamy.+Röm., Çekici+Yarı Röm.
Yıllar (Gün)	2004	43 997	4 249	1 099	7 051	2 126
	2005	46 637	4 379	1 110	7 474	2 317
	2006	46 534	5 464	1 071	7 093	3 045
	2004 (117)	5 147 649	497 133	128 583	824 967	248 742
	2005 (365)	17 022 505	1 598 335	405 150	2 728 010	845 705
	2006 (210)	9 772 140	1 147 440	224 910	1 489 530	639 450
	Toplam Trafik	31 942 294	3 242 908	758 643	5 042 507	1 733 897
Eşdeğerlik Faktörleri*		0,0006	0,60	3,20	2,90	4,10
Toplam Eşdeğer Standart Dingil		19 165	1 945 745	2427658	14 623 270	7 108 978
		26 124 816				
Hesap Şeridindeki Top. Eşd. Stan. Dingil (Yön Dağ. Faktörü=0,50) (Şerit Dağ. Faktörü=0,90)		11 756 167				

[#] KGM Ulaşım ve Trafik Bilgileri (KGM, 2004, 2005, 2006)

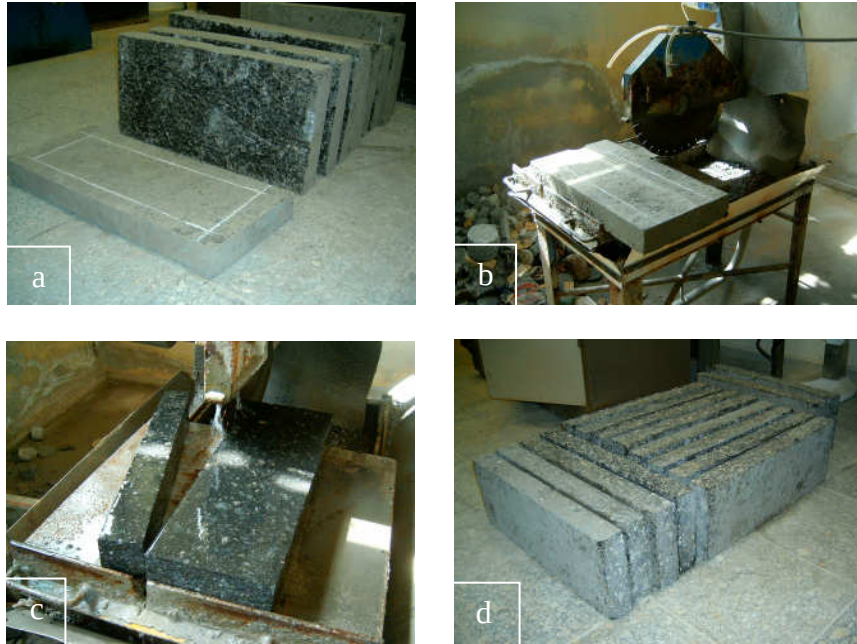
* Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi (Sağlık ve Güngör, 2006)

4. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Araziden alınan tekerlek izi numunelerine ve karotlara, bir laboratuvar çalışma planı çerçevesinde çeşitli deneyler uygulanmıştır. Laboratuvar çalışmaları kapsamında, alınan 56 adet tekerlek izi numunesinin 44 'üne, KGM Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şube Müdürlüğü 'nün Bitümlü Sıcak Karışımlar Laboratuvarı 'nda tekerlek izi deneyleri yapılmıştır. Alınan 50 karottan 38 'ine ise, İsfalt A. Ş. Bitümlü Sıcak Karışımlar Laboratuvarı 'nda statik sünme, dinamik (tekrarlı) sünme ve dolaylı çekme modülü deneyleri uygulanmıştır.

4.1 Tekerlek İzi Numunelerine Uygulanan Deneyler

Araziden daha büyük boyutlarda kesilerek alınan numuneler, önce tekerlek izi deneyi için uygun boyutlara (50x18x5 cm) getirilmiştir (Şekil 4.1.a,b,c,d). Daha sonra kesin boyutları hassas bir şekilde ölçülmüştür. Ayrıca D_p (pratik birim hacim ağırlık) 'leri belirlenmiştir. Tekerlek izi deneyinde aynı anda iki numune test edilmektedir. Bu nedenle, asimetrik yüklemekten kaçınmak için kalınlıkları ve D_p 'leri birbirine yakın olan numuneler seçilmiştir.



Şekil 4.1.a,b,c,d: Tekerlek izi numunelerinin deney boyutlarına getirilmesi

4.1.1 Boyutların ve D_p (Pratik Birim Hacim Ağırlık)'lerin Belirlenmesi

Tekerlek izi numunelerinin standart boyutları 50x18x5 cm 'dir. Kesim sırasında bu boyutlardan küçük sapmalar olabilir. Boyutlardaki sapmanın kabul edilebilir değeri ± 5 mm'dir. Tekerlek izi numunelerinin boyutları en, boy ve kalınlık olarak hassas bir şekilde ölçülmüştür. En üç ölçümün, boy iki ölçümün ve kalınlık sekiz ölçümün ortalaması olarak bulunmuştur. Her bir karışım için bulunan sonuçlar Ek B'de verilmiştir.

Tekerlek izi numunelerinin D_p (pratik birim hacim ağırlık)'lerini belirlemek için, numunelerin havadaki, sudaki ve doymuş kuru yüzeyli ağırlıkları ölçülmüştür. Sonuçlar her bir karışım için Ek B'de verilmiştir. Ortalama değerler, aşınma için 2,29, binder için 2,36, TMA için 2,45, modifiye bitümlü aşınma için 2,34 g/cm³'tür.

4.1.2 Tekerlek İzi Deneyleri

Tekerlek izi deneyleri için Fransız LCPC deney cihazı kullanılmıştır. Deneyler, yollarda görülebilecek ortam ve hizmet (servis) sıcaklıkları olarak, 45, 50, 55, 60 ve 65 °C sıcaklıklarda yapılmıştır. Her bir deney için toplam 5000 devir uygulanmıştır.

Başlangıçta karışımın pekleşmesi ve düzgün bir yüzeye sahip olması için genellikle 15 – 25 °C'de 1000 devir uygulanır. Bu işlem laboratuvarında hazırlanan numuneler için geçerlidir. Araziden alınan numuneler pekleşmiş durumdadır. Bu nedenle yalnızca numunenin kalıba yerleşmesi için 100 devir uygulanması uygun bulunmuştur.

İlk 100 devirden sonra, duyarlılığı 0,01 mm olan elektronik bir kumpas kullanılarak, 15 standart pozisyondan derinlik ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümler tekerlek izi derinliği ölçümlerine başlangıç olan referans yüzeyini belirlemektedir. Daha sonra numuneler deney cihazı içinde test sıcaklığına kadar ısıtılmıştır.

Deney başladıktan sonra, 30, 50, 100, 200, 300, 500, 1000, 2000, 3000 ve 5000 devirlerde derinlik ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlerle başlangıç ölçümünün farkı alınarak, her bir ölçümde oluşan tekerlek izi derinlikleri bulunmuştur. Sonuç olarak, tekerlek izi derinlikleri, başlangıçtaki numune kalınlığına bölünerek yüzde (%) ile ifade edilmiştir. Tablo 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, ve 4.8'de, sıcaklıklara ve devir sayılarına bağlı olarak, incelenen karışımlarda oluşan tekerlek izi deney sonuçları (mm ve yüzde (%)) olarak görülmektedir.

Tablo 4.1: Aşınma numunelerinde oluşan tekerlek izi derinlikleri (mm)

AŞINMA NUMUNELERİ TEKERLEK İZİ DERİNLİKLERİ (mm)																
Sıcaklıklar		65 °C			60 °C			55 °C			50 °C			45 °C		
Numuneler		A1	A13	Ort.	A2	A3	Ort.	A6	A11	Ort.	A10	A8	Ort.	A12	A9	Ort.
Devir Sayıları	30	0.92	2.09	1.50	1.09	0.94	1.02	0.83	0.56	0.70	0.93	0.69	0.81	0.37	0.38	0.37
	50	1.13	2.62	1.87	1.35	1.16	1.26	1.06	0.81	0.94	1.13	0.90	1.01	0.53	0.46	0.49
	100	1.39	3.30	2.34	1.68	1.35	1.52	1.33	1.02	1.17	1.29	1.11	1.20	0.70	0.68	0.69
	200	1.73	4.24	2.98	2.03	1.55	1.79	1.62	1.26	1.44	1.43	1.33	1.38	0.87	0.81	0.84
	300	1.92	4.85	3.38	2.32	1.77	2.05	1.80	1.40	1.60	1.58	1.53	1.55	1.02	0.94	0.98
	500	2.12	5.78	3.95	2.65	1.98	2.32	2.01	1.59	1.80	1.70	1.74	1.72	1.20	1.08	1.14
	1000	2.36	6.96	4.66	3.27	2.37	2.82	2.53	1.85	2.19	1.90	2.15	2.02	1.42	1.25	1.34
	2000	2.57	8.49	5.53	3.67	2.72	3.19	2.86	2.08	2.47	2.09	2.54	2.31	1.77	1.42	1.59
	3000	2.80	9.43	6.12	4.00	2.93	3.46	3.10	2.33	2.71	2.26	2.72	2.49	1.91	1.52	1.72
	5000	2.96	10.66	6.81	4.45	3.26	3.85	3.42	2.55	2.98	2.38	2.92	2.65	2.03	1.66	1.85
10000							3.73	2.84	3.29	2.60	3.14	2.87				

Tablo 4.2: Aşınma numunelerinde oluşan tekerlek izi değerleri (%)

AŞINMA NUMUNELERİ TEKERLEK İZİ DEĞERLERİ (%)																
Sıcaklıklar		65 °C			60 °C			55 °C			50 °C			45 °C		
Numuneler		A1	A13	Ort.	A2	A3	Ort.	A6	A11	Ort.	A10	A8	Ort.	A12	A9	Ort.
Kalınlık (mm)		49.41	49.66		46.19	47.20		49.13	48.75		49.68	50.85		52.50	52.04	
Devir Sayıları	30	1.85	4.22	3.03	2.36	2.00	2.18	1.69	1.15	1.42	1.87	1.36	1.62	0.70	0.73	0.71
	50	2.28	5.27	3.77	2.93	2.47	2.70	2.16	1.66	1.91	2.27	1.76	2.02	1.00	0.88	0.94
	100	2.80	6.64	4.72	3.64	2.87	3.26	2.70	2.09	2.39	2.60	2.19	2.39	1.34	1.30	1.32
	200	3.50	8.53	6.02	4.40	3.29	3.85	3.29	2.58	2.94	2.88	2.62	2.75	1.66	1.55	1.60
	300	3.88	9.76	6.82	5.02	3.76	4.39	3.66	2.88	3.27	3.17	3.01	3.09	1.93	1.81	1.87
	500	4.30	11.65	7.97	5.74	4.19	4.97	4.10	3.26	3.68	3.43	3.42	3.42	2.28	2.08	2.18
	1000	4.78	14.01	9.39	7.09	5.02	6.05	5.14	3.80	4.47	3.82	4.23	4.02	2.70	2.40	2.55
	2000	5.20	17.09	11.15	7.94	5.76	6.85	5.82	4.26	5.04	4.20	5.00	4.60	3.37	2.72	3.04
	3000	5.67	18.99	12.33	8.65	6.21	7.43	6.31	4.78	5.54	4.55	5.36	4.95	3.63	2.93	3.28
	5000	6.00	21.46	13.73	9.63	6.91	8.27	6.95	5.23	6.09	4.79	5.74	5.26	3.87	3.19	3.53
	10000							7.59	5.83	6.71	5.23	6.18	5.70			

Tablo 4.3: Binder numunelerinde oluşan tekerlek izi derinlikleri (mm)

BİNDER NUMUNELERİ TEKERLEK İZİ DERİNLİKLERİ (mm)																
Sıcaklıklar		65 °C			60 °C			55 °C			50 °C			45 °C		
Numuneler		B13	B3	Ort.	B7	B9	Ort.	B1	B12	Ort.	B6	B4	Ort.	B2	B11	Ort.
Devir Sayıları	30	0.96	0.67	0.82	0.48	0.68	0.58	0.40	0.61	0.51	0.30	0.25	0.28	0.08	0.19	0.14
	50	1.05	0.78	0.92	0.59	0.84	0.71	0.50	0.71	0.60	0.42	0.35	0.38	0.16	0.28	0.22
	100	1.18	0.85	1.02	0.76	1.01	0.89	0.60	0.85	0.73	0.55	0.43	0.49	0.33	0.42	0.37
	200	1.35	0.99	1.17	0.87	1.20	1.03	0.73	0.97	0.85	0.62	0.52	0.57	0.40	0.51	0.46
	300	1.46	1.05	1.25	0.97	1.34	1.16	0.80	1.09	0.94	0.70	0.58	0.64	0.46	0.57	0.52
	500	1.59	1.14	1.37	1.06	1.51	1.28	0.86	1.20	1.03	0.75	0.64	0.70	0.56	0.70	0.63
	1000	1.88	1.29	1.59	1.23	1.78	1.51	1.07	1.43	1.25	0.89	0.70	0.79	0.66	0.77	0.71
	2000	2.06	1.49	1.78	1.30	1.89	1.59	1.20	1.55	1.38	1.05	0.82	0.94	0.76	0.85	0.81
	3000	2.13	1.52	1.83	1.49	2.06	1.78	1.29	1.64	1.47	1.12	0.87	1.00	0.86	0.92	0.89
	5000	2.26	1.58	1.92	1.58	2.24	1.91	1.31	1.70	1.51	1.15	0.91	1.03	0.93	0.98	0.96

Tablo 4.4: Binder numunelerinde oluşan tekerlek izi değerleri (%)

BİNDER NUMUNELERİ TEKERLEK İZİ DEĞERLERİ (%)																
Sıcaklıklar		65 °C			60 °C			55 °C			50 °C			45 °C		
Numuneler		B13	B3	Ort.	B7	B9	Ort.	B1	B12	Ort.	B6	B4	Ort.	B2	B11	Ort.
Kalınlık (mm)		49.26	48.54		50.23	50.32		49.39	50.41		49.82	49.75		50.31	51.37	
Devir Sayıları	30	1.96	1.38	1.67	0.96	1.36	1.16	0.82	1.21	1.01	0.59	0.51	0.55	0.16	0.37	0.26
	50	2.13	1.62	1.87	1.17	1.67	1.42	1.01	1.40	1.21	0.84	0.70	0.77	0.32	0.55	0.44
	100	2.40	1.75	2.08	1.51	2.02	1.76	1.22	1.69	1.46	1.09	0.86	0.98	0.66	0.81	0.74
	200	2.75	2.04	2.39	1.73	2.38	2.05	1.48	1.92	1.70	1.25	1.04	1.15	0.80	1.00	0.90
	300	2.97	2.16	2.56	1.94	2.66	2.30	1.62	2.15	1.89	1.41	1.16	1.28	0.91	1.11	1.01
	500	3.23	2.36	2.79	2.10	3.00	2.55	1.75	2.38	2.07	1.51	1.29	1.40	1.12	1.36	1.24
	1000	3.81	2.66	3.24	2.44	3.55	2.99	2.16	2.84	2.50	1.79	1.40	1.60	1.32	1.49	1.40
	2000	4.18	3.07	3.63	2.59	3.75	3.17	2.44	3.07	2.76	2.12	1.66	1.89	1.52	1.66	1.59
	3000	4.33	3.13	3.73	2.96	4.10	3.53	2.62	3.25	2.94	2.25	1.75	2.00	1.72	1.79	1.75
	5000	4.59	3.25	3.92	3.15	4.46	3.80	2.66	3.38	3.02	2.30	1.83	2.07	1.85	1.91	1.88

Tablo 4.5: TMA numunelerinde oluşan tekerlek izi derinlikleri (mm)

TMA NUMUNELERİ TEKERLEK İZİ DERİNLİKLERİ (mm)																
Sıcaklıklar		65 °C			60 °C			55 °C			50 °C			45 °C		
Numuneler		C1	C2	Ort.	C10	C8	Ort.	C12	C9	Ort.	C5	C11	Ort.	C6	C3	Ort.
Devir Sayıları	30	0.64	0.80	0.72	0.80	0.62	0.71	1.16	0.39	0.77	0.76	İPTAL	0.76	0.30	0.27	0.28
	50	1.71	0.95	1.33	1.20	0.75	0.98	1.46	0.68	1.07	0.96		0.96	0.48	0.35	0.41
	100	2.16	1.42	1.79	1.69	1.03	1.36	1.78	0.93	1.36	1.23		1.23	0.68	0.63	0.66
	200	2.46	1.73	2.10	2.29	1.26	1.78	2.10	1.20	1.65	1.40		1.40	0.93	0.88	0.90
	300	2.72	1.99	2.35	2.55	1.40	1.98	2.34	1.42	1.88	1.54		1.54	1.08	1.04	1.06
	500	2.92	2.27	2.60	2.93	1.60	2.27	2.51	1.65	2.08	1.67		1.67	1.29	1.26	1.27
	1000	3.32	2.89	3.11	3.42	1.80	2.61	2.73	1.83	2.28	1.92		1.92	1.50	1.54	1.52
	2000	4.76	4.58	4.67	4.14	2.10	3.12	3.01	2.12	2.57	2.18		2.18	1.70	1.80	1.75
	3000	5.07	5.10	5.09	4.62	2.30	3.46	3.18	2.33	2.75	2.28		2.28	1.82	2.01	1.92
	5000	5.47	5.84	5.66	5.32	2.51	3.92	3.49	2.65	3.07	2.47		2.47	2.09	2.27	2.18

C11 uygun sonuç elde edilemediği için iptal edilmiştir.

Tablo 4.6: TMA numunelerinde oluşan tekerlek izi değerleri (%)

TMA NUMUNELERİ TEKERLEK İZİ DEĞERLERİ (%)																
Sıcaklıklar		65 °C			60 °C			55 °C			50 °C			45 °C		
Numuneler		C1	C2	Ort.	C10	C8	Ort.	C12	C9	Ort.	C5	C11	Ort.	C6	C3	Ort.
Kalınlık (mm)		61.30	61.79		65.25	67.44		66.70	67.72		64.07	62.81		69.85	69.88	
Devir Sayıları	30	1.04	1.30	1.17	1.23	0.92	1.07	1.73	0.58	1.16	1.19	İPTAL	1.19	0.43	0.39	0.41
	50	2.78	1.54	2.16	1.84	1.12	1.48	2.19	1.00	1.60	1.50		1.50	0.68	0.50	0.59
	100	3.52	2.29	2.91	2.59	1.52	2.06	2.67	1.38	2.02	1.92		1.92	0.97	0.91	0.94
	200	4.01	2.80	3.41	3.51	1.87	2.69	3.15	1.78	2.47	2.18		2.18	1.33	1.26	1.29
	300	4.43	3.22	3.83	3.91	2.08	3.00	3.51	2.09	2.80	2.40		2.40	1.54	1.49	1.51
	500	4.77	3.67	4.22	4.49	2.37	3.43	3.76	2.43	3.10	2.61		2.61	1.84	1.80	1.82
	1000	5.42	4.68	5.05	5.25	2.67	3.96	4.09	2.71	3.40	3.00		3.00	2.14	2.20	2.17
	2000	7.77	7.41	7.59	6.34	3.11	4.73	4.52	3.13	3.83	3.40		3.40	2.43	2.57	2.50
	3000	8.27	8.26	8.26	7.08	3.42	5.25	4.77	3.43	4.10	3.55		3.55	2.61	2.87	2.74
5000	8.92	9.46	9.19	8.16	3.72	5.94	5.23	3.92	4.58	3.86	3.86	2.99	3.25	3.12		

Tablo 4.7: Modifiye bitümlü aşınma numunelerinde oluşan tekerlek izi derinlikleri (mm)

MODİFİYE BİTÜMLÜ AŞINMA NUMUNELERİ TEKERLEK İZİ DERİNLİKLERİ (mm)															
Sıcaklıklar	65 °C			60 °C			55 °C			50 °C			45 °C		
Numuneler	D6	D2	Ort.	D7-3	D10-11	Ort.	D4	D1	Ort.	D9	D8	Ort.	D5	D12	Ort.
Devir Sayıları	30	0.59	0.58	0.59	0.22	0.35	0.29	0.28	0.26	0.27	0.24	0.13	0.18	0.17	0.18
	50	0.84	0.83	0.84	0.40	0.51	0.45	0.36	0.42	0.39	0.33	0.23	0.28	0.23	0.29
	100	1.06	1.05	1.06	0.50	0.63	0.57	0.45	0.54	0.49	0.44	0.35	0.39	0.30	0.36
	200	1.26	1.23	1.24	0.59	0.73	0.66	0.54	0.63	0.59	0.53	0.49	0.51	0.34	0.41
	300	1.41	1.36	1.38	0.68	0.81	0.74	0.63	0.79	0.71	0.61	0.57	0.59	0.38	0.50
	500	1.55	1.47	1.51	0.77	0.91	0.84	0.69	0.90	0.79	0.67	0.62	0.64	0.42	0.58
	1000	1.69	1.64	1.67	0.86	1.02	0.94	0.81	1.04	0.92	0.79	0.74	0.76	0.49	0.74
	2000	1.90	1.82	1.86	0.98	1.10	1.04	0.87	1.13	1.00	0.90	0.92	0.91	0.54	0.86
	3000	2.01	1.93	1.97	1.02	1.20	1.11	0.92	1.23	1.08	0.99	1.02	1.00	0.61	0.96
	5000	2.16	2.06	2.11	1.10	1.28	1.19	0.99	1.31	1.15	1.07	1.13	1.10	0.65	1.05

Tablo 4.8: Modifiye bitümlü aşınma numunelerinde oluşan tekerlek izi değerleri (%)

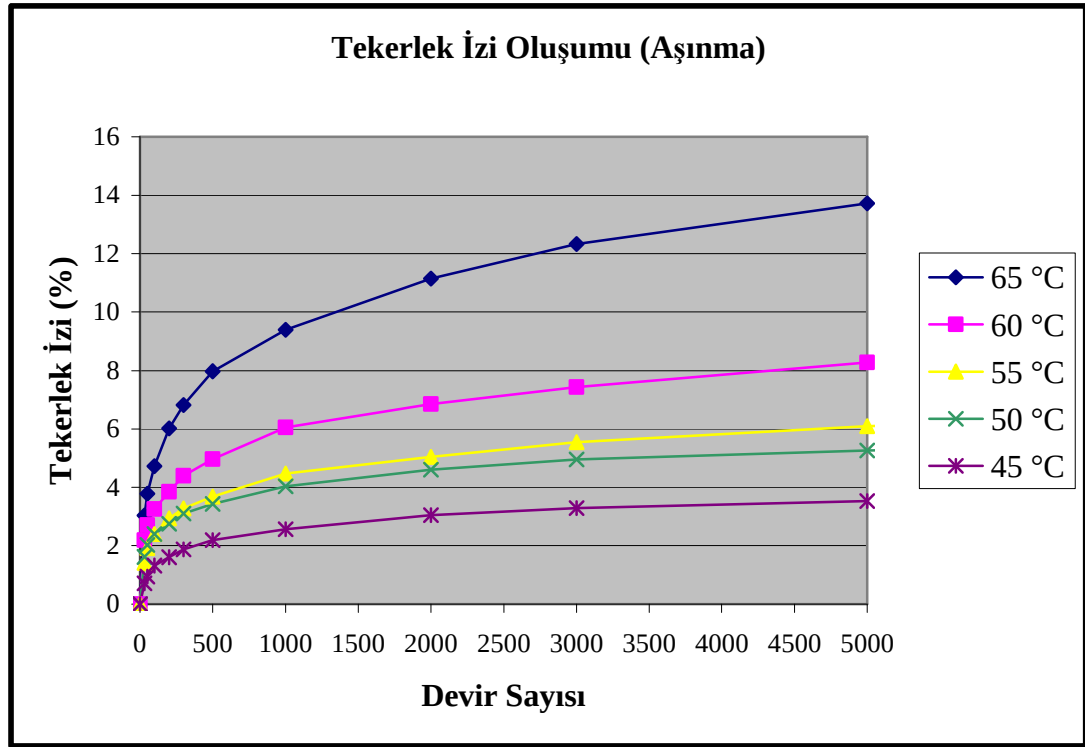
MODİFİYE BİTÜMLÜ AŞINMA NUMUNELERİ TEKERLEK İZİ DEĞERLERİ (%)															
Sıcaklıklar	65 °C			60 °C			55 °C			50 °C			45 °C		
Numuneler	D6	D2	Ort.	D7-3	D10-11	Ort.	D4	D1	Ort.	D9	D8	Ort.	D5	D12	Ort.
Kalınlık (mm)	53.13	53.14		52.32	52.65		52.73	52.85		52.63	52.18		52.74	53.14	
Devir Sayıları	30	1.12	1.09	1.10	0.42	0.67	0.54	0.52	0.50	0.51	0.45	0.25	0.35	0.32	0.35
	50	1.59	1.57	1.58	0.77	0.97	0.87	0.69	0.80	0.74	0.63	0.44	0.54	0.44	0.54
	100	2.00	1.97	1.99	0.96	1.19	1.08	0.85	1.01	0.93	0.83	0.66	0.75	0.56	0.67
	200	2.37	2.31	2.34	1.13	1.39	1.26	1.02	1.20	1.11	1.01	0.93	0.97	0.65	0.77
	300	2.65	2.55	2.60	1.29	1.53	1.41	1.20	1.49	1.34	1.16	1.09	1.12	0.73	0.94
	500	2.91	2.76	2.83	1.47	1.72	1.60	1.31	1.70	1.50	1.27	1.19	1.23	0.80	1.09
	1000	3.18	3.08	3.13	1.65	1.94	1.80	1.53	1.97	1.75	1.49	1.42	1.45	0.92	1.40
	2000	3.57	3.42	3.50	1.86	2.08	1.97	1.65	2.15	1.90	1.70	1.77	1.74	1.02	1.61
	3000	3.79	3.63	3.71	1.95	2.28	2.12	1.74	2.33	2.04	1.87	1.95	1.91	1.15	1.80
	5000	4.06	3.87	3.97	2.10	2.44	2.27	1.88	2.48	2.18	2.02	2.16	2.09	1.23	1.98

Aşınma numunelerinde, farklı sıcaklık ve devir sayılarında oluşan ortalama tekerlek izi değerleri özet olarak Tablo 4.9'da verilmiştir. Bu değerlere ait grafik Şekil 4.2'de, deneylerin sonunda numunelerden alınan kesitler de Şekil 4.3'te görülmektedir.

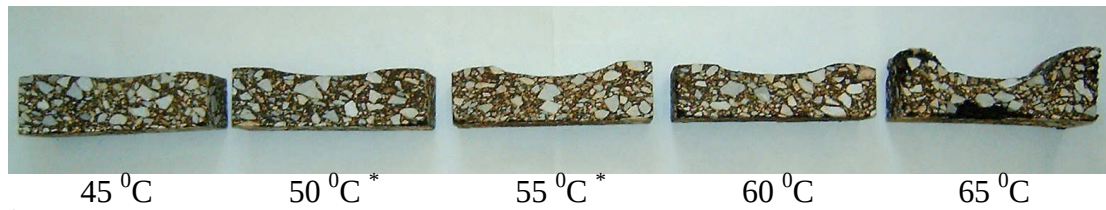
Bilindiği gibi tekerlek izi, devir sayısının ve sıcaklığın yükselmesiyle artar. Tekerlek izindeki bu artış, başlangıç devirlerinde daha yüksek oranlara sahiptir. Bu durum incelenen her bir sıcaklık için geçerlidir. Aşınma numunelerinde, 5000 devirde görülen toplam tekerlek izinin ortalama %73'ü, ilk 1000 devirde oluşmaktadır. Bununla birlikte, son devirlerde sıcaklığın tekerlek izi üzerindeki etkisi başlangıç devirlerine göre daha yüksektir. Aynı zamanda, 5000 devirde oluşan toplam tekerlek izi miktarlarına bakıldığında, sıcaklıklar (50, 55, 60 ve 65 °C) arasındaki artışın doğrusal olmadığı ve farkların giderek arttığı görülmektedir.

Tablo 4.9: Aşınma numunelerinde oluşan ortalama tekerlek izi değerleri

Aşınma Numuneleri Tekerlek İzi Değerleri (%)					
Devir Sayıları	Sıcaklıklar				
	65 °C	60 °C	55 °C	50 °C	45 °C
30	3.03	2.18	1.42	1.62	0.71
50	3.77	2.70	1.91	2.02	0.94
100	4.72	3.26	2.39	2.39	1.32
200	6.02	3.85	2.94	2.75	1.60
300	6.82	4.39	3.27	3.09	1.87
500	7.97	4.97	3.68	3.42	2.18
1000	9.39	6.05	4.47	4.02	2.55
2000	11.15	6.85	5.04	4.60	3.04
3000	12.33	7.43	5.54	4.95	3.28
5000	13.73	8.27	6.09	5.26	3.53



Şekil 4.2: Aşınma numunelerinde devir sayısına ve sıcaklığa bağlı tekerlek izi oluşumu



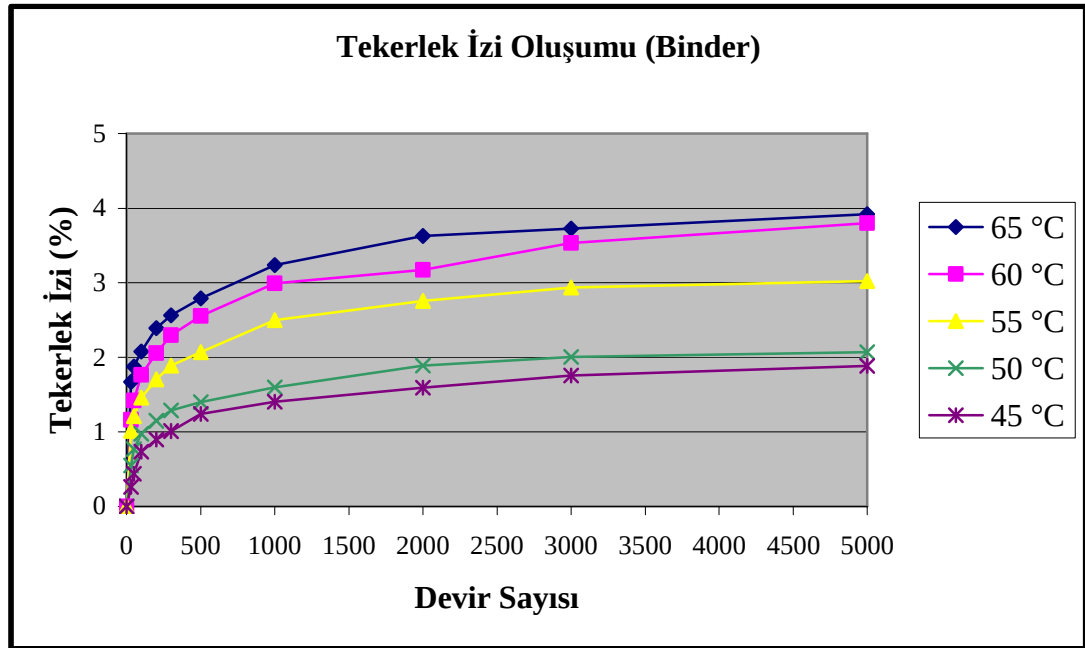
* Yalnızca bu deneylerde 10 000 devir uygulanmıştır.

Şekil 4.3: Tekerlek izi deneylerinden sonra aşınma numunelerinden alınan kesitler

Binder numunelerinde, farklı sıcaklık ve devir sayılarında oluşan ortalama tekerlek izi değeri olarak Tablo 4.10 'da verilmiştir. Bu değerlere ait grafik Şekil 4.4 'te, deneylerin sonunda numunelerden alınan kesitler de Şekil 4.5 'te görülmektedir.

Tablo 4.10: Binder numunelerinde oluşan ortalama tekerlek izi değerleri

Binder Numuneleri Tekerlek İzi Değerleri (%)					
Devir Sayıları	Sıcaklıklar				
	65 °C	60 °C	55 °C	50 °C	45 °C
30	1.67	1.16	1.01	0.55	0.26
50	1.87	1.42	1.21	0.77	0.44
100	2.08	1.76	1.46	0.98	0.74
200	2.39	2.05	1.70	1.15	0.90
300	2.56	2.30	1.89	1.28	1.01
500	2.79	2.55	2.07	1.40	1.24
1000	3.24	2.99	2.50	1.60	1.40
2000	3.63	3.17	2.76	1.89	1.59
3000	3.73	3.53	2.94	2.00	1.75
5000	3.92	3.80	3.02	2.07	1.88



Şekil 4.4: Binder numunelerinde devir sayısına ve sıcaklığa bağlı tekerlek izi oluşumu



Şekil 4.5: Tekerlek izi deneylerinden sonra binder numunelerinden alınan kesitler

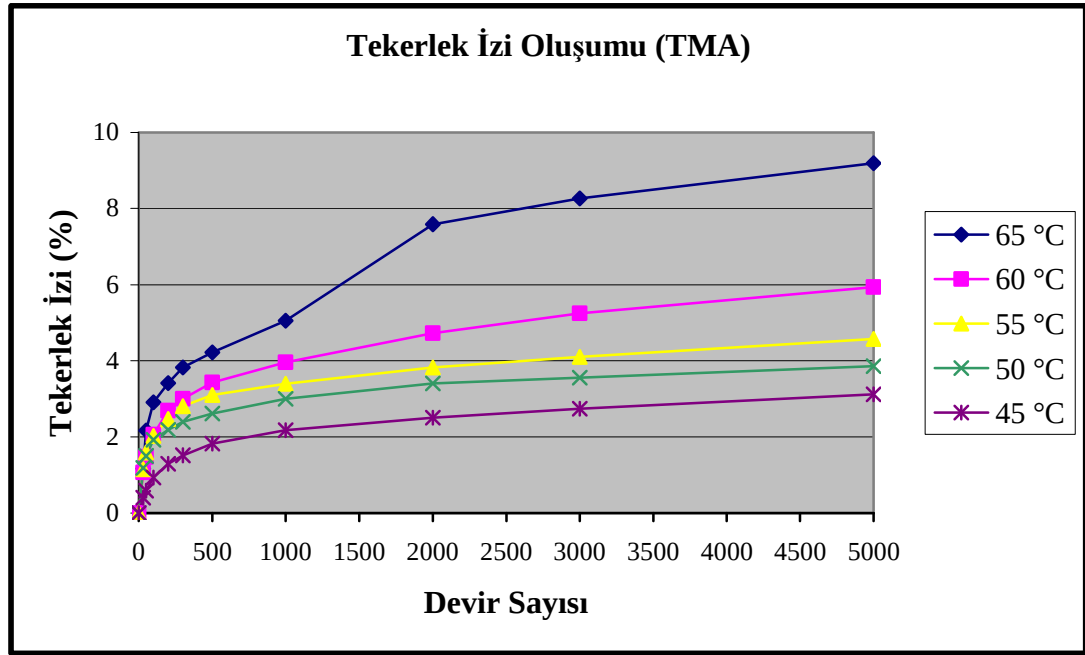
Aşınma numunelerinde olduğu gibi, tekerlek izindeki artış, başlangıç devirlerinde daha yüksek oranlara sahiptir. Binder numunelerinde, 5000 devirde görülen toplam tekerlek izinin ortalama %79'u, ilk 1000 devirde oluşmaktadır. Bununla birlikte, sıcaklık değişimlerine duyarlılığı başlangıç ve son devirlerde çok farklı değildir, oransal olarak hemen hemen aynıdır. Aynı zamanda, sıcaklığa fazla duyarlı olmadığı ve 5 farklı sıcaklığa karşılık 3 farklı davranış gösterdiği belirlenmiştir. 5000 devirde oluşan toplam tekerlek izi miktarlarına bakıldığında, 45 °C ile 50 °C ve 60 °C ile 65 °C'deki değerlerin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir.

TMA numunelerinde farklı sıcaklık ve devir sayılarında oluşan ortalama tekerlek izi değerleri özet olarak Tablo 4.11'de verilmiştir. Bu değerlere ait grafik Şekil 4.6'da, deneylerin sonunda numunelerden alınan kesitler de Şekil 4.7'de görülmektedir.

Tablo 4.11: TMA numunelerinde oluşan ortalama tekerlek izi değerleri

TMA Numuneleri Tekerlek İzi Değerleri (%)					
Devir Sayıları	Sıcaklıklar				
	65 °C	60 °C	55 °C	50 °C	45 °C
30	1.17	1.07	1.16	1.19	0.41
50	2.16	1.48	1.60	1.50	0.59
100	2.91	2.06	2.02	1.92	0.94
200	3.41	2.69	2.47	2.18	1.29
300	3.83	3.00	2.80	2.40	1.51
500	4.22	3.43	3.10	2.61	1.82
1000	5.05	3.96	3.40	3.00	2.17
2000	7.59	4.73	3.83	3.40	2.50
3000	8.26	5.25	4.10	3.55	2.74
5000	9.19	5.94	4.58	3.86	3.12

Yukarıda da ifade edildiği gibi tekerlek izindeki artış, başlangıç devirlerinde daha yüksek oranlara sahiptir. TMA numunelerinde, 5000 devirde görülen toplam tekerlek izinin ortalama %69'u, ilk 1000 devirde oluşmaktadır. Aşınmadaki gibi, son devirlerde sıcaklığın tekerlek izi üzerindeki etkisi, başlangıç devirlerine göre daha yüksektir. Bir başka deyişle, başlangıç devirlerinde (100 devire kadar) sıcaklığın tekerlek izi üzerindeki etkisi tam olarak görülememektedir. Aşınmadaki gibi, 5000 devirde oluşan toplam tekerlek izi miktarlarına bakıldığında, sıcaklıklar (50, 55, 60 ve 65 °C) arasındaki artışın doğrusal olmadığı ve farkların giderek arttığı görülebilir.



Şekil 4.6: TMA numunelerinde devir sayısına ve sıcaklığa bağlı tekerlek izi oluşumu

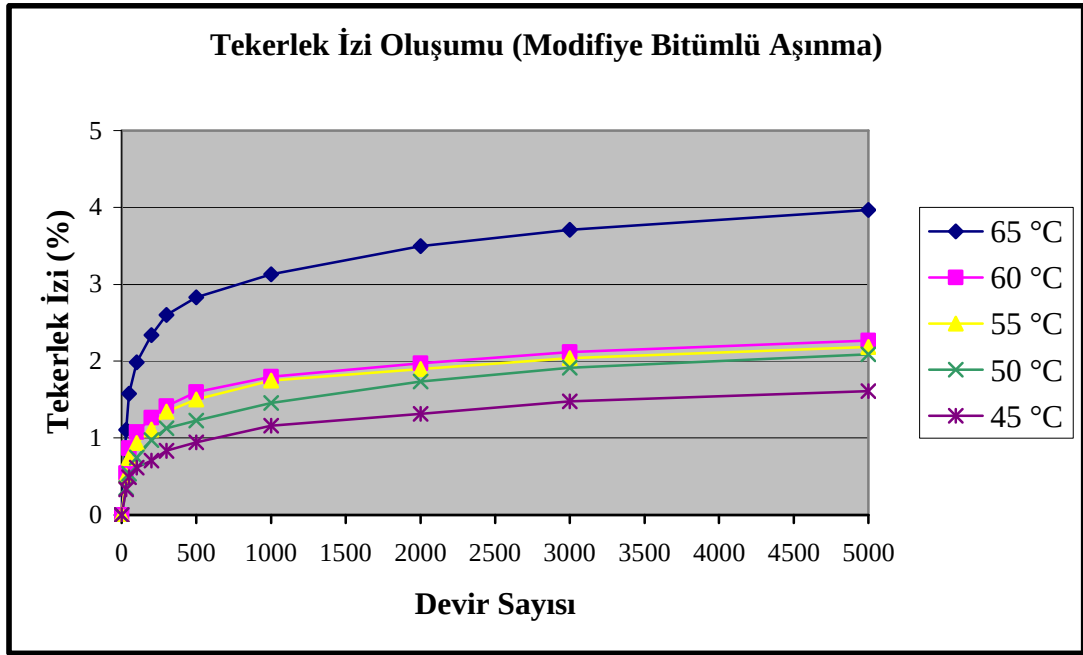


Şekil 4.7: Tekerlek izi deneylerinden sonra TMA numunelerinden alınan kesitler

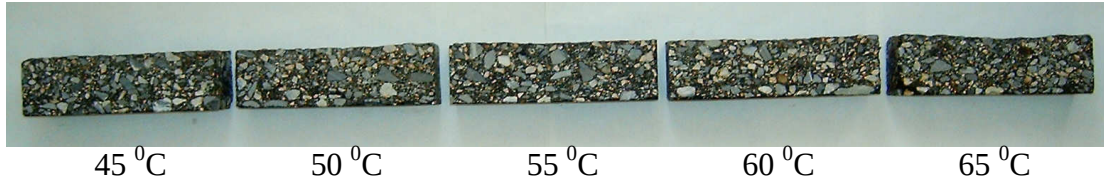
Modifiye bitümlü aşınma numunelerinde farklı sıcaklık ve devir sayılarında oluşan ortalama tekerlek izi değerleri özet olarak Tablo 4.12 'de verilmiştir. Bu değerlere ait grafik Şekil 4.8 'de, deneylerin sonunda numunelerden alınan kesitler de Şekil 4.9 'da görülmektedir.

Tablo 4.12: Modifiye bitümlü aşınma numunelerinde oluşan ortalama tekerlek izi değerleri

Mdf. Bit. Aşınma Numuneleri Tekerlek İzi Değerleri (%)					
Devir Sayıları	Sıcaklıklar				
	65 °C	60 °C	55 °C	50 °C	45 °C
30	1.10	0.54	0.51	0.35	0.33
50	1.58	0.87	0.74	0.54	0.49
100	1.99	1.08	0.93	0.75	0.62
200	2.34	1.26	1.11	0.97	0.71
300	2.60	1.41	1.34	1.12	0.83
500	2.83	1.60	1.50	1.23	0.94
1000	3.13	1.80	1.75	1.45	1.16
2000	3.50	1.97	1.90	1.74	1.31
3000	3.71	2.12	2.04	1.91	1.48
5000	3.97	2.27	2.18	2.09	1.61



Şekil 4.8: Modifiye bitümlü aşınma numunelerinde devir sayısına ve sıcaklığa bağlı tekerlek izi oluşumu



Şekil 4.9: Tekerlek izi deneylerinden sonra modifiye bitümlü aşınma numunelerinden alınan kesitler

Modifiye bitümlü aşınma numunelerinde, 5000 devirde görülen toplam tekerlek izinin ortalama %76 'sı, ilk 1000 devirde oluşmaktadır. Binderdeki gibi, sıcaklık değişimlerine duyarlılığı başlangıç ve son devirlerde çok farklı değildir. 5000 devirde oluşan toplam tekerlek izi miktarlarına bakıldığında, özellikle 50 °C, 55 °C ve 60 °C 'deki değerlerin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu sonuca göre, modifiye bitümlü aşınma numunelerinin, beklendiği gibi sıcaklığa fazla duyarlı olmadığı söylenebilir. Ancak, 65 °C 'de modifikasyonun etkisinin azaldığı ve modifiye bitümlü aşınma numunelerinin kendi içerisinde, bu sıcaklıkta diğer sıcaklıklara göre oldukça fazla (yaklaşık 2 kat) tekerlek izi oluştuğu görülmektedir.

4.2 Karotlara Uygulanan Deneyler

Araziden alınan 100 mm çapındaki karotlar, yükseklikleri yaklaşık 50 mm olacak şekilde kesilerek deneylere hazır hale getirilmiştir. Karotlar üzerinde statik sünme,

dinamik (tekrarlı) sünme ve dolaylı çekme modülü deneyleri 40 °C 'de yapılmıştır. Deneyler UMATTA cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (ELE-UMATTA, 1994).

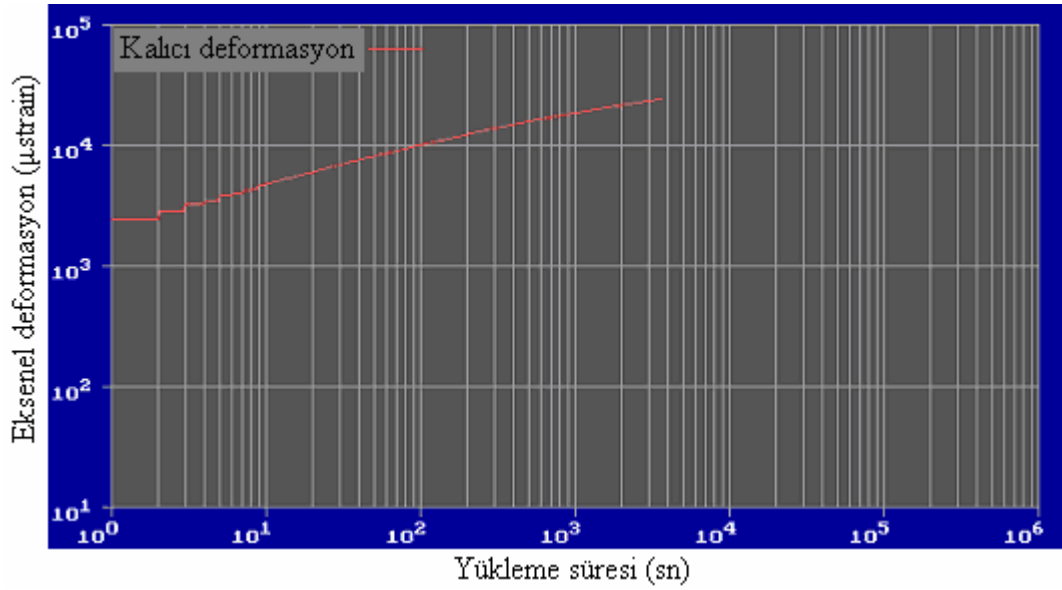
4.2.1 Statik Sünme Deneyleri

Statik sünme deneyleri gerilme kontrollü olarak yapılmıştır. Deneye başlamadan önce, numuneye 60 sn süresince statik eksenel bir yükleme ile koşullandırma gerilmesi (~190 kPa) uygulanmıştır. Daha sonra yükleme kaldırılarak numune 60 sn dinlendirilmiştir. Bu sürenin sonunda deneye başlanmış ve 3600 sn süresince, yaklaşık 480 kPa 'lık gerilme oluşturacak şekilde, statik eksenel bir yükleme (~3800 N) yapılmıştır. İzin verilen maksimum deformasyon 100 000 $\mu\epsilon$ olarak belirlenmiştir.

Deney düzeneği ve numune Şekil 4.10 'da görülmektedir. Deney sırasında, yükleme süresine karşılık oluşan deformasyonlar, cihaza bağlı bilgisayar ekranında grafik olarak verilmektedir. Örnek bir grafik Şekil 4.11 'de verilmiştir.



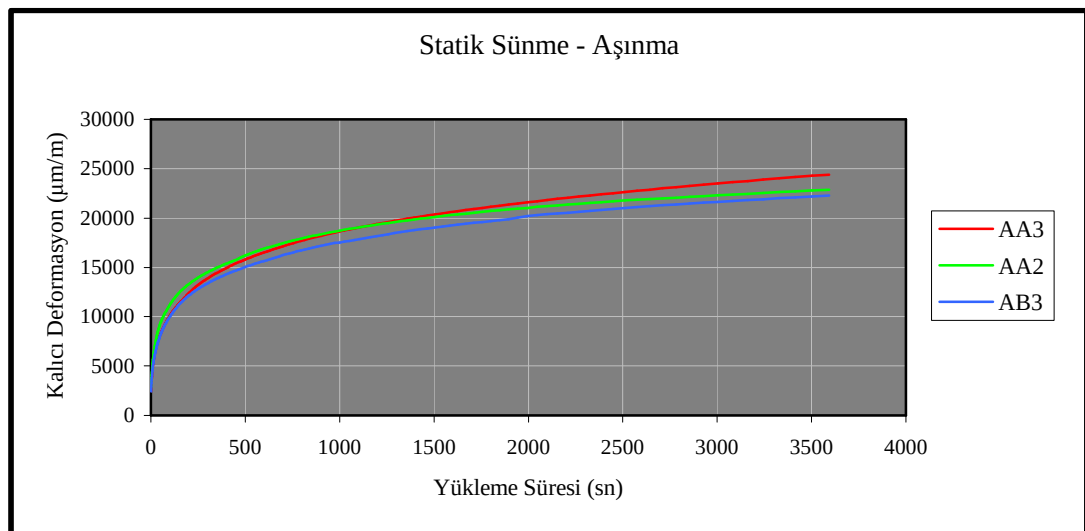
Şekil 4.10: Statik sünme deney düzeneği ve numunenin yüklenmesi



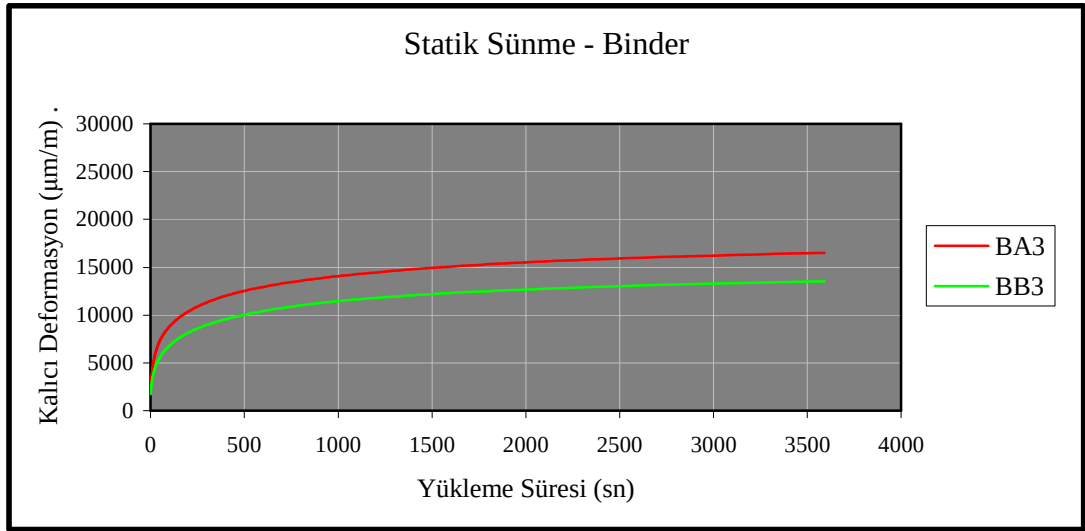
Şekil 4.11: Statik sünme deneyinde yükleme süresine göre kalıcı deformasyon artışı

Aşınma ve binderden 3 'er adet, TMA ve modifiye bitümlü aşınmadan 4 'er adet numuneye, aynı koşullarda statik sünme deneyi uygulanmıştır. Binder numunelerinden 1 tanesinin deneyi, uygun olmayan yükleme koşulları nedeniyle iptal edilmiştir. Statik sünme deneylerinin sonuçları grafikler halinde aşağıdaki şekillerde (Şekil 4.12, 4.13, 4.14, 4.15) verilmiştir.

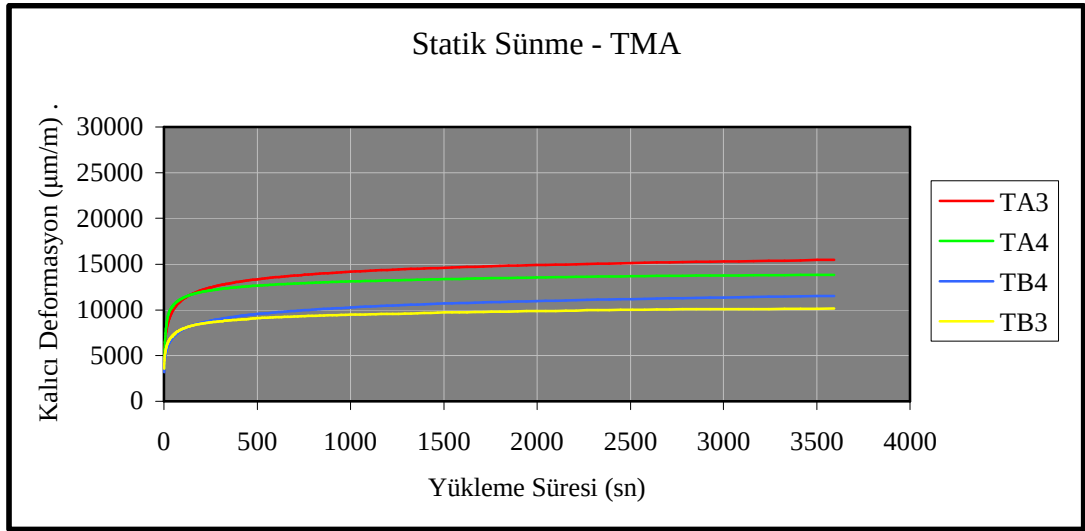
En yüksek kalıcı deformasyon miktarı aşınma numunelerinde görülmüştür. Modifiye bitümlü aşınma numunelerinde daha az deformasyon oluşmuştur. Üçüncü sırayı binder numuneleri almıştır. En az kalıcı deformasyonun ise TMA numunelerinde olduğu gözlenmiştir.



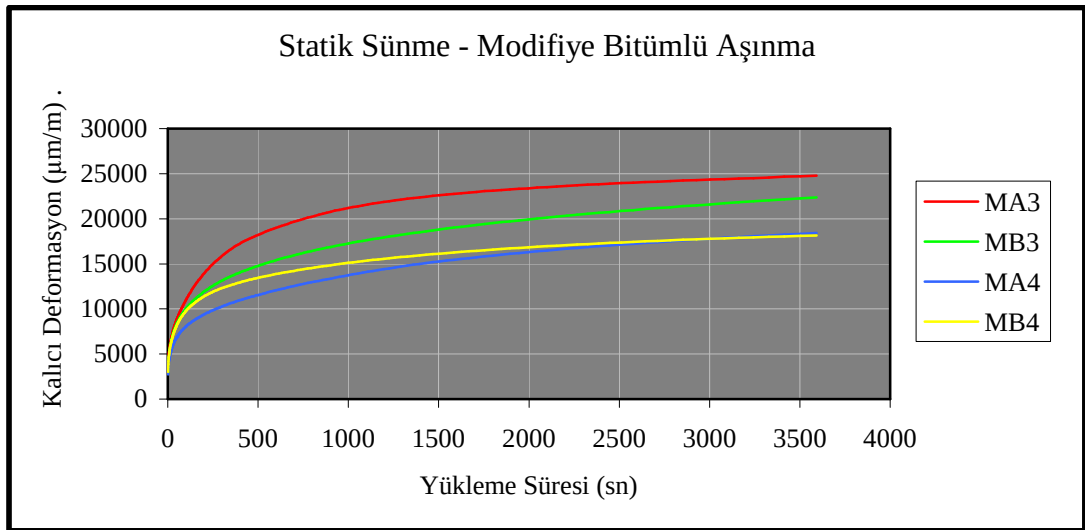
Şekil 4.12: Statik sünme deneyinde aşınma numunelerinde oluşan kalıcı deformasyon



Şekil 4.13: Statik sünme deneyinde binder numunelerinde oluşan kalıcı deformasyon

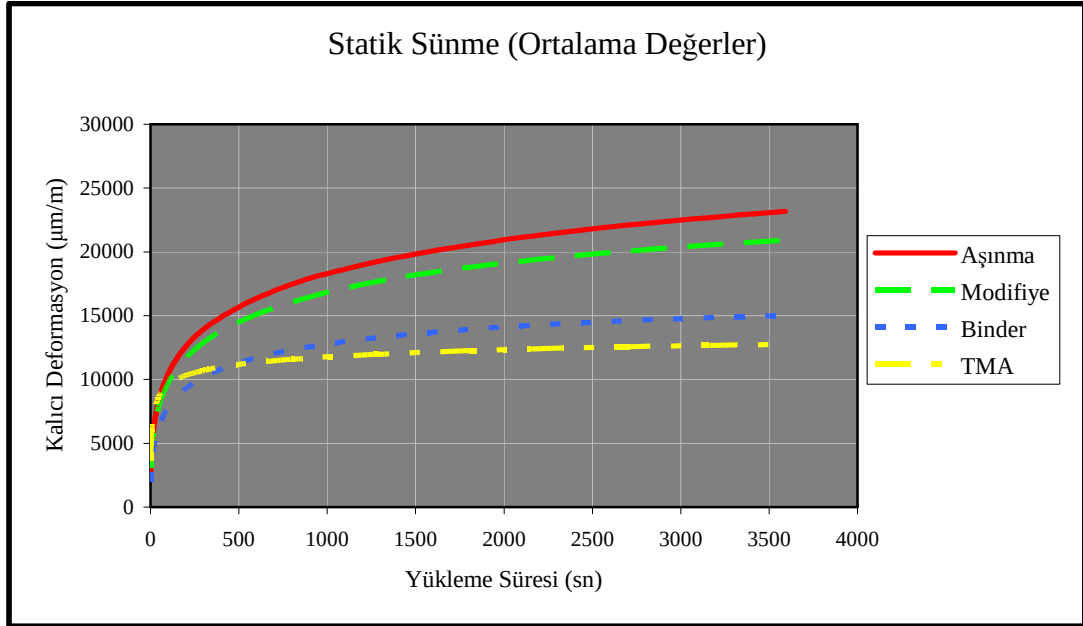


Şekil 4.14: Statik sünme deneyinde TMA numunelerinde oluşan kalıcı deformasyon



Şekil 4.15: Statik sünme deneyinde modifiye bitümlü aşınma numunelerinde oluşan kalıcı deformasyon

Deney sonuçlarından elde edilen ortalama kalıcı deformasyon miktarları; aşınma numunelerinde 23149 ($\mu\text{m/m}$), binder numunelerinde 15032 ($\mu\text{m/m}$), TMA numunelerinde 12713 ($\mu\text{m/m}$) ve modifiye bitümlü aşınma numunelerinde ise 20938 ($\mu\text{m/m}$) 'dır (Şekil 4.16).

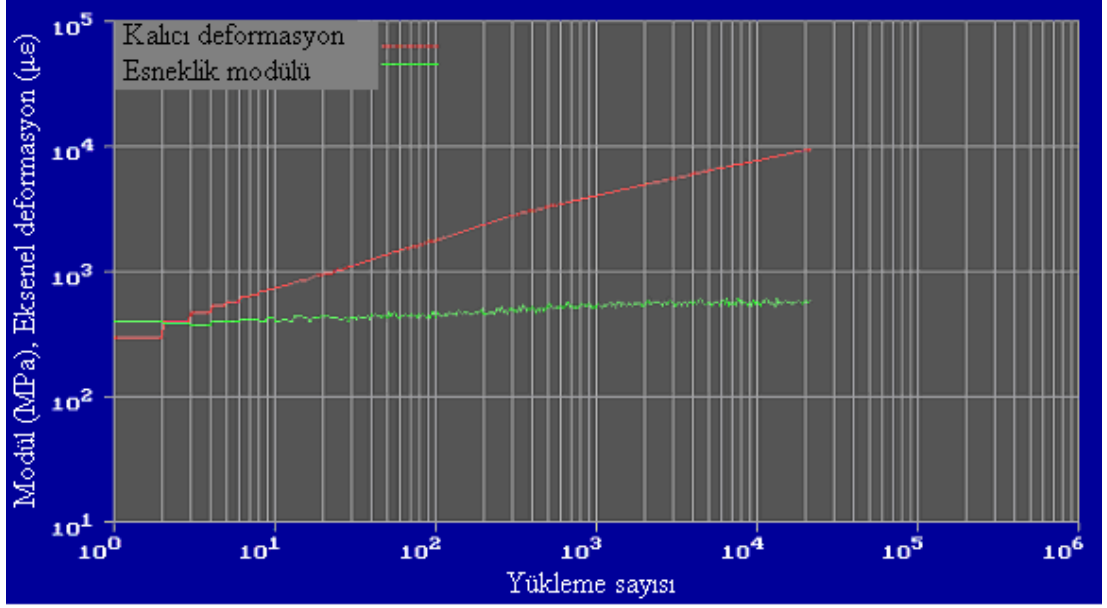


Şekil 4.16: Statik sünme deneylerinde numunelerde oluşan ortalama kalıcı deformasyonlar

4.2.2 Dinamik (Tekrarlı) Sünme Deneyleri

Dinamik (tekrarlı) sünme deneyleri de gerilme kontrollü olarak yapılmıştır. Deneye başlamadan önce, numuneye 60 sn süresince statik eksenel bir yükleme ile koşullandırma gerilmesi (~ 190 kPa) uygulanmıştır. Daha sonra yükleme kaldırılarak numune 60 sn dinlendirilmiştir. Bu sürenin sonunda deneye başlanmış ve yükleme aralığı 500 ms, yükleme periyodu 1000 ms olmak üzere, 6 saat süresince toplam 21600 yükleme gerçekleştirilmiştir. Dinamik (tekrarlı) eksenel yükleme (~ 1500 N), numunede yaklaşık 190 kPa 'lık gerilme oluşturmaktadır. İzin verilen maksimum deformasyon 100 000 $\mu\epsilon$ olarak belirlenmiştir.

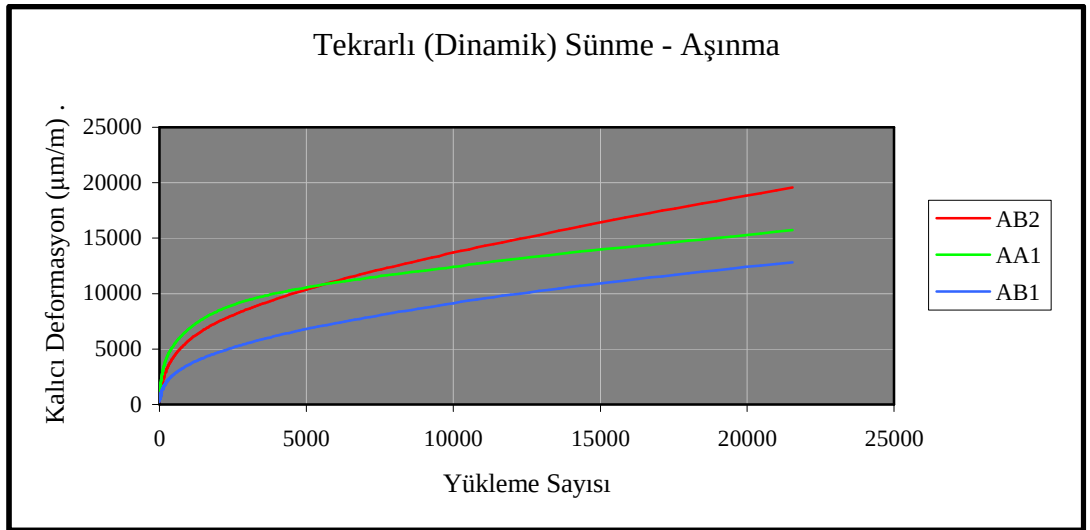
Deney düzeneği ve numune, statik sünme deneyinde olduğu gibidir (Şekil 4.10). Deney sırasında, yükleme sayısına karşılık oluşan deformasyon ve esneklik (resilient) modülü değerleri, cihaza bağlı bilgisayar ekranında grafik olarak verilmektedir. Örnek bir grafik Şekil 4.17 'de verilmiştir.



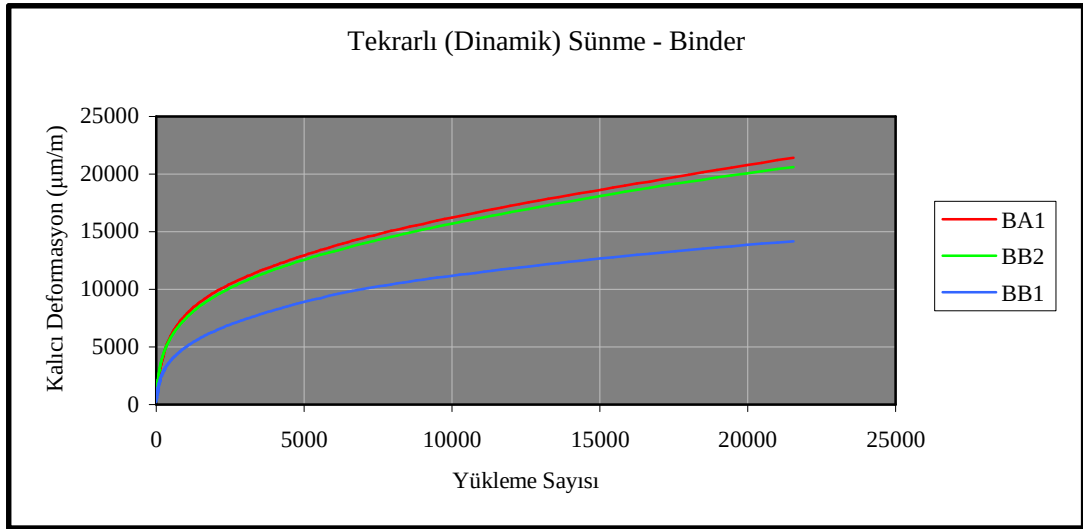
Şekil 4.17: Dinamik (tekrarlı) sünme deneyinde yükleme sayısına göre kalıcı deformasyon ve esneklik modülü değişimi

Aşınma ve binderden 3 ‘er adet, TMA ve modifiye bitümlü aşınmadan 4 ‘er adet numuneye, aynı koşullarda dinamik (tekrarlı) sünme deneyi uygulanmıştır. Bu deneylerin sonuçları grafikler halinde aşağıdaki şekillerde (Şekil 4.18, 4.19, 4.20, 4.21) verilmiştir.

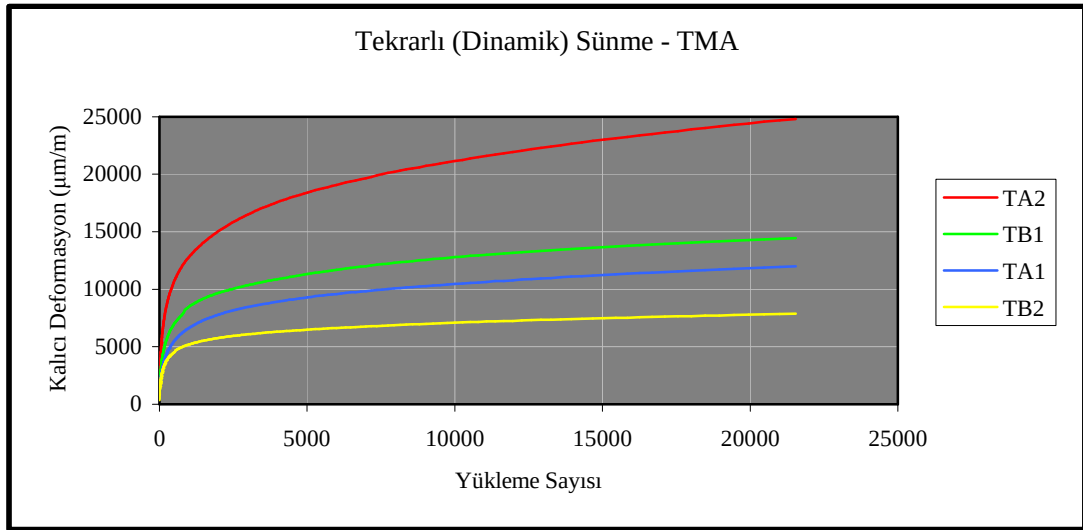
En yüksek kalıcı deformasyon miktarı binder numunelerinde görülmüştür. Binder numunelerine göre, aşınma numunelerinde daha az deformasyon oluşmuştur. En az kalıcı deformasyonun ise TMA ve modifiye bitümlü aşınma numunelerinde oluştuğu (yaklaşık eşit) gözlenmiştir.



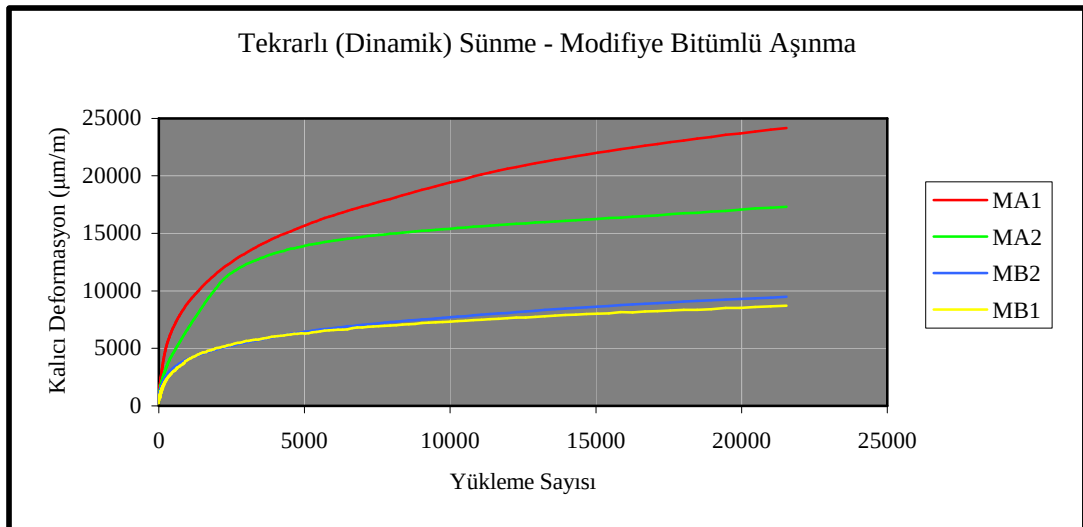
Şekil 4.18: Dinamik sünme deneyinde aşınma numunelerinde oluşan deformasyonlar



Şekil 4.19: Dinamik sünme deneyinde binder numunelerinde oluşan deformasyonlar

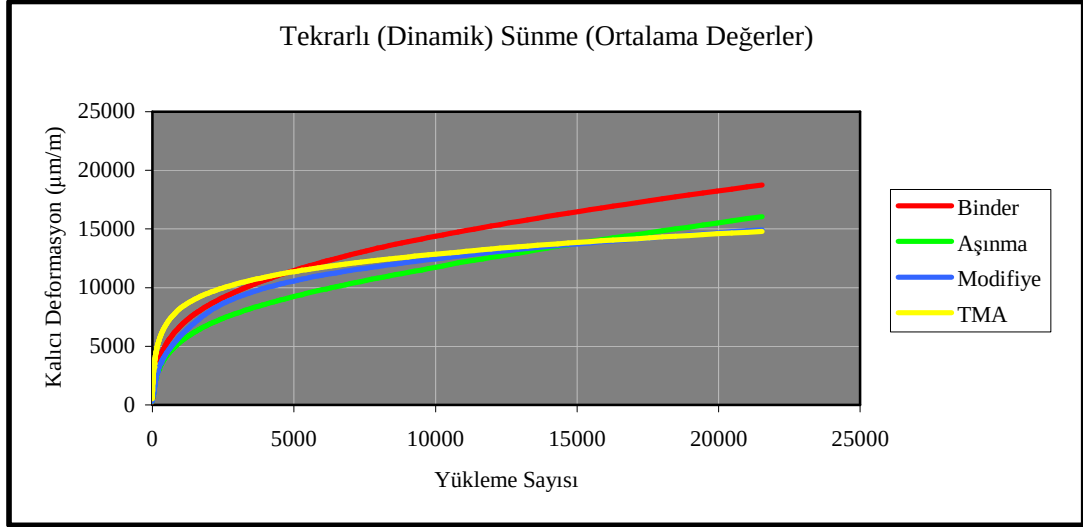


Şekil 4.20: Dinamik sünme deneyinde TMA numunelerinde oluşan deformasyonlar



Şekil 4.21: Dinamik sünme deneyinde modifiye bitümlü aşınma numunelerinde oluşan deformasyonlar

Deney sonuçlarından elde edilen ortalama kalıcı deformasyon miktarları; aşınma numunelerinde 16043 ($\mu\text{m/m}$), binder numunelerinde 18739 ($\mu\text{m/m}$), TMA numunelerinde 14780 ($\mu\text{m/m}$) ve modifiye bitümlü aşınma numunelerinde ise 14923 ($\mu\text{m/m}$) 'dir (Şekil 4.22).



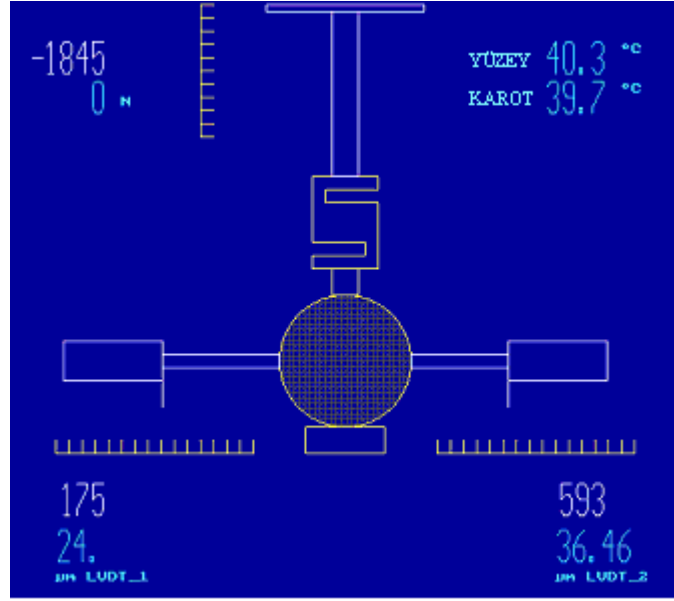
Şekil 4.22: Dinamik (tekrarlı) sünme deneylerinde numunelerde oluşan ortalama kalıcı deformasyonlar

Deney sonuçlarına göre, numuneler arasında ayırt edici büyük farklar görülmemektedir. Bunun nedeni, sıcaklık (40°C) ve yüklemenin (1500 N), karışımlar arasında ayırt edici büyük bir etki oluşturamayacak kadar düşük kalmasıdır.

4.2.3 Dolaylı Çekme Modülü Deneyleri

Her bir karışım tipinden 3'er adet (binderden 2 adet) olmak üzere toplam 11 karot üzerinde dolaylı çekme modülü deneyi yapılmıştır. Karot, cihazın yükleme ünitesine, eksene dik çap doğrultusunda (diametral) yerleştirilmiştir (Şekil 4.23, 4.24). Deneye başlamadan önce, karot ve yükleme ile ilgili değerler cihazın bağlı bulunduğu bilgisayar programına girilmiştir. Bu değerler; karot yüksekliği, karot çapı, deney sıcaklığı, tahmini poisson oranı (0,35), yükleme periyodu, yükleme süresi ve uygulanan yük miktarından oluşmaktadır (ELE-UMATTA, 1994). Deneyler üç farklı yükleme periyodunda (3000, 2000, 1000 ms) ve üç farklı yükleme süresinde (40, 60, 80 ms) gerçekleştirilmiştir. Bu yükleme koşullarında, numuneye 1300 N 'luk yükle 5 vuruş yapılmıştır (Şekil 4.25).

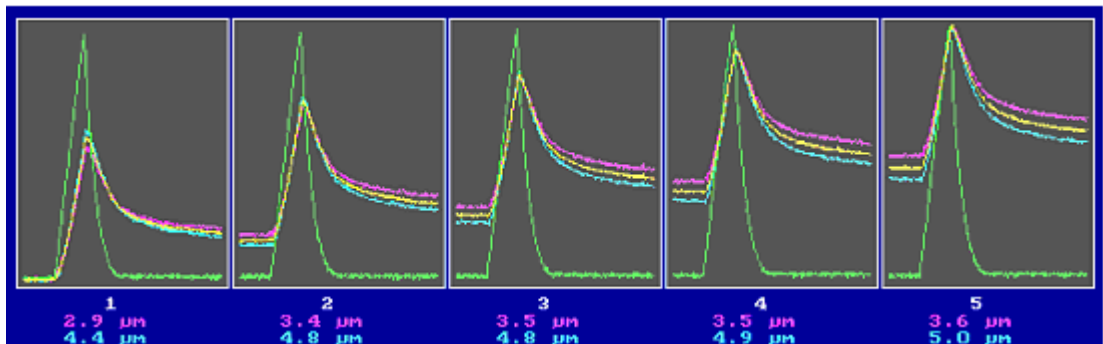
Deney tamamlandıktan sonra, karot 90° döndürülerek aynı yükleme koşullarıyla işlemler tekrarlanmıştır. Dolaylı çekme modülü (esneklik modülü, elastik modül) her iki durumda elde edilen sonuçların ortalaması alınarak belirlenmiştir (Tablo 4.13).



Şekil 4.23: Dolaylı çekme modülü deneyinin şematik görünümü



Şekil 4.24: Dolaylı çekme modülü deney düzeneği ve numunenin yüklenmesi



Şekil 4.25: Dolaylı çekme modülü deneyinde yükleme durumu (5 vuruş)

Tablo 4.13: Farklı yükleme koşullarındaki dolaylı çekme modülü (esneklik modülü, elastik modül) değerleri

Numune	Yükleme Periyodu (ms)								
	3000			2000			1000		
	Yükleme Süresi (ms)			Yükleme Süresi (ms)			Yükleme Süresi (ms)		
	40	60	80	40	60	80	40	60	80
AC1	2499.4	2070.1	1836.2	2253.4	1943.8	1733.8	2147.7	1915.9	1717.5
A2C1	2132.2	1835	1630.5	2189.4	1943	1738.2	2152.9	1919.2	1755.9
AC2	1661.3	1351	1185.8	1346.2	1221.7	1120.1	1342.1	1197.9	1121
A2C2	2063.6	1781.1	1587.4	1934.7	1702.3	1531.3	1954.6	1720.2	1560.5
AC3	1857.4	1532.3	1338.6	1673.7	1443.7	1297.7	1648.8	1450	1313.1
A2C3	1720.4	1364.9	1126.1	1387.6	1197.9	1081.6	1383.3	1241	1123
Ortalama	1989	1656	1451	1798	1575	1417	1772	1574	1432
BC1	(yapılmadı)								
B2C1									
BC2	3234.5	2845.4	2521.8	3156.1	2768.4	2481.3	3121.6	2729.8	2465.9
B2C2	2420.3	2100.9	1899.5	2360.4	2083.2	1901.8	2356.3	2098.7	1934.3
BC3	3873.9	3368	3002.2	3741.6	2803.3	2540.9	3230.1	2862.5	2642.5
B2C3	3449.5	2978.7	2637.5	3265.5	2888.4	2603.9	3300.1	2892.1	2610.7
Ortalama	3245	2823	2515	3131	2636	2382	3002	2646	2413
MC1 (İptal)	1093.7	1063.8	1033.4	1180.6	1091.4	1008.9	1156.7	1080.8	977.13
M2C1	2397.6	2097.6	1797.9	2286.5	1992	1758.9	2234.8	1977.8	1755.8
MC2	2413	2046.9	1842.5	2311.4	2039.3	1832.4	2300.3	2053.3	1835.8
M2C2	2538.2	2114.7	1829.7	2328.8	2035.3	1824.7	2340.4	2036	1826.7
MC3	2899.3	2321.4	2021.9	2527.7	2213.8	1951.4	2475.6	2166.1	1946.9
M2C3	2594.7	2165.2	1862.4	2342.2	2011	1791.8	2306.8	2017.3	1814.8
Ortalama	2569	2149	1871	2359	2058	1832	2332	2050	1836
TC1	3496.7	2842.2	2546.9	3258.9	2799	2461.9	3239.6	2827.8	2559
T2C1	3318.6	2834.2	2472.5	3152.5	2728	2472.2	3118.7	2780.3	2481.4
TC2	4026	3347.8	2901.5	3733.9	3263.1	2827.1	3703.2	3226.1	2826.3
T2C2	3850.5	3267.7	2849.4	3887.6	3267.4	2800	3663.1	3199.8	2827.3
TC3 (İptal)	1300.2	1259.4	1250.9	1431	1361.8	1293.2	1441.4	1365.4	1302.9
T2C3	4167.3	3431.4	2964.8	3726.4	3272.3	2938.6	3771.9	3305.7	2974
Ortalama	3772	3145	2747	3552	3066	2700	3499	3068	2734

A'lar aşınma, B'ler binder, M'ler modifiye bitümlü aşınma ve T'ler TMA numuneleridir.

Aynı yükleme koşulları altında, TMA numunelerinin en yüksek esneklik modüllerine sahip olduğu görülmüştür. Binder numunelerinin esneklik modülleri TMA numunelerine göre daha düşüktür. Üçüncü sırayı modifiye bitümlü aşınma numuneleri almıştır. En düşük esneklik modülü değerleri ise aşınma numunelerinde

bulunmuştur. Bu sıralama, statik sünme deneylerinden elde edilen sıralama ile ters yöndedir. Bir başka deyişle, esneklik modülü en yüksek olan numune tipinde, statik sünme deneylerinde oluşan deformasyonlar en düşüktür.

Dolaylı çekme modülü deneylerinden elde edilen sonuçlara göre, her bir yükleme periyodu için, kısa yükleme süresinde, beklendiği gibi daha yüksek esneklik modülü elde edilmiştir. Bu sonuç, yükleme süresi kısaldıkça malzemenin daha elastik davrandığını göstermektedir.

5. TEKERLEK İZİ OLUŞUM MODELLERİNİN KURULMASI

Deneysel çalışmaların sonuçları temel alınarak, tekerlek izi oluşumu, regresyon analizi ve bulanık mantık modelleme yöntemleriyle modellenmiştir. Ayrıca, tekerlek izi oluşumunda sıcaklığın etkisini değerlendirmek için kovaryans analizi yapılmıştır.

5.1 Regresyon Analizi ile Modelleme

Tekerlek izi deneylerinde kontrol altında bulundurulacak değişkenler devir sayısı (D) ve sıcaklıktır (S, °C). Bu değişkenlere bağlı olarak elde edilen sonuç değer ise, tekerlek izi miktarıdır (TI, %). Bir başka deyişle, devir sayısı ve sıcaklık bağımsız değişken, tekerlek izi miktarı ise bağımlı değişken olarak belirlenmiştir.

Gerçekleştirilen tekerlek izi deneylerinin sonuçları esas alınarak, öncelikle bağımlı değişken (tekerlek izi) ile her bir bağımsız değişken (devir sayısı ve sıcaklık) arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Bu araştırmanın sonucunda, tekerlek izi ile devir sayısı arasında logaritmik bir ilişkinin olduğu açıkça belirlenmiştir. Tekerlek izi miktarı ile sıcaklık arasında ise, üssel ilişkiye yakın bir ilişki vardır. Tekerlek izi ile devir sayısı arasındaki ilişkiyi doğrusallaştırmak için logaritmik dönüşüm uygulanmıştır. Bu durumda, logaritmik olarak dönüştürülmüş tekerlek izi değerleri ile sıcaklık arasında, doğrusala yakın bir ilişki ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak, kurulan çoklu doğrusal regresyon modelinde, bağımlı değişken olarak logaritması alınmış tekerlek izi değerleri, bağımsız değişken olarak da logaritması alınmış devir sayısı değerleri ve herhangi bir dönüşüm uygulanmamış normal sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Regresyon modellemesi, SPSS paket programı kullanılarak yapılmıştır.

5.1.1 Aşınma Numunelerine Ait Regresyon Modeli

Kurulan modele ait tanımlayıcı istatistikler Tablo 5.1’de, değişkenler arasındaki korelasyonlar Tablo 5.2’de verilmiştir. Model özeti Tablo 5.3’te, varyans analizi Tablo 5.4’te görülmektedir. Modele ait katsayılar Tablo 5.5’te, doğrusal bağımlılık durumu ise Tablo 5.6’da sunulmuştur.

Tablo 5.1: Tanımlayıcı istatistikler (aşınma)

	Ortalama	St. Sapma	N
LOGTI	,56213220	,27667600	50
LOGD	2,61303338	,72659467	50
S	55,0000000	7,14285714	50

Tablo 5.2: Değişkenler arasındaki korelasyonlar (aşınma)

		LOGTI	LOGD	S
Pearson Korelasyonu	LOGTI	1,000	,708	,678
	LOGD	,708	1,000	,000
	S	,678	,000	1,000
Anlamlılık (1-uçlu)	LOGTI	,	,000	,000
	LOGD	,000	,	,500
	S	,000	,500	,
N	LOGTI	50	50	50
	LOGD	50	50	50
	S	50	50	50

Yukarıdaki tabloda bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları oldukça yüksektir. Bağımsız değişkenler arasında ise korelasyon katsayısı sıfırdır, hiçbir ilişki yoktur. Bu, ideal bir durumdur. (Modellerde içsel bağımlılık olmaması için, bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon katsayılarının 0,5'ten küçük olması istenir.)

Tablo 5.3: Model özeti^b (aşınma)

Model	R	R Kare	Düzeltilmiş R Kare	Tahminin Std. Hatası	Değişim İstatistikleri				
					R Kare Değişimi	F Değişimi	df1	df2	F Değişiminin Anlamlılığı
1	,980 ^a	,961	,960	5,558E-02	,961	583,639	2	47	,000

a. Tahmin eden değişkenler: (Sabit), S, LOGD

b. Bağımlı Değişken: LOGTI

Çoklu belirtme katsayısı R^2 , birden çok bağımsız değişkenin, bağımlı değişkeni açıklama miktarını verir. Regresyon denkleminin uygunluk (modelin veriye uyumu) ölçüsü olarak da kullanılan R^2 , regresyon modeli ile açıklanabilen değişimin toplam değişim içindeki yüzdesidir (Alpar, 2003). Bir başka deyişle R^2 , bağımlı değişkenin varyansının regresyon modeli ile açıklanan oranıdır (Bayazıt, 2006). Modeldeki

bağımsız değişken sayısı arttığında (eklenen değişken ister ilgili, ister ilgisiz olsun) R^2 artar (Kalaycı ve diğ, 2005; Alpar, 2003). Ancak serbestlik derecesi azaldığından, tahmin hataları artar. Bu nedenle modelin anlamlılığını ölçerken, R^2 'de bir düzeltme yapmak gerekir (Bayazıt, 2006). Bu durumda düzeltilmiş R^2 'ye bakılmalıdır. Çünkü, düzeltilmiş R^2 , yalnızca eklenen değişken model ile ilişkili ise artmaktadır (Kalaycı ve diğ, 2005).

Kurulan modeldeki R^2 değeri 0,961, düzeltilmiş R^2 değeri ise 0,960 'tır.

Tablo 5.4: Varyans analizi^b (aşınma)

Model	Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	Anlamlılık p
1 Regresyon	3,606	2	1,803	583,639	,000 ^a
Kalıntı	,145	47	3,089E-03		
Toplam	3,751	49			

a. Tahmin eden değişkenler: (Sabit), S, LOGD

b. Bağımlı Değişken: LOGTI

ANOVA tablosu, modelin bir bütün olarak anlamlı olup olmadığını test etmeye yarar (Kalaycı ve diğ, 2005). Tablodaki F değeri (583,639), modelin bir bütün olarak her düzeyde anlamlı olduğunu göstermektedir ($p = 0,000$).

Tablo 5.5: Model katsayıları^a (aşınma)

Model	Standartlaştırılmamış Katsayılar	Std. Hata	Std. Katsayılar	t	Anlamlılık p	%95 Güven Aralığı (B için)		Korelasyonlar			Doğ. Bağımlılık İstatistikleri	
						Alt Sınır	Üst Sınır	Sıfır. Der.	Kısmi	Yarı kısmi	Tolerans	VIF
1 (Sabit)	-1,587	,068		-23,361	,000	-1,724	-1,450					
LOGD	,270	,011	,708	24,681	,000	,248	,292	,708	,964	,708	1,000	1,000
S	2,626E-02	,001	,678	23,625	,000	,024	,028	,678	,960	,678	1,000	1,000

a. Bağımlı Değişken: LOGTI

Yukarıdaki model katsayıları tablosunda regresyon katsayıları ve bunlara ilişkin t istatistikleri görülmektedir. Daha önce bahsedilen F istatistiği, modelin bir bütün olarak anlamlılığını test etmek için kullanılırken, t istatistiği değişkenlerin ayrı ayrı anlamlılıklarını test etmek amacıyla kullanılmaktadır (Kalaycı ve diğ, 2005). Tablo 5.5'teki t istatistik değerlerinden, modeldeki değişkenlerin ayrı ayrı her düzeyde anlamlı olduğu p (anlamlılık) değerlerinden anlaşılmaktadır ($p < 0,05$ veya 0,01).

Standartlaştırılmış katsayılar altındaki beta, bağımsız değişkenlerin önem sırasını göstermektedir. Beta değeri büyük olan değişken daha önemlidir (Kalaycı ve diğ., 2005).

Tablo 5.5'teki katsayılarla oluşturulan model aşağıda verilmiştir.

$$LOGTI = -1,587 + 0,270LOGD + 0,02626S \quad (5.1)$$

Burada; TI tekerlek izini (%), D devir sayısını ve S sıcaklığı ($^{\circ}C$) göstermektedir.

Model, matematiksel işlemlerle aşağıdaki durumlara getirilebilir:

$$TI = 0,02588D^{0,27} 1,06233^S \quad (5.2)$$

$$TI = 0,02588D^{0,27} e^{0,06S} \quad (5.3)$$

Tabloda bulunan diğer önemli istatistikler de, doğrusal bağımlılık istatistikleri altındaki tolerans ve VIF değerleridir. Bu değerler, modelde çoklu doğrusal bağlantı sorunu olup olmadığını göstermektedir. Düşük tolerans ve yüksek VIF değerleri bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantı olduğunu gösterir (Kalaycı ve diğ, 2005; Alpar, 2003). (Tolerans değerleri 0 ile 1, VIF değerleri ise 1 ile ∞ (sonsuz) aralığında değişir. Bu değerlerin 1'e yakın olması çoklu doğrusal bağımlılık sorunu olmadığını gösterir). Kurulan modelde, bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağımlılık olmadığı görülmüştür.

Tablo 5.6: Doğrusal bağımlılık durumu^a (aşınma)

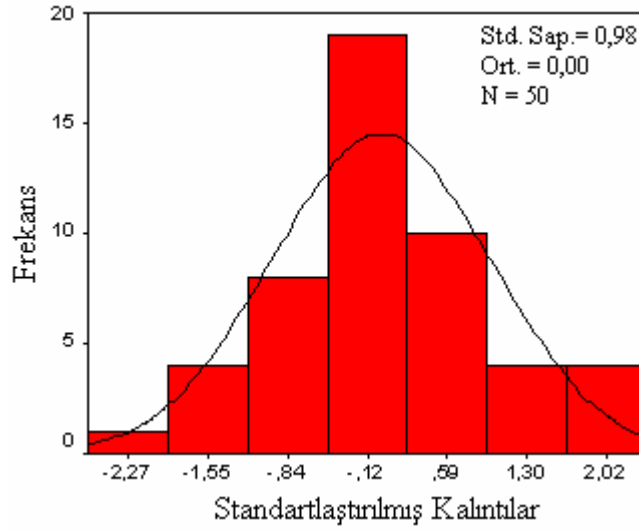
Model	Boyut	Özdeğer	Durum İndeksi	Varyans Ayırışım Oranları		
				(Sabit)	LOGD	S
1	1	2,942	1,000	,00	,01	,00
	2	5,075E-02	7,613	,03	,92	,07
	3	7,672E-03	19,582	,97	,07	,92

a. Bağımlı Değişken: LOGTI

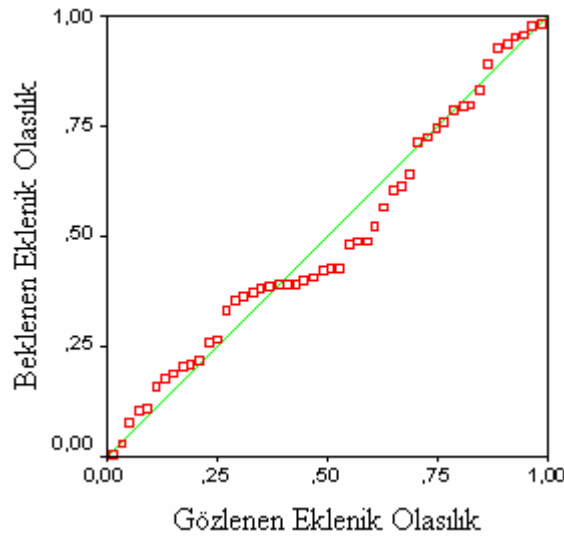
Tablo 5.6'da doğrusal bağımlılığın derecesi ölçülebilmektedir. Veride bir ya da daha fazla yakın doğrusal bağımlılık olduğunda, özdeğerlerden bir ya da daha fazlası sıfır veya sıfıra çok yakın değerler alır. Ayrıca özdeğerlerin en büyüğünün en küçüğüne bölünmesiyle elde edilen durum indeksi de doğrusal bağımlılığın bir göstergesidir. Durum indeksinin 100'ün altında olması, veride çoklu doğrusal bağımlılık olmadığını gösterir (Alpar, 2003). Tabloda durum indeksi değerleri 100'ün altındadır.

Regresyon çözümlemesinin varsayımlarından biri, bilindiği gibi hataların normal dağıldığı varsayımdır. Normallikten sapma önemsenmeyecek bir düzeyde ise sonuçları etkilemeyecektir. Normallik varsayımının yerine gelip gelmediği artıkların (kalıntıların) incelenmesi ile yapılır. Görsel olarak histogram ve P-P grafiğinden yararlanılabilir (Alpar, 2003).

Normal dağılımda ortalama sıfır (0), standart sapma bir (1)'dir. Şekil 5.1'deki histogramda standartlaştırılmış kalıntıların ortalaması sıfır, standart sapması 0,98'dir. Kalıntıların normal dağıldığı söylenebilir. Şekil 5.2'de ise standartlaştırılmış kalıntıların normal P-P grafiği görülmektedir. Grafikte saçılımın doğru üzerinde veya etrafında kümelenmiş olması kalıntıların normal dağıldığını göstermektedir.



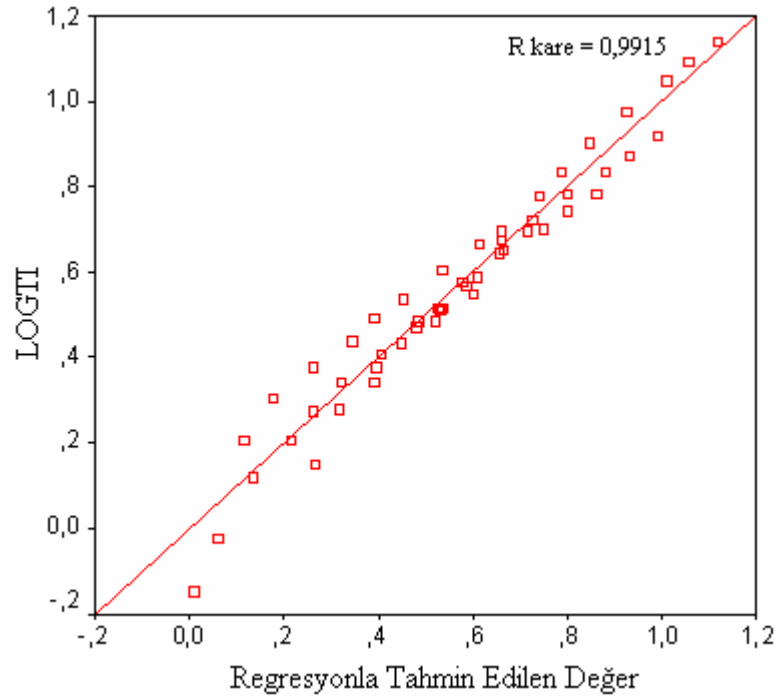
Şekil 5.1: Standartlaştırılmış kalıntıların histogramı (aşınma)



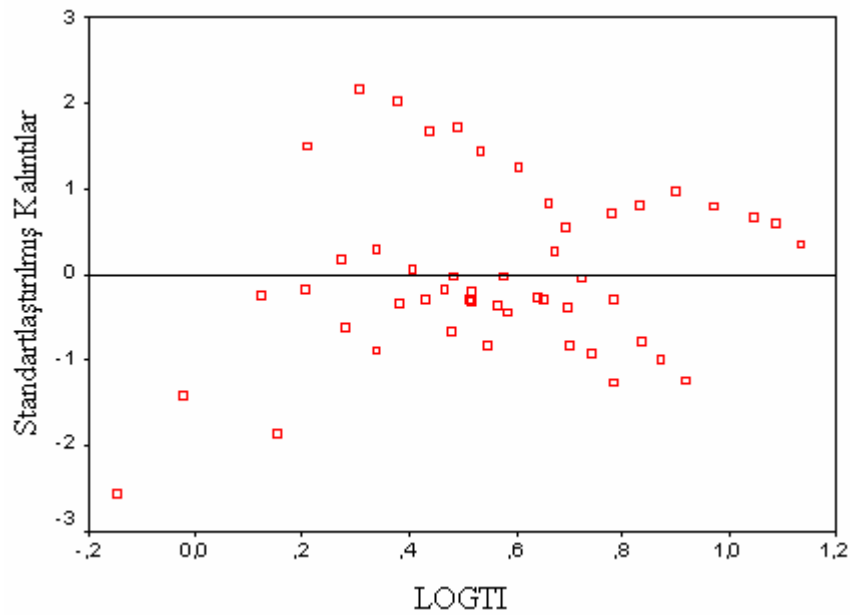
Şekil 5.2: Standartlaştırılmış kalıntıların normal P-P grafiği (aşınma)

Modelde kullanılan gerçek değerler (LOGTI) ile bunlara karşılık regresyon modelinin tahmin ettiği değerlerden oluşan saçılma grafiği Şekil 5.3'te görülmektedir. Grafikteki noktaların doğru üzerinde veya etrafında kümelenmesi modelin gücünü gösterir. Grafikte R^2 değeri 0,9915 'tir.

Şekil 5.4'te ise standartlaştırılmış kalıntıların bağımlı değişkene (LOGTI) göre dağılımı görülmektedir. Kalıntıların sıfır (0) etrafında rastgele dağılması, normallik varsayımını sağladığını gösterir.



Şekil 5.3: Gerçek değerlere karşılık tahmin edilen değerler (aşınma)



Şekil 5.4: Standartlaştırılmış kalıntıların dağılımı (aşınma)

5.1.2 Binder Numunelerine Ait Regresyon Modeli

Kurulan modele ait tanımlayıcı istatistikler Tablo 5.7’de, değişkenler arasındaki korelasyonlar Tablo 5.8’de verilmiştir. Model özeti Tablo 5.9’da, varyans analizi Tablo 5.10’da görülmektedir. Modele ait katsayılar Tablo 5.11’de, doğrusal bağımlılık durumu ise Tablo 5.12’de sunulmuştur.

Tablo 5.7: Tanımlayıcı istatistikler (binder)

	Ortalama	Std. Sapma	N
LOGTI	,23330629	,24896636	50
LOGD	2,61303338	,72659467	50
S	55,0000	7,1429	50

Tablo 5.8: Değişkenler arasındaki korelasyonlar (binder)

		LOGTI	LOGD	S
Pearson Korelasyonu	LOGTI	1,000	,701	,659
	LOGD	,701	1,000	,000
	S	,659	,000	1,000
Anlamlılık (1-uçlu)	LOGTI	,	,000	,000
	LOGD	,000	,	,500
	S	,000	,500	,
N	LOGTI	50	50	50
	LOGD	50	50	50
	S	50	50	50

Yukarıdaki tabloda bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları oldukça yüksektir. Bağımsız değişkenler arasında ise korelasyon katsayısı sıfırdır, hiçbir ilişki yoktur.

Tablo 5.9: Model özeti^b (binder)

Model	R	R Kare	Düzeltilmiş R Kare	Tahminin Std. Hatası	Değişim İstatistikleri				
					R Kare Değişimi	F Değişimi	df1	df2	F Değişiminin Anlamlılığı
1	,962 ^a	,925	,922	6,945E-02	,925	291,323	2	47	,000

a. Tahmin Eden Değişkenler: (Sabit), S, LOGD

b. Bağımlı Değişken: LOGTI

Kurulan modeldeki R^2 (çoklu belirtme katsayısı) değeri 0,925, düzeltilmiş R^2 değeri ise 0,922’dir.

Tablo 5.10: Varyans analizi^b (binder)

Model	Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	Anlamlılık p
1 Regresyon	2,811	2	1,405	291,323	,000 ^a
Kalıntı	,227	47	4,824E-03		
Toplam	3,037	49			

a. Tahmin Eden Değişkenler: (Sabit), S, LOGD

b. Bağımlı Değişken: LOGTI

Tablodaki F değeri (291,323), modelin bir bütün olarak her düzeyde anlamlı olduğunu göstermektedir (p = 0,000).

Tablo 5.11: Model katsayıları^a (binder)

Model	Standartlaştırılmamış Katsayılar		Std. Katsayılar	t	Anlamlılık p	%95 Güven Aralığı (B için)		Korelasyonlar			Doğ. Bağımlılık İstatistikleri	
	B	Std. Hata	Beta			Alt Sınır	Üst Sınır	Sıfır. Der.	Kısmi	Yarı Kısmi	Tolerans	VIF
1 (Sabit)	-1,657	,085		-19,524	,000	-1,828	-1,487					
LOGD	,240	,014	,701	17,585	,000	,213	,268	,701	,932	,701	1,000	1,000
S	2,297E-02	,001	,659	16,535	,000	,020	,026	,659	,924	,659	1,000	1,000

a. Bağımlı Değişken: LOGTI

Tablo 5.11'deki t istatistik değerlerinden, modeldeki değişkenlerin ayrı ayrı her düzeyde anlamlı olduğu p (anlamlılık) değerlerinden anlaşılmaktadır (p < 0,05 veya 0,01).

Tablo 5.11'deki katsayılarla oluşturulan model aşağıda verilmiştir.

$$LOGTI = -1,657 + 0,240LOGD + 0,02297S \quad (5.4)$$

Burada; TI tekerlek izini (%), D devir sayısını ve S sıcaklığı (°C) göstermektedir.

Model, matematiksel işlemlerle aşağıdaki durumlara getirilebilir:

$$TI = 0,02203D^{0,24}1,054314S \quad (5.5)$$

$$TI = 0,02203D^{0,24}e^{0,053S} \quad (5.6)$$

Tolerans ve VIF değerlerinin 1 olması, kurulan modelde, bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağımlılık sorunu olmadığını gösterir.

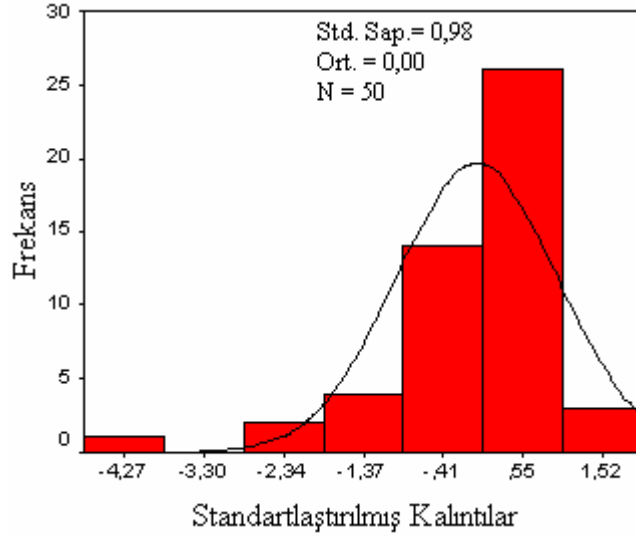
Tablo 5.12: Doğrusal bağımlılık durumu^a (binder)

Model	Boyut	Özdeğer	Durum İndeksi	Varyans Ayrışım Oranları		
				(Sabit)	LOGD	S
1	1	2,942	1,000	,00	,01	,00
	2	5,075E-02	7,613	,03	,92	,07
	3	7,672E-03	19,582	,97	,07	,92

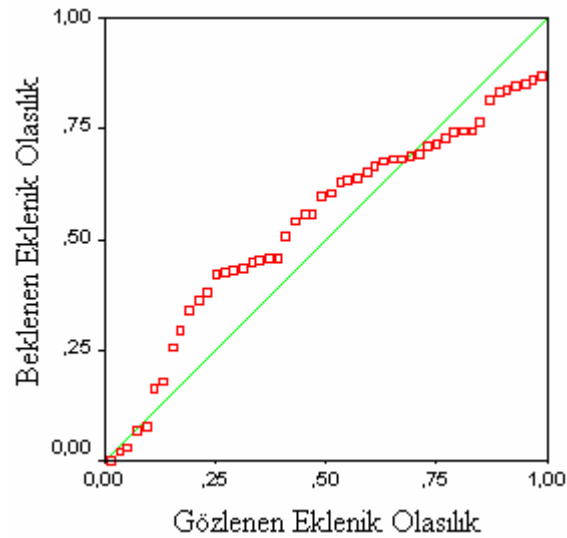
a. Bağımlı Değişken: LOGTI

Tablo 5.12'deki durum indeksi değerleri 100'ün altında olduğu için doğrusal bağımlılık sorunu yoktur.

Şekil 5.5'teki histogramda standartlaştırılmış kalıntıların ortalaması sıfır, standart sapması 0,98'dir. Kalıntıların normal dağıldığı söylenebilir.



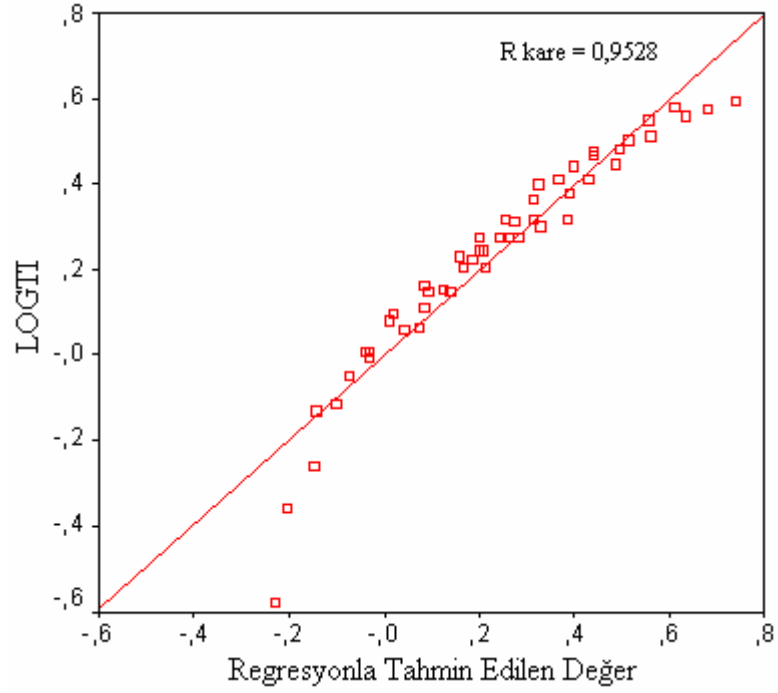
Şekil 5.5: Standartlaştırılmış kalıntıların histogramı (binder)



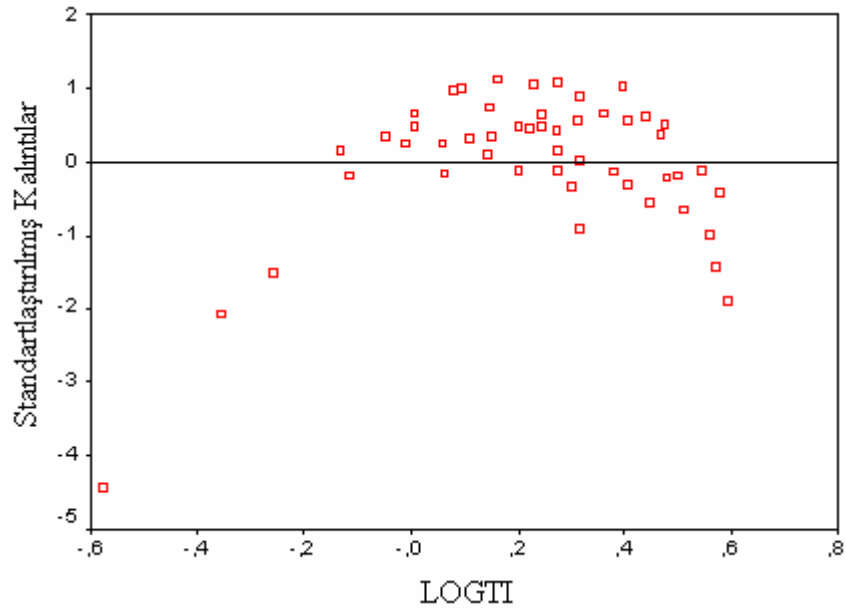
Şekil 5.6: Standartlaştırılmış kalıntıların normal P-P grafiği (binder)

Şekil 5.6’da ise standartlaştırılmış kalıntıların normal P–P grafiği görülmektedir. Grafikte saçılımın doğru üzerinde veya etrafında kümelenmiş olması kalıntıların normal dağıldığını göstermektedir.

Modelde kullanılan gerçek değerler (LOGTI) ile bunlara karşılık regresyon modelinin tahmin ettiği değerlerden oluşan saçılma grafiği Şekil 5.7’de görülmektedir. Grafikteki noktaların doğru üzerinde veya etrafında kümelenmesi modelin gücünü gösterir. Grafikte R^2 değeri 0,9528’dir. Şekil 5.8’de ise standartlaştırılmış kalıntıların dağılımı görülmektedir.



Şekil 5.7: Gerçek değerlere karşılık tahmin edilen değerler (binder)



Şekil 5.8: Standartlaştırılmış kalıntıların dağılımı (binder)

5.1.3 TMA Numunelerine Ait Regresyon Modeli

Kurulan modele ait tanımlayıcı istatistikler Tablo 5.13'te, değişkenler arasındaki korelasyonlar Tablo 5.14'te verilmiştir. Model özeti Tablo 5.15'te, varyans analizi Tablo 5.16'da görülmektedir. Modele ait katsayılar Tablo 5.17'de, doğrusal bağımlılık durumu ise Tablo 5.18'de sunulmuştur.

Tablo 5.13: Tanımlayıcı istatistikler (TMA)

	Ortalama	Std. Sapma	N
LOGTI	,40940597	,27331480	50
LOGD	2,61303338	,72659467	50
S	55,0000	7,1429	50

Tablo 5.14: Değişkenler arasındaki korelasyonlar (TMA)

		LOGTI	LOGD	S
Pearson Korelasyonu	LOGTI	1,000	,804	,518
	LOGD	,804	1,000	,000
	S	,518	,000	1,000
Anlamlılık (1-uçlu)	LOGTI	,	,000	,000
	LOGD	,000	,	,500
	S	,000	,500	,
N	LOGTI	50	50	50
	LOGD	50	50	50
	S	50	50	50

Yukarıdaki tabloda bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları oldukça yüksektir. Bağımsız değişkenler arasında ise korelasyon katsayısı sıfırdır, hiçbir ilişki yoktur.

Tablo 5.15: Model özeti^b (TMA)

Model	R	R Kare	Düzeltilmiş R Kare	Tahminin Std. Hatası	Değişim İstatistikleri				
					R Kare Değişimi	F Değişimi	df1	df2	F Değiş. Anlamlılığı
1	,956 ^a	,914	,911	8,172E-02	,914	250,534	2	47	,000

a. Tahmin Eden Değişkenler: (Sabit), S, LOGD

b. Bağımlı Değişken: LOGTI

Kurulan modeldeki R^2 (çoklu belirtme katsayısı) değeri 0,914, düzeltilmiş R^2 değeri ise 0,911'dir.

Tablo 5.16: Varyans analizi^b (TMA)

Model	Kareler Toplamı	df	Karelerin Ortalaması	F	Anlamlılık p
1 Regresyon	3,346	2	1,673	250,534	,000 ^a
Kalıntı	,314	47	6,679E-03		
Toplam	3,660	49			

a. Tahmin Eden Değişkenler: (Sabit), S, LOGD

b. Bağımlı Değişken: LOGTI

Tablodaki F değeri (250,534), modelin bir bütün olarak her düzeyde anlamlı olduğunu göstermektedir (p = 0,000).

Tablo 5.17: Model katsayıları^a (TMA)

Model	Standartlaştırılmamış Katsayılar		Standart Katsayılar	t	Anlamlılık p	%95 Güven Aralığı (B için)		Korelasyonlar			Doğ. Bağımlılık İstatistikleri	
	B	Std. Hata	Beta			Alt Sınır	Üst Sınır	Sıfır. Der.	Kısmi	Yarı Kısmi	Tolerans	VIF
1 (Sabit)	-1,470	,100		-14,720	,000	-1,671	-1,269					
LOGD	,302	,016	,804	18,819	,000	,270	,335	,804	,940	,804	1,000	1,000
S	1,981E-02	,002	,518	12,121	,000	,017	,023	,518	,870	,518	1,000	1,000

a. Bağımlı Değişken: LOGTI

Tablo 5.17'deki t istatistik değerlerinden, modeldeki değişkenlerin ayrı ayrı her düzeyde anlamlı olduğu p (anlamlılık) değerlerinden anlaşılmaktadır (p < 0,05 veya 0,01).

Tablo 5.17'deki katsayılarla oluşturulan model aşağıda verilmiştir.

$$LOGTI = -1,470 + 0,302LOGD + 0,01981S \quad (5.7)$$

Burada; TI tekerlek izini (%), D devir sayısını ve S sıcaklığı (°C) göstermektedir.

Model, matematiksel işlemlerle aşağıdaki durumlara getirilebilir:

$$TI = 0,03388D^{0,302}1,04667S \quad (5.8)$$

$$TI = 0,03388D^{0,302}e^{0,046S} \quad (5.9)$$

Tolerans ve VIF değerlerinin 1 olması, kurulan modelde, bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağımlılık sorunu olmadığını gösterir.

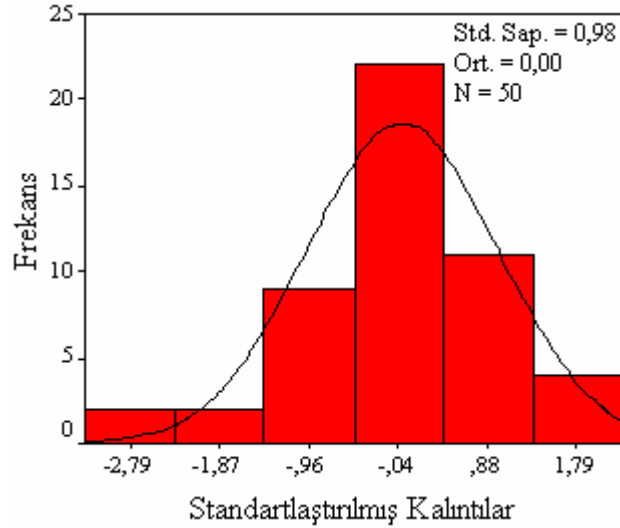
Tablo 5.18: Doğrusal bağımlılık durumu^a (TMA)

Model	Boyut	Özdeğer	Durum İndeksi	Varyans Ayrışım Oranları		
				(Sabit)	LOGD	S
1	1	2,942	1,000	,00	,01	,00
	2	5,075E-02	7,613	,03	,92	,07
	3	7,672E-03	19,582	,97	,07	,92

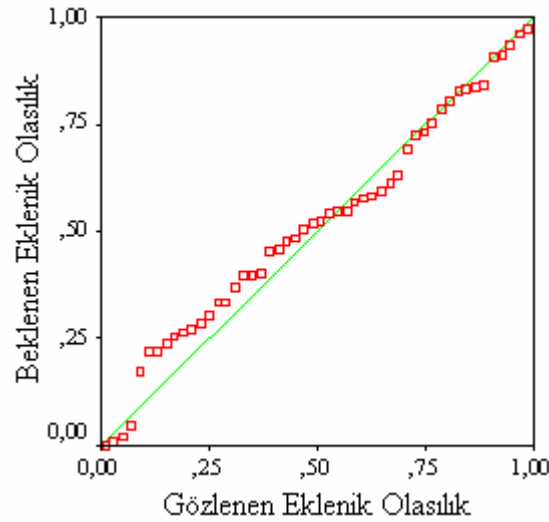
a. Bağımlı Değişken: LOGTI

Tablo 5.18'deki durum indeksi değerleri 100'ün altında olduğu için doğrusal bağımlılık sorunu yoktur.

Şekil 5.9'daki histogramda standartlaştırılmış kalıntıların ortalaması sıfır, standart sapması 0,98'dir. Kalıntıların normal dağıldığı söylenebilir.



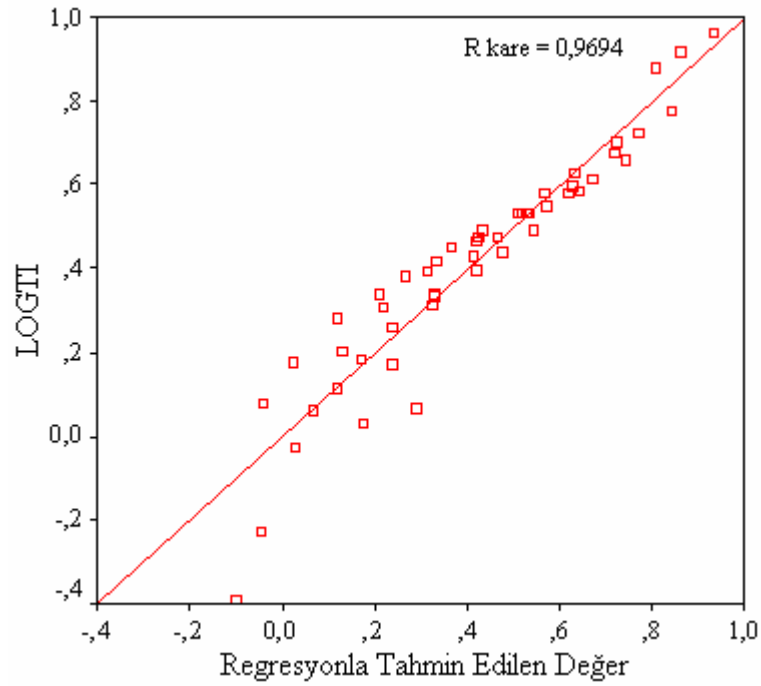
Şekil 5.9: Standartlaştırılmış kalıntıların histogramı (TMA)



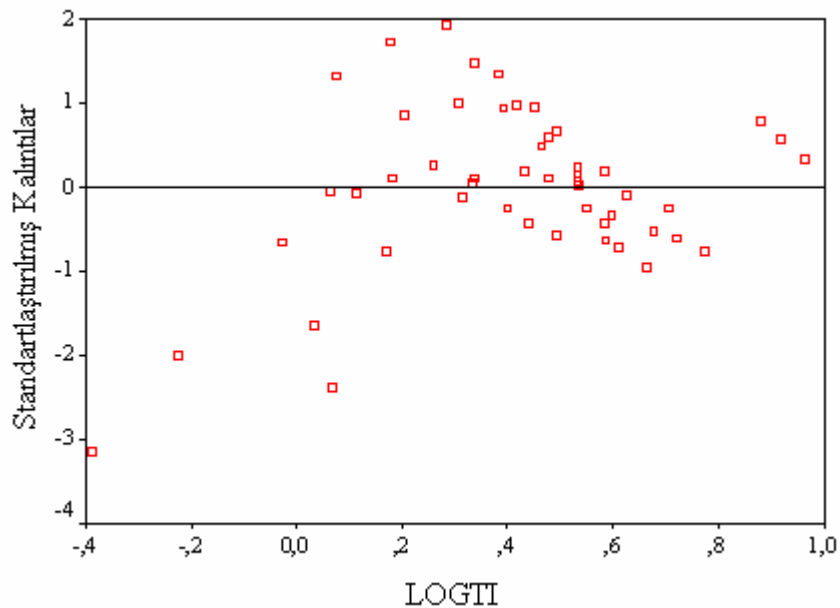
Şekil 5.10: Standartlaştırılmış kalıntıların normal P-P grafiği (TMA)

Şekil 5.10'da ise standartlaştırılmış kalıntıların normal P-P grafiği görülmektedir. Grafikte saçılımın doğru üzerinde veya etrafında kümelenmiş olması kalıntıların normal dağıldığını göstermektedir.

Modelde kullanılan gerçek değerler (LOGTI) ile bunlara karşılık regresyon modelinin tahmin ettiği değerlerden oluşan saçılma grafiği Şekil 5.11'de görülmektedir. Grafikteki noktaların doğru üzerinde veya etrafında kümelenmesi modelin gücünü gösterir. Grafikte R^2 değeri 0,9694'tür. Şekil 5.12'de ise standartlaştırılmış kalıntıların dağılımı görülmektedir.



Şekil 5.11: Gerçek değerlere karşılık tahmin edilen değerler (TMA)



Şekil 5.12: Standartlaştırılmış kalıntıların dağılımı (TMA)

5.1.4 Modifiye Bitümlü Aşınma Numunelerine Ait Regresyon Modeli

Kurulan modele ait tanımlayıcı istatistikler Tablo 5.19’da, değişkenler arasındaki korelasyonlar Tablo 5.20’de verilmiştir. Model özeti Tablo 5.21’de, varyans analizi Tablo 5.22’de görülmektedir. Modele ait katsayılar Tablo 5.23’de, doğrusal bağımlılık durumu ise Tablo 5.24’te sunulmuştur.

Tablo 5.19: Tanımlayıcı istatistikler (Mdf. bit. aşınma)

	Ortalama	Std. Sapma	N
LOGTI	,12062677	,25681309	50
LOGD	2,61303338	,72659467	50
S	55,0000	7,1429	50

Tablo 5.20: Değişkenler arasındaki korelasyonlar (Mdf. bit. aşınma)

		LOGTI	LOGD	S
Pearson	LOGTI	1,000	,761	,582
Korelasyonu	LOGD	,761	1,000	,000
	S	,582	,000	1,000
Anlamlılık	LOGTI	,	,000	,000
(1-uçlu)	LOGD	,000	,	,500
	S	,000	,500	,
N	LOGTI	50	50	50
	LOGD	50	50	50
	S	50	50	50

Yukarıdaki tabloda bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları oldukça yüksektir. Bağımsız değişkenler arasında ise korelasyon katsayısı sıfırdır, hiçbir ilişki yoktur.

Tablo 5.21: Model özeti^b (Mdf. bit. aşınma)

Model	R	R Kare	Düzeltilmiş R Kare	Tahminin Std. Hatası	Değişim İstatistikleri				
					R Kare Değişimi	F Değişimi	df1	df2	F Değiş. Anlamlılığı
1	,958 ^a	,918	,914	7,510E-02	,918	262,979	2	47	,000

a. Tahmin Eden Değişkenler: (Sabit), S, LOGD

b. Bağımlı Değişken: LOGTI

Kurulan modeldeki R^2 (çoklu belirtme katsayısı) değeri 0,918, düzeltilmiş R^2 değeri ise 0,914’tür.

Tablo 5.22: Varyans analizi^b (Mdf. bit. aşınma)

Model	Kareler Toplamı	df	Karelerin Ortalaması	F	Anlamlılık p
1 Regresyon	2,967	2	1,483	262,979	,000 ^a
Kalıntı	,265	47	5,640E-03		
Toplam	3,232	49			

a. Tahmin Eden Değişkenler: (Sabit), S, LOGD

b. Bağımlı Değişken: LOGTI

Tablodaki F değeri (262,979), modelin bir bütün olarak her düzeyde anlamlı olduğunu göstermektedir (p = 0,000).

Tablo 5.23: Model katsayıları^a (Mdf. bit. aşınma)

Model	Standartlaştırılmamış Katsayılar		Std. Katsayılar	t	Anlamlılık	%95 Güven Aralığı (B için)		Korelasyonlar			Doğ. Bağımlılık İstatistikleri	
	B	Std. Hata	Beta			Alt Sınır	Üst Sınır	Sıfır. Der.	Kısmi	Yarı Kısmi	Tolerans	VIF
1 (Sabit)	-1,733	,092		-18,881	,000	-1,918	-1,549					
LOGD	,269	,015	,761	18,217	,000	,239	,299	,761	,936	,761	1,000	1,000
S	2,093E-02	,002	,582	13,932	,000	,018	,024	,582	,897	,582	1,000	1,000

a. Bağımlı Değişken: LOGTI

Tablo 5.23'teki t istatistik değerlerinden, modeldeki değişkenlerin ayrı ayrı her düzeyde anlamlı olduğu p (anlamlılık) değerlerinden anlaşılmaktadır (p < 0,05 veya 0,01).

Tablo 5.23'teki katsayılarla oluşturulan model aşağıda verilmiştir.

$$LOGTI = -1,733 + 0,269LOGD + 0,02093S \quad (5.10)$$

Burada; TI tekerlek izini (%), D devir sayısını ve S sıcaklığı (°C) göstermektedir.

Model, matematiksel işlemlerle aşağıdaki durumlara getirilebilir:

$$TI = 0,01849D^{0,269}1,04937^S \quad (5.11)$$

$$TI = 0,01849D^{0,269}e^{0,048S} \quad (5.12)$$

Tolerans ve VIF değerlerinin 1 olması, kurulan modelde, bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağımlılık sorunu olmadığını gösterir.

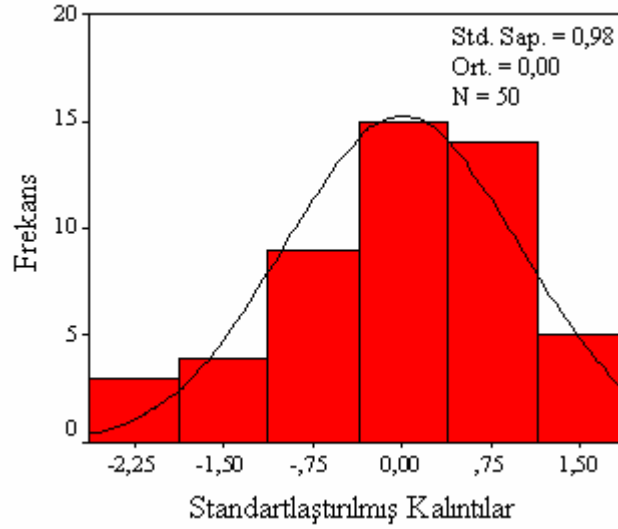
Tablo 5.24: Doğrusal bağımlılık durumu^a (Mdf. bit. aşınma)

Model	Boyut	Özdeğer	Durum İndeksi	Varyans Ayrışım Oranları		
				(Sabit)	LOGD	S
1	1	2,942	1,000	,00	,01	,00
	2	5,075E-02	7,613	,03	,92	,07
	3	7,672E-03	19,582	,97	,07	,92

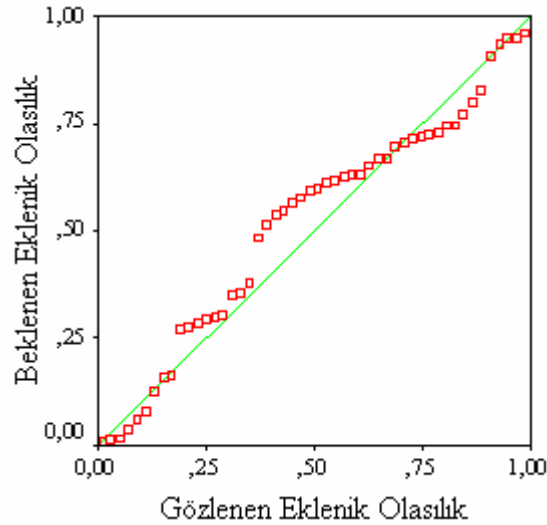
a. Bağımlı Değişken: LOGTI

Tablo 5.24'teki durum indeksi değerleri 100'ün altında olduğu için doğrusal bağımlılık sorunu yoktur.

Şekil 5.13'teki histogramda standartlaştırılmış kalıntıların ortalaması sıfır, standart sapması 0,98'dir. Kalıntıların normal dağıldığı söylenebilir.



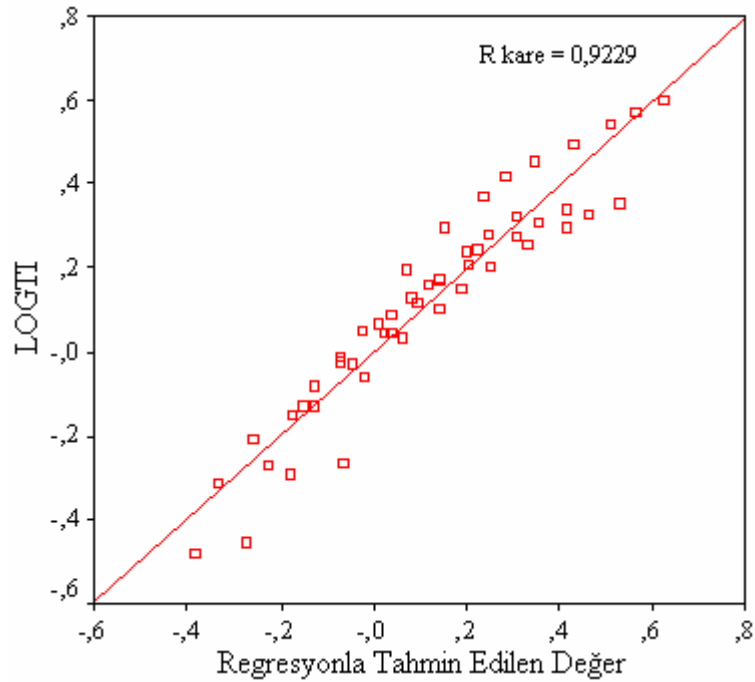
Şekil 5.13: Standartlaştırılmış kalıntıların histogramı (Mdf. bit. aşınma)



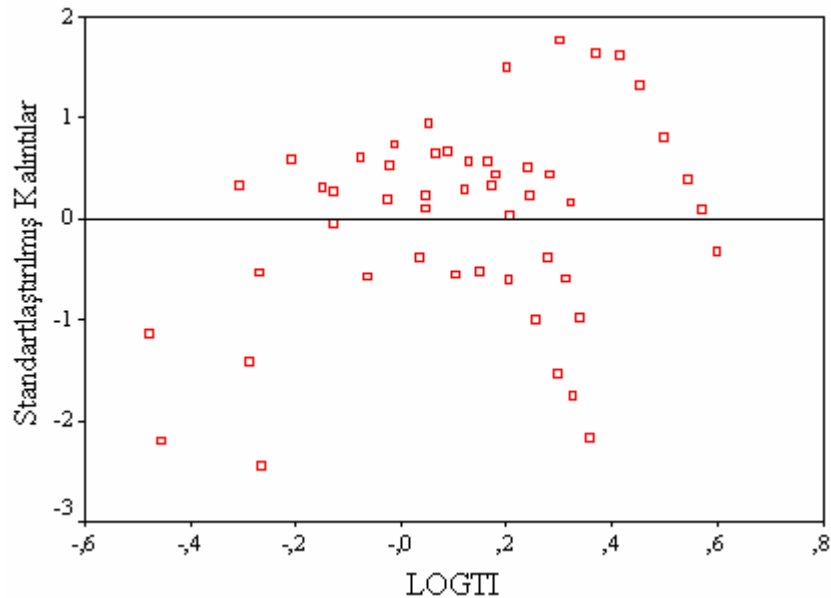
Şekil 5.14: Standartlaştırılmış kalıntıların normal P-P grafiği (Mdf. bit. aşınma)

Şekil 5.14'te ise standartlaştırılmış kalıntıların normal P-P grafiği görülmektedir. Grafikte saçılımın doğru üzerinde veya etrafında kümelenmiş olması kalıntıların normal dağıldığını göstermektedir.

Modelde kullanılan gerçek değerler (LOGTI) ile bunlara karşılık regresyon modelinin tahmin ettiği değerlerden oluşan saçılma grafiği Şekil 5.15'te görülmektedir. Grafikteki noktaların doğru üzerinde veya etrafında kümelenmesi modelin gücünü gösterir. Grafikte R^2 değeri 0,9229'dur. Şekil 5.16'da ise standartlaştırılmış kalıntıların dağılımı görülmektedir.



Şekil 5.15: Gerçek değerlere karşılık tahmin edilen değerler (Mdf. bit. aşınma)



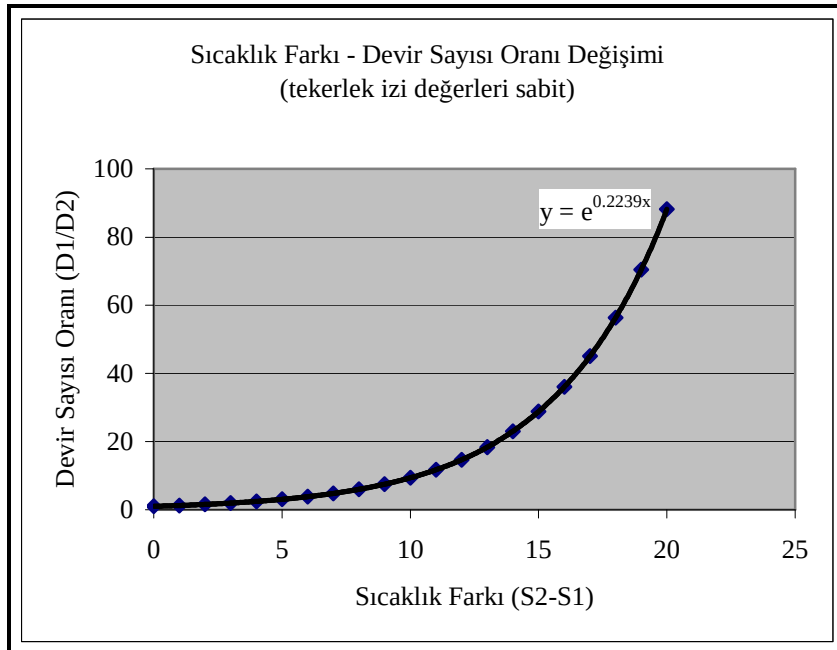
Şekil 5.16: Standartlaştırılmış kalıntıların dağılımı (Mdf. bit. aşınma)

5.1.5 Regresyon Modellerinin İrdelenmesi

Farklı sıcaklıklarda, aynı miktarda tekerlek izine neden olan devir sayıları aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Bu tablolar, modellerde, tekerlek izi değerlerinin sabit tutulması ve sıcaklıklara bağlı olarak devir sayılarının elde edilmesi ile oluşturulmuştur. Modellerde tekerlek izi değerleri sabit tutulduğunda, sıcaklık farkı ile devir sayısı oranının değişimi, aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Aşınma numunelerine ait değerler Tablo 5.25'te, grafik ise Şekil 5.17'de verilmiştir.

Tablo 5.25: Aynı miktarda tekerlek izine neden olan devir sayılarının sıcaklıkla değişimi (aşınma) (Model 5000 devrin üzerindeki değerleri kapsamaz)

Tİ (%)	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C
1	32	10	3	1.10	0.36
2	413	135	44	14	5
3	1855	606	198	65	21
4	5385	1758	574	187	61
5	12306	4016	1311	428	140
6	24176	7890	2575	840	274
7	42789	13965	4558	1488	485
8	70164	22900	7474	2439	796
9	108534	35423	11561	3773	1231
10	160339	52330	17079	5574	1819
11	228216	74483	24309	7934	2589
12	314995	102806	33553	10951	3574
13	423694	138282	45132	14730	4807
14	557512	181957	59386	19382	6326

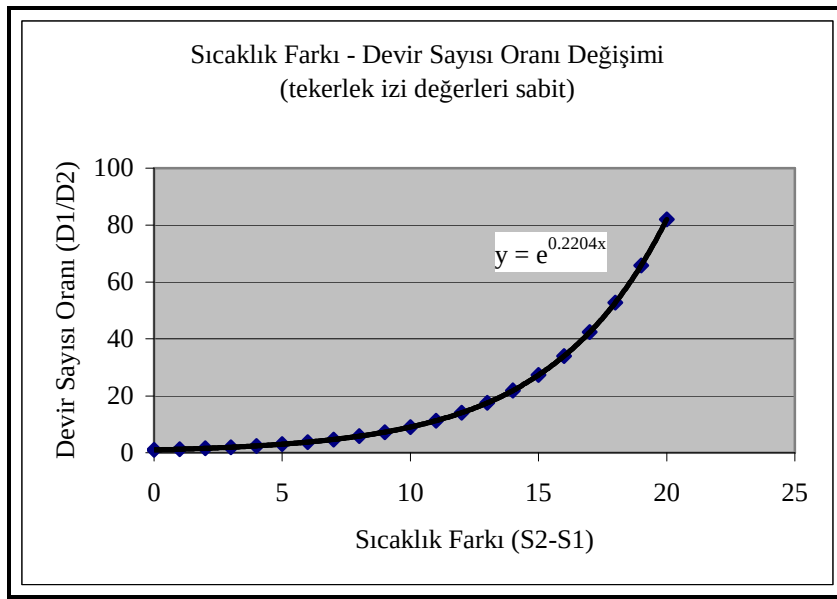


Şekil 5.17: Sıcaklık farkı ile devir sayısı oranının değişimi (aşınma)

Binder numunelerine ait değerler Tablo 5.26’da, grafik ise Şekil 5.18’de verilmiştir.

Tablo 5.26: Aynı miktarda tekerlek izine neden olan devir sayılarının sıcaklıkla değişimi (binder) (Model 5000 devrin üzerindeki değerleri kapsamaz)

Tİ (%)	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C
1	396	131	44	15	5
2	7106	2361	784	261	87
3	38488	12787	4249	1412	469
4	127615	42399	14087	4680	1555
5	323365	107437	35695	11860	3940
6	691218	229654	76301	25351	8423

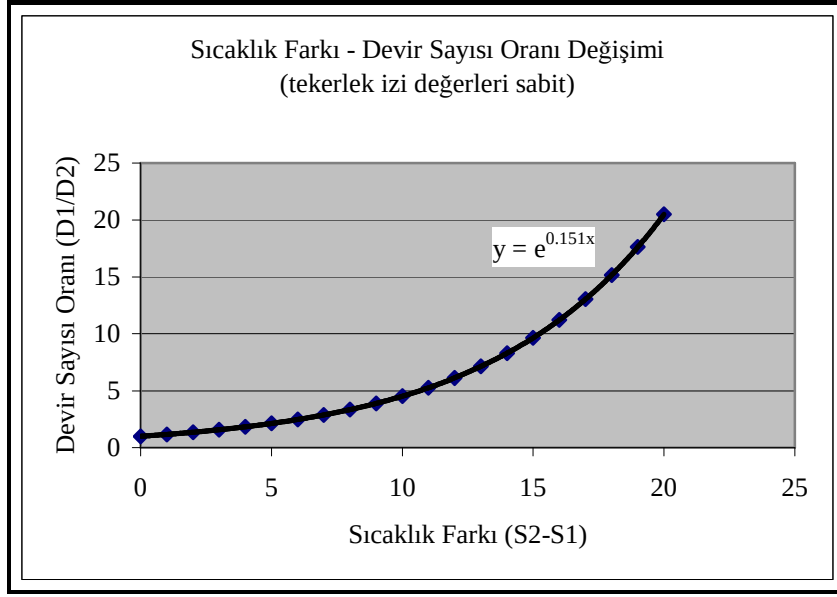


Şekil 5.18: Sıcaklık farkı ile devir sayısı oranının değişimi (binder)

TMA numunelerine ait değerler Tablo 5.27’de, grafik ise Şekil 5.19’da verilmiştir.

Tablo 5.27: Aynı miktarda tekerlek izine neden olan devir sayılarının sıcaklıkla değişimi (TMA) (Model 5000 devrin üzerindeki değerleri kapsamaz)

Tİ (%)	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C
1	82	39	18	9	4
2	818	384	181	85	40
3	3130	1471	691	325	153
4	8115	3813	1792	842	396
5	16990	7984	3752	1763	828
6	31073	14601	6861	3224	1515
7	51767	24326	11431	5372	2524
8	80553	37853	17788	8359	3928
9	118976	55908	26272	12346	5801
10	168646	79249	37240	17500	8223

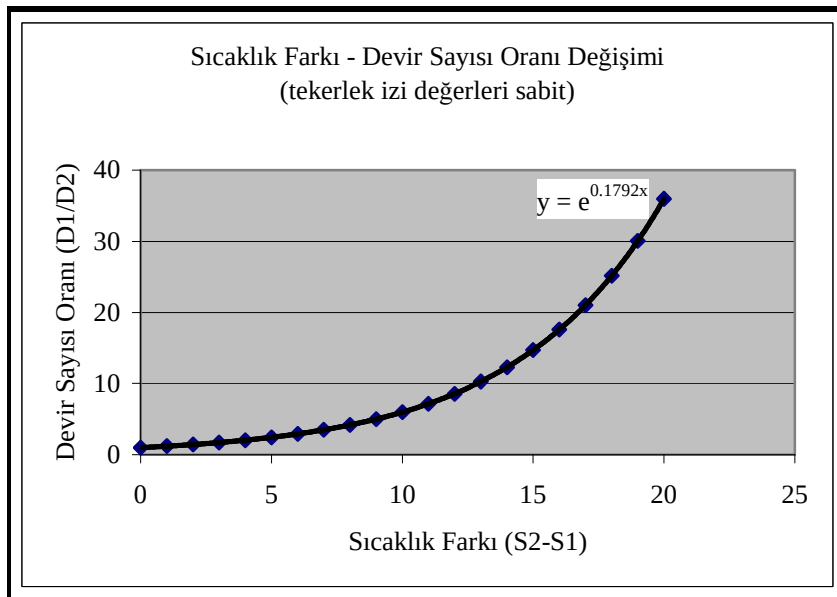


Şekil 5.19: Sıcaklık farkı ile devir sayısı oranının değişimi (TMA)

Modifiye Bitümlü aşınma numunelerine ait değerler Tablo 5.28’de, grafik ise Şekil 5.20’de verilmiştir.

Tablo 5.28: Aynı miktarda tekerlek izine neden olan devir sayılarının sıcaklıkla değişimi (Mdf. bit. aşınma) (Model 5000 devrin üzerindeki değerleri kapsamaz)

Tİ (%)	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C
1	873	356	146	59	24
2	11485	4689	1915	782	319
3	51851	21170	8644	3529	1441
4	151081	61685	25185	10283	4198
5	346315	141397	57731	23571	9624



Şekil 5.20: Sıcaklık farkı ile devir sayısı oranının değişimi (Mdf. bit. aşınma)

5.1.6 Regresyon İle Tahmin Edilen Tekerlek İzi Miktarlarının İrdelenmesi

Kurulan regresyon modellerine göre, sıcaklıklara ve devir sayılarına bağlı olarak değişen tekerlek izi değerleri Tablo 5.29'da görülmektedir. (10000, 20000 ve 30000 devirde deney yapılmamasına karşın, model tahmini olarak tabloda yer verilmiştir.)

Tablo 5.29: Regresyon modelleri ile tahmin edilen tekerlek izi miktarları (%)

Karışım Tipi	Sıcaklık (°C)	Devir Sayıları										
		100	200	300	500	1000	2000	3000	5000	10000	20000	30000
Aşınma	45	1.4	1.6	1.8	2.1	2.5	3.1	3.4	3.9	4.7	5.7	6.4
	50	1.8	2.2	2.5	2.8	3.4	4.1	4.6	5.3	6.4	7.7	8.6
	55	2.5	3.0	3.4	3.9	4.6	5.6	6.3	7.2	8.7	10.4	11.6
	60	3.4	4.1	4.5	5.2	6.3	7.6	8.5	9.7	11.7	14.1	15.8
	65	4.6	5.5	6.1	7.1	8.5	10.3	11.4	13.1	15.8	19.1	21.3
Binder	45	0.7	0.8	0.9	1.1	1.2	1.5	1.6	1.8	2.2	2.6	2.8
	50	0.9	1.1	1.2	1.4	1.6	1.9	2.1	2.4	2.8	3.3	3.7
	55	1.2	1.4	1.6	1.8	2.1	2.5	2.8	3.1	3.7	4.4	4.8
	60	1.6	1.9	2.1	2.3	2.8	3.3	3.6	4.1	4.8	5.7	6.2
	65	2.1	2.4	2.7	3.0	3.6	4.2	4.7	5.3	6.3	7.4	8.1
TMA	45	1.1	1.3	1.5	1.7	2.1	2.6	3.0	3.5	4.3	5.3	5.9
	50	1.3	1.6	1.9	2.2	2.7	3.3	3.7	4.3	5.4	6.6	7.5
	55	1.7	2.1	2.3	2.7	3.4	4.1	4.7	5.5	6.7	8.3	9.4
	60	2.1	2.6	2.9	3.4	4.2	5.2	5.9	6.8	8.4	10.4	11.8
	65	2.6	3.3	3.7	4.3	5.3	6.5	7.4	8.6	10.6	13.1	14.8
Mdf. Bit. Aşınma	45	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.9	2.3	2.6
	50	0.7	0.9	1.0	1.1	1.3	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	3.3
	55	0.9	1.1	1.2	1.4	1.7	2.0	2.3	2.6	3.1	3.8	4.2
	60	1.2	1.4	1.5	1.8	2.1	2.6	2.9	3.3	4.0	4.8	5.3
	65	1.5	1.8	2.0	2.3	2.7	3.3	3.7	4.2	5.1	6.1	6.8

Bu tablo kullanılarak, belirli bir tekerlek izi miktarının, farklı karışım tiplerinde hangi koşullarda oluştuğu bulunabilir. Örneğin, %4'lük tekerlek izi miktarı, 5000 devirde, aşınmada yaklaşık 45 °C'de, binderde yaklaşık 60 °C'de, TMA'da yaklaşık 50 °C'de ve modifiye bitümlü aşınmada yaklaşık 65 °C'de oluşmaktadır. Yine %4'lük tekerlek izi miktarı, 60 °C'de, aşınmada yaklaşık 200 devirde, binderde yaklaşık 5000 devirde, TMA'da yaklaşık 1000 devirde ve modifiye bitümlü aşınmada ise 10000 devirde oluşmaktadır.

Bu tablo, 60 °C'den farklı sıcaklıklarda da tekerlek izi deneyi yapma ve düşük sıcaklıktaki deney sonuçlarından, yüksek sıcaklıktaki tekerlek izi performansını tahmin edebilme kolaylığı sağlamaktadır. Aynı zamanda, yüksek devir sayılarındaki performansı, daha düşük devir sayılarında tahmin edebilme kolaylığı da sunmaktadır.

5.2 Kovaryans Analizi

Kovaryans analizi (ANCOVA), varyans analizinin (ANOVA) bir uzantısıdır. Varyans analizi, grup ortalamaları arasındaki farkları bulmak için kullanılır. Analizde, birkaç bağımsız (kategorik) değişkenin bir bağımlı (sürekli) değişken üzerindeki etkisi ortaya konulmaya çalışılır. Kovaryans analizinde ise, iki veya daha fazla sayıdaki grupta, bir bağımlı değişkenin ortalamalarının karşılaştırılmasında, bağımlı değişkeni etkileyen başka bir değişkenin etkisinin yok edilmesi söz konusudur (Kalaycı ve diğ. 2005).

Öncelikle, bağımlı değişkenin tekerlek izi (TI), bağımsız değişkenlerin ise devir sayısı (D) ve sıcaklık (S) olarak alındığı iki yönlü varyans analizi yapılmıştır. Bu analiz sonucunda (0,05 anlamlılık düzeyinde) 10 ayrı devir sayısının 6 farklı alt grupta, 5 ayrı sıcaklığın ise 3 farklı alt grupta toplandığı belirlenmiştir. Ancak bu çalışmada, devir sayısının etkisini ortadan kaldırarak yalnızca sıcaklığın etkisini incelemek amaçlanmıştır. Bu nedenle, kovaryans analizi yapılmıştır.

İlk olarak, bütün gruplar (aşınma, binder, TMA, mdf. bit. aşınma) birleştirilerek bir grup haline getirilmiş ve tek yönlü kovaryans analizi yapılmıştır. Analizde (regresyonda olduğu gibi) logaritmik dönüşüm uygulanmış değişkenler kullanılmıştır. Bağımlı değişken LOGTI, bağımsız değişken S ve kodeğişken LOGD olarak belirlenmiştir. Sıcaklıklar arasındaki karşılaştırmalar Tablo 5.30'da verilmiştir. Bu tabloda sıcaklıklar arasındaki ortalama farkları ve anlamlılık düzeyleri görülmektedir. 0,05 düzeyinde anlamlı olan farkların üzerinde * işareti mevcuttur.

Tablo incelendiğinde, 45 °C'nin ve 60 °C'nin diğer sıcaklıkların hepsinden farklı olduğu anlaşılmaktadır. 50 °C ile 55 °C arasında ve 55 °C ile hem 50 °C hem de 60 °C arasında 0,05 düzeyinde anlamlı bir fark bulunmamaktadır. Bu durumda birbirinden farklı 4 alt grup oluşmaktadır. Birinci alt grupta 45 °C, ikinci alt grupta 50 °C ve 55 °C, üçüncü alt grupta 55 °C ve 60 °C, dördüncü alt grupta ise 65 °C yer almaktadır. Sonuç olarak, ortalama farklarının 0,05 düzeyinde anlamlı olmadığı durumlarda, sıcaklıklar etkili olamamaktadır.

İkinci olarak, aşınma, binder, TMA ve modifiye bitümlü aşınma grupları, grup (G) değişkeni altında toplanarak iki yönlü kovaryans analizi yapılmıştır. Bu analizde, bağımlı değişken LOGTI, bağımsız değişkenler grup (G) ve sıcaklık (S), kodeğişken ise LOGD alınmıştır. Analiz sonucunda, bütün grupların ve sıcaklıkların tekerlek izi

ortalamaları yönünden, (her düzeyde) birbirlerinden farklı olduğu görülmüştür (Tablo 5.31, 5.32).

Tablo 5.30: Sıcaklık karşılaştırmaları (tek yönlü kovaryans analizi)

(I) S	(J) S	Ortalama Farkları (I-J)	Std. Hata	Anlamlılık	%95 Güven Aralığı (farklar için)	
					Alt Sınır	Üst Sınır
45,00	50,00	-,168*	,041	,001	-,285	-5,073E-02
	55,00	-,250*	,041	,000	-,368	-,133
	60,00	-,323*	,041	,000	-,440	-,206
	65,00	-,485*	,041	,000	-,602	-,367
50,00	45,00	,168*	,041	,001	5,073E-02	,285
	55,00	-8,244E-02	,041	,471	-,200	3,473E-02
	60,00	-,155*	,041	,002	-,272	-3,812E-02
	65,00	-,317*	,041	,000	-,434	-,200
55,00	45,00	,250*	,041	,000	,133	,368
	50,00	8,244E-02	,041	,471	-3,473E-02	,200
	60,00	-7,286E-02	,041	,790	-,190	4,431E-02
	65,00	-,234*	,041	,000	-,351	-,117
60,00	45,00	,323*	,041	,000	,206	,440
	50,00	,155*	,041	,002	3,812E-02	,272
	55,00	7,286E-02	,041	,790	-4,431E-02	,190
	65,00	-,161*	,041	,001	-,279	-4,427E-02
65,00	45,00	,485*	,041	,000	,367	,602
	50,00	,317*	,041	,000	,200	,434
	55,00	,234*	,041	,000	,117	,351
	60,00	,161*	,041	,001	4,427E-02	,279

* Ortalama farkları 0,05 düzeyinde anlamlıdır.

Tablo 5.31: Grup karşılaştırmaları (iki yönlü kovaryans analizi)

(I) G	(J) G	Ortalama Farkları (I-J)	Std. Hata	Anlamlılık	%95 Güven Aralığı (farklar için)	
					Alt Sınır	Üst Sınır
1,00	2,00	,329*	,013	,000	,294	,364
	3,00	,153*	,013	,000	,118	,188
	4,00	,442*	,013	,000	,406	,477
2,00	1,00	-,329*	,013	,000	-,364	-,294
	3,00	-,176*	,013	,000	-,211	-,141
	4,00	,113*	,013	,000	7,758E-02	,148
3,00	1,00	-,153*	,013	,000	-,188	-,118
	2,00	,176*	,013	,000	,141	,211
	4,00	,289*	,013	,000	,254	,324
4,00	1,00	-,442*	,013	,000	-,477	-,406
	2,00	-,113*	,013	,000	-,148	-7,758E-02
	3,00	-,289*	,013	,000	-,324	-,254

* Ortalama farkları 0,05 düzeyinde anlamlıdır.

Tablo 5.32: Sıcaklık karşılaştırmaları (iki yönlü kovaryans analizi)

(I) S	(J) S	Ortalama Farkları (I-J)	Std. Hata	Anlamlılık	%95 Güven Aralığı (farklar için)	
					Alt Sınır	Üst Sınır
45,00	50,00	-,168*	,015	,000	-,210	-,126
	55,00	-,250*	,015	,000	-,292	-,209
	60,00	-,323*	,015	,000	-,365	-,281
	65,00	-,485*	,015	,000	-,526	-,443
50,00	45,00	,168*	,015	,000	,126	,210
	55,00	-8,244E-02*	,015	,000	-,124	-4,063E-02
	60,00	-,155*	,015	,000	-,197	-,113
	65,00	-,317*	,015	,000	-,359	-,275
55,00	45,00	,250*	,015	,000	,209	,292
	50,00	8,244E-02*	,015	,000	4,063E-02	,124
	60,00	-7,286E-02*	,015	,000	-,115	-3,105E-02
	65,00	-,234*	,015	,000	-,276	-,192
60,00	45,00	,323*	,015	,000	,281	,365
	50,00	,155*	,015	,000	,113	,197
	55,00	7,286E-02*	,015	,000	3,105E-02	,115
	65,00	-,161*	,015	,000	-,203	-,120
65,00	45,00	,485*	,015	,000	,443	,526
	50,00	,317*	,015	,000	,275	,359
	55,00	,234*	,015	,000	,192	,276
	60,00	,161*	,015	,000	,120	,203

* Ortalama farkları 0,05 düzeyinde anlamlıdır.

Tablo 5.31 ve 5.32'deki sonuç, tekerlek izi ortalamaları yönünden, her bir gruptaki sıcaklıklar arasında ve her bir sıcaklıktaki gruplar arasında, tamamen bir farklılık olduğunu göstermez. Bu durumda bütün gruplar ve sıcaklıklar için ayrı ayrı inceleme yapmak gerekmektedir.

Her bir grup için yapılan kovaryans analizi sonucunda Tablo 5.33'teki durum oluşmuştur.

Tablo 5.33: Kovaryans analizi sonucunda oluşan alt gruplar (sıcaklığa göre)

Gruplar	Alt Gruplar			
	1	2	3	4
Aşınma	45 °C	50 °C - 55 °C	60 °C	65 °C
Binder	45 °C	50 °C	55 °C – 60 °C	60 °C – 65 °C
TMA	45 °C	50 °C – 55 °C – 60 °C	65 °C	--
Mdf. Bit. Aşınma	45 °C	50 °C	55 °C – 60 °C	65 °C

Tablo 5.33'te görüldüğü üzere, aşınma, binder ve modifiye bitümlü aşınma gruplarında 4 alt grup, TMA'da ise 3 alt grup oluşmaktadır. Aynı alt gruba dahil olan

sıcaklıklar arasında 0,05 düzeyinde önemli bir fark bulunmamaktadır. 45 °C, bütün gruplarda ayrı bir alt gruptadır. 65 °C'nin de ayrı bir alt grup oluşturduğu söylenebilir ancak, yalnızca binderde 60 °C ile aynı alt grupta yer almaktadır. TMA'da 3 alt grubun oluşması ve 50 °C, 55 °C, 60 °C ler arasında 0,05 düzeyinde önemli bir farkın bulunmaması, bu grubun sıcaklığa daha az duyarlı olduğunu göstermektedir.

Her bir sıcaklık için yapılan kovaryans analizi sonucunda ise, Tablo 5.34'teki durum oluşmuştur.

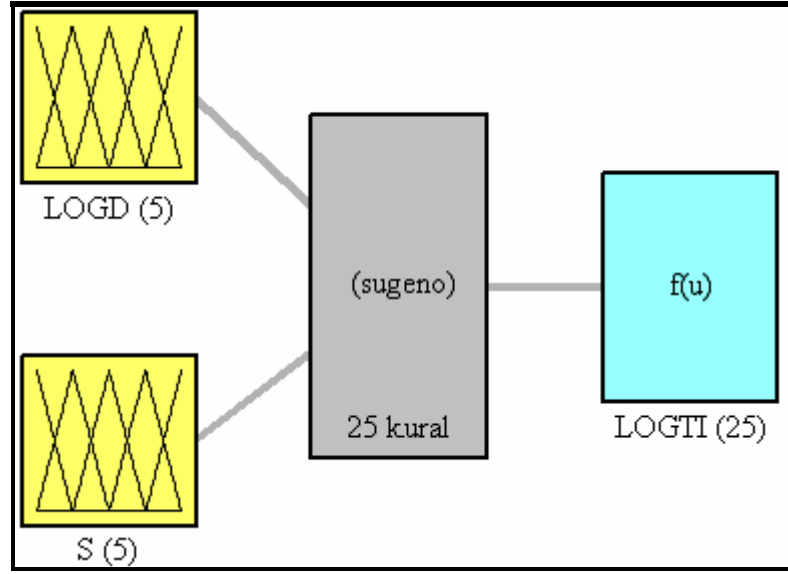
Tablo 5.34: Kovaryans analizi sonucunda oluşan alt gruplar (gruplara göre)

Sıcaklıklar	Alt Gruplar			
	1	2	3	4
65 °C	Aşınma	TMA	Binder – Mdf. bit. aşınma	--
60 °C	Aşınma	TMA	Binder	Mdf. bit. aşınma
55 °C	Aşınma	TMA	Binder	Mdf. bit. aşınma
50 °C	Aşınma	TMA	Binder	Mdf. bit. aşınma
45 °C	Aşınma	TMA	Binder – Mdf. bit. aşınma	--

Tablo 5.34'te görüldüğü üzere, 50 °C, 55 °C ve 60 °C'lerde 4 alt grup, 45 °C ve 65 °C lerde 3 alt grup oluşmaktadır. Grupların birbirlerinden tamamen ayrıldığı durumlarda (50 °C, 55 °C ve 60 °C), sıcaklıkların karışım tipleri üzerinde, 0,05 düzeyinde önemli bir fark oluşturacak etkiye sahip olduğu görülmektedir. Sonuç olarak sıcaklıkların, tekerlek izi yönünden, karışımlarda fark oluşturacak etkiye sahip oldukları (45 °C ve 65 °C'deki üçüncü alt grup hariç) belirlenmiştir.

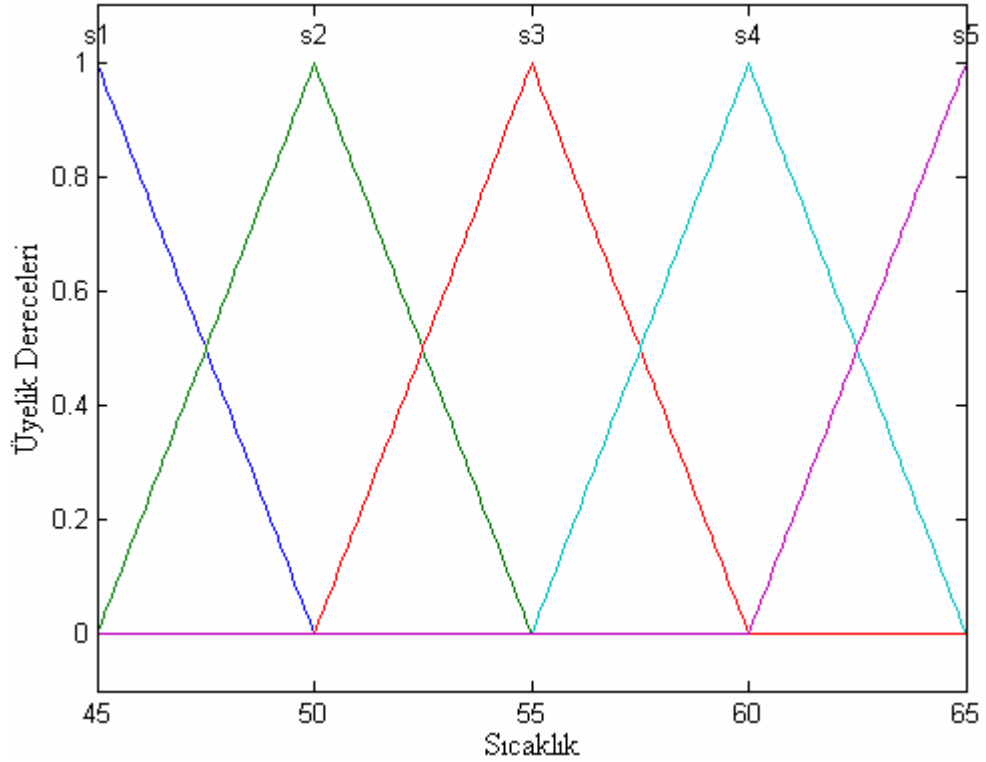
5.3 Bulanık Mantık ile Modelleme

Bulanık mantık modellemesi, Matlab paket programı kullanılarak yapılmıştır. Regresyon analizinde olduğu gibi, bulanık mantık modellemesinde de logaritmik dönüşüm uygulanmış değişkenler kullanılmıştır. Kurulan bulanık model yapısında, 2 girdi değişkenine karşılık 1 çıktı değişkeni bulunmaktadır. Girdi değişkenleri, devir sayısı (LOGD) ve sıcaklık (S), çıktı değişkeni ise tekerlek izi (LOGTI)'dir. Modelde, Sugeno türü bulanık çıkarım sistemi kullanılmıştır (Şekil 5.21). Bu sistemin eğitilmesi ANFIS (Adaptif (uyarlanır) ağ yapısına dayalı bulanık çıkarım sistemi) ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.21: Bulanık çıkarım sisteminin modeli

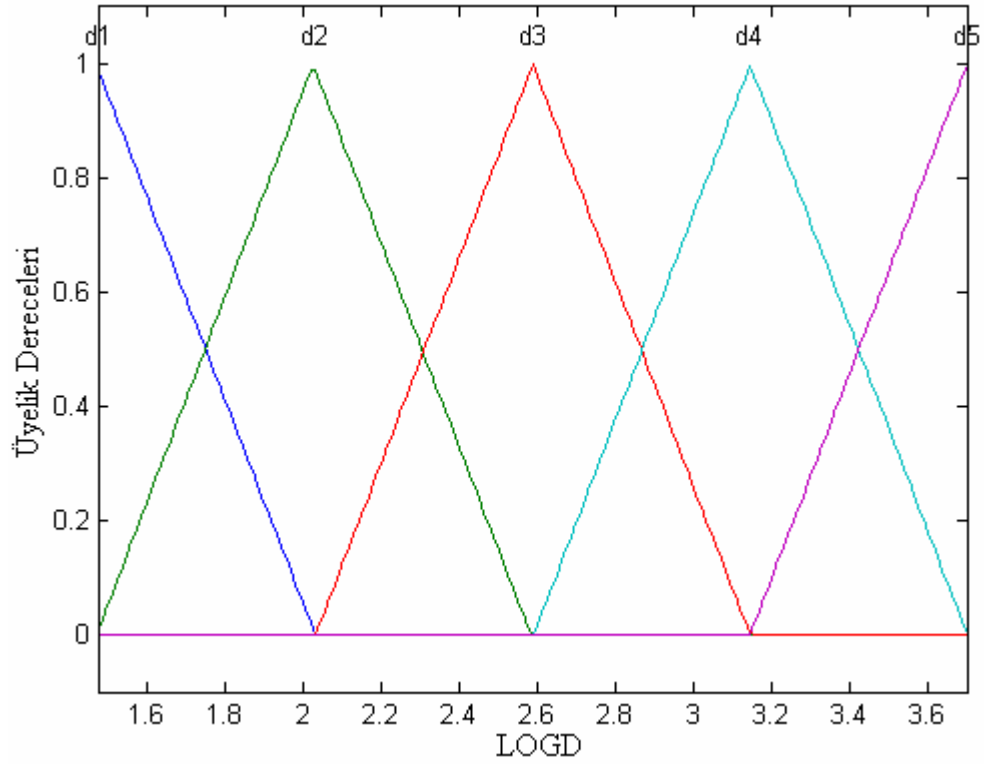
Her bir karışım tipi için, toplam 50 adet veri grubundan, 30 ‘u eğitimde, 10 ‘u kontrolde, 10 ‘u da testte kullanılması amacıyla seçilmiştir.Yapılan incelemeler sonucunda, girdi değişkenlerinde 5 ‘er adet üçgen üyelik fonksiyonunun kullanılmasının uygun olduğu anlaşılmıştır. Kurulan modellerdeki sıcaklığa ait üyelik fonksiyonları, her bir karışım türü için tamamen aynıdır (Şekil 5.22). Bu nedenle, her bir karışım için kurulan modelde tekrarlanmayacaktır.



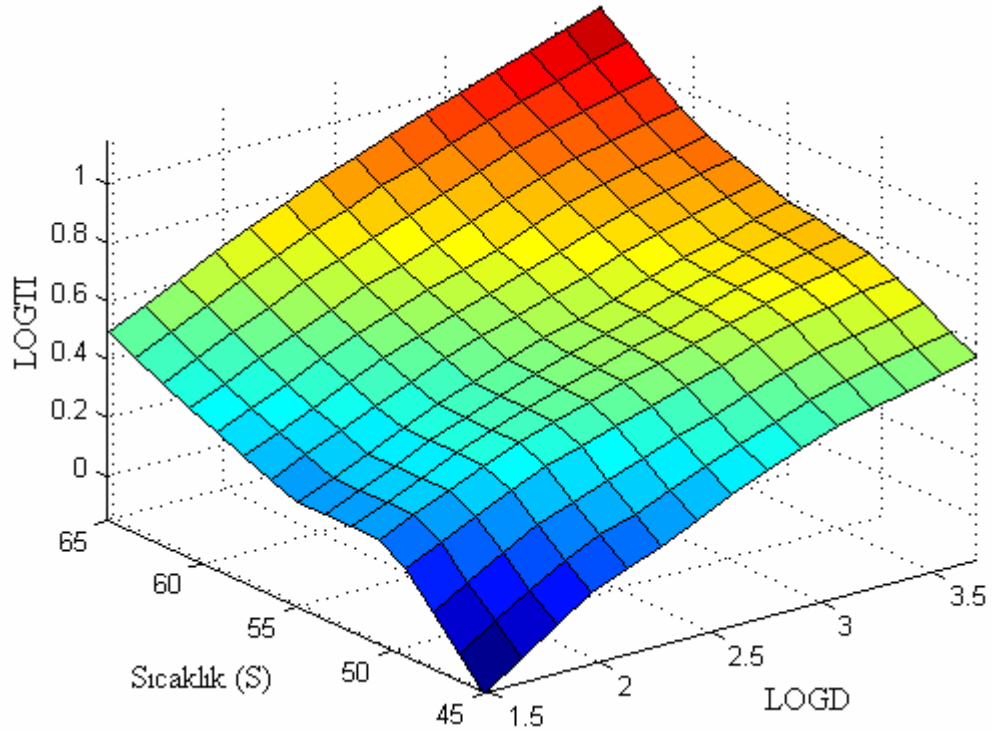
Şekil 5.22: Sıcaklığın üyelik fonksiyonları (Bütün karışım tipleri için)

5.3.1 Aşınma Numunelerine Ait Bulanık Mantık Modeli

Aşınma numunelerine ait bulanık mantık modelindeki girdi değişkenlerinden sıcaklığın üyelik fonksiyonları Şekil 5.22 'de, devir sayısı (LOGD) 'nın üyelik fonksiyonları Şekil 5.23 'te, model yüzeyi ise Şekil 5.24 'te görülmektedir.



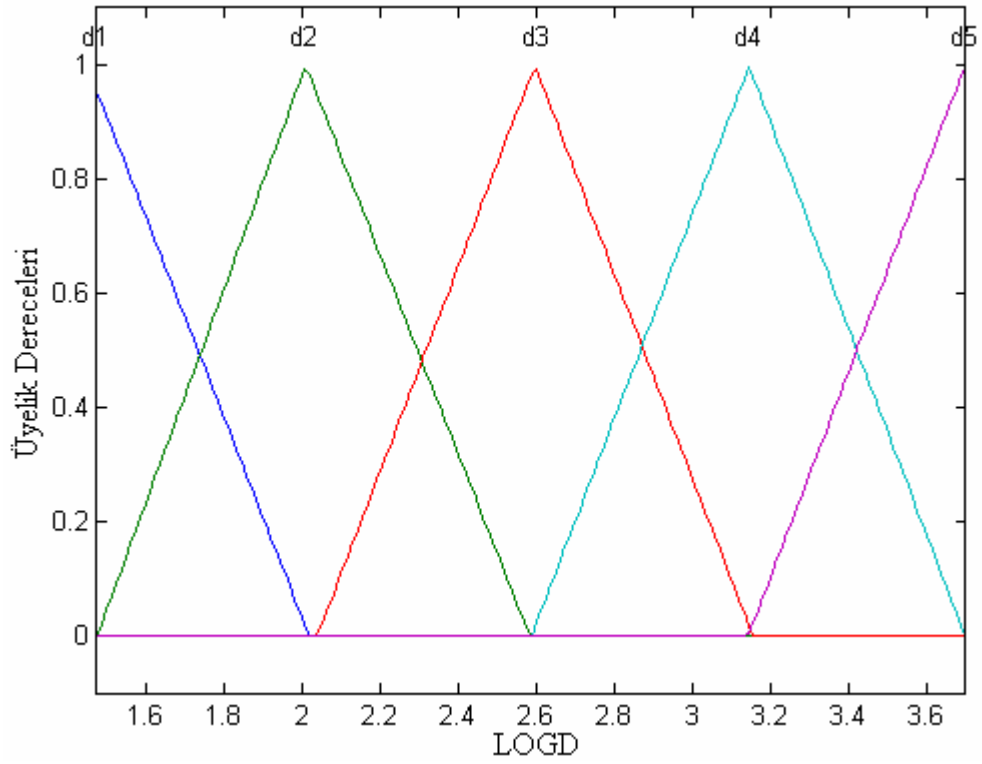
Şekil 5.23: Devir sayısı (LOGD) 'nın üyelik fonksiyonları (aşınma)



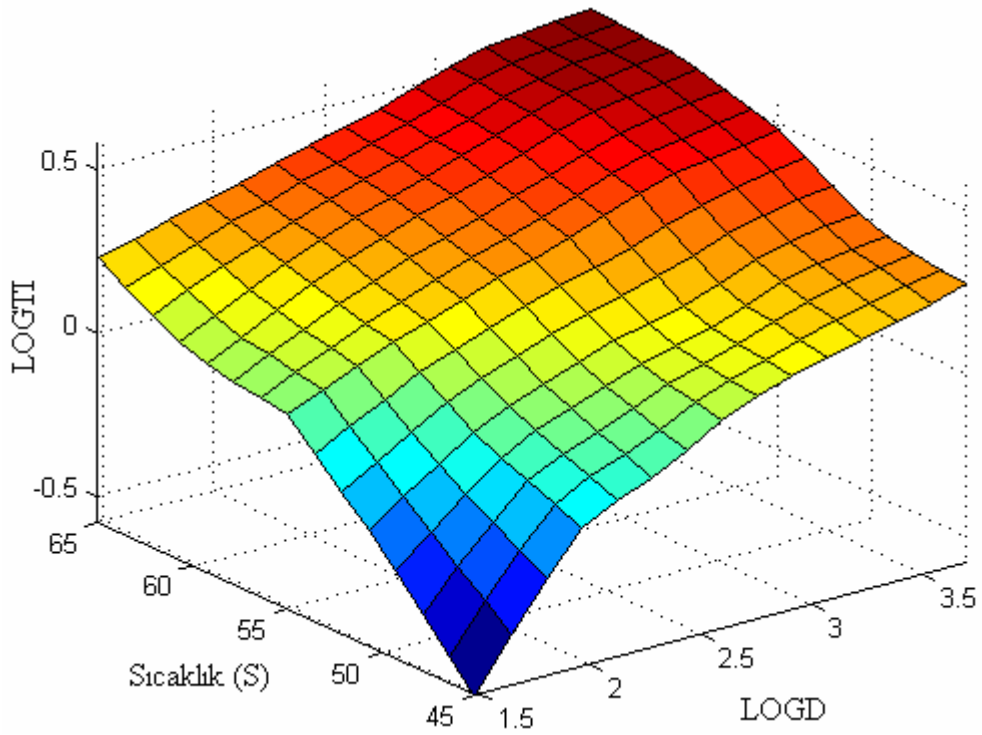
Şekil 5.24: Bulanık mantık model yüzeyi (aşınma)

5.3.2 Binder Numunelerine Ait Bulanık Mantık Modeli

Binder numunelerine ait bulanık mantık modelindeki girdi değişkenlerinden sıcaklığın üyelik fonksiyonları Şekil 5.22 'de, devir sayısı (LOGD) 'nın üyelik fonksiyonları Şekil 5.25 'te, model yüzeyi ise Şekil 5.26 'da görülmektedir.



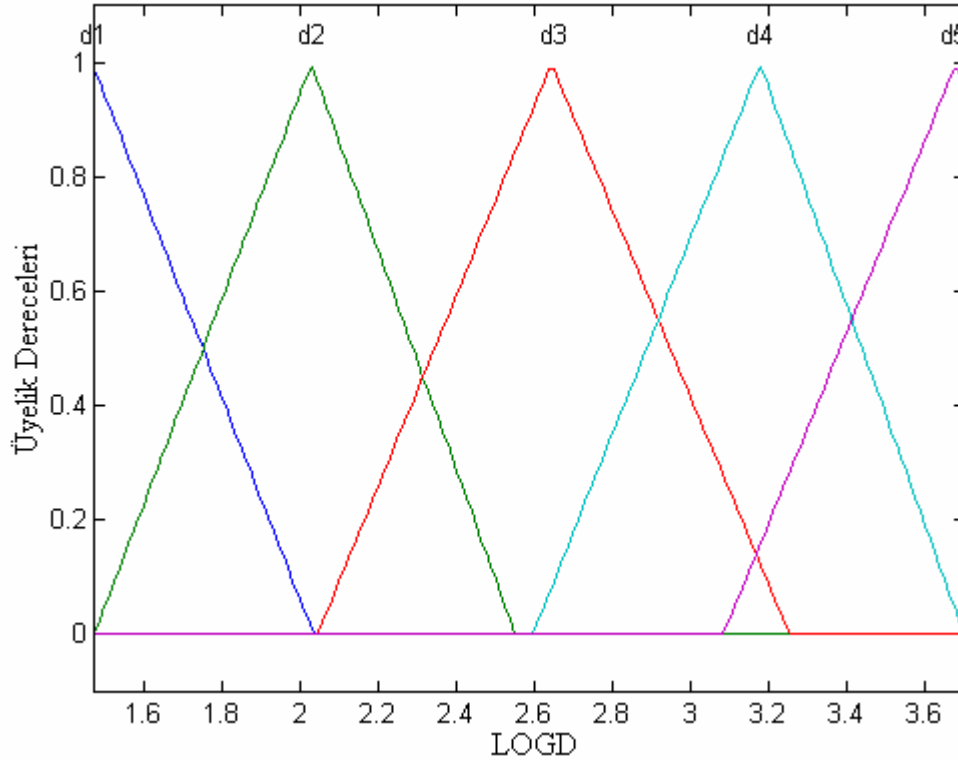
Şekil 5.25: Devir sayısı (LOGD) 'nın üyelik fonksiyonları (binder)



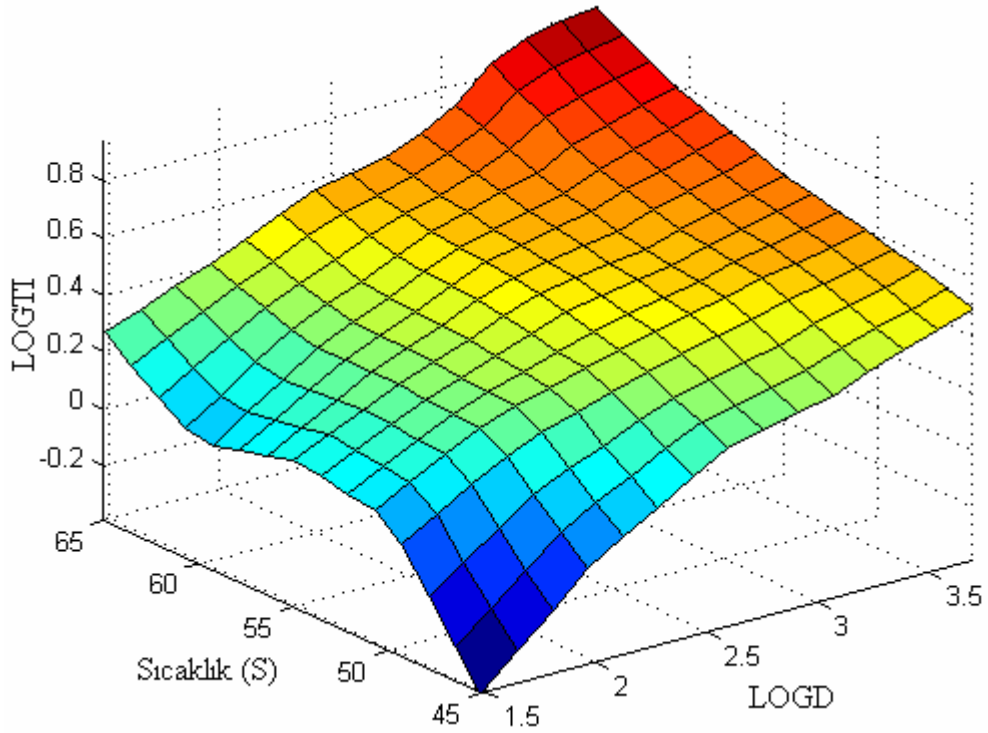
Şekil 5.26: Bulanık mantık model yüzeyi (binder)

5.3.3 TMA Numunelerine Ait Bulanık Mantık Modeli

TMA numunelerine ait bulanık mantık modelindeki girdi değişkenlerinden sıcaklığın üyelik fonksiyonları Şekil 5.22 'de, devir sayısı (LOGD) 'nın üyelik fonksiyonları Şekil 5.27 'de, model yüzeyi ise Şekil 5.28 'de görülmektedir.



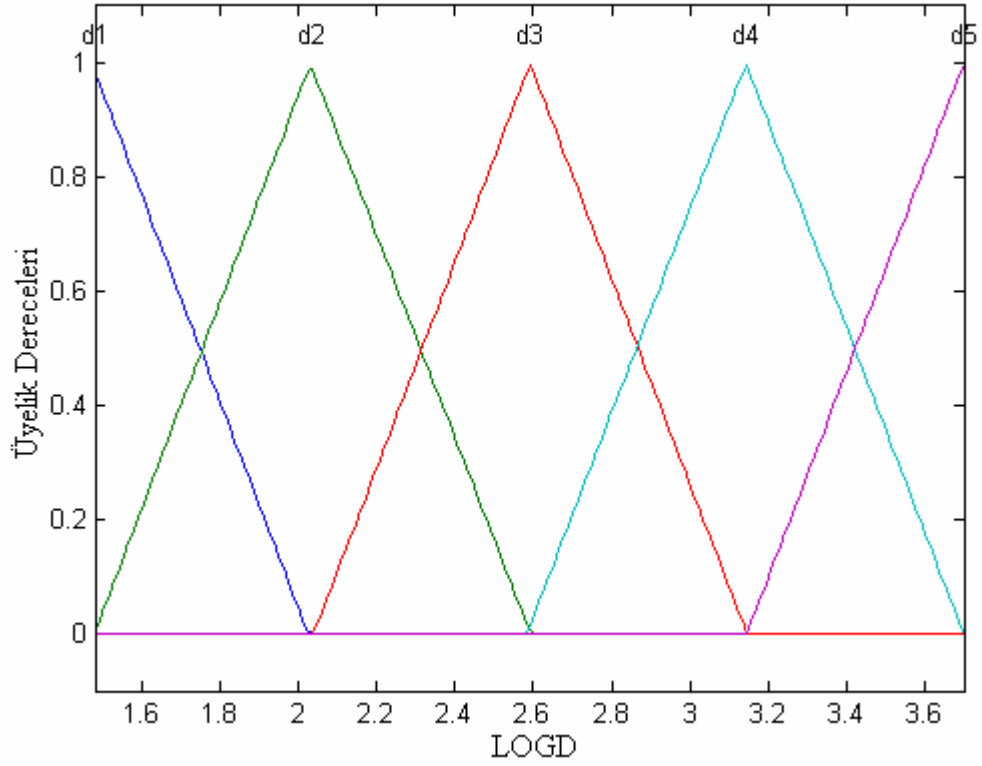
Şekil 5.27: Devir sayısı (LOGD) 'nın üyelik fonksiyonları (TMA)



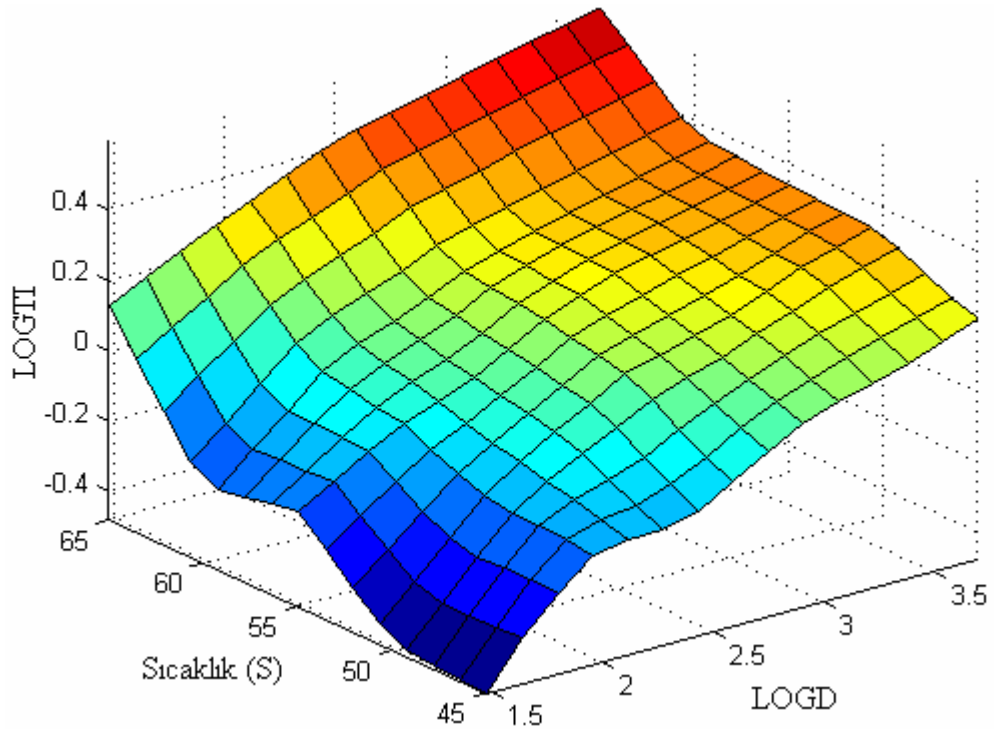
Şekil 5.28: Bulanık mantık model yüzeyi (TMA)

5.3.4 Modifiye Bitümlü Aşınma Numunelerine Ait Bulanık Mantık Modeli

Modifiye bitümlü aşınma numunelerine ait bulanık mantık modelindeki girdi değişkenlerinden sıcaklığın üyelik fonksiyonları Şekil 5.22 'de, devir sayısı (LOGD) 'nın üyelik fonksiyonları Şekil 5.29 'da, model yüzeyi Şekil 5.30 'da görülmektedir.



Şekil 5.29: Devir sayısı (LOGD) 'nın üyelik fonksiyonları (Mdf. bit. aşınma)



Şekil 5.30: Bulanık mantık model yüzeyi (Mdf. bit. aşınma)

5.4 Regresyon ve Bulanık Mantık Modellerinin Karşılaştırılması

Kurulan regresyon ve bulanık mantık modellerinin karşılaştırmasında, bulanık mantık modellemesinde test için ayrılan veriler kullanılmıştır. Bu veriler esas alınarak, deneyler sonucunda oluşan gerçek tekerlek izi değerleri ile modellerden elde edilen tekerlek izi değerleri karşılaştırılmıştır (Tablo 5.35, 5.36, 5.37, 5.38)

Tablo 5.35: Deney sonuçları ile model sonuçlarının karşılaştırılması (aşınma)

Aşınma Test Verileri			Model Sonuçları	
Deney Koşulları		Deney Sonucu	Bulanık Mantık	Regresyon
LOGD	S	LOGTI	LOGTI	LOGTI
1.477121	65	0.482005	0.495530	0.518387
1.698970	60	0.431390	0.411380	0.446914
2.000000	45	0.120988	0.117630	0.134188
2.301030	50	0.439279	0.451270	0.346680
2.477121	55	0.514797	0.515440	0.525477
2.698970	65	0.901583	0.895530	0.847918
3.000000	45	0.407333	0.424480	0.403888
3.301030	50	0.662723	0.668810	0.616380
3.477121	55	0.743821	0.739110	0.795176
3.698970	60	0.917340	0.898830	0.986313
Korelasyon:			0.998776	0.980647
RMSE:			0.012130	0.047814

Tablo 5.36: Deney sonuçları ile model sonuçlarının karşılaştırılması (binder)

Binder Test Verileri			Model Sonuçları	
Deney Koşulları		Deney Sonucu	Bulanık Mantık	Regresyon
LOGD	S	LOGTI	LOGTI	LOGTI
1.477121	65	0.222364	0.231160	0.190212
1.698970	60	0.152480	0.142310	0.128647
2.000000	45	-0.133396	-0.121530	-0.143581
2.301030	50	0.060270	0.067808	0.043545
2.477121	55	0.275783	0.268770	0.200669
2.698970	65	0.445963	0.446870	0.483620
3.000000	45	0.147009	0.155500	0.096553
3.301030	50	0.275684	0.276270	0.283679
3.477121	55	0.467951	0.458300	0.440803
3.698970	60	0.580069	0.568000	0.608915
Korelasyon:			0.999510	0.990047
RMSE:			0.008600	0.036365

Tablo 5.37: Deney sonuçları ile model sonuçlarının karşılaştırılması (TMA)

TMA Test Verileri			Model Sonuçları	
Deney Koşulları		Deney Sonucu	Bulanık Mantık	Regresyon
LOGD	S	LOGTI	LOGTI	LOGTI
1.477121	65	0.068754	0.269650	0.264036
1.698970	60	0.168951	0.154140	0.232065
2.000000	45	-0.027794	-0.020913	0.025931
2.301030	50	0.338023	0.340930	0.216009
2.477121	55	0.447559	0.451580	0.368309
2.698970	65	0.625335	0.609220	0.633498
3.000000	45	0.336820	0.312760	0.328310
3.301030	50	0.532067	0.530710	0.518389
3.477121	55	0.612802	0.615220	0.670689
3.698970	60	0.773609	0.774130	0.836824
			Korelasyon:	0.968651
			RMSE:	0.085934

Tablo 5.38: Deney sonuçları ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Mdf. bit. aş.)

Mdf. Bit. Aşınma Test Verileri			Model Sonuçları	
Deney Koşulları		Deney Sonucu	Bulanık Mantık	Regresyon
LOGD	S	LOGTI	LOGTI	LOGTI
1.477121	65	0.043011	0.130950	0.024336
1.698970	60	-0.062526	-0.136790	-0.020619
2.000000	45	-0.208945	-0.153450	-0.253538
2.301030	50	-0.012448	-0.013190	-0.067932
2.477121	55	0.127632	0.104540	0.084067
2.698970	65	0.452253	0.455800	0.353006
3.000000	45	0.064753	0.064968	0.015456
3.301030	50	0.239544	0.239980	0.201062
3.477121	55	0.309055	0.303730	0.353061
3.698970	60	0.356026	0.361370	0.517368
			Korelasyon:	0.978108
			RMSE:	0.071273

Yukarıdaki tablolar incelendiğinde, deney sonuçları ile model sonuçlarının birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Korelasyon katsayıları oldukça büyüktür. Bu durum, deney sonuçlarıyla model sonuçlarının yüksek bir ilişkiye sahip olduğunu, dolayısıyla modellerin tahmin gücünün yüksek olduğunu gösterir.

Modeller arasında bir karşılaştırma yapıldığında ise, bulanık mantık modellerinin regresyon modellerine göre, daha yüksek bir tahmin gücüne sahip olduğu belirlenmiştir. Bulanık mantık modellerinin sonuçları ile deney sonuçları arasındaki

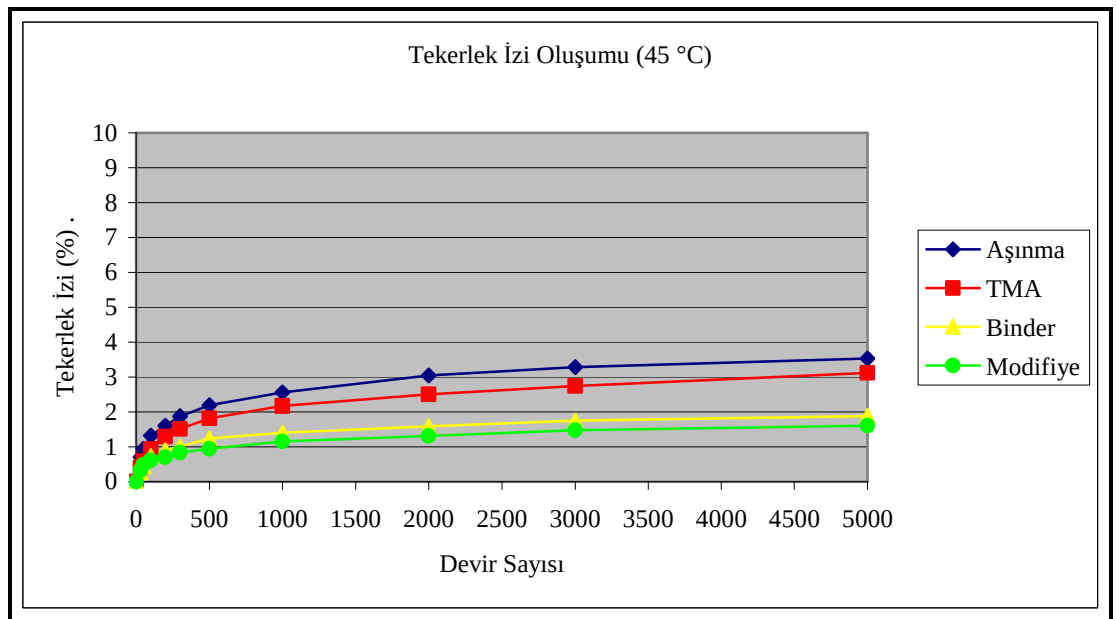
korelasyon katsayıları daha yüksektir. Diğer bir karşılaştırma ölçütü de RMSE (hataların karelerinin ortalamasının karekökü) değerleridir. Bu değerlerin küçük olması, tahminlerde daha az hata yapıldığını göstermektedir. Tablolarda, bulanık mantık modellerine ait RMSE değerleri daha küçüktür. Dolayısıyla bulanık mantık modellerinin tahminlerinde daha az hata yapılmaktadır.

6. ARAZİ VE LABORATUAR ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, çalışmada seçilen bitümlü sıcak karışım tiplerinin tekerlek izi oluşma potansiyellerinin karşılaştırılması, arazideki ve laboratuvardaki tekerlek izi oluşma uyumunun değerlendirilmesi, laboratuvar sonuçlarına göre kaplama performansının (ömrünün) tahmini ve laboratuvardaki tekerlek izi ile statik ve dinamik sünme uyumunun değerlendirilmesi yapılacaktır.

6.1 Karışım Tiplerinin Tekerlek İzi Oluşma Potansiyellerinin Karşılaştırılması

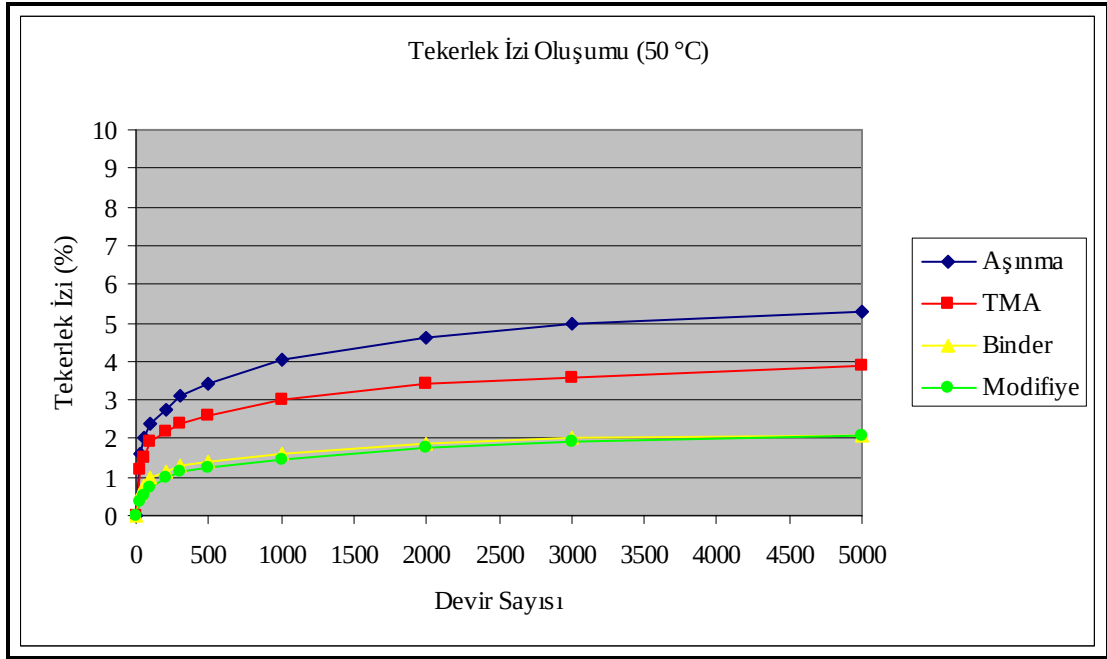
Bu tez çalışmasında, seçilen bitümlü sıcak karışım tiplerinin (aşınma, binder, TMA ve modifiye bitümlü aşınma) laboratuvarında incelenen tekerlek izi oluşma potansiyelleri, sıcaklıklar esas alınarak karşılaştırılmıştır. Karışımların farklı sıcaklıklardaki tekerlek izi performansları aşağıdaki şekillerde (Şekil 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10) görülmektedir. 45 °C ‘de, en fazla tekerlek izi aşınma numunelerinde, en az ise modifiye bitümlü aşınma numunelerinde görülmüştür. Tekerlek izi miktarı yönünden “Aşınma – TMA – Binder – Modifiye” sıralaması, hemen hemen bütün sıcaklıklar için geçerlidir.



Şekil 6.1: Karışımların 45 °C ‘deki tekerlek izi performansları



Şekil 6.2: Tekerlek izi deneylerinden sonra numunelerden alınan kesitler (45 °C)



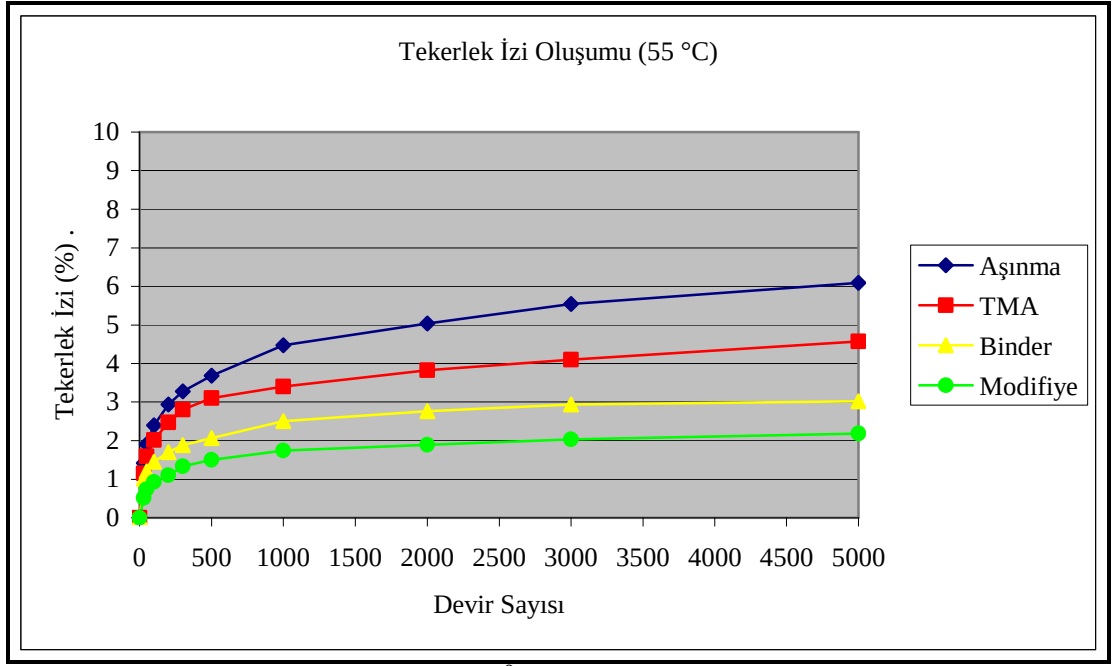
Şekil 6.3: Karışımların 50 °C 'deki tekerlek izi performansları



* 10 000 devir uygulanmıştır.

Şekil 6.4: Tekerlek izi deneylerinden sonra numunelerden alınan kesitler (50 °C)

45 ve 50 °C 'lerde, binder ile modifiye bitümlü aşınma numunelerinin tekerlek izi performansları birbirlerine çok yakındır. 55 ve 60 °C 'lerde, binder ve modifiye bitümlü aşınma numuneleri arasındaki fark artmıştır. Sıcaklıklar arttıkça, doğal olarak tekerlek izi miktarları artmakla birlikte, modifikasyonun olumlu etkisi de görülmektedir. Bu sıcaklıklarda, modifiye bitümlü aşınma numunelerinde daha az tekerlek izi oluşmuştur.

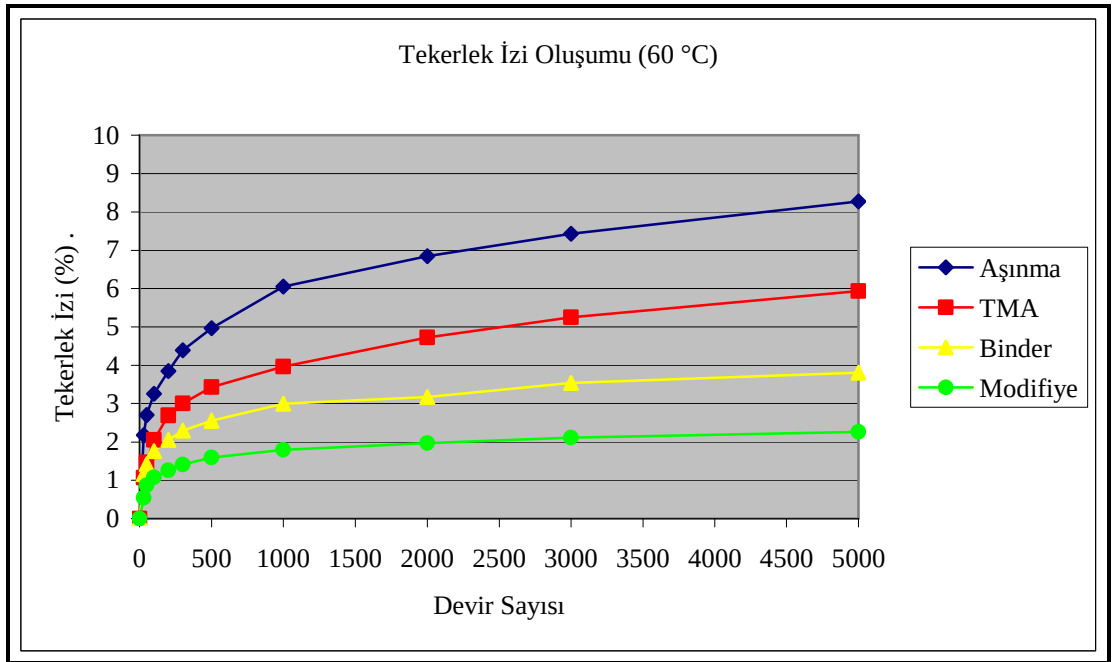


Şekil 6.5: Karışımların 55 °C 'deki tekerlek izi performansları



* 10 000 devir uygulanmıştır.

Şekil 6.6: Tekerlek izi deneylerinden sonra numunelerden alınan kesitler (55 °C)

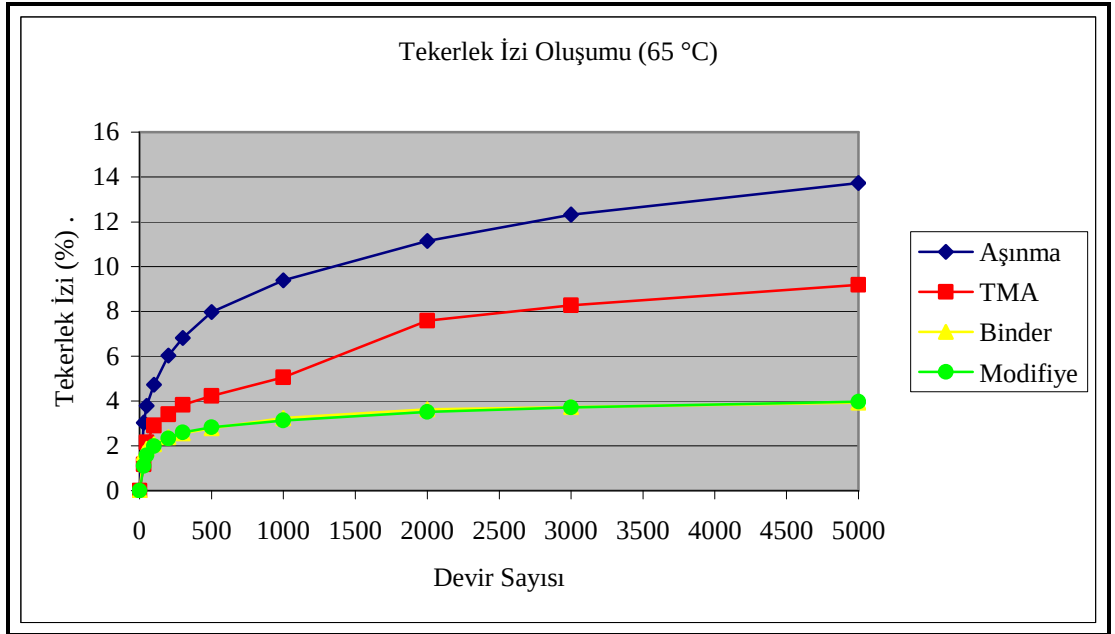


Şekil 6.7: Karışımların 60 °C 'deki tekerlek izi performansları



Şekil 6.8: Tekerlek izi deneylerinden sonra numunelerden alınan kesitler (60 °C)

65 °C ‘de ise binder ve modifiye bitümlü aşınma numuneleri tekrar aynı performansı göstermişlerdir . Bunun nedeni, yüksek sıcaklık sebebiyle modifikasyonun ve dolayısıyla bitümlü bağlayıcının etkisinin azalması ve tekerlek izine dayanımda agrega tane boyutu büyüklüğünün daha etkin hale gelmesi olarak düşünülmüştür. Nitekim binderin nominal maksimum agrega tane boyutu (19 mm) daha büyüktür.

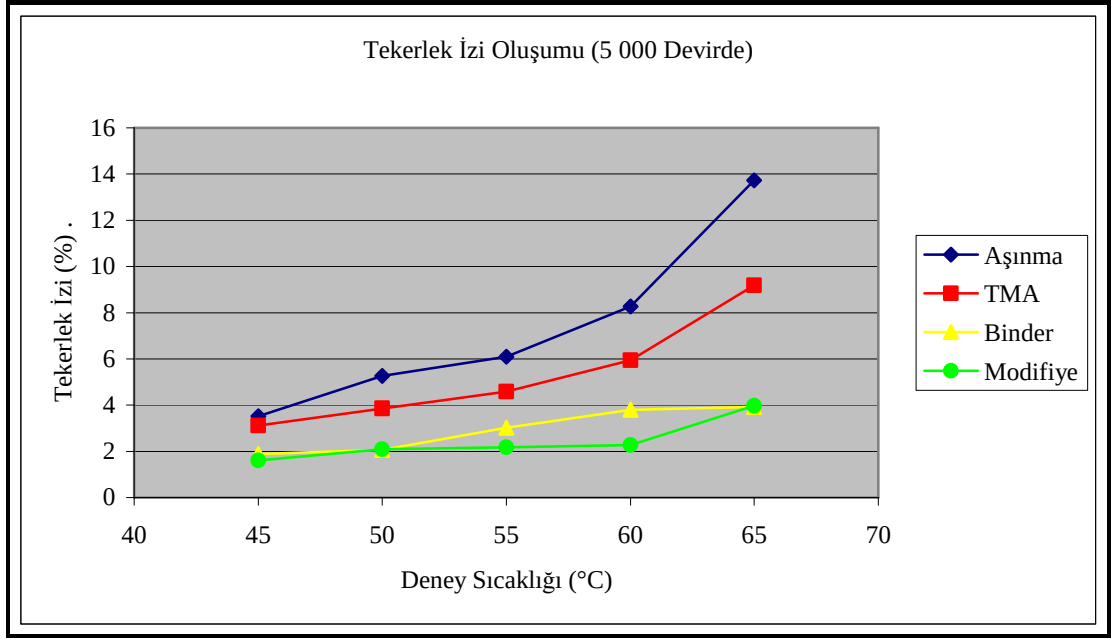


Şekil 6.9: Karışımların 65 °C ‘deki tekerlek izi performansları



Şekil 6.10: Tekerlek izi deneylerinden sonra numunelerden alınan kesitler (65 °C)

Sıcaklıklar arttıkça, karışımların tekerlek izi miktarları arasındaki farklar da açılmaktadır. Karışımların sıcaklığa bağlı tekerlek izi performansları Şekil 6.11 ‘de görülmektedir. Genel olarak, sıcaklık ile tekerlek izi miktarı arasında üssel bir ilişki olduğu sezilmektedir. (Bu ilişkiden, regresyon modellemesi kısmında da söz edilmişti.)



Şekil 6.11: Karışımların sıcaklığa bağlı tekerlek izi performansları (5000 devirde)

6.2 Arazideki Ve Laboratuvardaki Tekerlek İzi Oluşma Uyumunun Değerlendirilmesi

Bu bölümde, laboratuvarında farklı sıcaklıklarda uygulanan tekerlek izi deneylerinden elde edilen sonuçlarla, arazide yapılan tekerlek izi ölçümleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada ölçüt olarak tekerlek izi oluşum eğimi esas alınmıştır. Tekerlek izi oluşum eğimi, logaritmik ölçekteki devir sayısına karşılık oluşan tekerlek izi miktarını gösteren doğrunun eğimidir. Her bir karışım, farklı sıcaklıklar için ayrı ayrı tekrar modellenmiştir. Modelin genel ifadesi aşağıda görülmektedir:

$$TI = a * LOGD \quad (D > 1) \quad (6.1)$$

Burada;

TI : tekerlek izi miktarı (%)

a : tekerlek izi oluşum eğimi

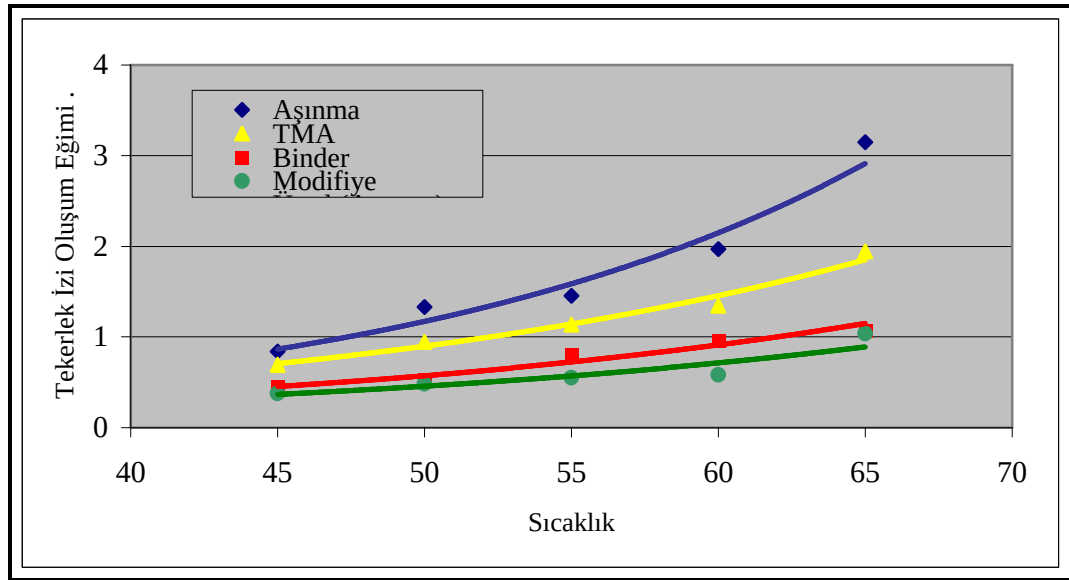
D : devir sayısı

Arazideki tekerlek izi oluşum eğimi ise, logaritmik ölçekteki standart eşdeğer dingil tekrar sayısına karşılık oluşan tekerlek izi miktarını gösteren doğrunun eğimi olarak alınmıştır. Arazideki eğim ile deneylerden elde edilen eğimlerin karşılaştırılmasının amacı, arazideki sonuçlara en yakın eğimi veren deney sıcaklığının belirlenmesidir. Bir başka ifadeyle amaç, arazideki koşulları en iyi yansıtan deney sıcaklığını bulmaktır.

Yapılan modellemeler sonucunda, her bir karışım ve sıcaklık için tekerlek izi oluşum eğimleri Tablo 6.1 'de, grafiği ise Şekil 6.12 'de görülmektedir.

Tablo 6.1: Karışımların sıcaklıklara göre tekerlek izi oluşum eğimleri (a)

Sıcaklık	Karışım Tipleri			
	Aşınma	Binder	TMA	Mdf.Bit.Aşınma
65 °C	3.148	1.067	1.945	1.038
60 °C	1.969	0.963	1.345	0.583
55 °C	1.453	0.799	1.137	0.551
50 °C	1.331	0.535	0.944	0.486
45 °C	0.839	0.450	0.693	0.377



Şekil 6.12: Karışımların tekerlek izi oluşum eğimlerinin sıcaklığa bağlı değişimi

Arazideki tekerlek izi oluşum eğimleri ise Tablo 6.2 'de hesaplanmıştır.

Tablo 6.2: Arazideki tekerlek izi oluşum eğimlerinin hesaplanması

Numunelerin Alındığı Yer	Ölçülen Tekerlek İzi (mm)	Ölçülen Kaplama Kalınlığı (mm)	Tekerlek İzi (%)	Eşd.St. Dingil ($T_{8,2}$)	Log($T_{8,2}$)	Arazideki Tekerlek İzi Oluşum Eğimi
Adapazarı (Aşınma)	5.41	47	11.51	14200343	7.152	1.609
Tekstil kent (TMA)	7.75	69	11.23	15611114	7.193	1.561
Kartal (Modifiye)	2.00	46	4.35	11756167	7.070	0.615

(Binder numuneleri aşınma numuneleri ile aynı kesimden alınmıştır.)

Tablo 6.2’de, ölçülen tekerlek izi (mm) değerleri (bkz. Bölüm 3) ölçülen kaplama kalınlığına bölünerek, tekerlek izi yüzdesi (%) bulunmuştur. Kaplamanın yapıldığı tarih ile numunelerin alındığı tarih arasında geçen sürede, numunelerin alındığı kesimden geçen trafik, eşdeğer standart dingil tekrar sayısına ($T_{8,2}$) dönüştürülmüştür. Tekerlek izi yüzdesi (%), logaritması alınmış $T_{8,2}$ değerine bölünerek arazideki tekerlek izi oluşum eğimleri hesaplanmıştır.

Tablo 6.2’de hesaplanan arazideki eğim değerleri, Tablo 6.1’de bulunan laboratuvar eğimleriyle karşılaştırıldığında; aşınma numunelerine ait olan 1,609 eğim değeri, laboratuvardaki 55 ve 60 °C’lerdeki eğimler arasına, TMA numunelerine ait olan 1,561 eğim değeri ile modifiye bitümlü aşınma numunelerine ait olan 0,615 eğim değeri ise, laboratuvardaki 60 ve 65 °C’lerdeki eğimler arasına düşmektedir. Değerler arasında doğrusal interpolasyon yapıldığında, arazi koşullarını en iyi yansıtan deney sıcaklıkları aşağıdaki gibi bulunmuştur (Tablo 6.3). (Bu değerlerin kullanılması pratik olmayacağı için, deneylerde yuvarlatılmış yaklaşık değerler kullanılabilir. Ancak hesaplamalarda, gerçek değerler kullanılacaktır.)

Tablo 6.3: Arazi koşullarını en iyi yansıtan deney sıcaklıkları

Karışım Tipi	Sıcaklık (°C)
Aşınma	56.52 (~57)
TMA	61.80 (~62)
Mdf. Bit. Aşınma	60.35 (~60)

6.3 Laboratuvar Sonuçlarına Göre Kaplama Performansının (Ömrünün) Tahmini

Kaplama performansının (ömrünün) tahmininde, deney sonuçları, regresyon modelleri ve arazi ölçümleri kullanılmıştır. Bu tahminin yapılabilmesi için, aynı miktarda tekerlek izine neden olan, arazideki eşdeğer standart dingil tekrar sayısı ($T_{8,2}$) ile laboratuvar deneylerindeki devir sayısının ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Buradaki hesaplar, kaplamanın yalnızca tekerlek izi yönünden bozulduğu kabulüne dayanmaktadır. Doğal olarak, gerçek trafik koşullarında diğer bozulma türlerinin de etkisi söz konusudur.

Tablo 6.2’de aşınma numunelerinin alındığı kesimde, 14 200 343 eşdeğer standart dingil tekrar sayısı ($T_{8,2}$)’na karşılık oluşan tekerlek izi %11,51 ‘dir. Aşınma için arazi koşullarını en iyi yansıtan sıcaklık Tablo 6.3’te 56,52 °C olarak belirlenmiştir.

56,52 °C sıcaklık ve %11,51 tekerlek izi değerleri, aşınma numuneleri için geliştirilen regresyon modelinde kullanılarak, devir sayısı 20445 olarak bulunmuştur. Diğer karışımlar için de aynı yöntem uygulanarak Tablo 6.4'teki sonuçlara ulaşılmıştır.

Tablo 6.4: Aynı miktarda tekerlek izine neden olan $T_{8,2}$ ve devir sayıları

Karışım Tipi	Tekerlek İzi (%)	Sıcaklık (°C)	Eşd. St. Dingil $T_{8,2}$	Modelden Hesaplanan Devir Sayısı
Aşınma	11.51	56.52	14200343	20445
TMA	11.23	61.80	15611114	19579
Mdf. Bit. Aşınma	4.35	60.35	11756167	13192

İzin verilecek tekerlek izi miktarının en üst sınırı (tekerlek izi yönünden kaplamanın ömrünü tamamladığı kabul edilen sınır değer) %15 veya %20 alınabilir. Bu durumda, regresyon modelleri kullanılarak devir sayıları ve bunlara karşılık gelen eşdeğer standart dingil tekrar sayıları ($T_{8,2}$) hesaplanmıştır (Tablo 6.5). (Devir sayısı ve $T_{8,2}$ değerinin, her bir karışım için doğrusal arttığı kabul edilmiştir.)

Tablo 6.5: Tekerlek izi üst sınırına karşılık gelen devir sayıları ve $T_{8,2}$ değerleri

Karışım Tipi	Tekerlek İzi Üst Sınırı (%)	Sıcaklık (°C)	Modelden Hesaplanan Devir Sayısı	Eşd. St. Dingil $T_{8,2}$
Aşınma	15	56.52	54 523	37 869 665
	20	56.52	158 239	109 906 974
TMA	15	61.80	51 057	40 709 773
	20	61.80	132 361	105 536 680
Mdf. Bit. Aşınma	15	60.35	1 314 716	1 171 620 393
	20	60.35	3 830 788	3 413 840 231

Tablo 6.5 'te, %15 ve %20 tekerlek izi değerlerine karşılık gelen eşdeğer standart dingil tekrar sayıları ($T_{8,2}$), kaplamaların ömürleri (yalnızca tekerlek izi yönünden ömürleri) boyunca üzerlerinden geçirebilecekleri dingil sayılarıdır.

Tablo 6.5'te, modifiye bitümlü aşınma tipi için hesaplanan devir sayıları ve $T_{8,2}$ değerleri oldukça büyüktür ve ulaşılması mümkün görünmemektedir. Bunun nedeni, Tablo 6.4'te görülebileceği gibi, 11 756 167 $T_{8,2}$ dingil sayısı değerine karşılık yalnızca % 4,35 tekerlek izi oluşmasıdır. Bu durum, modifiye bitümlü aşınma tipi kaplamanın tekerlek izine dayanımının yüksek olduğunu ve tekerlek izinin %15 veya %20'ye ulaşmasının hem laboratuvar hem de arazi koşullarında mümkün

olamayacağını göstermektedir. Ayrıca, bu kaplamanın hizmet ömrü boyunca (yalnızca) tekerlek izi yönünden herhangi bir sorunla karşılaşmayacağı anlamına da gelmektedir.

6.4 Tekerlek İzi İle Statik Ve Dinamik (Tekrarlı) Sünme Uyumunun Değerlendirilmesi

Tekerlek izi ve sünme deneylerinde kullanılan numunelerin şekilleri, boyutları, yükleme koşulları ve deney sıcaklıkları birbirlerinden farklıdır. Bu durum göz önünde bulundurularak değerlendirmeler yapılmıştır.

Bölüm 6.1’de, tekerlek izi yüzdesi yönünden “Aşınma – TMA – Binder – Modifiye Bitümlü Aşınma” sıralamasının, hemen hemen bütün sıcaklıklarda geçerli olduğu ifade edilmişti. Statik sünme deney sonuçlarına (bkz. 4.2.1) bakıldığında, kalıcı deformasyon yönünden sıralamanın “Aşınma – Modifiye Bitümlü Aşınma – Binder – TMA” şeklinde olduğu görülmektedir.

Tekerlek izi ve statik sünme sıralamaları arasındaki fark, TMA ve modifiye bitümlü aşınma karışımlarının yerlerinin değişmesidir. Statik sünme deneyleri, tekerlek izi deneylerindeki sıcaklıklardan daha düşük bir sıcaklıkta (40 °C) yapılmıştır. Bu sıcaklıkta, kalıcı deformasyon miktarında, agrega tane dağılımı ve en büyük tane boyutu, bağlayıcıya göre daha büyük bir etkiye sahiptir. Bunun nedeni, karışımlarda kullanılan tüm bağlayıcıların yumuşama noktalarının bu sıcaklıktan yüksek olması, dolayısıyla yumuşamaması ve davranışında elastik bileşenin viskoz bileşene göre daha baskın olmasıdır. Bir başka deyişle, belirtilen sıcaklıkta, karışımların kalıcı deformasyon davranışlarındaki fark, agrega gradasyonlarındaki ve ayrıca maksimum tane boyutlarındaki farklardan kaynaklanmaktadır. İri agrega oranı ve nominal maksimum agrega tane boyutu, karışımların kalıcı deformasyon direnci üzerinde etkilidir. Nitekim TMA karışımında iri agrega oranı daha fazladır. Binder karışımının ise nominal maksimum agrega tane boyutu daha büyüktür. Bu nedenle, statik sünme deneylerinde, modifiye bitümlü aşınmada, binder ve TMA karışımlarına göre daha fazla deformasyon oluşmuştur.

Dinamik (tekrarlı) sünme deney sonuçlarına bakıldığında ise, karışım tipleri arasında bir sıralama yapmanın anlamlı görülmediği sonucuna varılmıştır. Kalıcı deformasyonların ortalama değerleri birbirlerine oldukça yakındır. Bunun nedeni,

sıcaklık ve yükleme koşullarının, karışımlar arasında ayırt edici bir etki oluşturamamasıdır. Sıcaklık, statik sünme deneylerindeki gibi 40 °C olmasına karşın, uygulanan tekrarlı yük (~1500 N), statik sünme deneylerinde uygulanan statik yükten (~3800 N) daha düşüktür. Bu nedenle, karışımların ortalama kalıcı deformasyon miktarlarında önemli farklar oluşmamıştır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, karayollarımızda kullanılan bitümlü kaplama tiplerinin (asfalt betonu aşınma, binder, TMA aşınma ve modifiye bitümlü aşınma) arazideki tekerlek izi performansları, laboratuvar koşullarında incelenip değerlendirilmiştir.

İlk olarak, bitümlü kaplamaların tekerlek izi performanslarının değerlendirilmesinde izlenecek yöntem belirlenmiştir. Bu yöntem, daha önce yapıp trafiğe açılmış ve arazideki performansı bilinen kaplama ile bu kaplamadan alınan numunelerin laboratuvardaki tekerlek izi performanslarının karşılaştırılması şeklindedir.

Çalışmada, tekerlek izi oluşum süreci, oluşum şekilleri, etkili faktörler, ölçümü ve onarımı ortaya konulmuştur. Ayrıca, tekerlek izini azaltmaya yönelik dünyadaki bazı uygulamalar ve tekerlek izi tahmini için yapılan çalışmalar incelenmiş, geliştirilen tahmin modelleri sunulmuştur.

Arazi çalışmaları kapsamında, numunelerin alınması ve arazideki tekerlek izi ölçümleri yer almıştır. Ayrıca, bu kesimlere ait malzeme ve karışım özellikleri verilmiş, trafik değerleri hesaplanmıştır.

Çalışmanın deneysel kısmında, tekerlek izi numunelerine ve karotlara uygulanan deneyler ve sonuçları sunulmuştur. (Tekerlek izi numunelerine, 45, 50, 55, 60 ve 65 °C’lerde 5000 devir uygulanmıştır. Karotlara ise 40 °C’de statik, dinamik (tekrarlı) sünme ve dolaylı çekme modülü deneyleri yapılmıştır.)

Tekerlek izi oluşumu, regresyon analizi ve bulanık mantık modelleme yöntemleriyle modellenmiştir. Kurulan regresyon modelleri irdelenmiş ve bulanık mantık modelleriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, kovaryans analizi de yapılmıştır.

Yapılan arazi ve laboratuvar çalışmaları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Karışımların tekerlek izi oluşma potansiyelleri karşılaştırılmış, arazideki ve laboratuvardaki tekerlek izi oluşma uyumu incelenmiş, laboratuvar sonuçlarına göre kaplamaların tekerlek izi performansının (ömrünün) tahmini yapılmıştır. Ayrıca, tekerlek izi ile statik ve dinamik (tekrarlı) sünme uyumu değerlendirilmiştir.

Bütün bu çalışmalara dayanarak varılan sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. Tekerlek izi deneylerinde, en yüksek tekerlek izi miktarı aşınma numunelerinde görülmüştür. İkinci sırayı TMA, üçüncü sırayı binder numuneleri almıştır. En az tekerlek izi miktarı ise modifiye bitümlü aşınma numunelerinde gözlenmiştir. Bu sıralama hemen hemen bütün sıcaklıklarda geçerlidir.
2. Tekerlek izi deneylerinde, bağlayıcı modifikasyonunun olumlu etkisi görülmüştür. Benzer gradasyona sahip aşınma numunelerine göre, modifiye bitümlü aşınma numunelerinde çok daha düşük tekerlek izi oluşmuştur.
3. Nominal maksimum agrega tane boyutunun büyük olmasının, tekerlek izi dayanımına olumlu etkisi görülmüştür. Nominal maksimum agrega tane boyutu 19 mm olan binder karışımı, 12,7 mm olan modifiye bitümlü aşınmaya yakın tekerlek izi dayanımı göstermiştir. Bu sonuca göre, tekerlek izine dayanımı arttırmak için, modifikasyondan önce tane dağılımında bazı düzenlemeler yapmanın önemi ortaya çıkmıştır.
4. İri agrega oranının yüksek olması da, tekerlek izine dayanımda olumlu bir etki oluşturmuştur. Nominal maksimum agrega tane boyutu eşit (12,7 mm) olan ve modifiye edilmemiş iki karışımdan, iri agrega oranı yüksek olan TMA (%64) numunelerinde, aşınma (%51) numunelerine göre daha az tekerlek izi görülmüştür.
5. Tekerlek izi deneylerinde, devir sayısının ve sıcaklığın artmasıyla, tekerlek izi miktarının arttığı bilinmektedir. Bu artış, başlangıç devirlerinde (<1000 devir) daha yüksek oranlara sahiptir. Bu durum, incelenen tüm sıcaklıklar için geçerlidir. 5000 devirde görülen toplam tekerlek izinin, aşınma numunelerinde ortalama %73'ü, binder numunelerinde %79'u, TMA numunelerinde %69'u ve modifiye bitümlü aşınma numunelerinde ise %76'sı ilk 1000 devirde oluşmuştur. Benzer durum hizmet vermekte olan kaplamalar için de geçerlidir. Bir kaplama, en az iki sıcak yaz mevsimi boyunca üzerinden geçen trafiğe hizmet vermesine karşın, önemli miktarda tekerlek izi oluşmamış ise, bu kaplamanın tekerlek izi dayanımının (akma tekerlek izi) yüksek olduğu sonucu çıkarılabilir ve geri kalan ömrü boyunca, akma tekerlek izi yönünden herhangi bir sorunla karşılaşması beklenmez.

6. Aşınma ve TMA numunelerinde, son devirlerde (>1000 devir) sıcaklığın tekerlek izi üzerindeki etkisi başlangıç devirlerine göre daha yüksektir. 5000 devirde oluşan toplam tekerlek izi miktarlarına bakıldığında, sıcaklık aralıklarındaki (50, 55, 60 ve 65 $^{\circ}\text{C}$) tekerlek izi artışının doğrusal olmadığı ve artışların giderek büyüdüğü görülmüştür. Binder ve modifiye bitümlü aşınma numunelerinde ise sıcaklık değişimlerine duyarlılık, başlangıç ve son devirlerde çok farklı değildir. Aynı zamanda, binder ve modifiye bitümlü aşınma numunelerinin TMA ve aşınma numuneleri kadar sıcaklığa duyarlı olmadığı görülmüştür. (Bu durum, sıcaklığın devir sayısı ile birlikte oluşturduğu etkinin sonucudur. Kovaryans analizi ile devir sayısının etkisinin kaldırılıp, yalnızca sıcaklığın etkisi değerlendirildiğinde, aşağıdaki 7 numaralı sonuç ortaya çıkmıştır.) Binder numuneleri, 5 farklı sıcaklığa karşılık, 3 farklı davranış göstermiştir (45-50, 55, 60-65 $^{\circ}\text{C}$). Modifiye bitümlü aşınma numunelerinde, 65 $^{\circ}\text{C}$ 'de diğer sıcaklıklara göre oldukça fazla (yaklaşık 2 kat) tekerlek izi oluştuğu görülmüş, bu sıcaklıkta modifikasyonun etkisinin azaldığı sonucuna varılmıştır.
7. Yapılan varyans ve kovaryans analizleri sonucunda, bütün karışım tipleri ve sıcaklıklar için ayrı ayrı kovaryans analizi yapma kararı verilmiştir. Karışım tipleri için yapılan kovaryans analizi sonucunda, aşınma, binder ve modifiye bitümlü aşınmada 4, TMA 'da ise 3 alt sıcaklık grubu oluşmuştur. Bu durum, TMA numunelerinin sıcaklığa daha az duyarlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, 5 $^{\circ}\text{C}$ 'den daha küçük sıcaklık artışlarındaki davranış farklılıklarını ortaya çıkarmanın, oldukça zor olduğu sonucuna varılmıştır. Her bir sıcaklık için yapılan kovaryans analizi sonucunda ise, 50 $^{\circ}\text{C}$, 55 $^{\circ}\text{C}$ ve 60 $^{\circ}\text{C}$ 'lerde 4 alt grup, 45 $^{\circ}\text{C}$ ve 65 $^{\circ}\text{C}$ 'lerde 3 alt grup oluşmuştur. Sıcaklıkların, tekerlek izi yönünden, karışımlarda fark oluşturacak etkiye sahip oldukları belirlenmiştir (45 $^{\circ}\text{C}$ ve 65 $^{\circ}\text{C}$ hariç).
8. Statik sünme deneylerinde, en yüksek kalıcı deformasyon miktarı aşınma numunelerinde görülmüştür. İkinci sırayı modifiye bitümlü aşınma, üçüncü sırayı binder numuneleri almıştır. En az kalıcı deformasyon ise TMA numunelerinde gözlenmiştir.
9. Dinamik (tekrarlı) sünme deneylerinde, numuneler arasında ayırt edici büyük farklar görülmemiştir. Kalıcı deformasyonların ortalama değerleri birbirlerine

oldukça yakındır. Bunun nedeni, sıcaklık (40⁰C) ve yüklemenin (1500 N), karışımlar arasında ayırt edici büyük bir etki oluşturamayacak kadar düşük kalmasıdır. Bu deneylerin sonuçlarına dayanarak, karışım tipleri arasında kalıcı deformasyon miktarı yönünden bir sıralama yapmanın anlamlı görülmediği sonucuna varılmıştır.

10. Dolaylı çekme modülü deneylerinde, aynı yükleme koşulları (aynı yükleme periyodu ve yükleme süresi) altında, TMA numunelerinin en yüksek esneklik (elastik, resilient) modülüne sahip olduğu görülmüştür. Binder numunelerinin esneklik modülleri, TMA numunelerine göre daha düşüktür. Üçüncü sırayı modifiye bitümlü aşınma numuneleri almıştır. En düşük esneklik modülü değerleri ise aşınma numunelerinde bulunmuştur. Bu sıralama, statik sünme deneylerinden elde edilen sıralama ile ters yöndedir. Bir başka deyişle, esneklik modülü en yüksek olan numune tipinde, statik sünme deneylerinde oluşan deformasyonlar en düşüktür. Ayrıca, her bir yükleme periyodu için, kısa yükleme süresinde, beklendiği gibi daha yüksek esneklik modülü elde edilmiştir. Bu sonuç, yükleme süresi kısaltıkça malzemenin daha elastik davrandığını göstermektedir.
11. Statik ve dinamik (tekrarlı) sünme deneylerinin, karışımların tekerlek izi performansının ölçülmesinde, bu çalışmada incelenen sıcaklık (40 ⁰C) ve yükleme koşulları yönünden yeterli olamayacağı sonucuna varılmıştır. (Karışımların kalıcı deformasyon davranışlarının, aralarında fark oluşturabilecek düzeyde belirlenebilmesi için, deneylerin, serviste görülebilecek ve kullanılan bitümlü bağlayıcının yumuşama noktasının üstündeki yüksek sıcaklıklarda yapılması ve/veya uygulanan statik ve tekrarlı yüklerin artırılması gerekmektedir.)
12. Regresyon analizi ile yapılan modellemelerde, regresyon denkleminin uygunluk (modelin veriye uyumu) ölçüsü olarak kullanılan ve bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama oranı olarak tanımlanan çoklu belirtme katsayısı R² değerleri, oldukça yüksektir. Bu değerler, aşınma için 0,961, binder için 0,925, TMA için 0,914 ve modifiye bitümlü aşınma numuneleri için 0,918'dir. Modellerin bir bütün olarak anlamlılıklarını gösteren F değerleri, bütün karışımlar için, her düzeyde anlamlı bulunmuştur (p=0,000). Modelde kullanılan değişkenlerin ayrı ayrı anlamlılıklarını

gösteren t değerlerinin de, bütün karışımlar için, her düzeyde anlamlı olduğu görülmüştür ($p=0,000$). Ayrıca, kurulan modellerde, çoklu doğrusal bağımlılık sorunu olmadığı belirlenmiştir (Tolerans = 1, VIF = 1, Durum İndeksi < 100). Modellerdeki kalıntıların (hataların) normal dağıldığı gözlenmiştir.

13. Kurulan regresyon modelleri irdelenerek, farklı sıcaklıklarda aynı miktarda tekerlek izine neden olan devir sayıları belirlenmiştir. Örneğin, 20 °C'lik sıcaklık farkında (S2-S1), aynı miktarda tekerlek izine neden olan devir sayılarının oranı (D1/D2), aşınmada 88, binderde 82, TMA'da 21 ve modifiye bitümlü aşınmada 36'dır. Diğer bir ifadeyle, 65 °C'de oluşan tekerlek izi miktarına, 45 °C'de, örneğin aşınmada, 88 kat daha fazla devir sayısı sonunda ulaşılabileceği belirlenmiştir. (Diğer sıcaklıklar için bkz. 5.1.5) Ayrıca, en düşük devir sayısı oranının (21) TMA'da bulunması, bu karışımın sıcaklık değişimlerine en az duyarlılığı olan karışım olduğunu göstermektedir.
14. Belirli bir tekerlek izi miktarının, farklı karışım tiplerinde hangi koşullarda oluştuğunun kolaylıkla bulunabileceği, regresyon modelleri ile tahmin edilen tekerlek izi miktarlarını (%) gösteren Tablo 5.29 hazırlanmıştır. Bu tabloda, örneğin %4'lük tekerlek izi miktarı, 5000 devirde, aşınmada yaklaşık 45 °C'de, TMA'da yaklaşık 50 °C'de, binderde yaklaşık 60 °C'de ve modifiye bitümlü aşınmada yaklaşık 65 °C'de oluştuğu görülmektedir. (Bu sonuç, bölgelere göre karışım tipinin seçilmesinde yararlı olabilir.) Yine %4'lük tekerlek izi miktarı, 60 °C'de, aşınmada yaklaşık 200 devirde, TMA'da yaklaşık 1000 devirde, binderde yaklaşık 5000 devirde ve modifiye bitümlü aşınmada ise 10000 devirde oluşmaktadır.

Bu tablonun kullanılmasının esas faydası, getirdiği kolaylıklardır. Bu tablo, 60 °C'den farklı sıcaklıklarda da tekerlek izi deneyi yapma ve düşük sıcaklıktaki deney sonuçlarından, yüksek sıcaklıktaki tekerlek izi performansını tahmin edebilme kolaylığı sağlamaktadır. Aynı zamanda, yüksek devir sayılarındaki performansı, daha düşük devir sayılarında tahmin edebilme kolaylığı da sunmaktadır.

15. Kurulan bulanık mantık modelleri ile, deney sonuçlarına oldukça yakın tahmin değerleri elde edilmiştir. Deney sonuçları ile model sonuçları

arasındaki korelasyon katsayıları, aşınma için 0,9988, binder için 0,9995, TMA için 0,9687, modifiye bitümlü aşınma için 0,9781 olarak bulunmuştur. Bu durum, deney sonuçlarıyla model sonuçlarının yüksek bir ilişkiye sahip olduğunu, dolayısıyla modellerin tahmin gücünün yüksek olduğunu göstermiştir.

16. Modeller arasında bir karşılaştırma yapıldığında, bulanık mantık modellerinin regresyon modellerine göre, daha yüksek bir tahmin gücüne sahip olduğu belirlenmiştir. Bulanık mantık modellerinin sonuçları ile deney sonuçları arasındaki korelasyon katsayıları daha yüksektir. Diğer bir karşılaştırma ölçütü olan RMSE (hataların karelerinin ortalamasının karekökü) değerlerine bakıldığında ise, bulanık mantık modellerine ilişkin değerlerin daha küçük olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, bulanık mantık modelleriyle yapılan tahminlerde daha az hata oluşmaktadır.
17. Arazideki ve laboratuvardaki tekerlek izi oluşma uyumunun karşılaştırılmasında, ölçüt olarak tekerlek izi oluşum eğimi esas alınmıştır. Arazideki sonuçlara en yakın eğimi veren, başka bir deyişle, arazideki koşulları en iyi yansıtan deney sıcaklığını bulmak amacıyla, her bir karışım, farklı sıcaklıklar için ayrı ayrı tekrar modellenmiştir. Arazideki tekerlek izi oluşum eğimleri de hesaplanmıştır. Arazi koşullarını en iyi yansıtan deney sıcaklıkları, aşınma için 56,52 (~57 °C), TMA için 61,80 (~62 °C) ve modifiye bitümlü aşınma için 60,35 (~60 °C) olarak bulunmuştur.
18. Laboratuvar sonuçlarına göre kaplamanın tekerlek izi performansının tahmin edilebilmesi için, aynı miktarda tekerlek izine neden olan, arazideki eşdeğer standart dingil tekrar sayısı ($T_{8,2}$) ile laboratuvar deneylerindeki devir sayısı ilişkilendirilmiştir. Her bir kaplama tipi için arazi koşullarını en iyi yansıtan sıcaklıklar ve arazideki tekerlek izi miktarları, tekerlek izi modellerinde kullanılarak, arazideki $T_{8,2}$ dingil tekrar sayılarına karşılık gelen laboratuvardaki devir sayıları hesaplanmıştır. İzin verilecek tekerlek izi miktarının üst sınırı (tekerlek izi yönünden kaplamanın ömrünü tamamladığı kabul edilen sınır değer) %15 ve %20 seçilerek, bu sınırlara karşılık gelen eşdeğer standart dingil tekrar sayıları hesaplanmıştır. Bu değerler, aşınmada %15 üst sınır için yaklaşık 38 milyon, %20 için yaklaşık 110 milyonken, TMA'da %15 için yaklaşık 41 milyon, %20 için yaklaşık 106 milyondur.

Modifiye bitümlü kaplamada ise, %15 ve %20'ye karşılık gelen devir ve dingil sayılarına ulaşılması mümkün görülmemiştir. Dolayısıyla, bu kaplamanın servis ömrü boyunca (yalnızca) tekerlek izi yönünden herhangi bir sorunla karşılaşmayacağı sonucuna varılmıştır. (Buradaki hesaplar, kaplamanın yalnızca tekerlek izi yönünden bozulduğu kabulüne dayanmaktadır. Doğal olarak, gerçek trafik koşullarında diğer bozulma türlerinin de birlikte etkisi söz konusudur.)

Bu çalışma sonucunda, bundan sonraki tekerlek izi çalışmalarına yön verebilecek öneriler aşağıda sıralanmıştır:

1. 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 (bkz. 2.4). Bu sistemde, üstteki ince tabaka durabilite, geçirimsizlik ve kayma direnci sağlarken, alttaki daha kalın tabaka, tekerlek izine ve yorulma çatlamasına dayanımı sağlamaktadır. Bu sistemde, iri tane dağılımına sahip TMA karışımı, alttaki tabakayı oluşturabilir.
2. 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 eşdeğer hale getirilmesi gerekir. Bu amaca yönelik olarak, trafik hesabında kullanılmak üzere, farklı sıcaklıklar için eşdeğer dingil yükü ağırlık katsayıları bulunmalıdır (bkz. Şekil 2.21).
3. Bu çalışma, Türkiye 'de, farklı bölgelerdeki iklim ve trafik koşullarında kullanılan bütün karışım tiplerini kapsayacak şekilde genişletilmelidir.
4. Arazideki tekerlek izi ölçümleri sürekli hale getirilmeli, karayolu ağına ait tekerlek izi veri tabanı oluşturulmalıdır.

5. Kurulan tekerlek izi modelleri, arazide yapılan tekerlek izi ölçümleriyle kalibre edilmelidir. Modellerin güvenilirlikleri (tahmin güçleri) zamana bağlı olarak sınanmalıdır. Güvenilir modeller, üstyapı yönetim sistemi içerisinde ileriye dönük tahminlerde kullanılmalıdır.
6. Kaplamaların gerçek performanslarını gözlemleyebilmek için, ülkemizde de tam ölçekli çalışmalar bir an önce başlatılmalıdır. Bu kapsamda deney yolları yapılmalı, hızlandırılmış yükleme sistemleri geliştirilmelidir.

KAYNAKLAR

- AASHTO**, 1986. Guide For Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.
- Ağar, E., Süttaş, İ. ve Öztaş, G.**, 1996. Geçirimli esnek üstyapılar, 1. *Ulusal Asfalt Sempozyumu*, İstanbul, 19-20 Aralık, s. 28-38.
- Ağar, E.**, 1999. İleri Kaplama Teknolojisi, Lisansüstü ders notu, İstanbul.
- Allen, D. L. and Deen, R. C.**, 1986. A Computerized Analysis of Rutting Behaviour of Flexible Pavement, *Transportation Research Record*, **1095**, 1-10.
- Alpar, R.**, 2003. Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistiksel Yöntemlere Giriş I, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- Archilla, A. R. and Madanat, S.**, 2001a. Estimation of Rutting Models by Combining Data from Different Source, *Journal of Transportation Engineering*, **127**, i5, 379-389.
- Archilla, A. R. and Madanat, S.**, 2001b. Statistical Model of Pavement Rutting in Asphalt Concrete Mixes, *Transportation Research Record*, **1764**, 70-77.
- Aschenbrener, T.**, 1994. Comparison of Results Obtained from the LCPC Rutting Tester with Pavements of Known Field Performance, *Transportation Research Record*, **1454**, 66-73.
- Bayazıt, M.**, 2006. Çok Değişkenli İstatistik Analiz ve Hidrolojide Uygulamaları, Su Vakfı Yayıncılık, İstanbul.
- Bowskill, G., Herbst, G. and 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. and 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. and 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. and Lytton, R. L.,** 1990. Influence of Aggregate on Rutting in Asphalt Concrete Pavements, *Transportation Research Record*, **1259**, 141-152.
- Capitao, S. D. and Picado-Santos, L.,** 2006. Assessing Permanent Deformation Resistance of High Modulus Asphalt Mixtures, *Journal of Transportation Engineering*, **132**, No5, 394-401.
- Chen, J. S., Lin, C. H., Stein, E. and Hothan, J.,** 2004. Development of Mechanistic – Empirical Model to Characterize Rutting in Flexible Pavements, *Journal of Transportation Engineering*, **130**, 4, 519-525.
- Choubane, B., Page, G. C. and Musselman, J. A.,** 2000. Suitability of Asphalt Pavement Analyzer for Predicting Pavement Rutting, *Transportation Research Record*, **1723**, 107-115.
- Collins, R., Shami, H. and 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. and Caroff, G.,** 1994. Investigation of Rutting of Asphalt Surface Layers: Influence of Binder and Axle Loading Configuration, *Transportation Research Record*, **1436**, 28-37.
- ELE-UMATTA,** 1994. Universal Materials Testing Aparatus for Asphalt and Unbound Specimens, Reference and Operating Manual.
- FOSSC Materials Lab.,** 2001. Design and Construction of Concrete Intersection, *Tech Notes*, Washington State Department of Transportation, Washington, USA.
- Fwa, T. F., Tan, S. A. and Zhu, L. Y.,** 2004. Rutting Prediction of Asphalt Pavement Layer Using C- Φ Model, *Journal of Transportation Engineering*, **130**, No5, 675-683.
- Hadley, W. O.,** 1994. *SHRP-LTTP data analysis studies: five-year report*, **SHRP-P-688**, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington D.C., USA.
- Hensley, M. J. and 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.

- Kalaycı, Ş.,** 2005. SPSS Uygulamalı Çok Dğişkenli İstatistik Teknikleri, Asil Yayın Dağıtım, Ankara.
- Kandhal, P. S. and Cooley, L. A.,** 2002. Evaluation of permanent deformation of asphalt mixtures using loaded wheel tester, NCAT Report 02-08, Auburn, USA.
- Kandhall, P. S. and 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. and Brown, E. R.,** 1998. Hot mix asphalt for intersections in hot climates, NCAT Report 98-06, Auburn, USA.
- KGM,** 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006. *Otoyollar ve Devlet Yollarının Trafik Dilimlerine Göre Yıllık Ortalama Günlük Trafik Değerleri ve Ulaşım Bilgileri*, Karayolları Genel Müdürlüğü, Program ve İzleme Dairesi Başkanlığı, Ulaşım ve Maliyet Etütleri Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Khosla, N. P. and Sadasivam, S.,** 2002. Evaluation of the effects of mixture properties and compaction methods on the predicted performance of superpave mixtures, Final Report, **FHWA/NC/2002-030**, Raleigh, NC, USA.
- Kutluhan, S. ve Ağar, E.,** 2004. Bitümlü sıcak karışımlarda tekerlek izi oluşumunun incelenmesi, 4. *Ulusal Asfalt Sempozyumu*, KGM, Ankara, 25-26 Kasım, s. 213-223.
- KTŞ,** 2006. Karayolu Teknik Şartnamesi, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Lai, J. S.,** 1993. Results of Round-Robin Test Program to Evaluate Rutting of Asphalt Mixes Using Loaded Wheel Tester, *Transportation Research Record*, **1417**, 127-134.
- Leahy, R. B.,** 1989. Permanent deformation characteristics of asphalt concrete, *PhD Thesis*, University of Maryland, USA.
- Metcalf, J. B.,** 1996. Application of Full-Scale Accelerated Pavement Testing, NCHRP Synthesis of Highway Practice 235, National Academy Press, Washington D.C.
- Mfinanga, D. A., Ochiai, H., Yasufuku, N. and Yokota, H.,** 1996. Traffic Loading and Environmental Effects on Asphalt Pavement Rutting, *Memoirs of the Faculty of Engineering*, Kyushu University, **56, n3**, 149-169.

- Mogawer, W. S. and 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. and 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. and 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, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara
- Paulikakos, L. D., Takahashi, S. and Partl, M. N.,** 2003. A comparison of Swiss and Japanese porous asphalt through various mechanical tests, *3rd Swiss Transport Research Conference*, Monte Verita, Ascona, Sweden, March 19-21.
- Pirabarooban, S., Zaman, M. and Tarafder, R. A.,** 2003. Evaluation of rutting potential in asphalt mixes using finite element modeling, *Annual Conference of the Transportation Association of Canada*, St. John's, Newfoundland and Labrador, Canada, September 21-24.
- Powell, R. B.,** 2008. Modeling rutting performance on the NCAT pavement test track, *TRB 87th Annual Meeting*, Washington D. C., USA, January 13-17.
- Price, S., Mehta, Y. and McCarty, L. M.,** 2007. Evaluation and Modeling of Repeated Load Test Data of Asphalt Concrete for Mechanistic-Empirical Pavement Design, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **19**, No11, 993-999.

- Rauhut, J. B.**, 1980. Permanent Deformation Characterization of Bituminous Mixtures for Predicting Pavement Rutting, *Transportation Research Record*, **777**, 9-14.
- Rodriguez, M., Ould-Henia, M. and Dumont, A. G.**, 2005. Predictive method for evaluation of pavement rutting, *5th Swiss Transport Research Conference*, Monte Verita, Ascona, Sweden, March 9-11.
- Romero, P. and Stuart, K.**, 1998. Evaluating Accelerated Rut Testers, *Public Roads*, **62**, n1, 50-55.
- Rosenberger, C. and Buncher, M.**, 1999. Ensuring Structural Adequacy – A Key Step to Intersection Strategies, Strategy 2, *Asphalt Magazine*, Summer Issue, 8-9 and 27.
- Sağlık, A. ve Güngör, A. G.**, 2006. *Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi*, KGM, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Salama, H. K.**, 2005. Effect of heavy multi-axle trucks on flexible pavement rutting, *PhD Thesis*, Michigan State University, USA.
- Schwartz, C. W.**, 2007. Implementation of the NCHRP 1-37A design guide, *Final Report Volume 1: Summary of Findings and Implementation Plan*, **MDSHA Project No. SP0077B41**, submitted to Office of Material Technology Maryland State Highway Administration, Lutherville, MD, USA.
- Seo, Y., El-Haggan, O., King, M., Lee, S. J. and Kim, Y. R.**, 2007. Air Void Models for the Dynamic Modulus, Fatigue Cracking and Rutting of Asphalt Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **19**, No10, 874-883.
- Shami, H. I., Lai, J. S., D'Angelo, J. A. and Harman, T. P.**, 1997. Development of Temperature-Effect Model for Predicting Rutting of Asphalt Mixtures Using Georgia Loaded Wheel Tester, *Transportation Research Record*, **1590**, 17-22.
- Shatnawi, S. R. and Lancaster, F.**, 1997. Field and laboratory evaluation of superpave level one mix design in California, in *Progress of Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement): Evaluation and Implementation*, ASTM STP **1322**, p 64-79, Ed. Jester, R. N., American Society for Testing Materials.

- Sherwood, J. A., Thomas, N. L. and Qi, X.,** 1998. Correlation of Superpave $G^*/\sin\delta$ with Rutting Test Results from Accelerated Loading Facility, *Transportation Research Record*, **1630**, 53-61.
- Sousa, J. B., Craus, J. and 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. and 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.
- Timm, D., West, R., Priest, A., Powell, B., Selveraj, I., Zang, J. and Brown, R.,** 2006. Phase II NCAT test track results, NCAT Report 06-05, Auburn, USA.
- Ulaştırma Ana Planı Stratejisi,** 2005. *Sonuç Rapor*, Ulaştırma ve Ulaşım Araçları UYG-AR Merkezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Van de Loo, P. J.,** 1976. Practical Approach to the Prediction of Rutting in Asphalt Pavements: The Shell Method, *Transportation Research Record*, **616**, 15-21.
- Vanelstraete, A. and Francken, L.,** 1995. Ornierage: Synthèse 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. and Galal, K.,** 2003. Analysis of Accelerated Pavement Tests, *Transportation Research Board Annual Meeting*, Paper CS8-7, Washington D. C., USA.
- Witzack, M. W. and 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.
- www.asphaltwa.com,** 02.04.2008. Washington Asphalt Pavement Association, <http://www.asphaltwa.com/wapa_web/modules/11_guidance/11_surface_distress.htm#rutting>.

- www.bast.de**, 03.04.2008. Federal Highway Research Institute (Bundesanstalt für Straßenwesen) <http://www.bast.de/cln_007/nn_75158/SharedDocs/Publikationen/EN/infos-versuchseinrichtungen/e-pff,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/e-pff.pdf>.
- www.fhwa.dot.gov**, 02.04.2008. U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration <<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/labs/mixtures/hamburg.cfm>>.
- www.k-state.edu**, 03.04.2008. APT Facilities Around the World, TRB, <http://www.k-state.edu/pavements/trb/A2B09/index_files/world.htm>.
- www.pavetrack.com**, 02.04.2008. National Center for Asphalt Technology, <<http://www.pavetrack.com/images/photo%20album/2000/Trucking%20Operations/WESTRUCK.GIF>>.
- www.tfhr.gov**, 03.04.2008. U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, <<http://www.tfhr.gov/pubrds/july97/wstrk.htm>>.
- Zhang, J., Cooley, L. A. and Kandhal, P. S.**, 2002. Comparison of fundamental and simulative test methods for evaluating permanent deformation of hot mix asphalt, NCAT Report 02-07, Auburn, USA.
- Zhou, F., Scullion, T. and Sun, L.**, 2004. Verification and Modeling of Three-Stage Permanent Deformation Behaviour of Asphalt Mixes, *Journal of Transportation Engineering*, **130**, No4, 486-494.

EKLER

EK A: Tam Ölçekli Çalışmalar

EK B: Tekerlek İzi Numunelerinin Boyutları ve D_p - Pratik Birim Hacim Ağırlıkları

EK A: Tam Ölçekli Çalışmalar

A.1 Deney Yolları (www.k-state.edu, www.tfhr.gov)



Şekil A.1: Deney yolu -Waterloo Kanada



Şekil A.2: Deney yolu - Japonya



Şekil A.3a,b: Deney yolu - NCAT



Şekil A.4: Deney yolu - MnROAD Minnesota



Şekil A.5: Deney yolu-WesTrack Nevada

A.2 Hızlandırılmış Yükleme Sistemleri (HYS) (www.k-state.edu) (www.bast.de)



Şekil A.6: HYS-Porto Alegre, Brezilya



Şekil A.7: HYS-Çin



Şekil A.8: HYS-Güney Afrika (HVS)



Şekil A.9: HYS-Avustralya



Şekil A.10: HYS-Yeni Zelanda



Şekil A.11: HYS-Güney Kore



Şekil A.12: HYS-Hollanda



Şekil A.13: HYS-Finlandiya-İsveç



Şekil A.14.a,b,c,d: HYS-Japonya



Şekil A.15.a,b,c,d: HYS-Fransa



Şekil A.16: HYS-Lozan, İsviçre



Şekil A.17: HYS-Zürich, İsviçre



Şekil A.18: HYS-Danimarka



Şekil A.19: HYS-İspanya



Şekil A.20: HYS-Romanya



Şekil A.21: HYS-Slovakya



Şekil A.22: HYS-TRL, İngiltere



Şekil A.23: HYS-Uni. of Ulster, İngiltere



Şekil A.24: HYS-California (CAL-APT)



Şekil A.25: HYS-California (CAL-APT)2



Şekil A.26: HYS-Kansas State Uni.



Şekil A.27: HYS-Texas (MLS)



Şekil A.28: HYS-Louisiana (ALF)



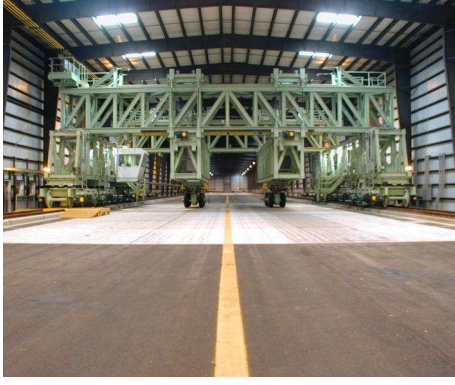
Şekil A.29.a,b: HYS-WES



Şekil A.30: HYS-Florida (HVS)



Şekil A.31: HYS-FHWA (ALF)



Şekil A.32: HYS-FAA NAPTF



Şekil A.33: HYS-CRREL



Şekil A.34: HYS- Ohio (APLF)



Şekil A.35: HYS- Purdue University



Şekil A.36: HYS-Illinois (ATLaS)



Şekil A.37: HYS-Almanya (BASt)

Tablo B.1: Aşınma Numunelerinin Boyutları ve D_p - Pratik Birim Hacim Ağırlıkları

A GRUBU NUMUNELER (AŞINMA NUMUNELERİ)													
NUMUNE	BOYUTLAR							D _p 'NİN BELİRLENMESİ					
	EN (cm)		BOY (cm)		KALINLIK (mm)			HAVADA AĞIRLIK (gr)	SUDA AĞIRLIK (gr)	DOYGUN KURU YÜZEYLİ AĞIRLIK (gr)	HACİM (cm3)	D _p (gr/cm3)	
	ÖLÇÜM	ORT.	ÖLÇÜM	ORT.	ÖLÇÜM		ORT.						
A-1	18.0	17.8	49.8	50.0	49.88	48.94	49.32	10480	6155	10486	4331	2.420	
	17.7		50.1		50.26	49.66	49.00						
	17.8				49.62	48.56							
A-2	18.0	18.0	49.6	49.7	44.58	49.13	46.59	9947	5893	9956	4063	2.448	
	18.0		49.7		43.77	46.50	46.43						
	18.0				44.95	47.56							
A-3	18.0	18.3	49.9	49.8	46.45	45.95	45.00	10335	6110	10342	4232	2.442	
	18.5		49.6		48.47	47.75	48.40						
	18.3				48.19	47.35							
A-4	17.7	18.0	49.7	49.6	48.18	49.12	49.37	10379	6132	10384	4252	2.441	
	18.3		49.5		47.15	48.30	47.42						
	17.9				47.21	48.14							
A-5	17.3	17.2	49.8	50.1	48.21	44.35	45.91	9590	5648	9594	3946	2.430	
	17.2		50.3		48.46	44.02	45.24						
	17.2				47.08	44.18							
A-6	18.2	18.1	50.0	50.0	50.11	48.70	50.34	10697	6315	10703	4388	2.438	
	17.9		50.0		48.81	47.03	50.10						
	18.2				49.54	48.41							
A-7	17.7	18.0	49.7	49.9	49.27	49.08	49.92	10713	6345	10718	4373	2.450	
	18.0		50.0		49.53	49.54	48.73						
	18.2				48.67	48.44							
A-8	18.4	17.7	50.2	50.1	51.81	50.26	50.45	10950	6437	10954	4517	2.424	
	17.1		50.0		54.19	50.41	49.08						
	17.7				52.73	47.90							
A-9	17.9	18.0	49.8	49.8	53.90	50.84	51.94	11191	6603	11196	4593	2.437	
	18.2		49.8		53.84	49.66	51.97						
	18.0				53.70	50.46							
A-10	18.0	18.0	49.7	49.8	50.27	49.08	51.30	10828	6370	10835	4465	2.425	
	18.0		49.9		51.50	48.76	48.93						
	18.0				50.25	47.36							
A-11	18.0	18.0	48.8	49.2	47.46	49.47	48.13	10482	6194	10498	4304	2.435	
	18.0		49.6		48.34	50.62	48.24						
	18.0				48.00	49.75							
A-12	18.5	18.5	49.9	50.0	54.79	49.05	52.14	11757	6907	11774	4867	2.416	
	18.4		50.0		57.51	49.74	51.75						
	18.5				54.91	50.10							
A-13	17.5	17.6	50.0	50.0	47.08	48.62	51.20	10628	6232	10634	4402	2.414	
	17.5		49.9		49.73	51.75	47.46						
	17.8				50.29	51.18							

EK B: Tekerlek İzi Numunelerinin Boyutları ve D_p - Pratik Birim Hacim Ağırlıkları

Tablo B.2: Binder Numunelerinin Boyutları ve D_p - Pratik Birim Hacim Ağırlıkları

B GRUBU NUMUNELER (BİNDER NUMUNELERİ)													
NUMUNE	BOYUTLAR							Dp 'NİN BELİRLENMESİ					
	EN (cm)		BOY (cm)		KALINLIK (mm)			HAVADA AĞIRLIK (gr)	SUDA AĞIRLIK (gr)	DOYGUN KURU YÜZEYLİ AĞIRLIK (gr)	HACİM (cm3)	Dp (gr/cm3)	
	ÖLÇÜM	ORT.	ÖLÇÜM	ORT.	ÖLÇÜM		ORT.						
B-1	17.9	17.8	49.9	49.9	49.13	49.16	49.60	49.39	10361	6026	10370	4344	2.385
	17.8		49.8		49.16	49.64	49.64						
	17.8				49.56	49.21							
B-2	18.1	17.9	49.9	50.0	50.73	50.75	49.61	50.31	10770	6295	10776	4481	2.403
	17.9		50.0		51.12	50.42	49.69						
	17.6				50.40	49.74							
B-3	17.8	18.0	49.7	49.9	48.02	47.95	48.46	48.54	10447	6095	10455	4360	2.396
	18.2		50.0		48.27	49.41	48.80						
	18.0				49.79	47.65							
B-4	18.3	18.0	49.5	49.7	49.23	49.99	50.47	49.75	10682	6237	10688	4451	2.400
	18.0		49.8		49.37	50.06	50.06						
	17.8				49.63	49.19							
B-5	17.5	17.4	49.9	49.8	48.53	48.50	48.75	48.80	10074	5894	10078	4184	2.408
	17.3		49.7		48.92	49.64	49.02						
	17.3				49.36	47.68							
B-6	18.3	18.2	49.8	49.7	49.66	50.08	49.81	49.82	10692	6243	10698	4455	2.400
	18.3		49.5		50.62	49.25	49.37						
	18.0				50.05	49.72							
B-7	18.5	18.3	50.0	50.0	50.79	49.80	50.53	50.23	10935	6380	10942	4562	2.397
	18.3		49.9		50.52	49.49	50.06						
	18.0				50.07	50.56							
B-8	18.5	18.0	49.8	49.9	50.21	50.75	50.70	50.45	10746	6268	10751	4483	2.397
	18.0		50.0		50.22	50.56	50.64						
	17.5				50.09	50.39							
B-9	18.4	18.1	50.0	50.0	50.56	49.65	50.96	50.32	10831	6317	10837	4520	2.396
	17.7		50.0		50.23	49.66	50.13						
	18.2				50.21	51.15							
B-10	18.0	18.1	49.7	49.7	50.64	50.54	50.60	50.61	10818	6295	10822	4527	2.390
	18.0		49.6		50.49	50.86	50.90						
	18.3				50.34	50.48							
B-11	18.0	18.0	49.9	49.8	52.11	51.02	51.22	51.37	10794	6284	10801	4517	2.390
	18.0		49.6		52.55	50.40	50.72						
	18.0				51.88	51.03							
B-12	18.0	18.2	49.6	49.7	50.15	50.39	50.69	50.41	10738	6234	10745	4511	2.380
	18.4		49.7		49.91	50.19	50.96						
	18.3				50.45	50.55							
B-13	17.2	17.6	49.6	49.8	49.05	50.45	48.38	49.26	10321	6023	10327	4304	2.398
	17.7		50.0		49.78	49.57	48.07						
	18.0				50.05	48.76							

Tablo B.3: TMA Numunelerinin Boyutları ve D_p - Pratik Birim Hacim Ağırlıkları

C GRUBU NUMUNELER (TMA NUMUNELERİ)													
NUMUNE	BOYUTLAR							Dp 'NİN BELİRLENMESİ					
	EN (cm)		BOY (cm)		KALINLIK (mm)			HAVADA AĞIRLIK (gr)	SUDA AĞIRLIK (gr)	DOYGUN KURU YÜZEYLİ AĞIRLIK (gr)	HACİM (cm3)	Dp (gr/cm3)	
	ÖLÇÜM	ORT.	ÖLÇÜM	ORT.	ÖLÇÜM		ORT.						
C-1	18.0	18.2	50.0	50.0	61.44	61.05	60.66	61.30	13554	8018	13566	5548	2.443
	18.2		50.0		62.00	61.18	61.26						
	18.3				62.32	60.45							
C-2	18.2	18.1	50.0	50.0	62.57	62.05	61.47	61.79	13330	7825	13345	5520	2.415
	18.0		50.0		63.10	61.30	60.54						
	18.0				61.56	61.75							
C-3	18.2	18.1	49.6	49.6	69.14	70.95	69.05	69.88	14912	8741	14932	6191	2.409
	18.0		49.6		71.60	70.00	68.38						
	18.1				71.07	68.88							
C-4	18.0	18.0	49.6	49.6	73.04	70.35	74.91	72.58	15347	9005	15361	6356	2.415
	18.0		49.6		72.12	70.92	72.25						
	18.0				72.35	74.69							
C-5	18.4	18.2	49.7	49.6	64.60	62.68	64.53	64.07	13906	8229	13916	5687	2.445
	18.0		49.5		63.87	64.31	64.86						
	18.2				62.42	65.28							
C-6	18.1	17.9	49.9	50.0	68.25	69.79	71.40	69.85	14592	8535	14615	6080	2.400
	17.8		50.0		68.81	70.02	70.82						
	17.9				70.94	68.75							
C-7	18.2	18.2	49.7	49.6	73.80	74.38	73.79	73.81	15838	9276	15858	6582	2.406
	18.2		49.5		74.74	71.92	72.84						
	18.3				77.09	71.94							
C-8	18.3	18.1	50.0	49.9	68.41	64.56	68.88	67.44	14347	8398	14359	5961	2.407
	18.1		49.8		68.94	64.98	66.81						
	18.0				66.91	70.00							
C-9	18.0	18.0	49.8	49.8	68.47	66.14	68.50	67.72	14587	8600	14599	5999	2.432
	18.0		49.7		67.82	66.80	67.15						
	18.1				68.98	67.90							
C-10	18.0	18.1	49.8	49.8	64.12	65.82	64.47	65.25	13904	8143	13920	5777	2.407
	18.2		49.7		66.16	63.32	65.65						
	18.0				66.25	66.17							
C-11	18.2	17.9	49.9	50.0	61.06	63.02	64.09	62.81	13627	8075	13636	5561	2.450
	18.0		50.0		62.08	64.08	63.25						
	17.6				63.00	61.89							
C-12	18.1	18.1	49.9	50.0	65.71	65.96	66.63	66.70	14600	8622	14607	5985	2.439
	18.1		50.0		68.24	65.28	65.79						
	18.0				69.00	67.02							
C-13	18.0	18.0	50.1	50.2	70.32	71.84	72.64	71.22	15348	9046	15358	6312	2.432
	18.0		50.3		71.94	70.38	70.06						
	18.0				71.63	70.92							

Tablo B.4: Modifiye Bitümlü Aşınma Numunelerinin Boyutları ve D_p - Pratik Birim Hacim Ağırlıkları

D GRUBU NUMUNELER (MODİFİYE BİTÜMLÜ AŞINMA NUMUNELERİ)													
NUMUNE	BOYUTLAR							D _p 'NİN BELİRLENMESİ					D _p (gr/cm ³)
	EN (cm)		BOY (cm)		KALINLIK (mm)			HAVADA AĞIRLIK (gr)	ŞUDA AĞIRLIK (gr)	DOYGUN KURU YÜZEYLİ AĞIRLIK (gr)	HACİM (cm ³)		
	ÖLÇÜM	ORT.	ÖLÇÜM	ORT.	ÖLÇÜM		ORT.						
D-1	17.9	18.0	49.8	49.9	53.0	51.1	54.4	10893	6305	10902	4597	2.370	
	18.0		50.0		53.1	52.6	52.3						
	18.0				53.2	53.1							
D-2	17.6	17.8	49.4	49.5	52.5	51.9	52.8	10846	6263	10851	4588	2.364	
	17.9		49.5		54.1	54.0	52.2						
	18.0				54.0	53.6							
D-3	18.0	18.0	49.8	49.8	52.8	52.2	52.0	10732	6178	10742	4564	2.351	
	18.0		49.8		53.0	52.0	51.7						
	18.0				52.9	51.8							
D-4	18.0	18.0	49.9	50.0	52.7	53.8	53.6	11078	6412	11090	4678	2.368	
	18.0		50.1		52.6	51.7	53.5						
	18.1				50.8	53.1							
D-5	18.1	18.2	49.3	49.2	52.5	51.6	53.6	11046	6388	11058	4670	2.365	
	18.2		49.1		53.3	52.3	52.0						
	18.4				52.9	53.7							
D-6	18.0	17.8	49.5	49.6	53.3	53.3	53.1	10782	6227	10804	4577	2.356	
	17.9		49.7		53.4	52.8	52.8						
	17.6				53.6	52.7							
D-7	18.3	18.4	49.8	49.7	52.0	52.6	52.2	11162	6465	11175	4710	2.370	
	18.4		49.5		52.4	53.1	51.5						
	18.5				52.7	52.2							
D-8	17.7	17.8	49.8	49.9	51.7	53.7	52.5	10715	6185	10725	4540	2.360	
	17.8		50.0		52.0	52.4	51.1						
	17.8				51.4	52.6							
D-9	17.8	17.7	50.0	50.0	52.6	54.0	52.4	10765	6224	10780	4556	2.363	
	17.7		50.0		51.1	53.6	51.8						
	17.7				53.5	52.0							
D-10	18.1	18.1	50.0	49.9	51.8	51.7	52.5	10883	6284	10898	4614	2.359	
	18.0		49.8		50.0	51.4	51.5						
	18.2				51.4	52.2							
D-11	18.2	18.4	49.5	49.5	53.2	51.6	51.7	11298	6535	11316	4781	2.363	
	18.4		49.5		53.9	53.4	54.8						
	18.5				55.6	55.7							
D-12	17.9	17.9	50.0	50.0	55.4	52.8	55.3	10868	6279	10891	4612	2.356	
	17.9		50.0		53.3	52.0	52.6						
	17.9				52.5	51.2							
D-13	18.0	18.1	49.6	49.6	48.7	51.8	50.3	10435	5993	10449	4456	2.342	
	18.1		49.5		49.2	53.3	48.7						
	18.2				47.9	50.4							

ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında Tokat Niksar’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Niksar’da tamamladı. 1990 yılında girdiği Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden 1994’te mezun oldu. Aynı yıl, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Mühendisliği programında yüksek lisans öğrenimine başladı. 1995 yılında Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’ne araştırma görevlisi olarak atandı. 1998 yılında yüksek lisans öğrenimini tamamladı. Aynı yıl, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Mühendisliği programında doktora öğrenimine başladı. Doktora öğrenimini tamamlamak üzere, kadrosu 2000 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne aktarıldı. 2000-2002 yıllarında askerlik görevini yaptı. Halen, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.