

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**AKMA TEKERLEK İZİ OLUŞUMUNUN SONLU
ELEMENLAR METODU İLE MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOLUNAY TOPÇUOĞLU

DENİZLİ, ARALIK – 2016

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**AKMA TEKERLEK İZİ OLUŞUMUNUN SONLU
ELEMENLAR METODU İLE MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOLUNAY TOPÇUOĞLU

DENİZLİ, ARALIK – 2016



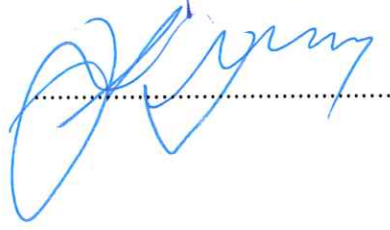
KABUL VE ONAY SAYFASI

Dolunay Topçuoğlu tarafından hazırlanan “**Akma Tekerlek İzi Oluşumunun Sonlu Elemanlar Metodu İle Modellenmesi**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **27.12.2016** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Prof. Dr. Yetiş Şazi MURAT
Pamukkale Üniversitesi
Üye
Yrd. Doç. Dr. Fatih ÇETİŞLİ
Pamukkale Üniversitesi
Üye
Doç. Dr. Ali TOPAL
Dokuz Eylül Üniversitesi


.....

.....

.....

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun **25.01.2017**.. tarih ve **04124**..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.


.....

Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

DOLUNAY TOPçUOğLU



ÖZET

**AKMA TEKERLEK İZİ OLUŞUMUNUN SONLU ELEMANLAR
METODU İLE MODELLENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
DOLUNAY TOPÇUOĞLU
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. YETİŞ ŞAZI MURAT)

DENİZLİ, ARALIK - 2016

Türkiye’de ulaşım modları içinde yük ve yolcu taşımacılığı için çoğunlukla karayolu ulaşımı tercih edilmekte olup üstyapı tipi olarak esnek kaplamalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu durumdan dolayı esnek kaplamaların kullanım ömrünün uzatılması, oluşabilecek bozulmaların önüne geçilmesi önem taşımaktadır. Tekerlek izi kaplama tabakalarında yaygın olarak görülen bir bozulma şeklidir. Bu çalışmada kaplama malzemesi karışımından kaynaklı, akma tekerlek izi, sonlu elemanlar metodu kullanılarak ANSYS programında modellenmeye çalışılmıştır.

Model iki boyutlu bir geometrik alan kullanılarak oluşturulmuştur. Öncelikle viskoelastik bir malzeme olan asfalt kaplamanın malzeme özellikleri kullanılarak malzeme tanımı yapılmıştır. Daha sonra geometrik alan sonlu elemanlara bölünerek ağ sistemi oluşturulmuştur. Modele çizgisel bir yükleme yapılarak oluşan tekerlek izi derinlikleri incelenmiştir.

Bu çalışmada, farklı elastisite modüllerinde, farklı sıcaklıklarda, farklı yük miktarlarında ve farklı yük tekrarlarında esnek kaplamanın nasıl davrandığı incelenmiştir. Bu parametrelerin tekerlek izine ne yönde etkisi olduğu görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: Akma tekerlek izi, sonlu elemanlar metodu, esnek kaplamalar, viskoelastik malzeme

ABSTRACT

**FLOW RUTTING MODELING WITH FINITE ELEMENT METHOD
MSC THESIS
DOLUNAY TOPÇUOĞLU
PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
CIVIL ENGINEERING
(SUPERVISOR: PROF. DR. YETİŞ ŞAZİ MURAT)
DENİZLİ, DECEMBER 2016**

Highways mostly preferred in Turkey for freight and passenger transport between transportation modes and flexible pavements are common in use. Therefore extending the expected life of flexible pavements is important to prevent the deteriorations. Rutting is one of the permanent deformation type of deterioration which can be seen widely especially in hot weather and heavy loading conditions. In this study, flow rutting which is arising from pavement material mixture, modelled with finite element method with using ANSYS.

Two-dimensional model used to forming the problem geometry. First of all, material description of asphalt pavement which show viscoelastic property is transferred to the program. Then problem geometry is divided to finite element to generating mesh system. Rutting depth is computing under the linear line loading.

In this study, behaviour of flexible pavement is examined under different young's modulus, different temperature, different loading and different load repetition conditions. These parameters are examined in how to affect the rutting of flexible pavements.

KEYWORDS: Flow rutting, finite element method, flexible pavement, viscoelastic material

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
KISALTMALAR	ix
ÖNSÖZ	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Problemin Tanımı	2
1.2 Tezin Amacı	3
2. TEKERLEK İZİ	6
2.1 Giriş	6
2.2 Bozulma çeşitleri	6
2.2.1 Çatlamlar	6
2.2.2 Ayrışmalar	8
2.2.3 Malzemeden dolayı oluşan bozulmalar	9
2.2.4 Şekil değiştirmeden kaynaklı bozulmalar	9
2.3 Tekerlek izi	11
2.3.1 Tekerlek izi oluşumuna sebep olan faktörler	11
2.3.2 Tekerlek izi çeşitleri.....	16
2.3.2.1 Yapısal tekerlek izi	17
2.3.2.2 Aşınma tekerlek izi	18
2.3.2.3 Oturma tekerlek izi	18
2.3.2.4 Akma tekerlek izi	19
3. ASFALT KAPLAMANIN VİSKOELASTİK YAPISI	20
3.1 Viskoelastisitenin tanımı	20
3.1.1 Hooke Kanunu	22
3.1.2 Newton Kanunu	23
3.1.3 Elastik şekil değiştirme	24
3.1.4 Viskoelastik şekil değiştirme	24
3.2 Asfalt kaplamanın düşük hız ve yüksek sıcaklıkta davranışı	25
3.3 Asfalt kaplamanın yüksek hız ve ortalama sıcaklık altındaki davranışı	25
3.4 Asfalt kaplamanın düşük sıcaklıktaki davranışı	25
3.5 Asfalt kaplamanın zamana bağlı şekil değişimi	26
4. YÖNTEM	28
4.1 Sonlu elemanlar metodu	28
5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ	32

5.1	Temel alınan model koşulları	32
5.2	Model Geometrisinin Oluşturulması	34
5.3	Sonlu Eleman Seçimi	35
5.4	Malzeme tanımlanması.....	35
5.5	Geometrik modelin elemanlara ayrılması	39
5.6	Uygulanacak yükün ve sınır şartlarının belirlenmesi	39
5.7	Sonlu elemanlar metodu analiz sonuçları.....	43
5.7.1	Birinci veri seti için tekerlek izi miktarları.....	43
5.7.2	İkinci veri seti için analiz sonuçları	47
5.7.3	Farklı sıcaklıklar için kaplama kalınlığının artışının tekerlek izine etkisi.....	53
5.7.4	Farklı yük miktarlarının tekerlek izine etkisi.....	57
5.8	Sonuçların değerlendirilmesi.....	59
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER	63
7.	KAYNAKLAR.....	65
8.	ÖZGEÇMİŞ	67

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Esnek kaplama tabakasında oluşan yüksek şiddette timsah sırtı çatlak (Sealco Sealcoating)	7
Şekil 2.2 : Esnek kaplama tabakasında oluşan çukurlaşma (SABLE Asphalt).	8
Şekil 2.3 : Esnek kaplama tabakasında oluşan soyulma / sökülme (Asphalt İnstitute)	9
Şekil 2.4 : Esnek kaplama tabakasında oluşan yüksek şiddette tekerlek izi (Pavement Maintenance And Rehabilitation 2011)	10
Şekil 2.5 : Gezinti miktarının tekerlek izine etkisi (Teng ve diğerleri (2008)).	14
Şekil 2.6 : Yapısal tekerlek izi	17
Şekil 2.7 : Aşınma ve oturma tekerlek izi	18
Şekil 2.8 : Akma tekerlek izi.....	19
Şekil 3.9 : Viskoelastik malzemenin hızlı ve yavaş yükleme koşulları altında şekil değişimi.....	21
Şekil 3.10 : Elastik ve plastik malzemenin zamana bağlı şekil değişimi.....	21
Şekil 3.11 : Viskoelastik malzemenin zamana bağlı şekil değişimi	21
Şekil 3.12 : Hooke Cismi ve Hooke Cisminin gerilme- şekil değiştirme grafiği	22
Şekil 3.13: Newton Cismi ve gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	23
Şekil 3.14: Elastik şekil değiştirme eğrisi	24
Şekil 3.15: Viskoelastik şekil değiştirme (ΔL_v).....	24
Şekil 3.16: Asfalt kaplamasında tekrarlı yükleme ile oluşan deformasyon eğrisi	26
Şekil 3.17: Kaplama malzemesinin tekrarlı yükler altındaki davranışı (KGM, 2008).....	27
Şekil 4.18 : Farklı sonlu eleman şekilleri (ANSYS 14.0 Help)	30
Şekil 5.19: Fransız tekerlek izi cihazının görünüşü (LCPC) (Kutluhan 2008) .	33
Şekil 5.20: Fransız tekerlek izi deney cihazında kullanılan numuneler.....	33
Şekil 5.21: Modelde temel alınan numune kesiti	34
Şekil 5.22: Model geometrisinin sonlu elemanlara ayrılmış hali.....	34
Şekil 5.23: PLANE183 eleman geometrisi (ANSYS 14.0 Help)	35
Şekil 5.24: ANSYS curve fitting (eğri uydurma) modeli ile malzeme tanımı yapılması	37
Şekil 5.25: ANSYS curve fitting modeli ile oluşturulmuş prony katsayıları tablosu	38
Şekil 5.26: Lastik temas alanının şematik olarak gösterimi (Xie ve Zheng, 2003).....	39
Şekil 5.27: Lastik temas alanı gösterimi a) Gerçek lastik temas alanı b) Eşdeğer lastik temas alanı	40
Şekil 5.28: Model geometrisine yük uygulanan kısım ve sınır şartları.....	41
Şekil 5.29: Eşdeğer yükleme varsayımı şeması (Zhu ve Sun 2013)	42
Şekil 5.30: E=2800 Mpa için yük tekrar sayısına göre oluşan tekerlek izi miktarı	44

Şekil 5.31: Tüm elastisite modülleri için tekerlek izinin yük tekrarına göre değişimi	45
Şekil 5.32: E=2800 MPa ve 5000 yük tekrarı için oluşan tekerlek izi profili...45	45
Şekil 5.33: E=2800 MPa ve 5000 yük tekrarı için oluşan tekerlek izi profilinin vektörel gösterimi.....	46
Şekil 5.34: Malzemenin yükleme yapıldıktan sonraki hali	47
Şekil 5.35: 100°F sıcaklıkta 66N/mm'lik yükleme ile 100 tekrar yapıldığında oluşan deformasyon.....	48
Şekil 5.36: 100°F sıcaklıkta 66 N/mm'lik yükleme ile 100 tekrar yapıldığında oluşan deformasyonun vektörel gösterimi	48
Şekil 5.37: 100°F sıcaklıkta 66 N/mm'lik yükleme ile 5000 tekrar yapıldığında oluşan deformasyon.....	49
Şekil 5.38: 100°F sıcaklıkta 66 N/mm' lik yükleme ile 5000 tekrar yapıldığında oluşan deformasyonun vektörel gösterimi	49
Şekil 5.39: 130°F Sıcaklık İçin Tekerlek İzi Derinliği	50
Şekil 5.40: 100°F Sıcaklık İçin Tekerlek İzi Derinliği	51
Şekil 5.41: 70°F Sıcaklık İçin Tekerlek İzi Derinliği	51
Şekil 5.42: 40°F Sıcaklık İçin Tekerlek İzi Derinliği	52
Şekil 5.43: 100°F için 4000 tekrar yapıldığında oluşan deformasyon	53
Şekil 5.44: 100°F için 4000 tekrar yapıldığında oluşan deformasyonun vektörel gösterimi.....	54
Şekil 5.45: Kaplama kalınlığının tekerlek izine etkisi (Pirabarooban ve diğ. 2003).....	56
Şekil 5.46: 130°F için 99N/mm' lik bir yükleme ve 100 tekrar ile oluşan deformasyon	57
Şekil 5.47: 130°F için 99N/mm' lik bir yükleme ve 100 tekrar ile oluşan deformasyonun vektörel gösterimi.....	57
Şekil 5.48: Fransız tekerlek izi cihazı ile yapılan deneyden elde edilen numune görünüşleri (Kutluhan 2008).....	59
Şekil 5.49: Aşınma numunelerinde oluşan ortalama tekerlek izi miktarları grafiği (Kutluhan 2008).....	60

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Tekerlek izi sınıflandırması (AASHTO 1986)	11
Tablo 2.2 : Asfalt kaplamanın yük tekrarı ve sıcaklığa bağlı değişimi (Zhu ve Sun 2013)	13
Tablo 2.3 : Tekerlek izi derinliğinin durma noktasına göre değişimi (Juhasz 2005).....	15
Tablo 5.4: Fransız tekerlek izi cihazı özellikleri (Kutluhan ve Ağar 2004)....	32
Tablo 5.5: Prony katsayılarını elde etmek için kullanılan birinci veri seti (20 ⁰ C sıcaklıkta yapılan yorulma deneyinden elde edilmiştir.) (Mulungye ve diğ. 2007)	36
Tablo 5.6: Prony katsayılarını elde etmek için kullanılan ikinci veri seti (Kaloush 2002).....	37
Tablo 5.7: Birinci veri seti için elastisite modülü ve yük tekrarına göre tekerlek izi miktarları (mm)	43
Tablo 5.8: Sıcaklık ve yük tekrar sayısına göre tekerlek izi miktarı.....	50
Tablo 5.9: 7 cm kalınlık için farklı sıcaklıklarda tekerlek izi derinlikleri (mm)	54
Tablo 5.10: 5 ve 7 cm kalınlıklar arasındaki tekerlek izi değişiminin yüzde (%) cinsinden ifadesi	55
Tablo 5.11: %10'luk yük artışında tekerlek izi miktarı	58
Tablo 5.12: %50'lik yük artışında tekerlek izi miktarı	58
Tablo 5.13: Aşınma numunelerinde oluşan ortalama tekerlek izi derinlikleri (Kutluhan 2008)	59
Tablo 5.14: Sonlu elemanlar analizinde, ikinci veri setine, göre 66 N/mm' lik yüklemde farklı sıcaklıklar için elde edilen tekerlek izi derinlikleri ile LCPC deney sonuçları arasındaki korelasyon katsayıları	61
Tablo 5.15: Sonlu elemanlar analizinde, birinci veri setinden, 66 N/mm' lik yüklemde, farklı elastisite modüllerine göre elde edilen tekerlek izi derinlikleri ile LCPC deney sonuçları arasındaki korelasyon katsayıları	62

SEMBOL LİSTESİ

σ	:	Gerilme
E	:	Elastisite Modülü
ε	:	Şekil Değişirme
τ	:	Kayma Gerilmesi
η	:	Viskozite
γ	:	Kayma Şekil Değişirmesi
$[K]$:	Rijitlik Matrisi
$[Q]$:	Deplasman Matrisi
$[F]$:	Kuvvet Matrisi
$\sigma(t)$:	Zamana Bağlı Gerilme Fonksiyonu
$Y(t)$:	Relaksasyon Fonksiyonu
ai	:	Prony Katsayısı
T_i	:	Prony Gecikme Zamanı Katsayısı
$\dot{\varepsilon}$:	Viskoelastik Şekil Değişirme
ai	:	Prony Katsayısı
T_i	:	Prony Gecikme Zamanı Katsayısı

KISALTMALAR

LCPC : Fransız Tekerlek İzi Deney Cihazı
SEM : Sonlu Elemanlar Metodu

ÖNSÖZ

Bu çalışma Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ulaştırma Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez çalışmam sırasında yardımını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Yetiş Şazi MURAT' a, Tezime olan katkılarından dolayı Doç. Dr. Ali TOPAL ve Yrd. Doç. Dr. Fatih ÇETİŞLİ' ye teşekkür ederim.

Tez dönemi boyunca yanımda olan çalışma arkadaşlarım Arş Gör. Özge ERSU, Arş. Gör, Ümit Sakine DEMİR, Arş Gör. Ahmet DEMİR' e ve Pamukkale üniversitesi çalışanlarına teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan annem Hülya TOPÇUOĞLU, babam Telat TOPÇUOĞLU ve kardeşlerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez dönemi boyunca karşılaştığım tüm zorluklarda ayağa kalkmamı sağlayan Tanfer ZENGİN'e teşekkür ederim.

Aralık 2016

Dolunay TOPÇUOĞLU

(İnşaat Mühendisi)

1. GİRİŞ

Karayolu ulaşımı dünyada ve ülkemizde en çok tercih edilen ulaşım biçimidir. Yük taşımacılığında karayolunun kullanılıyor olması yol üst yapısı bozulmalarında çok büyük bir etkidir. Taşıt trafiğindeki devam eden artışlar nedeniyle mevcut üstyapılar zaman zaman yetersiz kalmaktadır. Özellikle ağır taşıt trafiğinin yol üst yapısı üzerinde ciddi zararları olmaktadır.

Yol üst yapısı rijit, yarı rijit, karışık üstyapı ve esnek olmak üzere 4 farklı şekilde incelenebilir. Türkiye de en çok kullanılan üst yapı tipi esnek yol üstyapısıdır. Gerek esnek üstyapı konusunda bilgili teknik eleman çokluğu, gerekse makine parklarının esnek üstyapı imalatına uygun olmasından dolayı diğer seçeneklere göre daha çok tercih edilmektedir. Ancak bilindiği gibi her çeşit kaplamada trafik etkisi iklim şartları, don etkisi, yol inşaatının yapıldığı koşullar, kullanılan malzemenin niteliği, drenaj problemleri, zayıf zemin tabakası, üstyapı mukavemetinin düşük olması, bakım ve onarım işlemlerinin düzenli yapılmaması gibi etkenlerden dolayı bozulmalar meydana gelmektedir. Asfalt betonunda meydana gelen bu bozulmalar temel olarak; kalıcı şekil değiştirmeler, çatlak oluşumları, sudan kaynaklı soyulma ve ayrışmalar şeklinde gruplandırılır. Bu bozulmalar arasında şekil değişiminden kaynaklı tekerlek izi oluşumu ülkemizde özellikle yaz sıcaklıklarının yüksek olduğu ve ağır trafik hacmine maruz yollarda en yaygın olarak görülen bozulma türüdür.

Tekerlek izi oluşumunun, nem hasarı, aşınma ve tekrarlı trafik yükleri, sıcak karışım asfaltın temelini oluşturan tabakaların zayıflaması gibi birçok nedeni olmasına karşın, başlıca iki ana sebebi vardır. Bunlardan birisi, zayıf alt tabakalardan kaynaklı bozulmalar, diğeri ise zayıf asfalt tabakadan kaynaklı bozulmalardır. Alt tabakalara bağlı olarak oluşan bozulmalar, üstyapı kalınlıklarının yetersiz olması ve üstyapı tabakalarında veya taban zemininde oluşan oturmalarla kaynaklıdır. Bitümlü tabakalara bağlı olarak oluşan bozulmalar ise; karışımda uygun stabilitenin sağlanamaması ve yoğun trafik kompozisyonu sonucunda kaplama tabakasının aşırı sıkışmadan kaynaklanır.

Asfalt kaplamalarda oluşan tekerlek izi yol boyunca düşey kalıcı deformasyonlar şeklinde görülürler. Tekerlek izi en yaygın görülen bozulma türlerindedir. Üstyapı yönetim sistemlerinin etkin şekilde kullanılabilmesi için uygun ve gerçeğe yakın bozulma modellerinin geliştirilmesi gerekmektedir. İnşaa edilen esnek üstyapıların veya serilen kaplamaların ömürleri bu modeller kullanılarak tahmin edilebilmekte ve ileriye dönük daha gerçekçi planlamalar yapılabilmektedir. Bu nedenle bu bozulma modellerinin geliştirilmesi oldukça önem arz etmektedir.

1.1 Problemin Tanımı

Asfalt kaplamalar sürücüler için trafikte güvenli ve konforlu sürüş sağlamalıdır. Ancak zamanla maruz kalınan aşırı yüklerden ve çevresel etkilerden dolayı kaplamalarda bozulmalar meydana gelmektedir. Dolayısıyla kaplamanın servis ömrü hızla azalmaktadır. Bu durumda trafik güvenliğini ciddi anlamda etkilemektedir.

Asfalt kaplamalı yollar, yapım bakım ve onarım yönünden yüksek maliyet gerektirmektedir. Özellikle tasarım ömrü açısından yirmi yıllık olarak tasarlanan bu yollar, birkaç sene sonra deforme olmakta ve bakım onarım gerektirmektedir. Asfalt kaplamalı yolların performansını artırmak amacıyla sürekli çalışmalar yapılmaktadır. Yol gövdesinde veya yol tabakasındaki deformasyon, kaplamanın formunu değiştirebilmektedir (Özcanan ve diğ. 2014).

Yol tabakalarında meydana gelen hasarın oluşmadan önlenmesi önem arz etmektedir. Yol üstyapısının çok yüksek maliyetlerle inşa edildiği düşünülürse servis ömrünün uzatılması ekonomik anlamda oldukça gereklidir. Dolayısıyla proje tasarımı esnasında, pratikte karşılaşılan yol üstyapısı bozulmaları göz önüne alınmalıdır.

Yol üstyapısı bozulmalarının sebeplerini belirlemek ve çözüm üretmek amacıyla birçok deneysel çalışma yapılmıştır. Ancak deneysel çalışmalarda karşılaşılan uygulama zorlukları bu durumu güç hale getirmektedir. Çünkü yol tasarımında malzeme yapısı, trafik yükü, çevresel faktörler, yapım ve bakım şartları gibi göz önünde bulundurulmuş birçok değişken mevcuttur. Tüm bu arazi

değişkenlerini laboratuvar ortamında bire bir uygulamak oldukça zordur. Bu nedenle elde edilmesi nispeten daha kolay ve pratik olan bazı deneysel verileri kullanarak bilgisayar programları aracılığıyla modelleme yapılması göz önünde bulundurulması gereken bir seçenektir.

Bu çalışmada ANSYS bilgisayar programı kullanılarak akma tekerlek izi oluşumunun sonlu elemanlar metoduyla modellenmesi amaçlanmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Tekerlek izi modellenmesi ile ilgili birçok modelleme tekniği kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. mekanik ampirik yöntemler, akma sayısı ile tekerlek izi duyarlılığı tahminleri, yapay zeka ile modellemeler, istatistik modeller ve sonlu elemanlar modeli yaygın kullanılan yöntemlerdir.

Zhu ve Sun (2013), asfalt kaplamalarda iki aşamalı viskoelastik-viskoplastik hasar oluşum modeli kullanarak mekanik tekerlek izi tahmini yapmışlardır. Bu çalışma için sonlu elemanlar modeli bir alt program yazılarak uygulanmıştır. Aynı zamanda farklı sıcaklık ve yükleme koşulları altında laboratuvarında tekerlek izi deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları sonlu elemanlar metoduyla simüle edilmiş modelle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak sonlu elemanlar metodunun tekerlek izi tahminini uygun hassasiyette yapılabildiği görülmüştür. Deney sıcaklığı arttıkça oluşan tekerlek izinin daha fazla olduğu görülmüştür. Uygulanan yük miktarı arttıkça da oluşan deformasyonlar beklenildiği üzere artmıştır.

Minkwan ve diğerleri (2009), üç katmanlı bir asfalt kaplama için sonlu elemanlar metodu ile gerilme ve şekil değiştirme analizi yapmışlardır. Modelde asfalt kaplama tabakasını lineer izotropik olarak kabul edip alt katmanların nonlineer olma durumuna göre şekil değiştirmeleri ve deformasyonları değerlendirmişlerdir.

Teng ve diğerleri (2008), çalışmalarında asfalt kaplamayı Ducker-Prager modeli ile viskoelastik malzeme olarak tanımlayarak gezinti mesafesinin tekerlek izini nasıl etkilediğini göstermiştir. Tekerlek yükü analiz boyunca sabit kabul edilmiş ve üniform olarak lastik temas alanına etki etmektedir. Bu çalışma aynı zamanda

zemin modülünün ve yük büyüklüğünün tekerlek izi derinliği oluşumunda büyük bir etkisi olduğunu ortaya koyarken, tekerlek hızı ve yük tekrarının tekerlek izi oluşumunda daha önemsiz olduğunu gözlemlemişlerdir.

Yang ve diğerleri (2011), çalışmalarında ABAQUS programında bulunan materyal kütüphanesindeki sünme oranı modelini kullanarak viskoelastik malzemeyi tanımlamaya çalışmıştır. Metal test kalıbına konularak sınırlandırılan numunenin, tekerlek izi deneyinde kullanılan tek katmanlı asfalt sistemin sınır koşullarından az etkilenmesi için numune kalınlığının ne kadar olması gerektiğini göstermiştir. Viskoelastik malzemenin numune kalınlığına göre davranışını incelemiştir.

Özcanan ve Akpınar (2014), Çalışmalarında farklı tekerlek ve aks konfigürasyonlarına göre esnek üstyapıda oluşan gerilmeleri sonlu elemanlar metodu kullanarak hesaplamışlardır. Farklı genişlikteki tekerlek ve aks şekillerinden dolayı oluşan yatay ve düşey gerilmelere göre en çok hasar verecek tekerleğin tekli ve tekil tekerlekler olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca motris tek dingilin de en çok hasarı veren dingil tipi olduğunu belirlemişlerdir.

Zhu ve diğerleri (2010), çalışmalarında asfalt kaplamayı ve kaplama temelini lineer elastik malzeme olarak seçmişlerdir. Ancak zemini Drucker-Prager akma kriterine göre modellemişlerdir. Düşey yüzey yükünün kaplama yüzeyine üniform olarak etki ettiği varsayılmıştır. Kaplamanın hangi bölgesinde gerilmelerin daha yüksek olduğunu incelemişlerdir. Asfalt kaplamanın orta kısımlarında yüzeyden 4-10 cm alttaki bölgede gerilmelerin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Karayollarımızda kullanılan bitümlü sıcak karışımlarda görülen bozulma türlerinin en önemlilerinden biri olan akma tekerlek izi oluşumunun yüklenme ve sıcaklık koşullarına bağlı olarak sonlu elemanlar metodu ile modellenmesi amaçlanmıştır.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde tekerlek izi oluşumunu en fazla etkileyen parametrelerin yüklenme koşulları iklim faktörü, alt tabakadan kaynaklı sorunlar ve kaplama imalatında kullanılan malzeme ve karışım oranları olduğu görülmüştür.

Şimdiye kadar yapılmış çalışmalar incelendiğinde tekerlek izi, yorulma, gerilme analizlerinde sonlu elmanlar metodunun sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Tekerlek izine etki eden birçok parametre bulunmaktadır. Ancak yapılan analizlerde

ve deneylerde tüm değişkenleri hesaba katabilmek çok mümkün olmamaktadır. Özellikle de asfalt malzemenin yükleme ve sıcaklıkla mekanik davranışının değiştii göz önünde bulundurulursa malzeme modellemesini gerçekçi bir şekilde yapmak önem kazanmaktadır.

Tekerlek izi ile ilgili çalışmalarda zaman zaman malzeme davranışı elastik ya da lineer izotropik kabul edilmiştir. Bazı çalışmalarda lastiğin kaplamaya temas ettiği temas yüzeyi, lastik genişlikleri, iç basınçları tekerlek ve aks konfigürasyonları dikkate alınmış ve bu durumlar arasında karşılaştırma yapılmıştır. Malzeme davranışının deformasyon ve gerilme üzerinde büyük bir etkisi olduğundan boşluk oranı, bitüm yüzdesi, agrega özellikleri gibi malzeme davranışını temel alan durumlar için de analizler yapılmıştır. Aşırı yükleme altında ya da yük tekrarı temel alınarak da yapılan çalışmalar mevcuttur. Tüm bu durumlarda tekerlek izi üzerinde etkisi olan parametrelerin farklı kombinasyonları kullanılmış olup hangi durumda, hangi parametrenin nasıl bir değişime sebep olduğu incelenmiştir.

Bu çalışmada akma tekerlek izi konusu ele alındığından, sadece asfalt kaplama tabakasındaki deformasyonlar incelenecektir. Akma tekerlek izi alt tabakalardan kaynaklı bir bozulma türü olmadığından, taban zemini dikkate alınmayacaktır. Dikkate alınacak parametreler ise akma tekerlek izine en çok etki eden parametreler olan; yük miktarı, yük tekrarı ve sıcaklık olarak seçilmiştir. Bununla birlikte, malzeme davranışı da sıcaklık değişimleri ve yükleme koşullarına göre değişkenlik gösteren viskoelastik malzeme olarak seçilmiştir.

Tezin genel amacı karayollarımızda kullanılan bitümlü sıcak karışımlarda görülen bozulma türlerinin en önemlilerinden biri olan akma tekerlek izi oluşumunun sonlu elemanlar metodu ile modellenmesidir.

2. TEKERLEK İZİ

2.1 Giriş

Her çeşit kaplamada; trafik etkisi, iklim şartları, don etkisi, yol inşaatının kötü hava koşullarında ve uygun olmayan mevsimde yapılması, kullanılan malzemenin uygun nitelikte olmaması, drenaj yetersizliği, zayıf zemin tabakası, üstyapı mukavemetinin düşük olması, bakım işlemlerinin çok geç yapılması veya ertelenmesi gibi etkenlerden dolayı çeşitli bozulmalar meydana gelir. Asfalt betonunda görülen bozulmalar; kalıcı şekil değiştirmeler, çatlak oluşumları, sudan kaynaklı soyulma ve ayrışmalar şeklinde olarak sınıflandırılır. Meydana gelen bu bozulmaların nedenlerini temel, alt temel ve taban zemininin taşıma gücü yetersizliği, trafiğin bozucu etkileri, iklim koşulları ve asfalt betonunun özellikleri olarak sıralanabilir.

2.2 Bozulma çeşitleri

Yol kaplamalarında görülen bozulmalar; kalıcı şekil değiştirmeler, çatlak oluşumları, sudan kaynaklı soyulma ve ayrışmalar şeklinde 4 ana grupta incelenebilir.

2.2.1 Çatlamalar

Asfalt kaplamada çatlamalar çeşitli şekillerde meydana gelebilirler. Çatlak çeşitlerini kılcal çatlaklar, timsah sırtı çatlakları, kenar çatlakları, ek yerinde meydana gelen çatlaklar, büzülme çatlakları enlemesine çatlaklar, yansıma çatlakları ve kayma çatlakları olarak sınıflandırabiliriz. Şekil 2.1' de çatlak şekillerinden biri olan timsah sırtı çatlak görülmektedir. Asfalt kaplamalarda oluşan çatlamalar genellikle iki grupta incelenirler. Bunlardan ilki ağır dingil yüklerinin çok sayıda geçmesi sonucunda oluşan trafik etkisi altındaki çatlamalardır. Bu çatlaklar yorulma

çatlakları olarak da adlandırılır ve tekerlek izi oluşumundan sonra kaplama tabakalarının zayıflamasıyla sıklıkla görülebilirler. İkincisi ise ısı ve sıcaklık değişimi gibi çevre etkilerine bağlı olan çatlaklardır. Asfalt kaplamanın gevrekleşip yumuşamasından dolayı kaynaklanır.



Şekil 2.1 : Esnek kaplama tabakasında oluşan yüksek şiddette timsah sırtı çatlak (Sealco Sealcoating)

2.2.2 Ayrışmalar

Ayrışmalar, iklim ve trafiğin mekanik etkileri sonucunda agrega tanelerinin koparak, kaplama yüzey bütünlüğünün bozulması şeklinde görülürler. Soyulmalar, kabarmalar, çukurlaşmalar, kopma ve sökülmeler görülen ayrışma türleridir. Şekil 2.2' de ayrışma şekillerinden biri olan çukurlaşma görülmektedir.



Şekil 2.2 : Esnek kaplama tabakasında oluşan çukurlaşma (SABLE Asphalt)

2.2.3 Malzemedan dolayı oluşan bozulmalar

Bitümlü kaplamalarda, kaplamayı meydana getiren agrega ve bitümlün özellikleri ve karışım oranlarındaki düzensizliklerden dolayı bu bozulmalar oluşabilir. Soyulmalar kabarmalar çukurlaşmalar kopma ve sökülmeler terlemeler agreganın cilalanması ve soyulması malzemedan kaynaklı bozulma türleridir. Şekil 2.3' de malzemedan kaynaklı bozulma türlerinden biri olan soyulma görülmektedir.



Şekil 2.3 : Esnek kaplama tabakasında oluşan soyulma / sökölme (Asphalt İnstitute)

2.2.4 Şekil değiştirmeden kaynaklı bozulmalar

Şekil değiştirmeler, kaplama yüzeyinin normal şekline ve yüzey kotuna göre değişmesidir.

Bu tür bozulmalar üstyapı tabakaların ve asfalt kaplama stabilitesinin yetersizliğinden kaynaklanmaktadır. Çünkü karışımın ya da diğer üstyapı tabakalarının stabilitesi, yük altındaki deformasyon direncidir. Stabilitenin yüksek olması toplam deformasyonun az olmasına, stabilitenin düşük olması ise toplam deformasyonun yüksek olmasına neden olur. Karışımında yüksek stabilite; düzgün bir granülometrik dağılım, pürüzlü köşeli agregalar ve iyi bir sıkıştırma ile sağlanır.

Ayrıca iklim şartları gibi çevresel etkiler kaplamanın elastik halden viskoz hale gelmesine yol açıp malzeme davranışını değiştirdiği için şekil değiştirmeden kaynaklı bozulmalara yol açar. Ağır taşıtlar ve kullanıcı hatalarının neden olduğu aşırı yüklü araçlar da kaplamada şekil değişikliğine sebep olan önemli etkenlerdendir. Şekil değiştirmeden kaynaklı bozulma türleri; tekerlek izi oluşumu, bozuk kaplama yüzeyi, yolun ondüle hale gelmesi ve kaplamanın çökmesi olarak 4 sınıfa ayrılabilir. Bu çalışmada bu bozulma türlerinden tekerlek izi üzerinde durulacağından tekerlek izi oluşumuna ve nedenleri geniş bir şekilde açıklanmıştır. Şekil 2.4’ de şekil değiştirmeden kaynaklı bozulma türlerinden tekerlek izi görülmektedir.



Şekil 2.4 : Esnek kaplama tabakasında oluşan yüksek şiddette tekerlek izi (Pavement Maintenance And Rehabilitation 2011)

2.3 Tekerlek izi

Tekerlek izi, sürüş konforuna ve güvenliğine etki eden ve taşıt tekerleklerinin yola temas ettiği kısımlarda, yol boyunca oluşan düşey kalıcı deformasyonlardır. Yol araştırmalarının başlıca odak noktalarından biri, güvenilir tekerlek izi tahmini ve tekerlek izini önlemedir (Yang ve diğ. 2009) . Çünkü tekerlek izi arttıkça zamanla yorulma çatlaklarının oluşmasına ve yolun tamamen kullanılmaz hale gelmesine sebep olmaktadır.

Tekerlek izi ile ilgili deneysel çalışmalar yapılsa da daha kısa sürede sonuç alınabilmesi açısından bilgisayar programları ile modellenmesi kolaylık sağlayacaktır.

Modelleme yapabilmek için öncelikle tekerlek izinin ne olduğunun kavranabilmesi ve sebep-sonuç ilişkisi içinde irdelenmesi gereklidir.

2.3.1 Tekerlek izi oluşumuna sebep olan faktörler

Bitümlü sıcak karışım her yüklendiğinde küçük miktarlarda oluşan geri dönüşümsüz deformasyonların toplamı kalıcı deformasyon olarak adlandırılır. Tekerlek izi oluşumu bu kalıcı deformasyonun en yaygın görülen şeklidir.

AASHTO' ya göre tekerlek izi derinliğine göre düşük orta ve yüksek olarak sınıflandırılmaktadır.

Tablo 2.1: Tekerlek izi sınıflandırması (AASHTO 1986)

Tekerlek izi sınıfı	Ortalama tekerlek izi derinliği
Düşük	6-13 mm
Orta	13-25 mm
Yüksek	>25 mm

Tekerlek izine sebep olan faktörlerin tespit edilmesi ve bunlara uygun çözümler üretilmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan araştırmalara göre esnek kaplamalarda tekerlek izine sebep olan başlıca faktörler; malzeme ve zemin yapısı yüksek sıcaklık, aşırı yüklü taşıtlar ve tekrarlı trafik yükleridir. Bunun

yanında lastik iç basıncına bağılı olarak temas yüzeyi ve kaplamaya iletilen basınç ve tekerleğin kaplamaya temas süresi de tekerlek izi oluşumunda diğerk faktörlerdir.

Sıcaklık ve yükleme hızı ile zamanı viskoelastik bir malzeme olan asfalt karışımının deformasyonunda büyük bir etkiye sahiptir. Asfalt karışımı düşük sıcaklıklarda kırılğan yüksek sıcaklıklarda ise yumuşak hale gelen bir malzemedir. Asfalt kaplamanın bozulmasındaki ana sebep olan sıcaklıktan kaynaklı bu değışim ‘sıcaklık hassasiyeti’ olarak adlandırılmaktadır (Al Hadidy, A.I.ve diğerkleri 2009). Dolayısıyla bu durum asfalt kaplamaları mevsim değışikliklerine daha duyarlı hale getirecektir.

Asfalt karışımlar mekanik karakteristikleri dolayısıyla yükleme süresi, yük miktarı ve sıcaklığa karşı hassastır. Asfalt karışımının zamana bağılı davranışı kaplama performansında büyük bir etkiye sahiptir. Bu durum sadece kalıcı deformasyonun değıl aynı zamanda yorulma çatlaklarına da sebep olur (Zhu ve Sun 2013). Zhu ve Sun (2013) yük tekrarı, yük miktarı ve sıcaklığa bağılı tekerlek izi deneyi gerçekleştirmişlerdir. Tablo 2.2’ de bu deneylerden elde edilen veriler görölmektedir. Deney sonuçlarından sıcaklık arttıkça, tekerlek izinin arttığı görölmektedir.

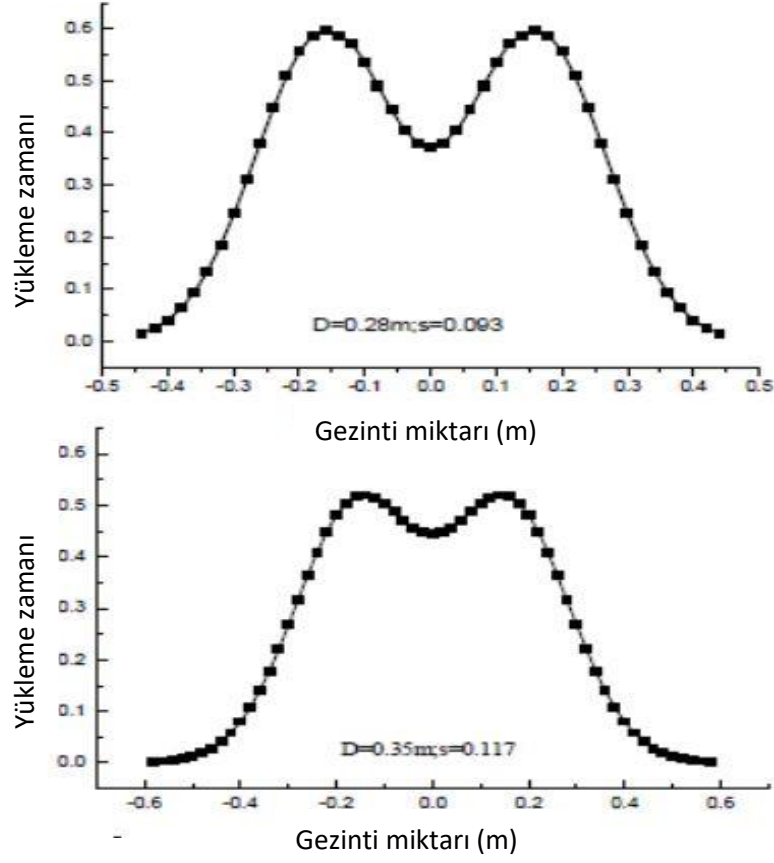
Tablo 2.2 : Asfalt kaplamamın yük tekrarı ve sıcaklığa bağlı değişimi (Zhu ve Sun 2013)

Yük tekrarı	Tekerlek izi deneyi sonuçları		
	40°C	50°C	60°C
0	0,00	0,00	0,00
70	0,20	0,26	0,35
140	0,30	0,39	0,52
210	0,37	0,49	0,64
280	0,42	0,56	0,72
350	0,46	0,62	0,81
700	0,60	0,83	1,10
1400	0,77	1,07	1,45
2100	0,87	1,23	1,73
2800	0,96	1,34	1,95
3500	1,03	1,44	2,15
4200	1,08	1,53	2,34
5040	1,13	1,62	2,56

Asfaltın viskoelastik yapısından dolayı aynı yüklü hızlı hareket etmekte olan bir araç, yavaş hareket etmekte olan araca göre kaplamaya daha az zarar verecektir.

Asfalt tabakasının kalınlığı, tekerlek izine etki eden faktörlerden bir tanesidir. İnce bir asfalt tabakasında yüzeye gelen tüm yükler etkileri yeterince azalmadan alt tabakalara iletileceğinden, deformasyon daha fazla olacaktır. Kalın bir asfalt tabakası ise rijitlik anlamında avantaj sağlayacağından dolayı alt tabakaya iletilen gerilmeler daha az olacaktır. Ancak üstyapı kalınlığı açısından ekonomik koşullar da göz önünde bulundurularak tasarım yapılmalıdır.

Teng ve diğerleri (2008), tekerlek izinin asfalt kaplamalardaki etkilerini anlayabilmek amacıyla, yirmi beş farklı durum için analizler yapmıştır. Tekerlek yükünün büyüklüğü, gezinti aralığı, tekerlek yükünün hızı, yük tekrar sayısı ve taban modülü faktörleri göz önüne alınmıştır. Tekerlek yükü büyüklüğü ve taban modülünün tekerlek izi oluşumunda büyük etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Gezinti aralığının, tekerlek yükü büyüklüğü ve taban modülü parametrelerinden sonra büyük etkileri olduğu görülmüştür. Fakat yükleme hızının ve yük tekrarının tekerlek izi oluşumunda diğer üç parametreye nispeten daha önemsiz olduğu görülmüştür.



Şekil 2.5 : Gezinti miktarının tekerlek izine etkisi (Teng ve diğerleri (2008))

Şekil 2.5' den görüldüğü üzere gezinti miktarı azaldıkça tekerlek izi derinliği artmaktadır. Sürekli aynı noktadan geçen taşıtlar, aynı yüzeye tekrarlı yük uyguladıklarından dolayı, yük daha az bir alana yayılacağından deformasyon miktarı fazla olacaktır.

Yüksek sıcaklıklarda, yükün tekerlek izi oluşumuna etkisi çok büyüktür. Özellikle de ağır taşıtların neden olduğu aşırı yükleme koşullarında kaplamada tekerlek izi oluşumu daha hızlı bir şekilde artar. Lastik basıncı araç yüküne adapte olur; fazla yük, fazla lastik basıncı demektir.

Lastik iç basıncına lastik tipine ve lastik sırt desenine bağlı olarak da yüzeye iletilen basınç farklılık gösterecektir. Xie ve Zheng (2003), lastik tipinin kaplamaya olan etkisini araştırmış ve enine sırt desenine sahip lastik tekerleklerin boyuna sırt desenine sahip lastik tekerleklerden daha fazla yer değiştirmeye sebep olduğunu görmüşlerdir.

Yüksek iç basınca sahip bir lastik tekerlek düşük iç basınca sahip lastik tekerlekten daha az bir temas yüzeyine sahiptir. Dolayısıyla temas yüzeyi iletilen basıncın büyüklüğünü etkileyeceğinden aracın hızı ya da ortam sıcaklığına göre kaplama üzerinde oluşan gerilmeler farklılık gösterecektir. Genel olarak lastik iç basıncında görülen artış tekerlek izinde de artışa sebep olacaktır.

Trafiğin yavaşladığı otobüs durakları, kavşak kesimleri gibi bölgelerde yüklenme süresinin artmasından dolayı tekerlek izi oluşumu sıklıkla görülmektedir. Aşağıdaki Tablo 2.3’de durma noktasına olan mesafelere göre tekerlek izi derinliği arasındaki ilişki açıkça görülmektedir. Durma mesafesine yaklaştıkça tekerlek izi derinliği artmaktadır.

Tablo 2.3 : Tekerlek izi derinliğinin durma noktasına göre değişimi (Juhasz 2005)

Durma çizgisine olan mesafe (m)	İç tekerlek izi (mm)	Dış tekerlek izi (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

Walubita ve Ven (2000), poisson oranının gerilme şekil değiştirmede özellikle kalın kaplama tabaklarından önemli bir etkisinin olmadığını görmüşlerdir. 20mm’ lik ince kaplama tabakalarında ise etkinin önemli olduğu görülmüştür.

2.3.2 Tekerlek izi çeşitleri

Tekerlek izi oluşumunun çevre ve iklim koşulları, trafik yükleri, malzeme ve karışım özellikleri gibi sebepleri olmasına rağmen iki ana sebep altında tekerlek izi çeşitlerini toplayabiliriz.

Bunlardan birincisi zayıf alt tabakadan kaynaklı deformasyonlardır. Bilindiği üzere asfalt kaplamalar esnek bir yapıya sahip olup zemin şekline kolaylıkla uyum sağlamaktadırlar. Zayıf alt tabakaya sahip bir esnek kaplamada tekrarlı yüklerin uygulanması sonucu temel ya da doğal zeminde deformasyonların meydana gelmesi sonucu tekerlek izi oluşmaktadır. Yani deformasyon asfalt tabakada değil, daha çok alt tabakalarda yani temel veya doğal zeminde oluşmaktadır. Mukavemeti yüksek kaplama malzemeleriyle bu tip tekerlek izi azaltılabilmesine rağmen bu durum bir malzeme probleminden çok yapısal bir problem olarak dikkate alınır. Nedeniyse trafik yüklerinden kaynaklı gerilmeleri, asfalt tabakası altındaki temel tabakası için mukavemetli hale getirecek bir kaplama kalınlığının mevcut olmamasıdır. Deformasyonlar daha çok asfalt tabakası altındaki katmanlarda oluşur. Alt tabakalara bağlı olarak oluşan bu bozulmalar, alt tabaka kalınlıklarının yetersiz olması ve alt tabakalarda ya da taban zemininde oluşan oturmalarından dolayıdır.

İkinci tür tekerlek izi çeşidiyse zayıf asfalt tabakalarından meydana gelen deformasyonlardan kaynaklı tekerlek izidir. Bu ikinci durumda tekerlek izi asfalt karışımının tekrarlı ağır yüklere karşı koyamaması sonucu oluşur. Asfalt karışımının yeterli kayma mukavemetine sahip olmamasındandır. Zayıf bir karışımda her bir ağır araç geçişinde küçük ama kalıcı deformasyonlar oluşur. Bu deformasyonlar da karışımın kenarlara ve aşağı doğru yer değiştirmesine neden olarak tekerlek izi oluşumuna neden olur.

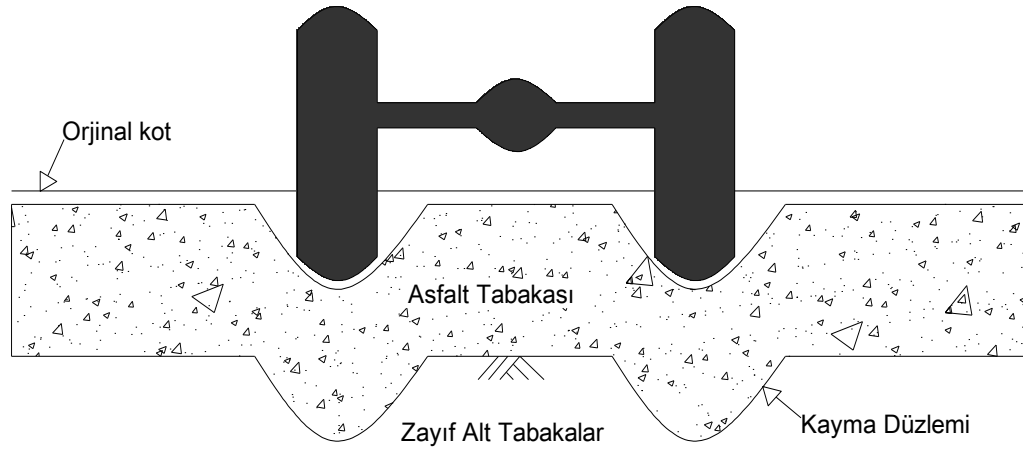
Tekerlek izi asfaltın yüzey tabakasında oluşabilir, ancak yüzey tabakasında oluşan tekerlek izi yüzeyin altındaki asfalt tabakasından kaynaklanabilir. Bitümlü tabakalara bağlı olarak oluşan bozulmalar karışımda uygun stabilitenin sağlanamaması ve yoğun trafik kompozisyonu sonucunda kaplamadaki aşınma tabakasında görülen aşırı sıkışmadandır.

Tekerlek izi çeşitleri temel olarak iki grupta incelenmesine rağmen 4 gruba ayrılarak özelleştirilebilir.

2.3.2.1 Yapısal tekerlek izi

Yapısal tekerlek izi asfalt tabakanın altındaki tabakaların ya da taban zemininde oluşan deformasyonların sonucudur. Uygulanan yükten dolayı oluşan gerilmelerin malzeme dayanımını aşmasından kaynaklanmaktadır. Bu tekerlek izi çeşidinde, tekerlek izinin etrafında yükseltmeler oluşmaz (Verstraeten 1995).

Yapısal tekerlek izi oluşumu daha çok var olan trafik koşullarına uygun dizayn edilmemiş üstyapılarda görülür. Aynı zamanda kalitesiz malzeme kullanımından, donma ve çözülme olayına karşı önlem alınmamasından, malzemenin yeterli derecede sıkıştırılmamasından, yetersiz drenajdan da kaynaklanabilir (Verstraeten 1995).



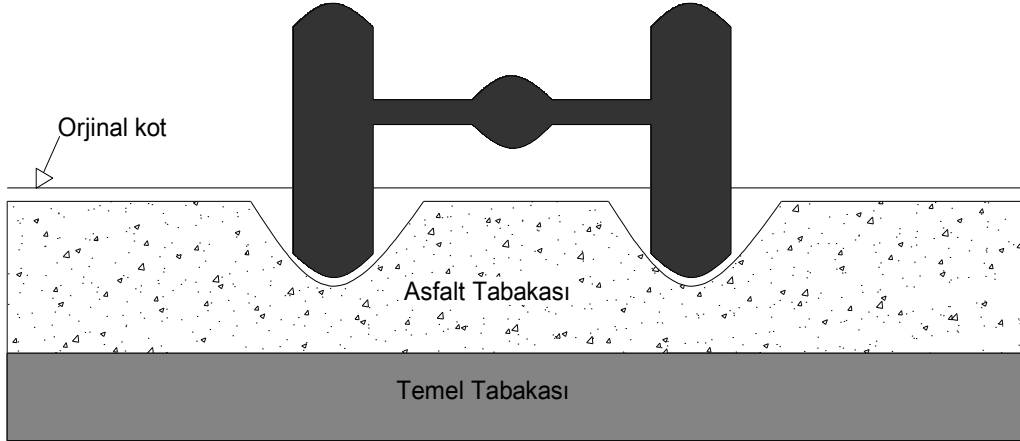
Şekil 2.6 : Yapısal tekerlek izi

2.3.2.2 Aşınma tekerlek izi

Aşınma tekerlek izi yüzeysel bir tekerlek izidir. Kışın çivili tekerleklerin kullanımından dolayı kaplama yüzeyinde bulunan agregaların aşınması sonucu aşınma tekerlek izi oluşmaktadır. Özellikle soğuk iklime sahip kuzey Avrupa ülkelerinde kullanılan çivili tekerlekler bu tip bozulmaya sebep olmaktadır. Agreganın aşınmasını önlemek için, kaplama tasarımında dikkat edilmesi gereken nokta, agreganın sertliği ve aşınma dayanımı olmalıdır (Verstraeten 1995).

2.3.2.3 Oturma tekerlek izi

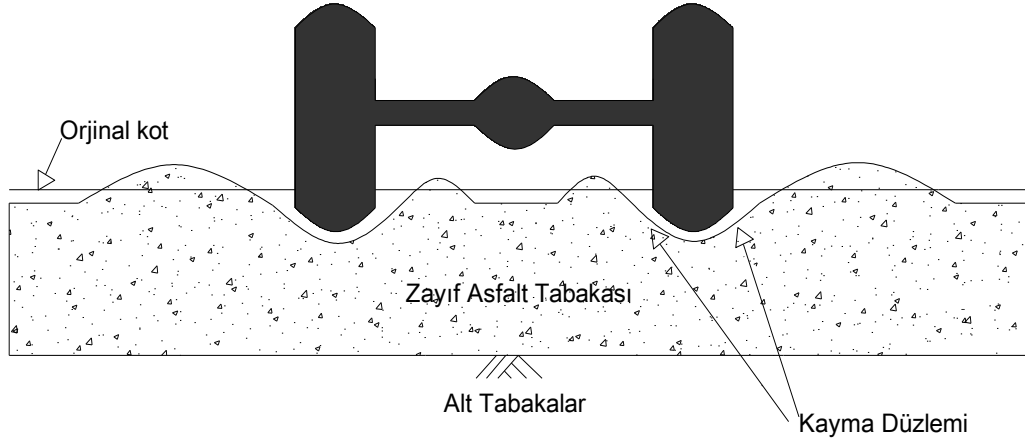
Oturma tekerlek izi de aşınma tekerlek izi gibi yüzeysel tekerlek izidir. Enkesiti aşınma tekerlek iziyle aynı görünüme sahiptir, kaplama imalatında yeterli sıkıştırma olmamasından kaynaklanır. Yeterince sıkışmamış kaplamalarda trafiğin duran ya da yavaş hareket eden kesimlerde ve yüksek sıcaklıklarda oturma görülmektedir. Oturma tekerlek izinde kenarda kabarmalar oluşmaz (Verstraeten 1995). Çünkü zaten gereğinden fazla boşluk içeren kaplama tabakası, var olan boşlukları doldurma eğilimi gösterecektir.



Şekil 2.7 : Aşınma ve oturma tekerlek izi

2.3.2.4 Akma tekerlek izi

Akma tekerlek izi, bitümlü tabaka veya tabakaların kendi içlerindeki deformasyonlardan kaynaklanır. Trafik yükünden dolayı bitümlü malzemenin dayanımı aşıldığında tekerlek izi etrafında kabarmalar meydana gelmektedir. Akma tekerlek izi daha çok ağır taşıtların yavaşladığı çıkış eğimli yollarda, kavşak bölgelerinde ve kurlarda görülmektedir. Akma tekerlek izi lastik ile kaplamamın birbirine temas ettiği yani teğetsel gerilmelerin yüksek olduğu bölgelerde görülür. Bitümlü karışımlardaki malzeme ve karışım oranları bu tür tekerlek izi oluşumunda etkilidir (Verstraeten 1995).



Şekil 2.8 : Akma tekerlek izi

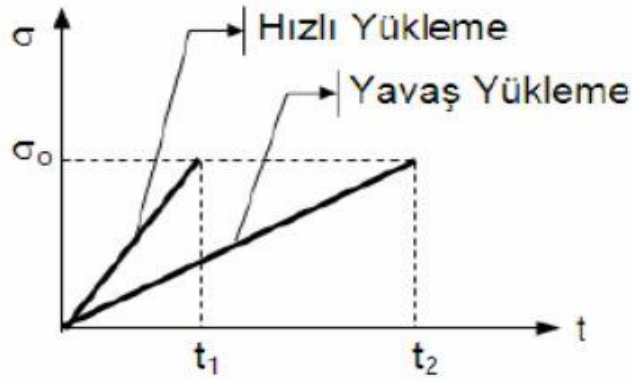
Yük tekrarı arttıkça deformasyon birikiminden dolayı akma tekerlek izi oluşacaktır. Yük tekrara sayısı arttıkça tekerleğin temas ettiği alanda çökme, yan kısımlarındaysa yükselmeler artar. (Kutluhan 2008).

3. ASFALT KAPLAMANIN VİSKOELASTİK YAPISI

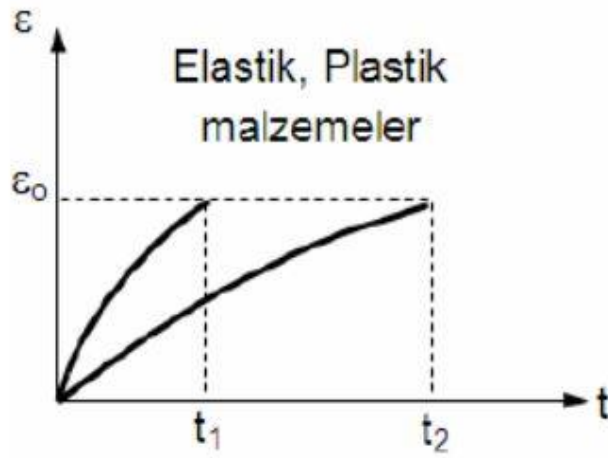
Beton ve çelik gibi yapı malzemelerinin aksine asfalt kaplama zamana ve sıcaklığa göre davranışını değiştiren bir davranışa sahiptir. Düşük sıcaklık ve kısa süreli uygulanan yüklerde elastik bir malzeme gibi davranır. Fakat tam tersi durumda yani yük uzun süreli uygulanıp sıcaklığın yüksek olduğu koşullarda viskoz davranış gösterecektir. Dolayısıyla asfalt kaplamanın viskoz ve elastik davranışı farklı yükleme koşulları ve farklı sıcaklıklarda değişkenlik göstermektedir.

3.1 Viskoelastisitenin tanımı

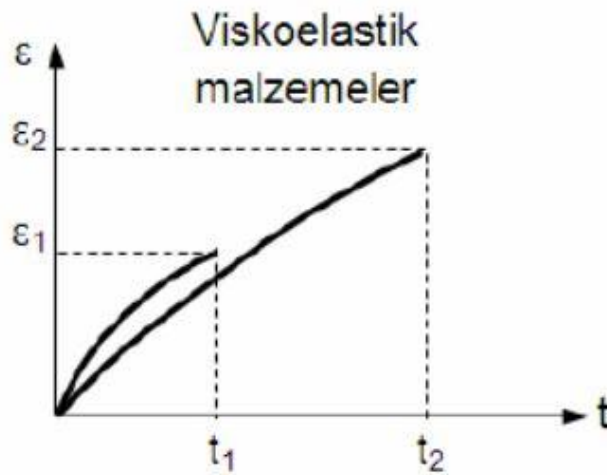
Viskozite cismin akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Viskoz davranışta cisme bir kuvvet uygulandığında malzeme gecikmeli bir şekil değişimi gösterir. Yani viskoz davranış zamana bağlıdır. Elastiklik ise, cisme uygulanan yük kaldırıldığı zaman cismin ilk haline dönmesidir ve zamandan bağımsız bir davranıştır. Asfalt kaplama gibi cismin hem elastik hem de viskoz davranış gösterdiği malzeme davranışı viskoelastisite olarak tanımlanır. Elastik davranış zamandan bağımsız olsa da viskoz davranış zamana bağımlı olduğundan dolayı viskoelastik davranış zamana bağlı olmaktadır. Elastik davranışta yükleme süresi ne olursa olsun cismin şekil değiştirmesi aynı olacaktır. Bunun yanında viskoelastik bir malzemede, yavaş yüklemede fazla şekil değiştirme görülürken, hızlı yüklemede şekil değiştirmeler daha az olacaktır. Şekil 3.9, 3.10 ve 3.11’ de elastik, plastik ve viskoelastik malzemelerin zamana bağlı şekil değişimleri görülmektedir.



Şekil 3.9 : Viskoelastik malzemenin hızlı ve yavaş yükleme koşulları altında şekil değişimi



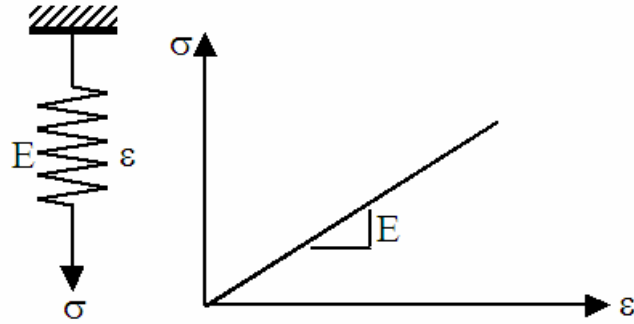
Şekil 3.10 : Elastik ve plastik malzemenin zamana bağlı şekil değişimi



Şekil 3.11 : Viskoelastik malzemenin zamana bağlı şekil değişimi

3.1.1 Hooke Kanunu

1600'lü yıllarda Robert Hooke katıların elastik davranışını modellemiştir. Katı maddelerin reolojik özelliklerini yay aracılığıyla modellemiştir. Yayı uzama miktarı ve yaya etkiyen gerilme arasında lineer bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Böylelikle yayın ideal elastik olduğunu göstermiştir. Yay Hooke Cismi olarak adlandırılmıştır. Şekil 3.12' de Hooke Cismi ve gerilme-şekil değiştirme grafiği görülmektedir.



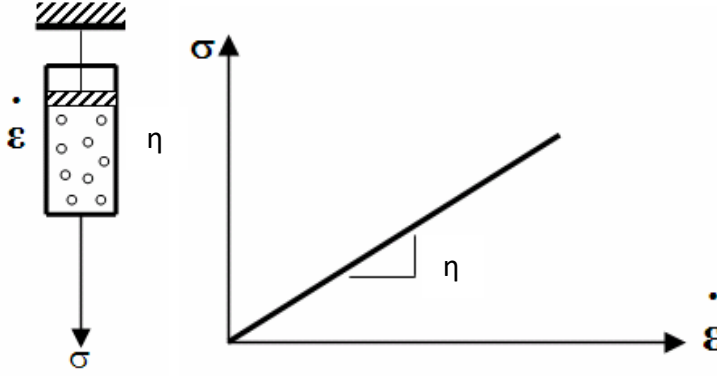
Şekil 3.12 : Hooke Cismi ve Hooke Cisminin gerilme- şekil değiştirme grafiği

Hooke kanununa göre gerilme (σ) - şekil değiştirme (ϵ) ilişkisi denklem (3.1) de verilmiştir. Burada E elastisite modüldür.

$$\sigma = E \times \epsilon \quad (3.1)$$

3.1.2 Newton Kanunu

Yine 1600'lü yıllarda Issaac Newton sıvıların kayma gerilmesi altında gecikmeli şekil değişimi gösterdiğini ortaya koymuştur. Viskoz davranışı gösteren iç sürtümlü amortisörle bu durumu modellemiştir. Bu modele Newton Cismi adı verilir.



Şekil 3.13: Newton Cismi ve gerilme-şekil değiştirme grafiği

Şekil 3.13' den görüldüğü üzere Newton cisminin sabit gerilme altındaki şekil değişimi zamanla artar ve gerilme kaldırılınca son aldığı şekli korur. Newton, kayma gerilmesi ve kayma şekil değiştirmesi arasında doğrusal bir orantı olduğunu göstermiş ve bu oranı viskozite (η) olarak adlandırmıştır.

$$\tau = \eta \cdot \gamma \quad (3.2)$$

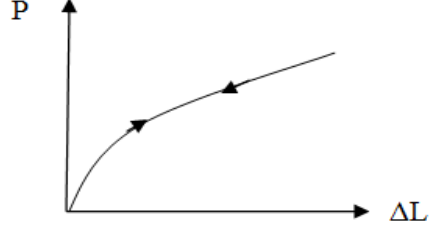
Denklem (3.2)'de kayma gerilmesi (τ) ve kayma şekil değiştirmesi (γ) arasındaki bağlantı görülmektedir. Ayrıca;

$$\dot{\epsilon} = \frac{\sigma}{\eta} \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)'te şekil değiştirmenin ($\dot{\epsilon}$), gerilmeye (σ) ve viskoziteye (η) bağlı olduğu görülmektedir.

3.1.3 Elastik şekil değiştirme

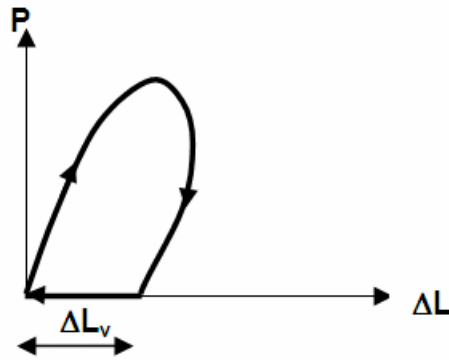
Bir malzemenin şekil değiştirmeye karşı koyması katılar için elastisite modülü ile değerlendirilebilir. Elastik malzeme yükleme esnasında bir miktar şekil değişimine uğrar. Ancak yük kalktıktan sonra eski haline gelecektir. Şekil 3.14 bu durumu açıkça izah etmektedir.



Şekil 3.14: Elastik şekil değiştirme eğrisi

3.1.4 Viskoelastik şekil değiştirme

Gerilme şekil değişimi grafiğinde yükleme boşaltma sonucu oluşan alan histerisis çemberi olarak adlandırılmaktadır. Histerisis çemberi içinde kalan alan ısıya dönüşen enerjiyi ifade etmektedir. Viskoelastik şekil değiştirme, boşaltma sonunda kalan şekil değiştirmelerin zamanla sıfıra inmesidir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15: Viskoelastik şekil değiştirme (ΔL_v)

3.2 Asfalt kaplamanın düşük hız ve yüksek sıcaklıkta davranışı

Asfalt kaplama düşük yükleme hızı ve yüksek sıcaklık altında viskoz davranarak viskozitesi yüksek bir sıvı özelliği göstermektedir. Sıvı özelliği gösteren kaplamada, asfaltın artık bir taşıyıcılığı kalmayacağından, taşıyıcılığı agregalar üstlenecektir. Taşıyıcılık yüksek sıcaklıklarda daha çok agrega özelliklerine bağlı olarak değişecektir. Ancak bu durum mutlaka kaplama yapısının bozulmasına ve oturmalara neden olacaktır.

3.3 Asfalt kaplamanın yüksek hız ve ortalama sıcaklık altındaki davranışı

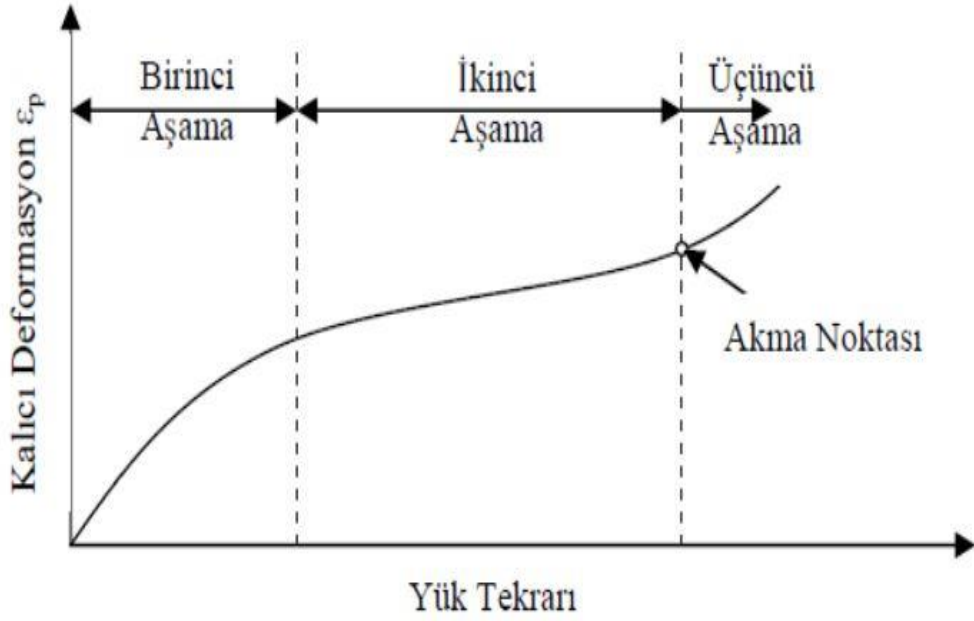
Asfalt kaplamalar orta sıcaklıklarda hem viskoz hemde elastik bir malzeme gibi davranarak viskoelastik bir davranış sergiler. Bu nedenle uç sıcaklık durumları olmadığı sürece hem kullanım hem inşa anlamında oldukça uygun bir yol malzemesidir. Çünkü sıcak haldeyken sıvılaşmış agregaları saracak ve soğuduğunda ise sertleşerek agregaları bir arada tutup esnek davranış gösterecektir.

3.4 Asfalt kaplamanın düşük sıcaklıktaki davranışı

Yüksek araç hızı ve ortalama bir sıcaklık altında asfalt kaplama elastik bir katı gibi davranacaktır. Dolayısıyla oluşan şekil değişikliği yükleme süresince var olacak yükleme bittiği zaman kaplama eski haline geri dönecektir. Ancak düşük sıcaklıklarda fazla yük yüklendiği zaman kırılmanlaşır ve yüzeyinde çatlaklar oluşur. Bu çatlakların altında yatan sebep, donma-büzülme olayından dolayı kaplamanın zayıflamasından kaynaklanmaktadır.

3.5 Asfalt kaplamanın zamana bağıl şekil değişimi

Asfalt kaplamalar viskoelastik bir malzeme olduğu için zamana bağıl olarak farklı davranış göstermektedir. Bu nedenle zamana bağıl deformasyon oluşumu lineer olmayacaktır. Şekil 3.16' da asfalt kaplamanın yük tekrarına bağıl deformasyon eğrisi görölmektedir.



Şekil 3.16: Asfalt kaplamasında tekrarlı yükleme ile oluşan deformasyon eğrisi (Witczack ve diğerleri 2002)

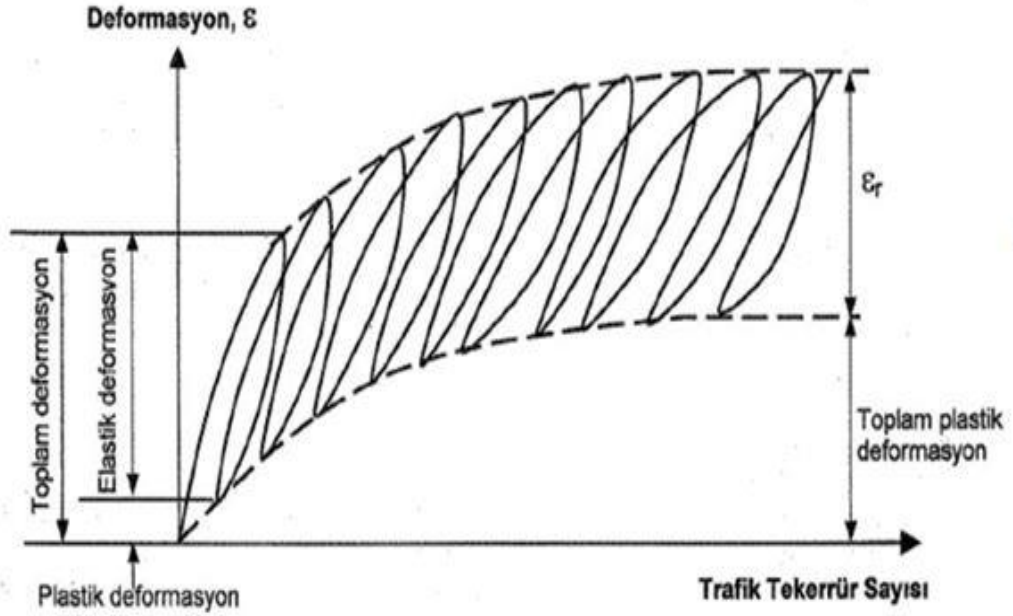
Şekil 3.16'daki eğri üç kısımdan oluşmaktadır.

İlk kısım deformasyonların hızla arttığı bölgedir. İlk kısımda karışım hacmi azalırken deformasyonlar artmaktadır. Hacimsel değişimden dolayı belli bir noktaya kadar hızla artan deformasyondan sonra ikinci bölgeye geçilmektedir.

İkinci bölgede ise bir geçiş durumu söz konusudur. İlk deformasyonlar oluşmuş ve malzemede daha az deformasyon görölmeye başlanmıştır.

Üçüncü bölgede ise tekerlek izi oluşumu tekrar hızlı bir şekilde artmaya başlar. Üçüncü kısmın başladığı nokta yani deformasyonların hızla artış gösterdiği nokta akma noktası olarak tanımlanır. Artık bu noktadan sonra asfalt kaplamada ciddi bozulmalar görölr ve kullanılamaz hale gelir. İlk kısımda oluşan

deformasyonlara yani tekerlek izlerine bağı olarak yorulma çatlakları görülür ve yol servis kabiliyetini kaybeder.



Şekil 3.17: Kaplama malzemesinin tekrarlı yükler altındaki davranışı (KGM, 2008)

Şekil 3.17’de asfalt kaplamanın tekrarlı yükler altındaki davranışı görülmektedir. Ortalama sıcaklıklarda ve kısa zamanlı yükleme koşullarında asfalt kaplama elastik bir katı gibi davranmaktadır. Her yük tekrarında belli bir geri dönüşümsüz (plastik) deformasyon oluşmaktadır. Ancak zamanla yük tekrarı ve artmakta ve malzeme yavaş yavaş viskoelastik özelliklerini sergilemeye başlamaktadır. Grafikte yükleme boşalma sonucunda kalıcı şekil değiştirmelerin azaldığı görülmektedir. Bu da malzemenin tekrarlı yükleme sonucunda, viskoelastik özelliklerinden dolayı, oluşan deformasyonunun zamanla azaldığını göstermektedir.

4. YÖNTEM

Asfalt kaplama birçok dış etkene maruz kalan bir yapıdır. Yağmur, rüzgâr don, aşırı sıcaklık gibi iklimsel olaylar, tekrarlı trafik yükleri, ağır taşıtlar gibi çok fazla değişkene maruz kalmaktadırlar. Bu tarz dış değişkenler yanında asfalt kaplamanın kendi yapısından kaynaklanan problemler de bulunmaktadır. Karışımda kullanılan agrega şekli ve yapısı, karışım granülometrisi, bitüm yüzdesi, filler miktarı, bitüm kimyası da kaplamanın davranışının değerlendirmede oldukça önemli olmaktadır. Ayrıca asfalt kaplamanın yapım koşulları da kaplama davranışını dolayısıyla ömrünü etkileyen önemli parametrelerdendir. Doğayla sürekli temas halinde olan bir yapıyı laboratuvarlarda deneysel olarak birebir kurgulamak elbette mümkün değildir. Olabildiğince gerçeği yansıtacak şekilde, çoğu zaman bazı parametreleri yok sayarak deneyler ve modellemeler yapılmaktadır. Deneysel çalışmalar da çok fazla emek ve zaman gerektirmektedirler. Dolayısıyla bu noktada bazı problemlere daha hızlı çözümler bulabilmek adına bilgisayar ortamında kurulacak modellemeler önem kazanmaktadır. Kullanılan analiz yöntemi ne olursa olsun doğayı tam anlamıyla kopyalamak neredeyse imkânsız ve çok karmaşık olduğundan bazı kabul edilebilir kısıtlarla bilgisayar modelleri kurulmaktadır ve deneysel verilere çok yakın sonuçlar çıkarmaktadırlar. Bu çalışmada sonlu elemanlar metodu kullanılacaktır. Karmaşık problemlerin çözümünde birebir olmasa bile başarılı bir şekilde yaklaşık sonuçlar veren bir metottur.

4.1 Sonlu elemanlar metodu

Mühendislik problemlerinde sıkça kullanılan sonlu elemanlar metodu; karmaşık problemlerde çözüme gidebilmek için problemi daha küçük alt parçalara ayırıp, her bir parçanın kendi içinde çözülüp, nihai sonuca ulaşıldığı bir analiz şeklidir.

Metodun üç temel niteliği vardır: İlk olarak, geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit alt bölgelere ayırır. İkincisi her elemandaki, sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların

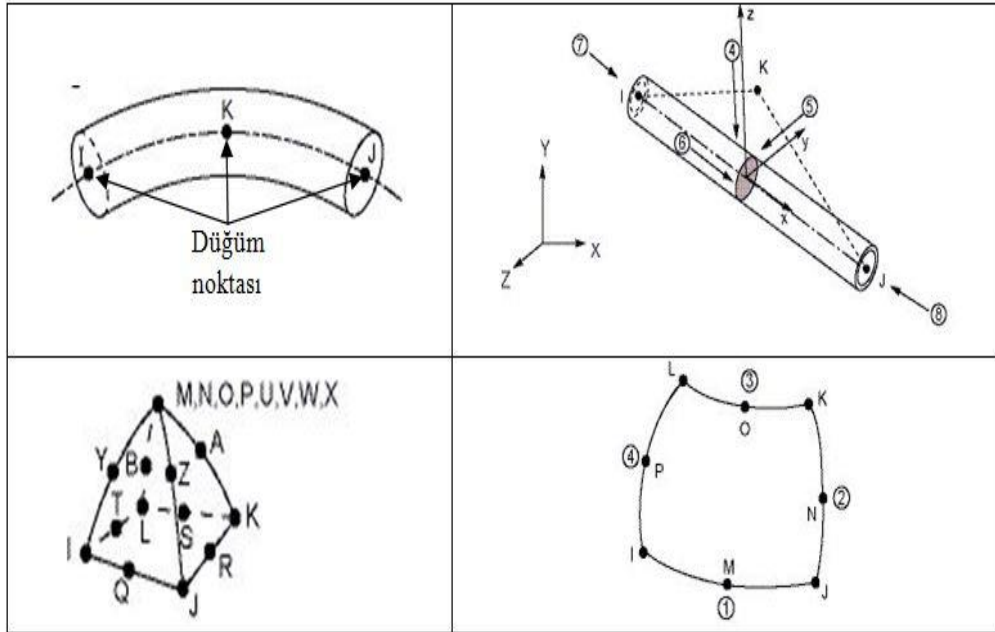
lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir. Üçüncü kabul ise, aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktalardaki (düğüm noktaları) değerleri elde edilmesinin problemin çözümünde yeterli olmasıdır. Kullanılan yaklaşım fonksiyonları, interpolasyon teorisinin genel kavramları kullanılarak polinomlardan seçilir. Seçilen polinomların derecesi ise çözülecek problemin tanım denkleminin derecesine ve çözüm yapılacak elemandaki düğüm sayısına bağlıdır (Topçu ve Taşgetiren 1998)

Sonlu elemanlar metodu ile çözümde öncelikle cisim geometrisi sonlu elemanlara bölünür. Daha sonra şekil fonksiyonları seçilir. Lokal rijitlik matrisleri oluşturularak, lokal rijitlik matrislerinden global rijitlik matrisi oluşturulur. Sisteme etki eden kuvvetler ve sınır şartları da göz önünde bulundurularak matrislerden oluşan denklem çözülüp sonuca ulaşılmaktadır.

Sonlu elemanlar metodunda çözüme matrisler yoluyla ulaşılır. Her bir eleman için lokal rijitlik matrisleri oluşturulup daha sonra tüm çözüm için lokal rijitlik matrislerinden global rijitlik matrisi oluşturulur. Bu nedenle eleman sayısı çoğaldıkça oluşacak olan global rijitlik matrisi büyüyecektir. Matris boyutunun büyümesi de çözüm süresini uzatacaktır. Bu nedenle karmaşık ve büyük problemler için elde çözüm yapmak imkânsızlaşmaktadır. Bu noktada çözüm hızı yüksek bilgisayarlar yardımımıza koşmaktadır. Çok farklı mühendislik problemine yanıt veren bir yöntem olan sonlu elemanlar için birçok program geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar metodu inşaat, makine, uçak, otomotiv mühendisliği gibi alanlarda, biyomedikal tasarımlarda, nükleer mühendislikte, akışkan ve hidrolik problemlerinde, ısı problemlerinde rahatlıkla kullanabilen bir yöntemdir.

Sonlu elemanlar metodunda en çok kullanılan programlar; ANSYS, ABAQUS, ADINA, LS-DYNA, SAP2000 gibi programlardır. Bu programların en kullanışlı kısmı malzeme özelliklerini analiz tipini yükleme koşullarını ve problem geometrisini kısacası giriş verilerini değiştirerek farklı mühendislik dallarındaki problemlere çözüm bulabilmesidir. Bu nedenle sonlu elemanlar metodu farklı mühendislik alanlarında sıkça kullanılan bir yaklaşık çözüm yöntemidir. Bu çalışmada ANSYS paket programı kullanılacaktır.

Sonlu elemanlar metodunda, çözüm bölgesinin geometrik yapısına bağlı olarak sistem geometrisi daha basit alt parçalara ayrılır. Bu parçaların her birine eleman denmektedir. Her bir elemanı birbirine bağlayan düğüm noktaları bulunmaktadır. Problemden sınır şartı olan, kritik durumlar bulunan kesit değişikliği olan noktalarda düğüm noktaları bulunmaktadır. Bu noktalar her bir eleman için hesaplanan deplasmanların bir elemandan diğerine aktarıldığı noktalardır. Sonlu elemanlar metodunun kullanışlı olmasının en büyük sebeplerinden biri karmaşık geometrilere uyum sağlamasıdır. Sistem alt elemanlara bölünürken kare, üçgen, dikdörtgen, beşgen gibi farklı eleman tipleri kullanılarak hemen her şekle kolaylıkla uyum sağlayan elemanlar seçilebilir. Farklı geometrilere elemanların kullanılabilir olması özellikle delikli geometriye sahip sistemlerde kolaylık sağlamaktadır.



Şekil 4.18 : Farklı sonlu eleman şekilleri (ANSYS 14.0 Help)

Kullanılacak malzeme ve çözülecek problemin geometrisi eleman seçiminde büyük önem taşımaktadır. Sonlu elemanlar metodunda çözüm bölgesi problemin tipine göre tek boyutlu, iki boyutlu, üç boyutlu ve dönel eleman olmak üzere alt elemanlara ayrılır (Şekil 4.18). Kullanılacak elemanın serbestlik derecesi, nod sayısı (düğüm noktası sayısı) problemin geometrisini en iyi temsil edecek şekilde seçilmelidir. Seçilen eleman geometrik bölgeyi ne kadar iyi tanımlıyorsa kesin

çözümüne o kadar yaklaşmış olacaktır. Ayrıca farklı malzeme davranışına göre farklı eleman seçimleri de yapılmaktadır.

Problem için uygun eleman seçimi yapıldıktan sonra problem alt parçalara bölünür. Bu noktada önemli olan eleman boyutunu ayarlamaktır. Ne kadar sık bir eleman ağı kurulursa yani ne kadar küçük boyutlu elemanlar kullanılırsa çözüme o kadar yaklaşmış olacaktır. Ancak eleman boyutunun küçülmesi eleman sayısının artması anlamına geleceğinden analiz süresi de uzayacaktır. Sonlu elemanlar metodunda bir eleman için ayrı ayrı çözüm yapıldığından dolayı işlem yükü artmaktadır. Bu nedenle hem çözüm süresini çok fazla uzatmayacak aynı zamanda olabildiğince gerçek sonuca yaklaşan bir çözüm bulmak adına en optimum durum uygulanmalıdır.

Geometrik şekli elemanlara böldükten sonra sınır şartları ve yüklerin belirlenmesi gereklidir. Yükler bir alana, hacme ya da çizgiye etki ediyor olabilir. Ancak yükleme tipi ne olursa olsun çözüm esnasında yükler kompleks eleman tipinden basit eleman tipine doğru aktarılacaktır. Hacme etki eden yük alana, alandan çizgiye, çizgiden de düğüm noktalarına aktarılarak çözüm gerçekleşecektir.,sonlu elemanlar metodunda kullanılan genel formül aşağıdaki gibidir.

$$[K][Q] = [F] \quad (4.3)$$

Burada $[K]$ rijitlik matrisini, $[Q]$ deplasmanları ve $[F]$ ' de sisteme etkiyen kuvvetleri temsil eder.

Çözümüne geçmeden önce mutlaka malzeme tanımının yapılması gerekmektedir. Çünkü tüm şekil değiştirmeler gerilmeler malzemenin yapısı ile alakalı olarak şekillenecektir. Malzemenin tipine göre gerekli veriler mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. ANSYS'de birçok hazır malzeme bulunduğu gibi malzemeyi deneysel verilere göre tanımlamak da mümkündür.

Bütün fiziksel özellikler tanımlandıktan sonra uygun çözüm yöntemiyle çözüme gidilir.

5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Bir önceki bölümde sonlu elemanlar metodundan kısaca bahsedilmiştir. Bu bölümde ise ANSYS sonlu elemanlar programında yapılmış olan analiz basamakları incelenmiştir. Analiz tipi olarak ANSYS programından statik analiz seçilmiştir.

Bu çalışmada akma tekerlek izi için modelleme yapılmıştır. Akma tekerlek izinde alt tabakalar veya temel değil de asfalt tabakasının etkisi olduğundan dolayı öncelikle asfaltın viskoelastik yapısı incelenmiştir. Çünkü akma tekerlek izine malzeme ve karışım oranlarındaki tutarsızlık sebep olmaktadır. Ayrıca yük tekrarı ve yük miktarı önemli olan parametrelerden olup, hesaba katılmıştır.

5.1 Temel alınan model koşulları

Çalışmada tekerlek izi deney cihazlarından biri olan Fransız tekerlek izi cihazı özellikleri kullanılarak geometrik model oluşturulmuştur. Fransız tekerlek izi cihazında 50x18x5 cm boyutlarında numune üzerine lastik tekerlekle 5000 N luk hareketli yük uygulanmıştır.

Tablo 5.4: Fransız tekerlek izi cihazı özellikleri (Kutluhan ve Ağar 2004)

	Fransız Tekerlek İzi Cihazı (LCPC)
Uygulanan Yük	5000±50 N
Tekerlek İç Basıncı	0,60±0.03 Mpa
Tekerlek Boyutları	Çap:415 mm Genişlik: 110 mm
Tekerlek Tipi	Basıncılı Lastik Tekerlek
Numune Tipi	Prizmatik (Plak)
Numune Boyutları	500x180x20 mm

Tablo 5.4’ te Fransız tekerlek izi cihazının özellikleri görülmektedir. Geometrik model ve yükleme koşulları Fransız tekerlek izi deney cihazı örnek alınarak modellenmiştir.



Şekil 5.19: Fransız tekerlek izi cihazının görünüşü (LCPC) (Kutluhan 2008)

Şekil 5.19 da Fransız tekerlek izi cihazı görülmektedir. Cihaz aynı anda iki numuneyi test edebilmektedir. Numuneler şekilde görüldüğü üzere prizma şeklindedir



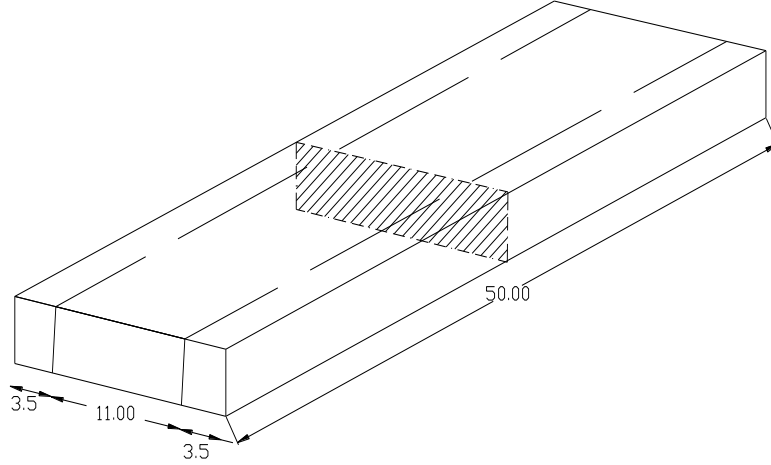
Şekil 5.20: Fransız tekerlek izi deney cihazında kullanılan numuneler

Şekil 5.20’de Fransız tekerlek izi deney cihazında kullanılan numuneler görülmektedir. Dikdörtgenler prizması şeklinde olan numuneler metal numune kalıbı ile alt ve yan kenarlarından sınırlandırılmıştır. LCPC cihazında tekerlek izi ölçümleri elle yapılmakta olup, deformasyon derinlikleri genel olarak 100, 300, 1000, 3000, 10000 ve 30000 döngü için alınır.

Bu çalışmada ilk veri seti için 30000 adet, ikinci veri seti için 5000 adet yük tekrarı yapılmıştır. Yük tekrarının artması analiz süresini uzattığından, sadece tek veri seti için 30000 yük tekrarında malzemenin davranışı incelenmiştir.

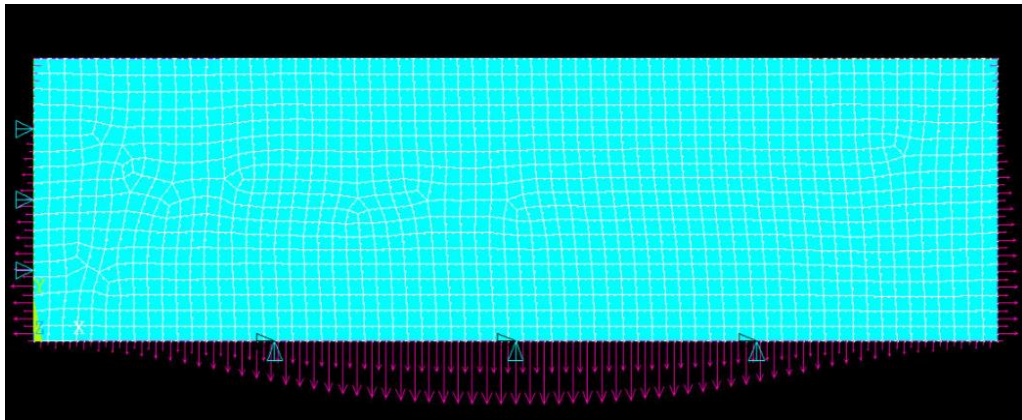
5.2 Model Geometrisinin Oluşturulması

Çalışmada 2 boyutlu geometrik model kullanılmıştır. Model, Fransız tekerlek izi deney cihazında kullanılan numune boyutları baz alınarak boyutlandırılmıştır.



şekil 5.21: Modelde temel alınan numune kesiti

şekil 5.21’de modelde temel alınan numune kesiti görölmektedir. Dikdörtgenler prizması şeklindeki numuneden bir kesit alınarak 2 boyutlu bir geometri belirlenmiştir. Seçilen kesitin boyutları 18x5 cm’ dir. Deney cihazının tekerlek genişliği 11 cm’ dir. şekilde de göröldüğü üzere, kesitin orta kısmında kalan 11 cm’ lik uzunluk, yükün uygulanacağı bölgedir. şekil 5.22’de oluşturulan geometrik model görölmektedir.



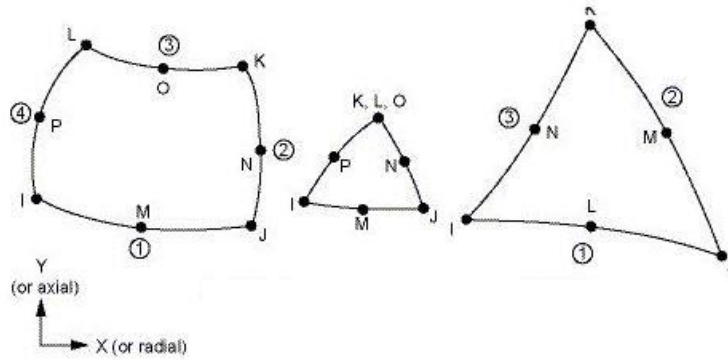
şekil 5.22: Model geometrisinin sonlu elemanlara ayrılmış hali

5.3 Sonlu Eleman Seçimi

Sonlu eleman seçiminde, kullanılacak olan malzeme ve model geometrisi önemli olmaktadır. Bu çalışmada PLANE183 8 nodlu eleman seçilmiştir.

PLANE183 elemanı 2 boyutlu geometriler için uygun olup, 8 ya da 6 düğüm noktalı seçenekleri mevcuttur. aynı zamanda kuadratik deplasman özelliğine sahiptir ve düzensiz geometrilere kolaylıkla uymaktadır. Her düğüm noktasında iki serbestlik dereceli olarak 6 ya da 8 nodludur. (ANSYS 14.0 Help)

PLANE183 elemanı plastik, hiperleistik, viskoelastik ve elastoplastik malzeme davranışına uyum sağlamaktadır. Şekil 5.23' de PLANE183 elemanı görülmektedir.



Şekil 5.23: PLANE183 eleman geometrisi (ANSYS 14.0 Help)

5.4 Malzeme tanımlanması

Asfalt kaplama viskoelastik bir malzeme olduğundan dolayı ANSYS'de viskoelastik malzeme tanımında kullanılan "curve fitting (eğri uydurma)" modeli kullanılmıştır. Curve fitting modelinde, malzeme sabitleri deneysel verilerle ilişkilendirilerek, prony serisi dağılımı, hem kayma hem de hacim modülü için bulunmaktadır.

Curve fitting (eğri uydurma) deneysel verilere ihtiyaç duyar. Viskoelastik malzemelerde curve fitting (eğri uydurma) metodu kullanabilmek için kayma ya da

hacim modülünün zamana bağlı değişimini gösteren deneysel veri seti mutlaka bulunmalıdır.(ANSYS 14.0 Help)

Çalışmada iki farklı deney veri seti kullanılmıştır. Veri setleri tablo 5.5 ve 5.6' da verilmektedir.

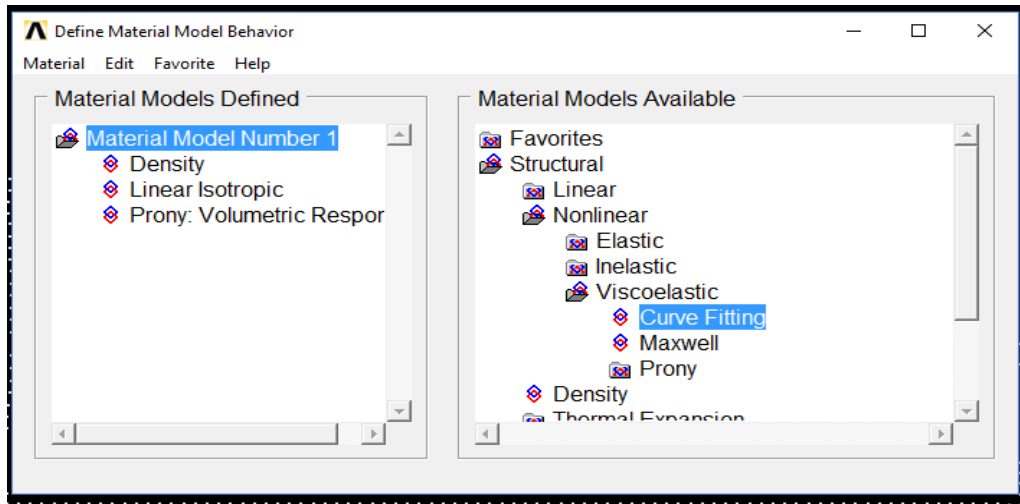
Tablo 5.5: Prony katsayılarını elde etmek için kullanılan birinci veri seti (20⁰C sıcaklıkta yapılan yorulma deneyinden elde edilmiştir.) (Mulungye ve diğ. 2007) .

Zaman (s)	Hacim Modülü (MPa)
2,5	975
5	916
7,5	938
10	937
12,5	950
15	960
17,5	985
20	972
22,5	952
25	920
50	596
75	585
100	597
125	601
137,5	616
237,5	539
262,5	535
287,5	542
312,5	546
337,5	562
362,5	570
387,5	567
637,5	499
887,5	401
1137,5	227
1147,5	212

Tablo 5.6: Prony katsayılarını elde etmek için kullanılan ikinci veri seti (Kaloush 2002)

Zaman (s)	Farklı Sıcaklıklarda Hacim Modülü Değerleri (MPa)			
	130°F	100°F	70°F	40°F
0,04	212	530	1325	2651
0,1	159	318	1166	2386
0,2	132	265	1060	2121
1	116	212	795	1697
2	106	159	662	1591
10	79	106	530	1060

Malzeme tanımlanırken Poisson oranı=0,3 alınmıştır. İlk veri seti için farklı elastisite modüllerinde asfalt kaplamanın davranışını görmek için, elastisite modülü sırasıyla 2100, 2200, 2300, 2400, 2500, 2600, 2700 ve 2800 MPa alınmıştır. İkinci veri setinde ise elastisite modülü 2100 MPa alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Kaplama yoğunluğu 2.4×10^{-009} kg/mm³ seçilmiştir.



Şekil 5.24: ANSYS curve fitting (eğri uydurma) modeli ile malzeme tanımlanması

Şekil 5.24' de ANSYS programına malzeme verilerinin aktarıldığı kısım görülmektedir.

Temperature	T1
	0
a1	0.2037
t1	0.056077
a2	0.12436
t2	0.055871
a3	0.09482
t3	1.0849
a4	0.20182
t4	0.055663
a5	0.10439
t5	1.3637

Şekil 5.25: ANSYS curve fitting (eğri uydurma) modeli ile oluşturulmuş prony katsayıları tablosu

Şekil 5.25’ de curve fitting (eğri uydurma) modeli ile oluşturulan prony katsayıları görülmektedir. Curve fitting (eğri uydurma) ile yapılan malzeme tanımının amacı kaplamanın yük tekrarı altında ve zamana bağlı olarak nasıl bir davranış göstereceğini tanımlamaktadır.

Prony analizi Gasphard Riche De Prony tarafından 1795 yılında geliştirilmiştir. Ancak pratik kullanımı dijital bilgisayar çağında başlamıştır. Sisteme bir yük uygulandığında, malzemede ilk gerilme elastik bir tepkiden kaynaklanır. Daha sonra oluşan gerilme malzemedeki viskoz etkiler nedeniyle zamanla azalır. Zamana bağlı bir davranış gösteren malzeme de prony katsayıları ile tanımlanır. Prony katsayılarını kullanabilmek için zamana bağlı olarak malzemenin hacim ya da kayma modülü gerekmektedir.

Viskoelastik malzeme için kalıcı şekil değiştirme denklem (5.4)’ deki şekilde ifade edilebilir.

$$\sigma(t) = Y(t) \cdot \varepsilon_0 \quad (5.4)$$

Burada $Y(t)$ gevşeme (relaksasyon) fonksiyonudur. Ve denklemde de ifade edildiği gibi zamana bağlıdır. Materyal Maxwell katısı olarak varsayılırsa,

relaksasyon fonksiyonu, tipik olarak denklem (5.5)' deki gibi prony serisi olarak modellenebilir. (Chen, 2000)

$$Y(t) = E_0 \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^n a_i \cdot (1 - e^{-t/T_i}) \right) \quad (5.5)$$

Burada; a_i i'inci prony katsayısı ($i=1,2,\dots$), T_i ise i'inci prony gecikme zamanı sabitidir. Bu iki sabite göre malzemenin davranışı tanımlanır.

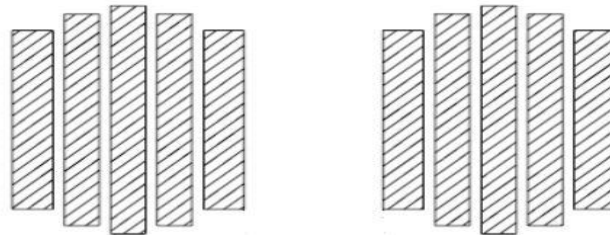
5.5 Geometrik modelin elemanlara ayrılması

Bir önceki bölümde anlatıldığı üzere model geometrisi oluşturulduktan sonra, alan alt elemanlara ayrılmaktadır. Uygun eleman seçimi yapıldıktan sonra eleman ağı (mesh) sıklığı belirlenmelidir. Problemden karmaşık bir geometrik alan bulunmadığı için mesh yapılırken ANSYS programında bulunan “mesh tool” sekmesinden yararlanarak eleman ağı oluşturulmuştur. Geometrik alan çok küçük elemanlara bölünmemiş ancak kaba bir eleman ağı da oluşturulmamıştır. İşlemleri hızlı gerçekleştirecek kadar büyük, olabildiğince yaklaşık sonuç elde edebilecek kadar küçük eleman boyutu kullanılmıştır.

5.6 Uygulanacak yükün ve sınır şartlarının belirlenmesi

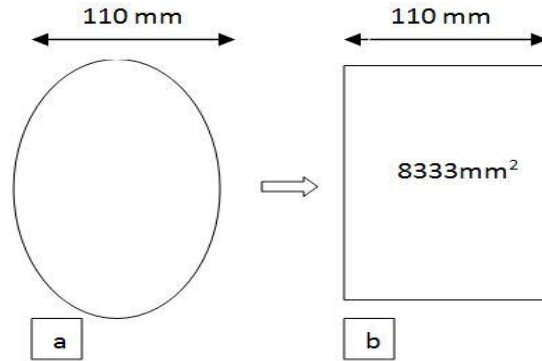
Alınan kesitin orta kısmında kalan 110 mm' lik bölgeye basınç uygulanacaktır. Fransız tekerlek izi cihazında basınçlı lastiğin numuneye uyguladığı yük 5000 N' dur. 2 boyutlu numune kesitine çizgisel bir yük uygulanmıştır.

Lastik temas alanı gerçekte Şekil 5.26'da görüldüğü gibidir.



Şekil 5.26: Lastik temas alanının şematik olarak gösterimi (Xie ve Zheng, 2003)

Lastik temas alanı gerçekte oval bir şekle yakın olup, lastik sırt desenlerinden dolayı Şekil 5.26’ daki gibi görünmektedir.



Şekil 5.27: Lastik temas alanı gösterimi a) Gerçek lastik temas alanı b) Eşdeğer lastik temas alanı

Fransız tekerlek izi deney cihazında lastik deseni bulunmadığından lastik temas alanı Şekil 5.27’deki gibi gösterilmiştir. Görüldüğü üzere lastik temas alanı oval şekilde olmaktadır. Ancak etkiyecek yük miktarını hesaplarken eşdeğer lastik temas alanı kullanılmıştır.

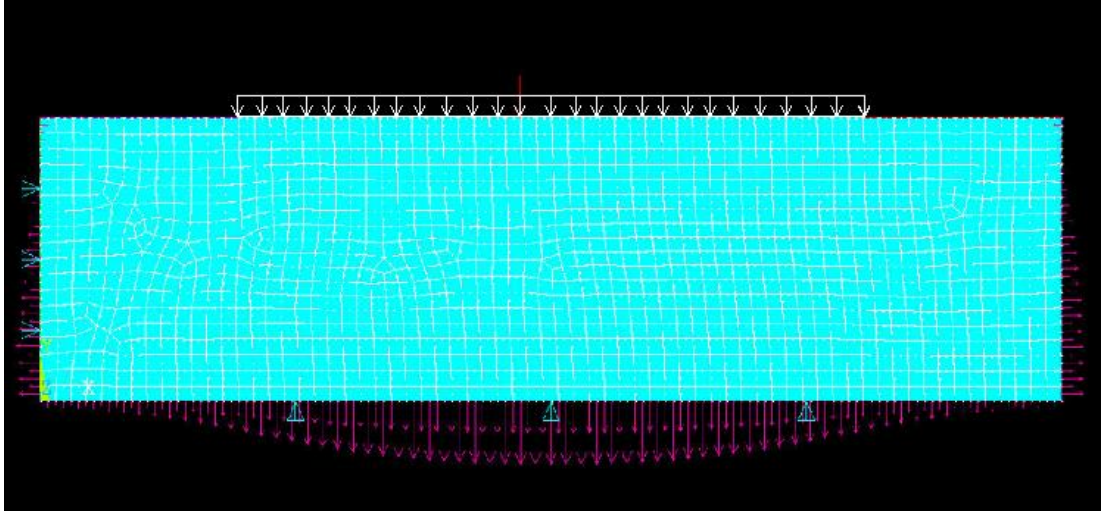
Tekerlek ve numunenin temas alanına etki eden yük aşağıdaki gibi bulunmuştur;

$$\text{Lastik temas alanı} = \text{uygulanan kuvvet} / \text{lastik iç basıncı} \quad (5.6)$$

$$\text{Lastik temas alanı} = 5000\text{N} / 600000\text{N/mm}^2 = 8333\text{mm}^2 \quad (5.7)$$

$$\text{Uygulanacak kuvvet} = (5000\text{N} \times 110\text{mm}) / 8333\text{mm}^2 = 66.002 \text{ N/mm} \quad (5.8)$$

Lastik temas alanı daha önce yapılan bazı çalışmalarda kabul gördüğü üzere, uygulanan kuvvetin lastik iç basıncına bölünmesiyle kabaca hesaplanmıştır. Temas alanı dörtgen kabul edilerek 8333mm² ‘lik bir temas alanı bulunmuştur. Bu temas alanına etki eden kuvvet çizgisel bir yüke dönüştürülmüş ve model geometrisine üniform yayılı yük olarak uygulanmıştır. Şekil 5.28’ de yük uygulanan kesim görülmektedir.

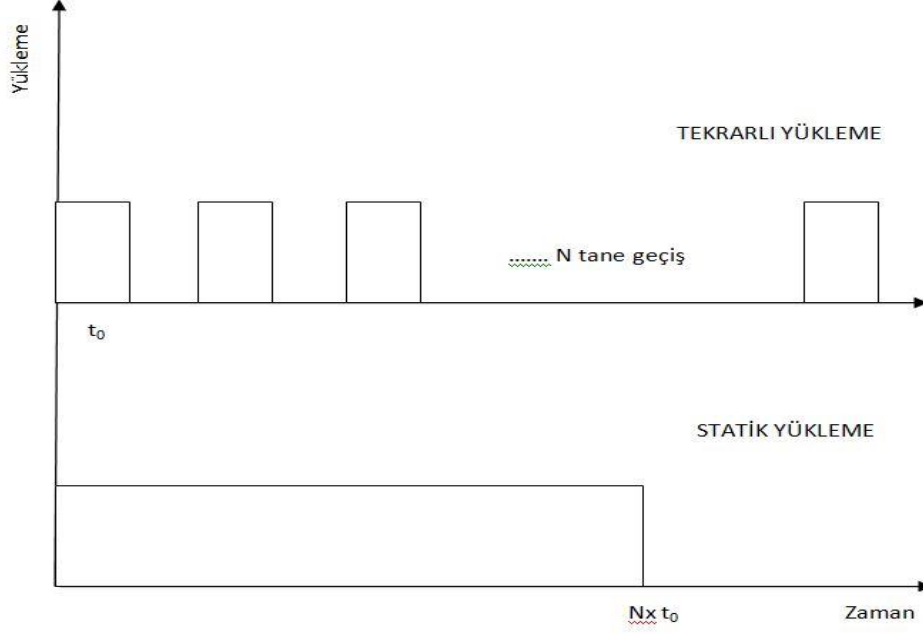


Şekil 5.28: Model geometrisine yük uygulanan kısım ve sınır şartları

Fransız tekerlek izi deney cihazında kullanılan numuneler metal kaplar içinde alt ve üst kısımlarından sınırlandırılmış olduğundan modelin sağ, sol ve alt kenarları Y yönünde sınırlandırılmıştır. Aynı zamanda akma tekerlek izi üzerinde çalışıldığından dolayı bu sınırlandırma uygun bulunmuştur. Çünkü akma tekerlek izinde oturmalar alt tabakadan değil, kaplama tabakasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla akma tekerlek izini analiz ederken alt tabakaların hiç deforme olmadığını varsayarak sadece kaplama tabakasının deformasyonu göz önünde bulundurulmaktadır.

Yüklemeye şekli belirlenirken eşdeğer yüklemeye varsayımı kullanılmıştır. Bunun nedeni tekrarlı yüklemeye ve boşaltma hesaplarının çok fazla hesaplama zaman gerektirmesidir. Hesaplama verimini arttırmak amacıyla eşdeğer yüklemeye varsayımı kullanılmıştır.

Eşdeğer yüklemeye varsayımı pek yeni bir varsayım olmamakla birlikte hareketli tekerlek yüklerinin kümülatif etkisini yansıtmak için literatürde kullanılan bir yöntemdir (Huang ve diğerleri 2001).



Şekil 5.29: Eşdeğer yükleme varsayımı şeması (Zhu ve Sun 2013)

Şekil 5. 29' da görüldüğü gibi yükleme boşalma şeklinde N tane geçiş, statik yüklemeden çok daha fazla zaman ve hesap gerektirecektir

LCPC deney cihazında numuneye dakikada 1 döngü uygulanmaktadır. Yapılan çalışmalarda tekerleğin bir kesitte durma zamanının 0,1- 0,01 sn aralığında olması makul kabul edilmiştir. Bu çalışmada tekerleğin kesitte durma zamanı 0,1 s olarak kabul edilmiştir. İlk aşamada kullanılan yük 66 N/mm olup, yükün %10 ve %50 arttığı durumlar için de analizler yapılarak farklı yük miktarı altında asfalt kaplamanın davranışı gözlemlenmiştir.

5.7 Sonlu elemanlar metodu analiz sonuçları

İki farklı malzeme kullanılmış ve iki farklı malzeme için sonlu elemanlar analizi yapılmıştır.

5.7.1 Birinci veri seti için tekerlek izi miktarları

Birinci veri seti için yapılan çalışmada farklı elastisite modüllerinde ve farklı yük tekrarlarında asfalt kaplamanın nasıl davrandığı analiz edilmiştir. Elastisite modülü 2100, 2200, 2300, 2400, 2500, 2600, 2700 ve 2800 Mpa olarak alınmıştır. Her bir elastisite modülü için analiz yapılmıştır. Daha önce belirtildiği üzere birinci veri seti için 30000 adet yük tekrarı yapılmıştır.

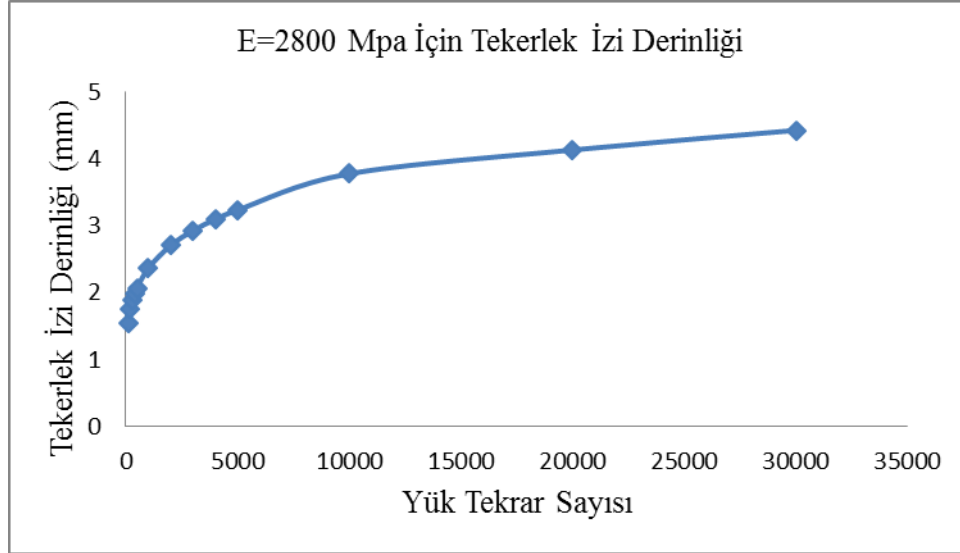
Tablo 5.7: Birinci veri seti için elastisite modülü ve yük tekrarına göre tekerlek izi miktarları (mm)

Yük Tekrarı (adet)	Elastisite modülü (MPa)							
	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800
100	2,05263	1,96100	1,8772	1,80026	1,72939	1,66388	1,60315	1,5467
200	2,36271	2,21225	2,11793	2,03132	1,95151	1,87774	1,80934	1,74575
300	2,54375	2,38224	2,28082	2,18769	2,10186	2,02251	1,94894	1,88053
400	2,62998	2,51319	2,40633	2,30818	2,21777	2,13409	2,05654	1,98442
500	2,79772	2,62082	2,50949	2,40723	2,31298	2,22583	2,14501	2,06995
1000	3,19189	2,99136	2,86472	2,74837	2,6411	2,54188	2,44985	2,36425
2000	3,64677	3,41939	3,2752	3,14268	3,02046	2,90739	2,80248	2,70487
3000	3,9434	3,69872	3,54316	3,40015	3,26824	3,14617	3,0329	2,92749
4000	4,16872	3,91104	3,74687	3,59593	3,45667	3,3278	3,20818	3,09687
5000	4,35217	4,08396	3,91282	3,75544	3,61022	3,47581	3,35105	3,23493
10000	4,97398	4,6531	4,53463	4,37725	4,23203	4,09762	3,97286	3,77612
20000	5,67165	5,3246	5,2323	5,07492	4,9297	4,79529	4,67053	4,51332
30000	6,07866	5,8013	5,63931	5,48193	5,33671	5,2023	5,07754	4,92757

Tablo 5.7'den görüldüğü üzere elastisite modülü arttıkça tekerlek izi azalmaktadır. Bu durumun sebebi; elastik modül malzemenin esnekliğini ve şekil

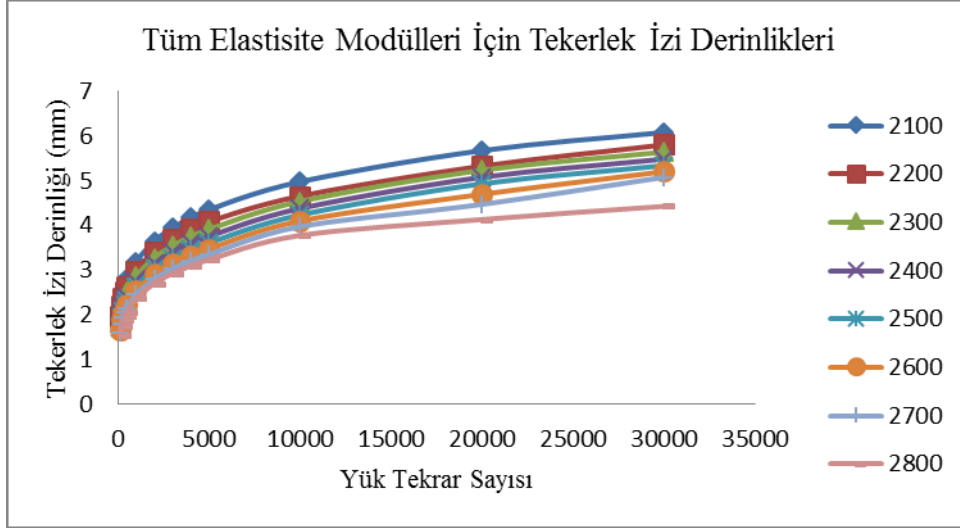
değişimine karşı direncini gösterdiği için elastik modül ne kadar yüksek olursa deformasyon o kadar düşük olacaktır.

Aynı zamanda yük tekrar sayısına bakıldığında yük tekrarı arttıkça malzemedeki tekerlek izinin arttığı görülmektedir. Daha önceki kısımlarda yük tekrarı arttıkça, tekerlek izi miktarının da artacağı belirtilmişti.



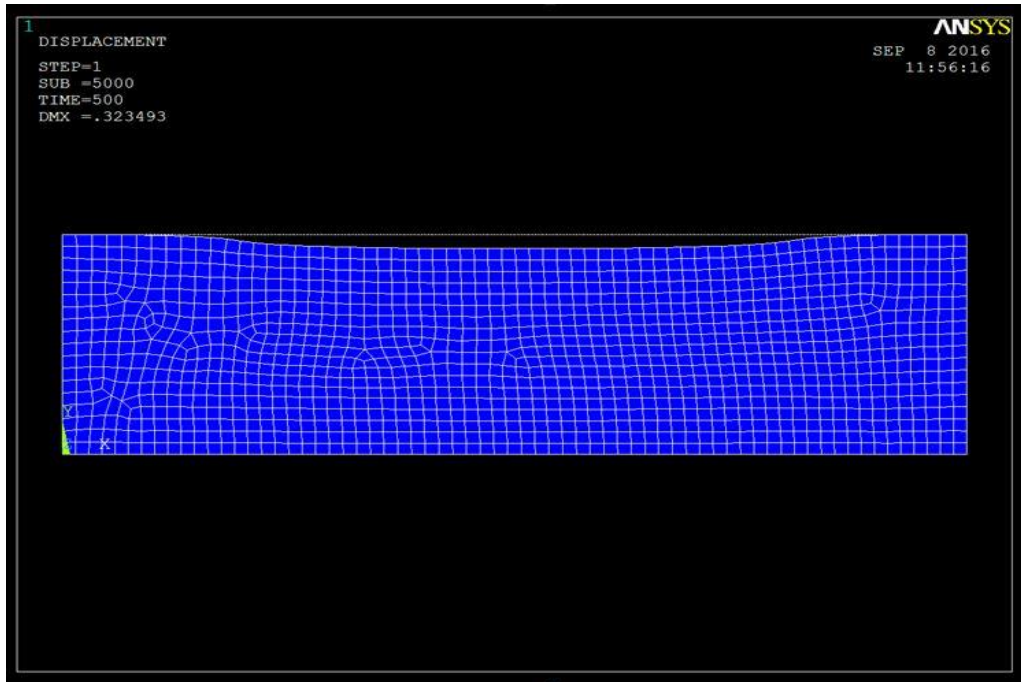
Şekil 5.30: E=2800 Mpa için yük tekrar sayısına göre oluşan tekerlek izi miktarı

Şekil 5.30'da E=2800 Mpa için tekerlek izi analizi yapılmıştır. Grafikten rahatça görüldüğü üzere yaklaşık 1000 tekrara kadar tekerlek izinde hızlı bir artış olmaktadır. 1000 tekrardan sonra tekerlek izindeki artış hızı azalmıştır. Bu durum da daha önceki kısımlarda bahsedilen, asfalt kaplamanın deformasyon eğrisindeki ikinci bölgeye geçişin yapıldığı kısım olarak tanımlanabilir.



Şekil 5.31: Tüm elastisite modülleri için tekerlek izinin yük tekrarına göre değişimi

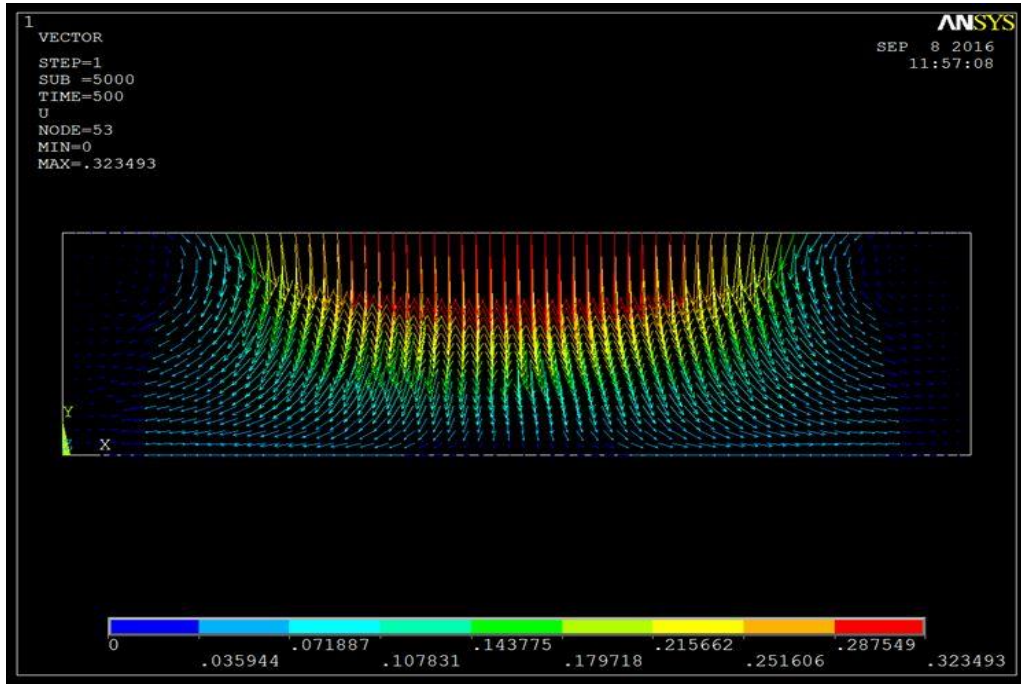
Şekil 5.31’ de tüm elastisite modülleri için tekerlek izi miktarları görülmektedir. Grafikten anlaşılacağı üzere, elastik modül arttıkça malzemenin şekil değiştirmesi azalmaktadır.



Şekil 5.32: E=2800 MPa ve 5000 yük tekrarı için oluşan tekerlek izi profili

Şekil 5.32’ de E=2800 Mpa ve 5000 yük tekrarı sonucunda oluşan kesit profili bulunmaktadır. Kesitin deforme olmamış hali ve deforme olmuş hali arasındaki fark görülmektedir. Çizgisel yükleme yapılmış bölgenin kenarlarında da

deformasyon görülmüştür. Ayrıca sağ ve sol üst kısımlarda belli bir kabarma mevcuttur.

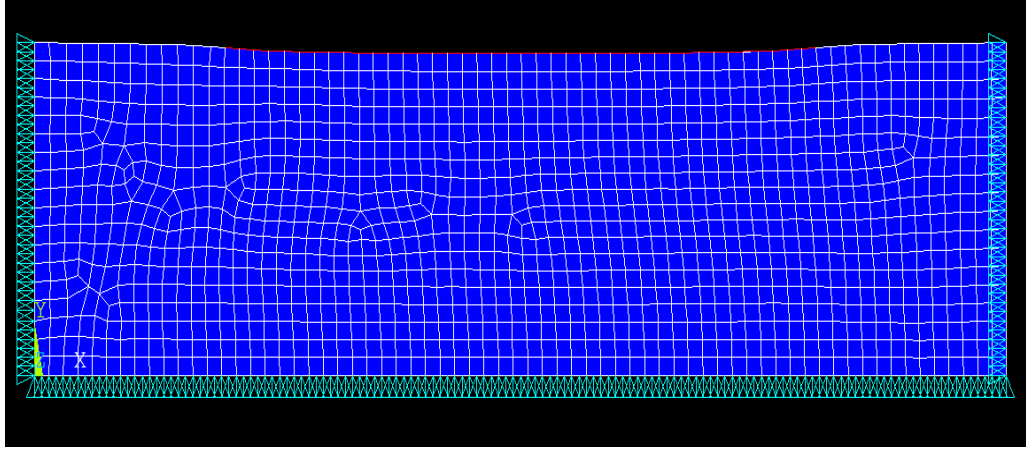


Şekil 5.33: $E=2800$ MPa ve 5000 yük tekrarı için oluşan tekerlek izi profilinin vektörel gösterimi

Şekil 5.33' de deforme olmuş kesitin vektörel gösterimi bulunmaktadır. En fazla deformasyonun olduğu düğüm noktasının 53. düğüm noktası olduğu görülmektedir. Vektörlerin yönleri de yükün numune en kesitinde nasıl dağıldığını açıkça göstermektedir.

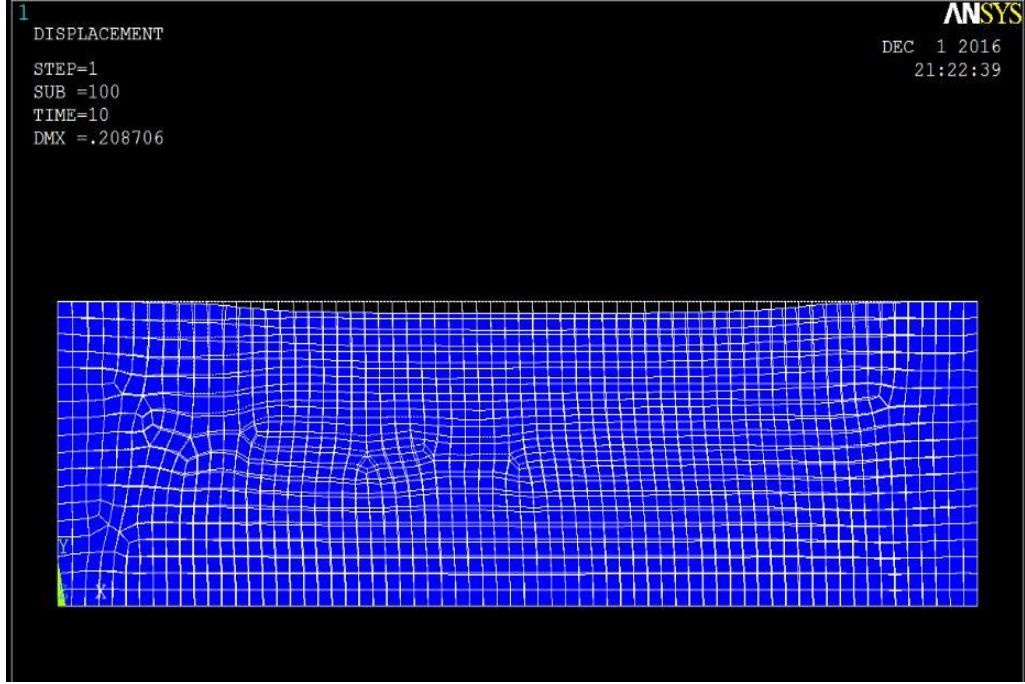
5.7.2 İkinci veri seti için analiz sonuçları

İkinci veri setinde, farklı sıcaklık değerleri için, zamana bağlı hacim modülleri bulunmaktadır. Sıcaklık değişiminin, tekerlek izi oluşumunu nasıl etkilediği incelenmiştir. İlk yükleme olarak 66 N/mm^2 kullanılmıştır.

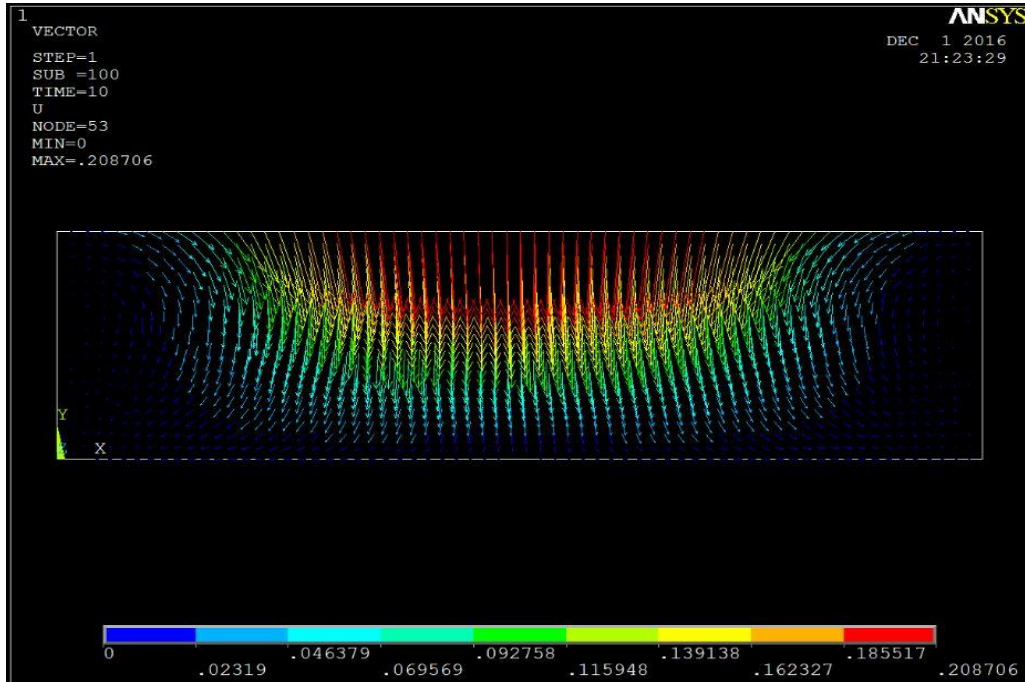


Şekil 5.34: Malzemenin yükleme yapıldıktan sonraki hali

Şekil 5.34'de malzemenin yükleme yapıldıktan sonraki hali görülmektedir. Şeklin üst kısmında görülen kırmızı çizgi yayılı yük uygulanan kesimi ifade etmektedir. Görüldüğü üzere yük uygulanan kesimin kenarlarında da bir miktar deformasyon olmaktadır.

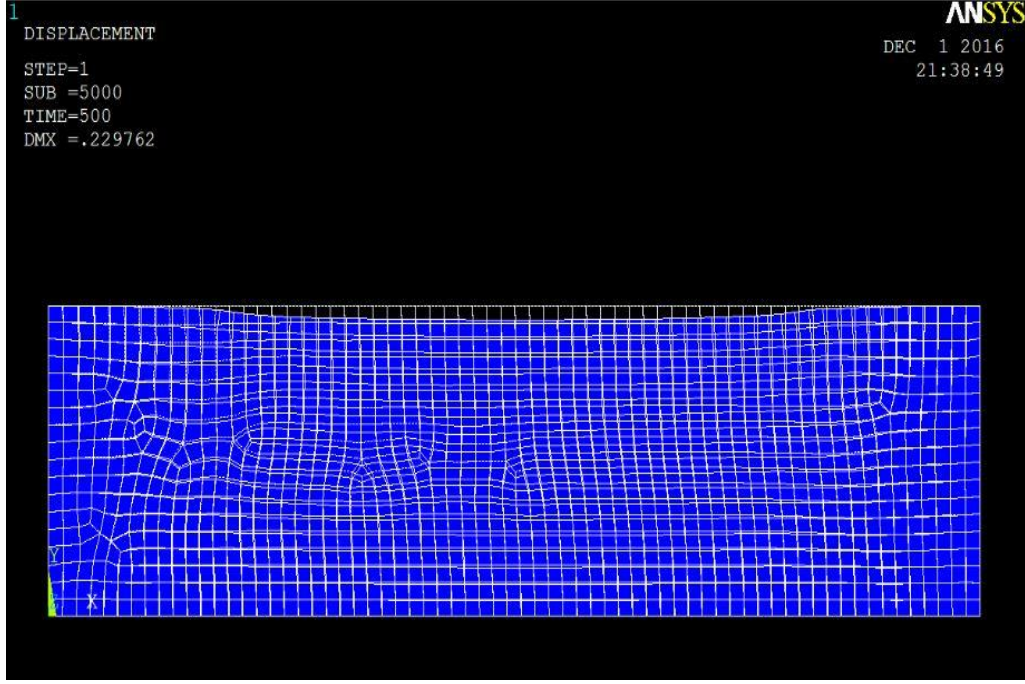


Şekil 5.35: 100°F sıcaklıkta 66N/mm'lik yükleme ile 100 tekrar yapıldığında oluşan deformasyon

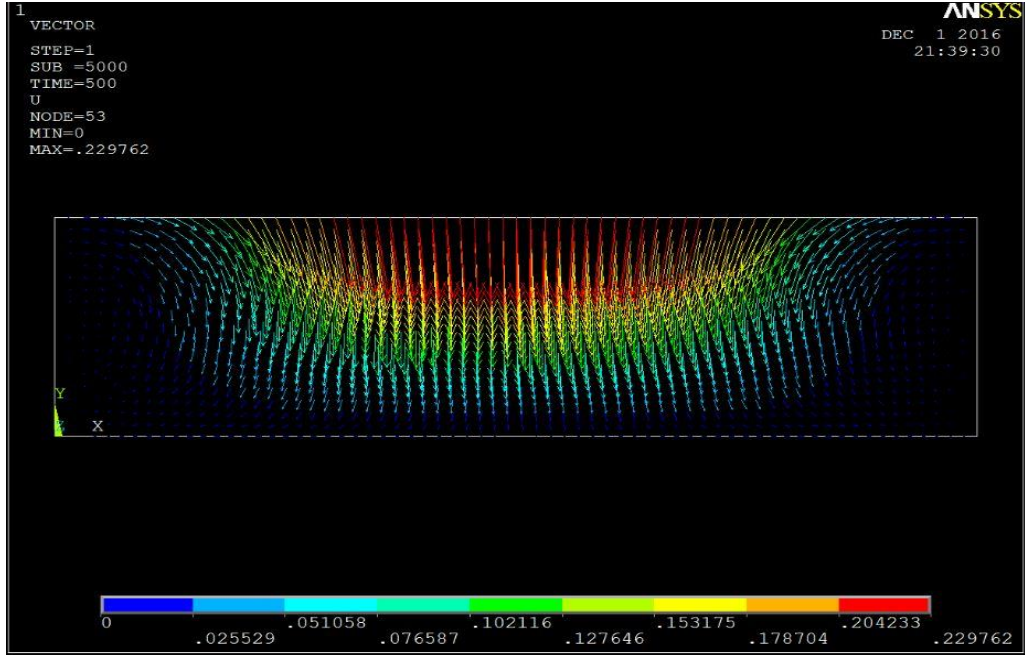


Şekil 5.36: 100°F sıcaklıkta 66 N/mm'lik yükleme ile 100 tekrar yapıldığında oluşan deformasyonun vektörel gösterimi

Şekil 5.35 ve 5.36'dan görüldüğü üzere oluşan deformasyonlar sağ ve sol kenarda az miktarda bir kabarmaya sebep olmuş ve orta kısımda oturma gözlenmiştir.



Şekil 5.37: 100°F sıcaklıkta 66 N/mm'lik yüklemeye ile 5000 tekrar yapıldığında oluşan deformasyon



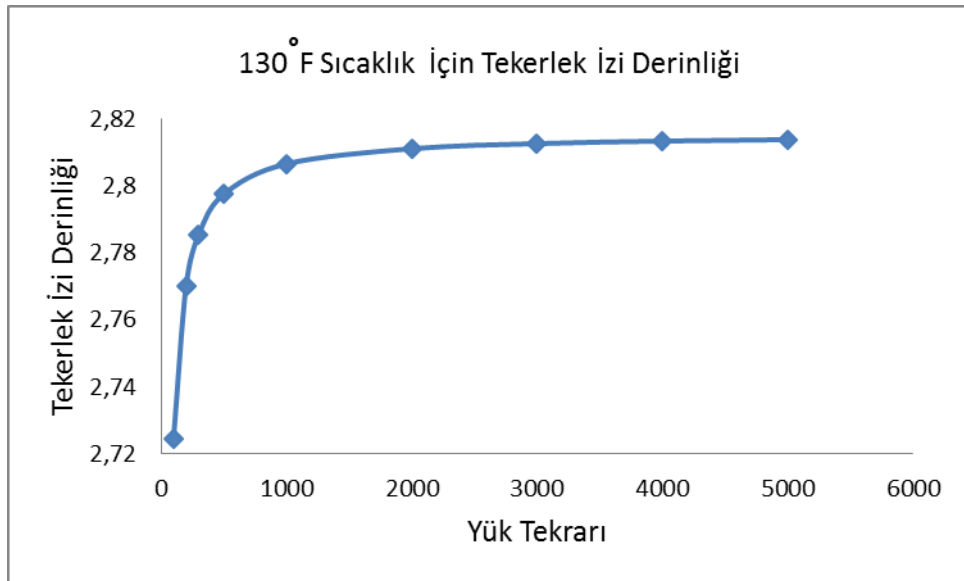
Şekil 5.38: 100°F sıcaklıkta 66 N/mm' lik yüklemeye ile 5000 tekrar yapıldığında oluşan deformasyonun vektörel gösterimi

Şekil 5.37' de 5000 tekrar yapıldığında oluşan deformasyonlar görülmektedir. 5.38' de ise malzeme hareketinin vektörel hali gözlenmiştir.

Tablo 5.8: Sıcaklık ve yük tekrar sayısına göre tekerlek izi miktarı

Yük Tekrar Sayısı (adet)	Sıcaklık (°F)			
	40°F	70°F	100°F	130°F
100	1,77342	1,90555	2,11817	2,7246
200	1,80494	1,95133	2,21886	2,77008
300	1,81763	1,9674	2,25692	2,78532
500	1,82806	1,98025	2,28763	2,79748
1000	1,83589	1,98986	2,31052	2,80657
2000	1,8398	1,99466	2,32191	2,81111
3000	1,8411	1,99625	2,3257	2,81263
4000	1,84175	1,99705	2,3276	2,81338
5000	1,84214	1,99753	2,32873	2,81383

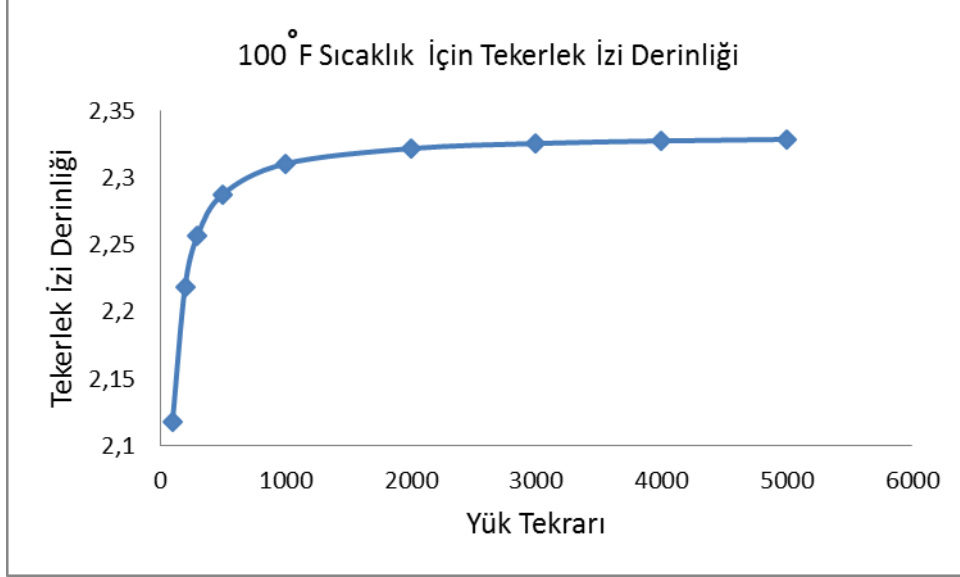
Tablo 5.8’ de tekerlek izi miktarının sıcaklığa ve yük tekrar sayısına bağlı değişimi gözlenmektedir. Sıcaklık arttıkça malzeme daha viskoz davrandığından ötürü tekerlek izi artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda düşük sıcaklıklara göre daha fazla tekerlek izi oluştuğu analiz sonuçlarından görülmektedir.



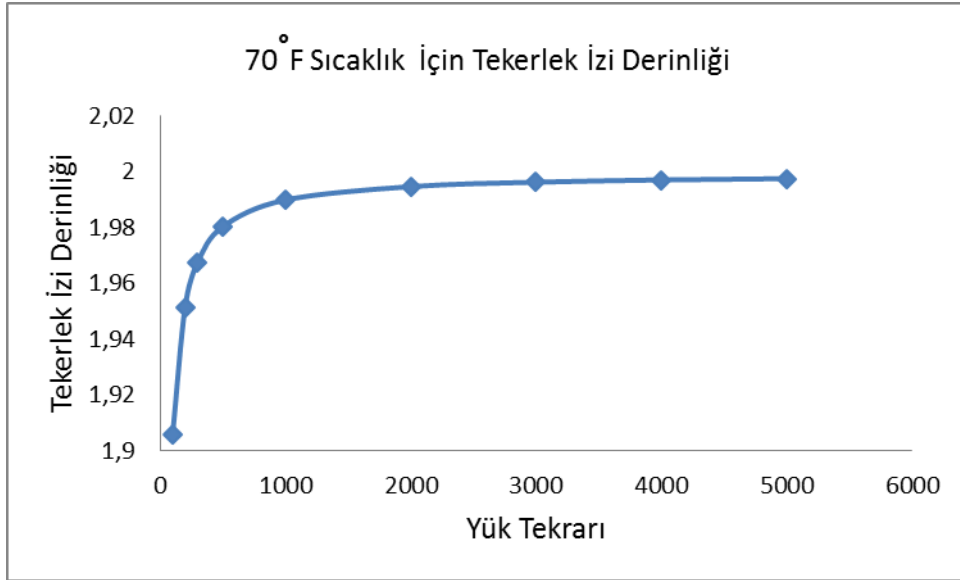
Şekil 5.39: 130°F Sıcaklık İçin Tekerlek İzi Derinliği

Şekil 5.39, 5.40, 5.41, 5.42’ de farklı sıcaklıklar için yük tekrarına bağlı tekerlek izi oluşumu görülmektedir. Asfalt kaplamaların şekil değiştirme eğrisi göz önünde bulundurulursa yaklaşık 1000 tekrardan sonra ikinci bölgeye girildiği görülebilir. Yani ilk 1000 tekrara kadar hacimsel değişimlerden dolayı hızlı bir artış

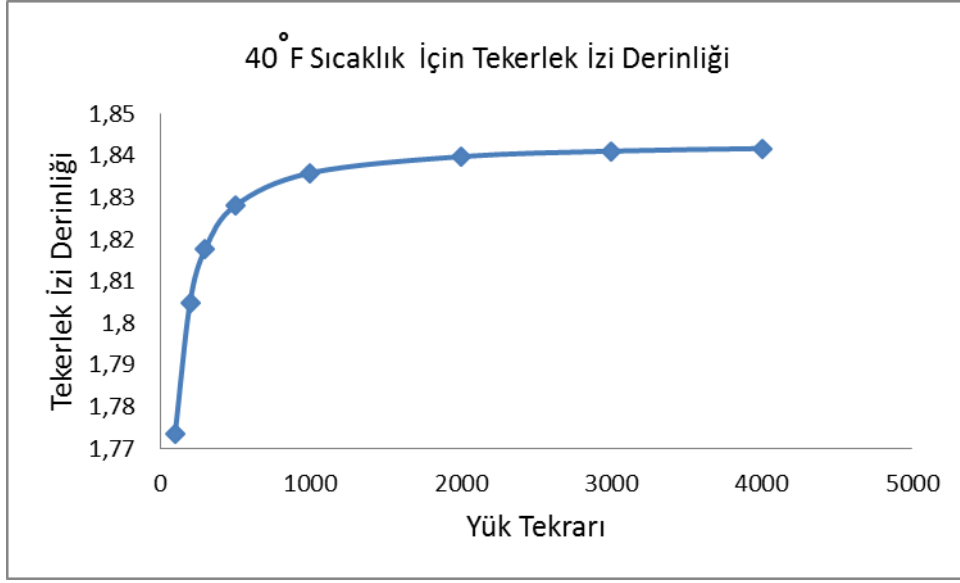
gözlemlenmiş olup, 1000 tekrardan sonra tekerlek izi artış miktarı azalmıştır. Bu da deformasyon eğrisindeki ikinci bölgeye yani geçiş bölgesine geçildiğini göstermektedir.



Şekil 5.40: 100°F Sıcaklık İçin Tekerlek İzi Derinliği



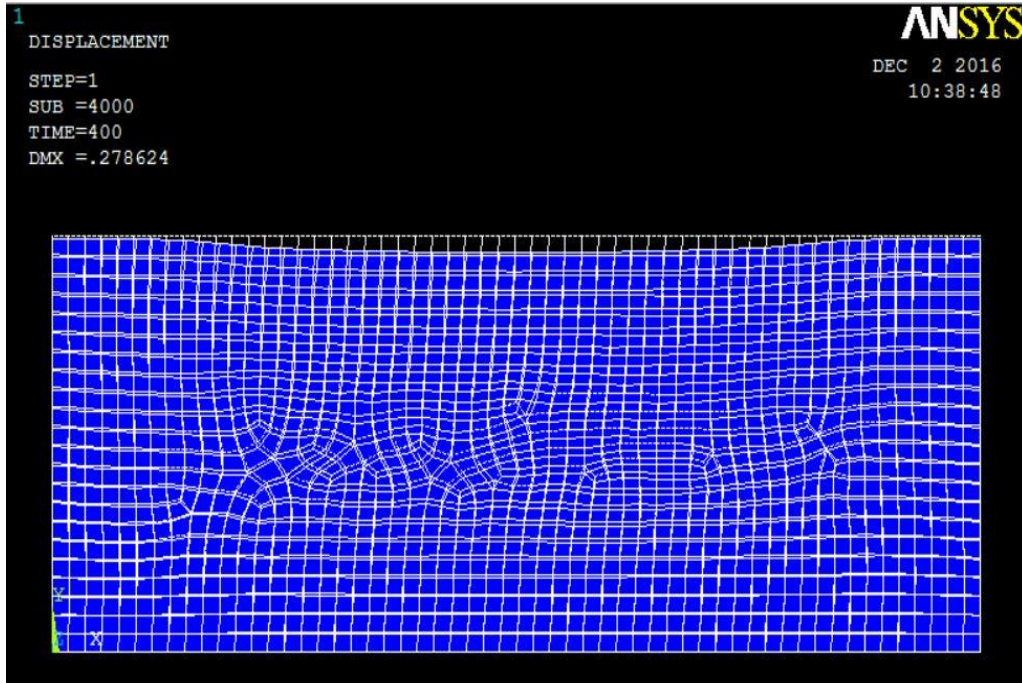
Şekil 5.41: 70°F Sıcaklık İçin Tekerlek İzi Derinliği



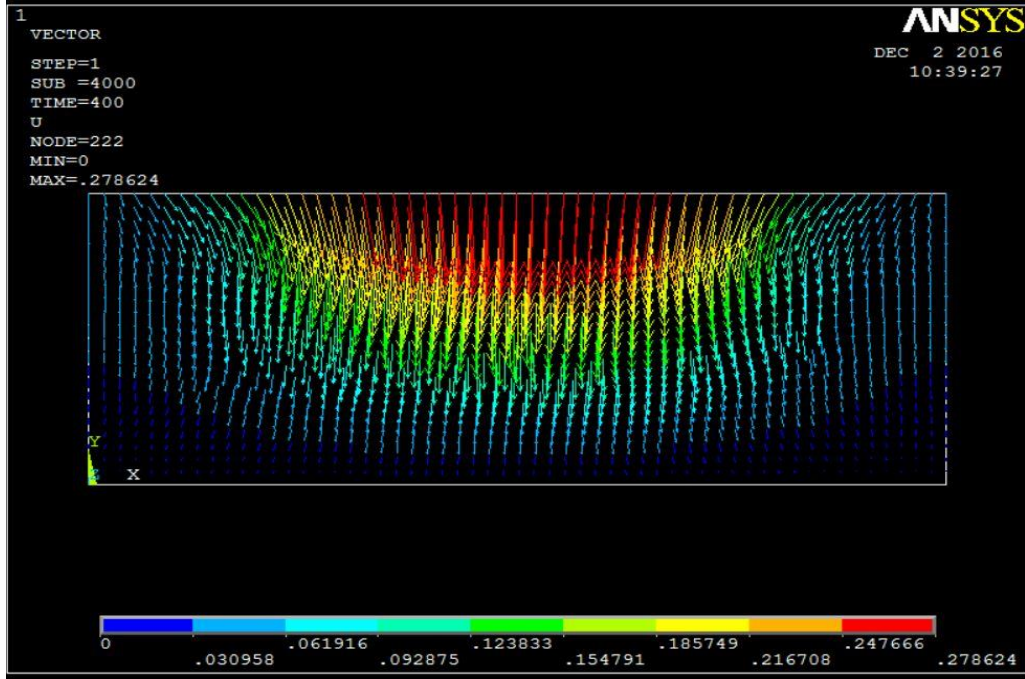
Şekil 5.42: 40°F Sıcaklık İçin Tekerlek İzi Derinliği

5.7.3 Farklı sıcaklıklar için kaplama kalınlığının artışının tekerlek izine etkisi

Şimdiye kadar yapılan analizlerde numune enkesiti 5 cm olarak modellenmişti. Ancak farklı kalınlıklardaki asfalt kaplamaların davranışını görmek adına kesit yüksekliğinin 5 cm den 7 cm ye çıktığı durum için sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Analiz için farklı sıcaklıklardaki, zamana bağlı hacim değişimleri bulunan, ikinci veri seti malzeme tanımında kullanılmıştır.



Şekil 5.43: 100°F için 4000 tekrar yapıldığında oluşan deformasyon



Şekil 5.44: 100°F için 4000 tekrar yapıldığında oluşan deformasyonun vektörel gösterimi

Şekil 5.43 ve 5.44' de için 4000 tekrar yapıldığında oluşan deformasyon görülmektedir. 66N/mm' lik yükleme için oluşan deformasyonlar vektörel haliyle de görülmektedir. Daha önce yapılan deneysel çalışmalarla, bu çalışmadan elde edilen kesit profilleri karşılaştırıldığında bir uyumsuzluk görülmemektedir.

Tablo 5.9: 7 cm kalınlık için farklı sıcaklıklarda tekerlek izi derinlikleri (mm)

Yük tekrar sayısı (adet)	7 cm kalınlık için farklı sıcaklıklarda tekerlek izi derinlikleri			
	40°F	70°F	100°F	130°F
100	2,32377	2,50025	2,78811	3,03447
200	2,36705	2,56274	2,92356	3,08654
300	2,38446	2,58465	2,97435	3,10372
500	2,39878	2,60216	3,01526	3,11734
1000	2,40953	2,61525	3,04574	3,12747
2000	2,41489	2,62178	3,06091	3,13252
3000	2,41767	2,62396	3,06595	3,1342
4000	2,42257	2,62505	3,06847	3,13504
5000	2,4281	2,6257	3,06998	3,13554

Tablo 5.9 de görüldüğü gibi kaplama kalınlığının gerekenden fazla olması tekerlek izi oluşumunu arttıracaktır. Çünkü kaplama tabakası gereğinden fazla kalın

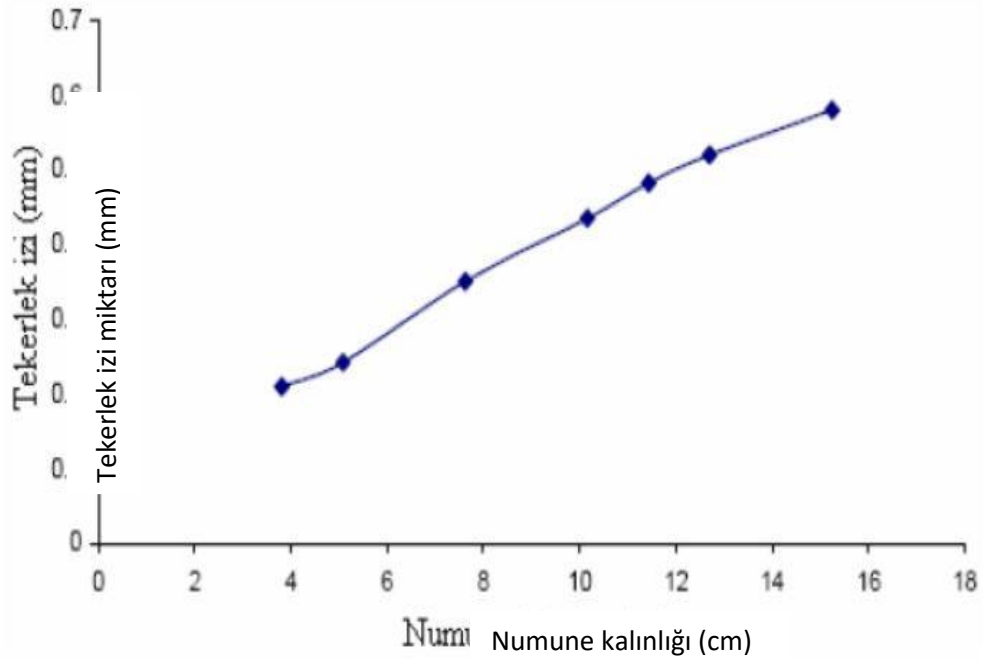
yapıldığı zaman gerekenden daha rijit bir yapıya sahip olur. Bu nedenle de gelen taşıt yüklerini tek başına taşımaya yönelecektir. Haliyle bu durum kaplamada daha fazla tekerlek izi oluşumuna neden olacaktır. Ancak kaplama kalınlığının gereğinden az yapılması taşıyıcılık konusunda eksikliklere neden olacaktır. (Kutluhan 2008)

Normalde kaplama kalınlığı arttıkça tekerlek izinin azalması beklenirken artmasının en büyük sebebi modelde kullanılan sınır şartlarıdır. Model alt ve yan kısımlarından sınırlandırıldığı için, malzeme kalınlığı arttıkça daha fazla deformasyon oluşmuştur.

Tablo 5.10: 5 ve 7 cm kalınlıklar arasındaki tekerlek izi değişiminin yüzde (%) cinsinden ifadesi

Yük Tekrar Sayısı (adet)	5 cm ve 7 cm kalınlık arasındaki tekerlek izi değişimi (%)			
	40°F	70°F	100°F	130°F
100	0,027653	0,029491	0,033453	0,015451
200	0,028241	0,030327	0,035191	0,01578
300	0,028477	0,030619	0,035827	0,015877
500	0,028672	0,030852	0,036337	0,01595
1000	0,028818	0,031026	0,036717	0,016002
2000	0,02889	0,031112	0,036906	0,016028
3000	0,028964	0,031142	0,036968	0,016036
4000	0,029177	0,031156	0,036999	0,01604
5000	0,029434	0,031165	0,037018	0,016043

Tablo 5.10 da 5 cm ve 7 cm kalınlıktaki en kesitler için yapılan analiz sonuçları arasındaki yüzdelerlik fark görülmektedir.

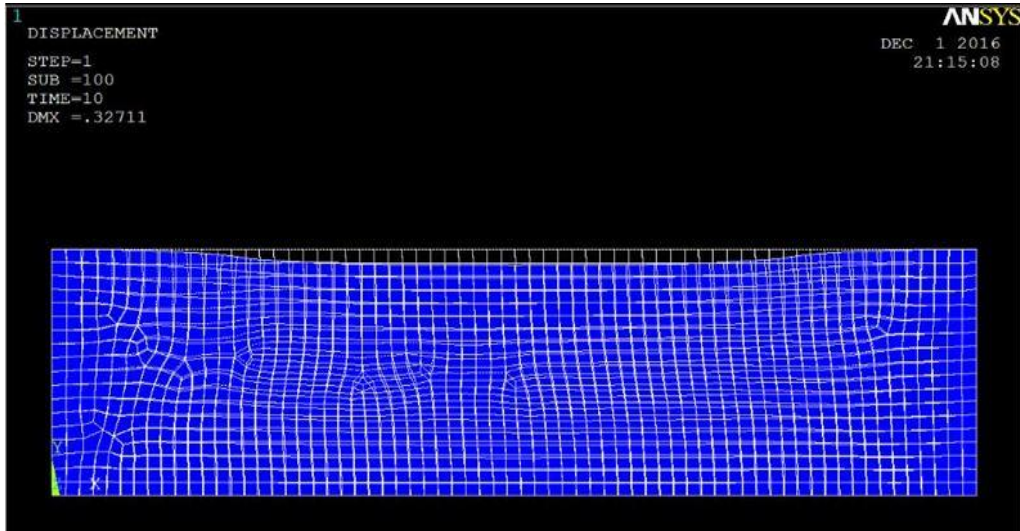


Şekil 5.45: Kaplama kalınlığının tekerlek izine etkisi (Pirabarooban ve diğ. 2003)

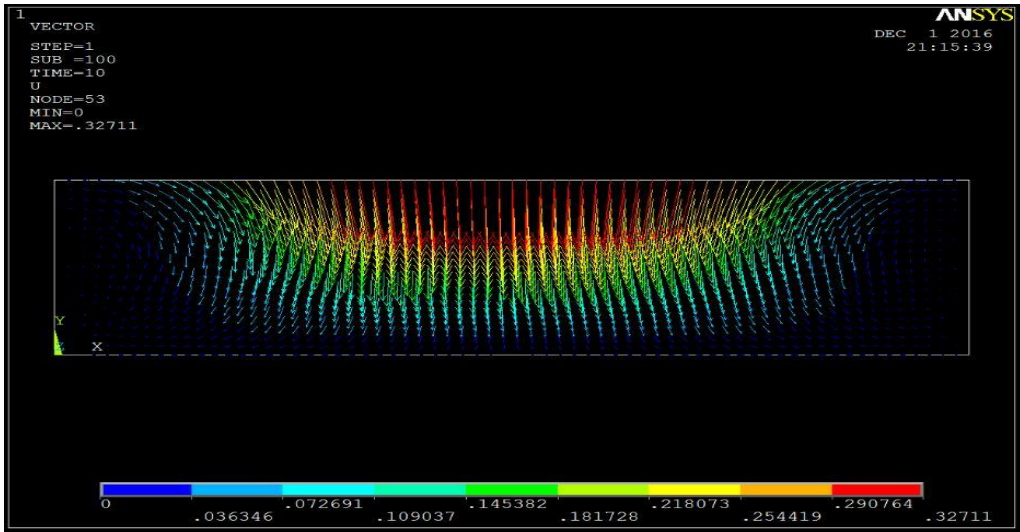
Şekil 5.45' de kaplama kalınlığı artışı ile tekerlek izi miktarı arasındaki ilişki görülmektedir. Daha önce yapılmış olan bu çalışmada kaplama kalınlığı arttıkça tekerlek izi miktarı artmıştır.

5.7.4 Farklı yük miktarlarının tekerlek izine etkisi

Asfalt kaplamaya gelen yük miktarının artması da tekerlek izine etkiyen başlıca parametreler arasında gelmektedir. Yük miktarı artışının tekerlek izi miktarına nasıl yansıdığını görebilmek adına, farklı yük miktarları için, sonlu elemanlar metoduyla tekerlek izi analizleri yapılmıştır (Şekil 5.46 ve Şekil 5.47). Malzeme olarak, farklı sıcaklıklardaki, zamana bağlı hacim değişimleri bulunan, ikinci veri seti malzeme tanımında kullanılmıştır.



Şekil 5.46: 130°F için 99N/mm' lik bir yükleme ve 100 tekrar ile oluşan deformasyon



Şekil 5.47: 130°F için 99N/mm' lik bir yükleme ve 100 tekrar ile oluşan deformasyonun vektörel gösterimi

Tablo 5.11: %10'luk yük artışında tekerlek izi miktarı

Yük tekrarı (adet)	72.6 N/mm ² için analiz sonuçları			
	40°F	70°F	100°F	130°F
100	1,94524	2,06549	2,25557	2,96737
200	1,97969	2,11509	2,29197	3,12057
300	1,99356	2,1325	2,30417	3,17828
500	2,00496	2,14641	2,31389	3,22447
1000	2,01351	2,1568	2,32117	3,25856
2000	2,01778	2,16199	2,3248	3,2754
3000	2,0192	2,16372	2,32601	3,28099
4000	2,01991	2,16458	2,32661	3,28378
5000	2,02033	2,1651	2,32698	3,28545

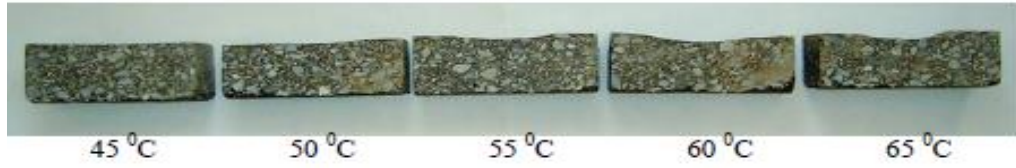
Tablo 5.12: %50'lik yük artışında tekerlek izi miktarı

Yük tekrarı (adet)	99 N/mm ² için analiz sonuçları			
	40°F	70°F	100°F	130°F
100	2,64098	2,79325	3,05442	3,2992
200	2,68725	2,86243	3,10261	3,47003
300	2,70584	2,888	3,11872	3,54049
500	2,7211	2,90856	3,13155	3,59869
1000	2,73253	2,92392	3,14113	3,64196
2000	2,73822	2,93157	3,14592	3,66337
3000	2,74012	2,93412	3,14751	3,67046
4000	2,74106	2,93539	3,1483	3,67401
5000	2,74163	2,93615	3,14878	3,67613

Tablo 5.11 ve tablo 5.12' de tekerlek izinin yük miktarı artıkça artmış olduğu görülmektedir.

5.8 Sonuçların değerlendirilmesi

Bu çalışmada viskoelastik malzemeyi tanımlamak için kullanılan verilere özgü tekerlek izi deneyi sonuçları bulunmamaktadır. Dolayısıyla analizlerin doğruluğunun kontrolü için bir takım benzeşimlerden yararlanılmıştır. Daha önce Fransız tekerlek izi deney cihazı (LCPC) ile yapılan deney sonuçları ile bu çalışmadaki analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.48: Fransız tekerlek izi cihazı ile yapılan deneyden elde edilen numune görünümleri (Kutluhan 2008)

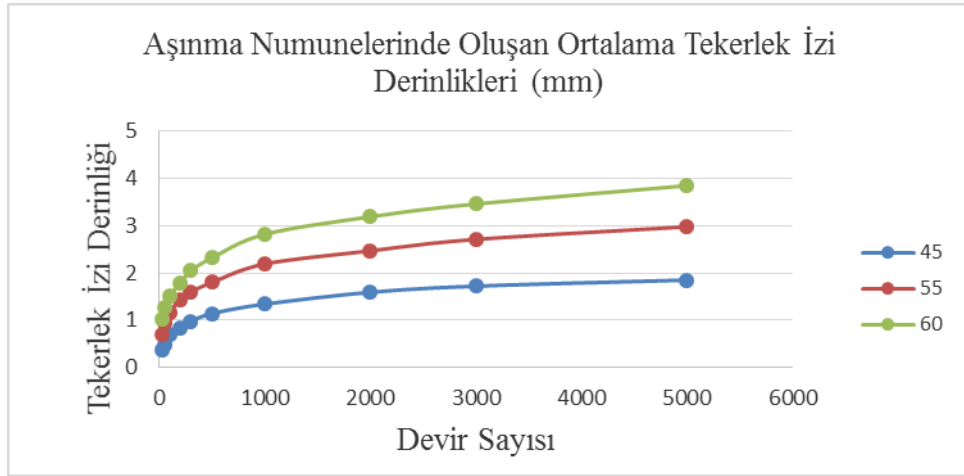
Şekil 5.48’ de Fransız tekerlek izi cihazıyla yapılmış bir deneyin numune kesitleri bulunmaktadır. Deneyde, sıcaklık arttıkça tekrarlı yüklemelerden dolayı numunelerde oluşan deformasyonlar görülmektedir. Görüldüğü üzere şekilde oluşan deformasyonlar bu çalışmada yapılan sonlu elemanlar analiz sonuçlarıyla numune şekli açısından benzerlik göstermektedir. Analiz ve deney çalışmalarının ikisinde de, yükün uygulandığı orta kısımda çökmeler, yan kısımlarda ise kabarmalar mevcuttur. Aynı deneye ait sayısal sonuçlar tablo 5.13’de görülmektedir.

Tablo 5.13: Aşınma numunelerinde oluşan ortalama tekerlek izi derinlikleri (Kutluhan 2008)

	Sıcaklık	Aşınma Numunelerinde Oluşan Ortalama Tekerlek İzi		
		45° C	55° C	60° C
Devir Sayısı	30	0,37	0,7	1,02
	50	0,49	0,94	1,26
	100	0,69	1,17	1,52
	200	0,84	1,44	1,79
	300	0,98	1,6	2,05
	500	1,14	1,8	2,32
	1000	1,34	2,19	2,82
	2000	1,59	2,47	3,19
	3000	1,72	2,71	3,46
	5000	1,85	2,98	3,85

Tablo 5.13’de daha önce yapılan Fransız tekerlek izi deney cihazı ile yapılan, bir tez çalışmasından alınan deney sonuçları bulunmaktadır. Bu deney sonuçları

farklı sıcaklık ve farklı devir sayılarında Fransız tekerlek izi deney cihazıyla yapılan bir tekerlek izi deneyinin sonuçlarıdır.



Şekil 5.49: Aşınma numunelerinde oluşan ortalama tekerlek izi miktarları grafiği (Kutluhan 2008)

Şekil 5.49'daki grafikte, yukarıdaki deney sonuçlarının grafiğe aktarılmış hali bulunmaktadır. Görüldüğü gibi tekerlek izi derinliği önce hızlı bir artış göstermiş, daha sonra daha yavaş bir artış göstermiştir. Bu da yapılan analiz sonuçlarına göre tekerlek izi oluşum eğilimlerinin doğru şekilde olduğunu göstermektedir. Deney sonuçları ve yapılan analiz sonuçları arasındaki benzeşimi matematiksel olarak ifade etmek için korelasyon analizi yapılmıştır.

Tablo 5.14: Sonlu elemanlar analizinde, ikinci veri setine, göre 66 N/mm' lik yüklemde farklı sıcaklıklar için elde edilen tekerlek izi derinlikleri ile LCPC deney sonuçları arasındaki korelasyon katsayıları

	SEM Analizi Tekerlek İzi Sonuçları (130°F) (54,44°C)	SEM Analizi Tekerlek İzi Sonuçları (100°F) (37,77°C)	SEM Analizi Tekerlek İzi Sonuçları (70°F) (21,11°C)	SEM Analizi Tekerlek İzi Sonuçları (40°F) (4,45°C)
LCPC deneyi tekerlek izi sonuçları (45°C)	0,864433	0,877322	0,869452	0,885772
LCPC deneyi tekerlek izi sonuçları(55°C)	0,85659	0,869101	0,861464	0,877395
LCPC deneyi tekerlek izi sonuçları(60°C)	0,851702	0,864906	0,856841	0,873602

Tablo 5.14'de ikinci veri setinden elde edilen sonuçların deneysel verilerle olan benzeşimi gösterilmiştir. Korelasyon analizi sonuçları tabloda görülmektedir. Korelasyon değerinin 1'e yakın çıkması benzeşmenin yüksek, 0'a yaklaşması da deney ve analiz sonuçları arasında benzeşim olmadığını gösterir. Tabloda tüm korelasyon değerlerinin 0,85 ten büyük olduğu görülmektedir. Benzer sıcaklıktaki kaplamanın davranışı tabloda koyu renk ile gösterilmiş olup aralarındaki korelasyon katsayısı 1'e yakındır.

Tablo 5.15: Sonlu elemanlar analizinde, birinci veri setinden, 66 N/mm' lik yüklemde, farklı elastisite modüllerine göre elde edilen tekerlek izi derinlikleri ile LCPC deney sonuçları arasındaki korelasyon katsayıları

	SEM Analizi Tekerlek İzi Sonuçları (2100 MPa) (54,44°C)	SEM Analizi Tekerlek İzi Sonuçları (2200 MPa) (37,77°C)	SEM Analizi Tekerlek İzi Sonuçları (2300 MPa) (21,11°C)
LCPC deneyi tekerlek izi sonuçları (45°C)	0,995139	0,995115	0,997545
LCPC deneyi tekerlek izi sonuçları(55°C)	0,997624	0,997608	0,997545
LCPC deneyi tekerlek izi sonuçları(60°C)	0,997574	0,997608	0,997545

Tabloda ilk veri setinden elde edilen sonuçların deneysel çalışmayla benzeşimi gösterilmiştir. Korelasyon katsayıları 1'e yakın çıkmıştır. Korelasyon katsayılarının 1'e yakın çıkması aradaki benzeşimin yüksek olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni ilk veri seti kullanılarak yapılan analiz sonuçlarından elde edilen eğri ile karşılaştırılan numunenin tekerlek izi oluşum eğrisinin birbirine eğilim olarak benzemesinden kaynaklanmaktadır.

Her iki veri setiyle yapılan sonlu elemanlar analiz sonuçları ile deneysel tekerlek izi derinliği verileri, tekerlek izi oluşum davranışı yönünden karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma tekerlek izi oluşum eğrilerinin benzeşimine göre yapılarak tekerlek izi deney sonuçları ve sonlu elemanlar analiz sonuçları arasındaki korelasyon katsayıları değerlendirilmiştir. Analizde kullanılan her iki malzeme için elde edilen tekerlek izi derinlikleri değerlendirilmiş ve oluşan tekerlek izi derinliklerinin kabul edilebilir miktarlarda olduğu görülmüştür.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, bitümlü sıcak karışımlarda görülen bozulma türlerinin en önemlilerinden biri olan akma tekerlek izi oluşumunun sonlu elemanlar metodu ile modellenmesi amaçlanmıştır. Modelleme için sonlu elemanlar metodu kullanılmış ve ANSYS programı ile analizler gerçekleştirilmiştir.

Modelleme yapılırken asfalt kaplama viskoelastik malzeme olarak tasarlanmıştır. Örnek alınan LCPC deney cihazında kullanılan numuneden bir enkesit alınarak 2 boyutlu analizler gerçekleştirilmiştir.

Farklı elastisite modüllerinin, farklı sıcaklıkların, farklı yük miktarı ve yük tekrar sayılarının tekerlek izi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Özetle asfalt kaplamanın malzeme özelliklerinden dolayı duyarlı olduğu parametrelerin tekerlek izi oluşumunu nasıl etkilediği incelenmiştir.

Analiz sonuçlarına göre;

- a) Birinci veri setine göre yapılan analizlerde sıcaklık 20⁰C olarak alınmış ve farklı elastisite modülleriyle yük tekrarına bağlı olarak tekerlek izinin değişimi incelenmiştir. Buna göre elastisite modülü arttıkça tekerlek izinin azaldığı analiz sonuçlarından elde edilmiştir. Ayrıca yük tekrar sayısı arttıkça da tekerlek izinde artış olmaktadır.
- b) İkinci veri setine göre malzeme farklı sıcaklıklarda tanımlanmıştır. Farklı sıcaklıklar altında asfalt malzemenin davranışı incelenmiştir. Sıcaklık arttıkça asfalt malzeme viskoz davranış göstereceğinden dolayı tekerlek izinde bir artış olması beklenmektedir ve analiz sonuçları da bu beklentiyi karşılamaktadır. Aynı şekilde yine yük tekrar sayısı arttıkça kaplamada oluşan tekerlek izi miktarının da arttığı görülmektedir.
- c) İkinci veri seti kullanılarak farklı yükleme koşulları altında analizler yapılmıştır. Yük miktarı %10 ve %50 arttırılarak tekerlek izinde oluşan değişim incelenmiştir. Yük miktarı arttıkça tekerlek izinde bir

artış gözlenmiştir. Yük miktarı artışının tekerlek izini arttırdığı görülmüştür.

- d) İkinci veri seti kullanılarak kaplama kalınlığı arttırıldığı zaman asfalt kaplamanın nasıl bir davranış gösterdiği incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre kaplama kalınlığı artışı tekerlek izi oluşumunu arttırmıştır. Kaplama kalınlığı arttırıldığı zaman tekerlek izinde bir artış meydana gelmektedir. Çünkü kalınlık arttıkça kaplama tüm yükü kendi taşıma davranışı gösterdiğinden, bünyesinde daha fazla deformasyon oluşturmuştur. Gerçek koşullarda, esnek kaplama kalınlığı arttıkça oluşacak tekerlek izinin azalması beklenirken, modelin sınır koşullarından dolayı, kalınlık arttıkça malzemede oluşan tekerlek izi derinlikleri artmıştır.

Elastisite modülü değişimine bağlı, birinci veri seti analizinde; Elastisite modülü arttıkça, karışım tipiyle alakalı olan akma tekerlek izinin azaldığı gözlenmiştir.

Sıcaklığın yükselmesi de kaplama malzemesinde oluşan deformasyonu arttıracığından yüksek sıcaklık görülen bölgelerde agreg a özellikleri daha çok önem kazanmaktadır. Viskoz davranış gösteren bitüm yerine taşıyıcılığı büyük oranda agregalar üstleneceğinden, agreg a tipi önem kazanmaktadır. Karışım da daha köşeli ve aşınmaya dayanıklı agregalar kullanılmalıdır.

Ağır taşıtların kullandığı en sağ şeritler daha fazla yük miktarına maruz kalacaklarından, sağ şeritte tekerlek izi oluşumunu önlemek adına daha az viskoz davranış gösteren bir karışım kullanılabilir. Aynı şekilde kavşaklarda otobüs duraklarında görülen tekerlek izinin azaltılması için bu bölgelerde modifiye asfalt kaplama uygulamaları yapılabilir. Modifiye asfalt kaplamalar kullanılarak, kaplamanın sıcaklık duyarlılığı azaltılıp daha uzun ömürlü olması sağlanabilir.

Malzeme özellikleri bilinen asfalt kaplama için tekerlek izi oluşumu, sonlu elemanlar metoduyla modellenerek tahmin edilebilir. Böylelikle tekerlek izi deneyi yapmadan oluşacak tekerlek izleri öngörülebilir.

7. KAYNAKLAR

AASHTO, Guide For Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., (1986).

Asphalt pavement distress summary, (2016), <http://www.asphaltinstitute.org/asphalt-pavement-distress-summary/> .

Asphalt sealcoating, (2016), <http://www.sealco.ca/sealcoating/sealcoating.html> .

Chen, T., “Determining A Prony Series For A Viskoelastic Material From Time Varying Strain Data”, NASA, 2006.

Juhasz, M., “Surface Engineering And Aggregates”, *Technical Standart Branch*, 4, 3-4, (2005).

Kaloush, K., E., “Asphalt Rubber Research”, Rubber Pavement Association Technical Advisory Board Meeting, (2002).

Kim, M., Tutumluer, E. ve Kwon, J., “Nonlinear Pavement Foundation Modeling for Three-Dimensional Finite-Element Analysis of Flexible Pavements”, *International Journal Of Geomechanics*, 9, (5), 195, (2009).

Kutluhan, S. ve Agar, E., “Bitümlü sıcak karışımlarda tekerlek izi oluşumunun İncelenmesi”, 4. *Ulusal Asfalt Sempozyumu*, 213-223, (2004).

Kutluhan, S., “Bitümlü Karışımlarda Tekerlek İzinin Oluşumunun Modellenmesi”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, *İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, İstanbul, (2008).

Mulungye, R. M., Owende, O., M., P., Mellon K., “Finite Element Modelling Of Flexible Pavements On Soft Soil Subgrades”, *Material And Design*, 739-756, (2007).

Özcanan, S. ve Akpınar, M., V., “Esnek Üstyapılarda Kritik Tekerlek ve Aks Konfigürasyonların Mekanistik Analizlere Göre Tespit Edilmesi”, *İMO Teknik Dergi*, 6625-6653, (2014).

Parking Lot Maintenance Tips, (2016), <http://www.sableasphalt.com/asphalt-2/parking-lot-maintenance-tips/>

Pavement Maintenance And Rehabilitation, (2016), <https://pavemaintenance.wikispaces.com/CVEEN+7570+Spring+2011>, (2011).

Pirabarooban, S., Zaman, M. and Tarafder, R. A., Evaluation of rutting potential in asphalt mixes using finite element modeling, *Annual Conference of the Transportation Association of Canada*, St. John's, Canada, 21-24, (2003).

Sağlık, A., ve Güngör, G.,A., *KGM Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi*, (2008).

Teng, X., Li, X. ve Chou, K., Application of Finite Element Analysis to Assess the Rutting Potential in Asphalt Pavements, *Transportation and Development Innovative Best Practices*, ASCE, 480-485, (2008).

Topçu, M., Taşgetiren, S., *Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodu*, Denizli: Mühendislik Fakültesi Matbaası, 1998.

Verstraeten, J., “Bituminous materials with a high resistance to flow rutting”, *PIARC Technical Committee on Flexible Roads*, (1995).

Walubita, L., F. ve Ven, M., F., C., “Stresses And Strain in Asphalt Surfacing Pavements”, *South African Transport Conference*, South Africa, 17 – 20, (2000).

Witczack, M. W. and El-Basyouny, M. M., “Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures”, *NCHRP*, (2004).

Xie, S., ve Zheng, C., “Effects Of The Tire-Pavement Contact Pressure On Asphalt Pavement”, *Eastern Asia Society For Transportation Studies*, 4, 401-407, (2003).

Yang, B., Zhang, Z. ve Zhang, H., “Influence of Boundary Conditions on Composite Structure Wheel-Tracking Test Based on Viscoelastic Finite Element Analysis”, *ICCTP*, ASCE, 3389-3398, (2011).

Yang, J., Lu, H., and Zhu, H., “Approaches to Rut Depth Prediction in Semirigid Asphalt Pavements”, 135, 510-516, (2009).

Zhu, H. ve Sun L., “Mechanistic Rutting Prediction Using a Two-Stage Viscoelastic-Viscoplastic Damage Constitutive Model of Asphalt Mixtures”, 1577-1591, (2013).

Zhu, J., Zhang, M. Liu, Y. Ve Gao, M., “Mechanical Analysis on Rutting Resistance in Asphalt Pavement”, *ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable*, 3611-3617, (2010).

8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Dolunay TOPÇUOĞLU
Doğum Yeri ve Tarihi : İzmir 13/02/1989
Lisans Üniversite : SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
Elektronik posta : dtopcuoglu@pau.edu.tr
İletişim Adresi : Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yayın Listesi :

Koşarsoy T., Topçuoğlu D., Kutluhan S., “ Trafik Güvenliği Ve Trafikte Saygı” 6. Karayolu Trafik Güvenliği Sempozyumu Ve Sergisi, 1, 424-441, (2015).