

**ÇANKIRI KARATEKİN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DEFORME OLMUŞ ESNEK KAPLAMALI KARAYOLLARININ FARKLI  
SICAKLIK VE TRAFİK YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ ÜÇ  
BOYUTLU MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

**Hamza FAKROUJİ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇANKIRI  
2024**

**Her hakkı saklıdır**

## TEZ ONAYI

Hamza FAKROUJI tarafından hazırlanan “**Deforme Olmuş Esnek Kaplamalı Karayollarının Farklı Sıcaklık Ve Trafik Yükleri Altındaki Davranışının Üç Boyutlu Modellenmesi Ve Analizi**” adlı tez çalışması 02/01/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Dr. Öğr. Üyesi Başak VARLI BİNGÖL

**Eş Danışman** : Dr. Öğr. Üyesi Vesile Hatun AKSANEL

**Jüri Üyeleri** :

**Başkan** : Dr. Öğr. Üyesi Başak VARLI BİNGÖL  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Çankırı Karatekin Üniversitesi

**Üye** : Prof. Dr. Murat YAYLACI  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi

**Üye** : Prof. Dr. Ender SARIFAKIOĞLU  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Çankırı Karatekin Üniversitesi

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Hamit ALYAR**

**Enstitü Müdürü**

## ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Çankırı Karatekin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğine göre hazırlamış olduğum “**Deforme Olmuş Esnek Kaplamalı Karayollarının Farklı Sıcaklık Ve Trafik Yükleri Altındaki Davranışının Üç Boyutlu Modellenmesi Ve Analizi**” konulu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, tezin Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nden başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve bu çalışmanın Çankırı Karatekin Üniversitesi tarafından kullanılan “Bilimsel İntihal Tespit Programı”yla tarandığını, “intihal içermediğini” beyan ederim. Çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması halinde ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm. Çankırı Karatekin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim (02/01/2024).

**Hamza FAKROUJI**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### DEFORME OLMUŞ ESNEK KAPLAMALI KARAYOLLARININ FARKLI SICAKLIK VE TRAFİK YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ ÜÇ BOYUTLU MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Hamza FAKROUJI

Çankırı Karatekin Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Başak VARLI BİNGÖL  
Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Vesile Hatun AKANSEL

Yüzey kaplaması olarak asfalt katmanlı bir yapı, yol ve ulaşımda kullanılan olağan kaplama sistemlerinden biridir. Bu yapı, yüzey asfalt betonu ile temel ve alt temel adı verilen kaliteli granül malzemelerin birleşiminden oluşur. Bu katmanlar aracılığıyla trafik yükü, alt temel adı verilen altta bulunan mevcut zemine aktarılır. Her katman belirli davranışlara sahip farklı türde malzemelerden yapıldığından sistem karmaşıktır. Katmanların bu yapının toplam mukavemetine katkısı da karmaşıktır ve tanımlanması zordur. Katmanlı sistemin toplam işlevi, esas olarak katmanların trafikten kaynaklanan dinamik yüklemeye karşı birleşik tepkisi ile tanımlanır. Bu nedenle her katmandaki malzemelerin özelliklerinin doğru bir şekilde hesaba katılması gerekir. Bu komplike yapıya, kaplama üzerinde oluşan deformasyonlar da eklenince, durum çözümlenmesi daha zor bir durum olacaktır. Kaplamalı kaplamanın çatlaklarla birlikte çatlak yayılma potansiyeli, kaplama stratejisinin ve kaplama hizmet ömrünün değerlendirilmesinde kilit nokta olacaktır. Bu çalışmada, çatlaklı kaplama sonlu modelini oluşturmak için analiz motoru olarak ABAQUS'taki Genişletilmiş Sonlu Elemanlar Yöntemi (XFEM) kullanılmıştır. Yöntem uygulanırken, deforme olmuş yol kesiti farklı aks yükleri (700 kPa ve 900 kPa) ve sıcaklıklar (0°C, 15°C ve 30 °C) altında analiz edilmiş, bu değişkenler altında zaman içerisinde kaplamada meydana gelen yük,deformasyon değişimleri incelenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki, asfalt karışımı ve taban tabakası elastik modülünün tekerlek izi performansı üzerinde küçük bir etkisi vardır. Ancak, sıcaklık 0°C, 15°C'den 30°C'ye yükseltildiğinde, kaplama katmanlarında belirgin bir deformasyon ve dikey yer değiştirme meydana gelmiştir.

**2024, 88 sayfa**

**ANAHTAR KELİMELER:** ABAQUS, Esnek kaplama, sıcaklık, Sonlu elemanlar, Çatlak

## ABSTRACT

Master of Science Thesis

### THREE-DIMENSIONAL MODELING AND ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF DEFORMED FLEXIBLE PAVEMENT HIGHWAYS UNDER DIFFERENT TEMPERATURES AND TRAFFIC LOADS

Hamza FAKROUJI

Çankırı Karatekin University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

Advisor: Asst. Prof. Dr. Başak VARLI BİNGÖL  
Co-Advisor: Asst. Prof. Dr. Vesile Hatun AKANSEL

An asphalt layered structure as a surface coating is one of the usual coating systems used in roads and transportation. This structure consists of a combination of surface asphalt concrete and quality granular materials called base and subbase. Through these layers, the traffic load is transferred to the existing ground below, called the subbase. The system is complex because each layer is made of different types of materials with specific behaviors. The contribution of layers to the overall strength of this structure is also complex and difficult to define. The overall function of the layered system is essentially defined by the combined response of the layers to dynamic loading from traffic. Therefore, the properties of the materials in each layer must be taken into account accurately. When the deformations on the coating are added to this complex structure, the situation will become more difficult to resolve. The crack propagation potential of the coated pavement along with cracks will be key in evaluating the pavement strategy and pavement service life. In this study, the Extended Finite Element Method (XFEM) in ABAQUS was used as the analysis engine to create the cracked pavement finite model. While applying the method, the deformed road section was analyzed under different axle loads (700 kPa and 900 kPa) and temperatures (0 °C, 15 °C and 30 °C), and the load and deformation changes in the pavement over time were examined under these variables. The results showed that the asphalt mixture and base layer elastic modulus had a small effect on the rutting performance. However, when the temperature was increased from 0°C, 15°C to 30°C, a significant deformation and vertical displacement of the coating layers occurred.

**2024, 88 pages**

**Keywords:** ABAQUS, Flexible pavement, Temperature, Finite element, Crack

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim boyunca her sorunumda yanında olan, sabrı ve bilgileriyle bana kattıkları için tez danışmanım değerli Dr. Öğr. Üyesi Başak VARLI BİNGÖL'e ve ikinci danışman değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Vesile Hatun AKANSEL'e her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Değerli danışmanım, size minnettarlığın ifade etmek için kelimeler yetersiz kalıyor. Bana sağladığınız desteğin ve rehberliğinizin yanı sıra, gösterdiğiniz hoşgörü ve anlayış için de teşekkür ediyorum. Siz olmadan bu tez çalışmamı başarmam mümkün olmazdı.

Son olarak tez sürecinde bana sabır gösteren ve desteğini daima hissettiğim, uzun ve yorucu çalışmaların boyunca her yanında olan, maddi manevi hiçbir desteğini esirgemeyen ve tüm zorlukları benimle sevgili anneme ve kardeşlerime candan ve yürekten teşekkür ederim.

**Hamza FAKROUJI**

**Çankırı, Ocak 2024**

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER .....	v
SİMGELER DİZİNİ .....	vii
KISALTMALAR DİZİNİ .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	2
2.1 ABAQUS Esnek Yol Kaplaması Tasarım İlkeleri .....	10
2.1.1 Üstyapı Tasarımında Temel Kavramlar .....	11
2.1.2 Ampirik Yöntemler .....	13
2.1.3 Mekanistik Ampirik Tasarım .....	13
2.1.4 Analitik Modeller .....	15
2.1.5 Deneysel Modeller.....	15
2.1.6 Sayısal Modeller .....	18
2.2 Esnek Üstyapı Sisteminin Sayısal Modellenmesinde Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanması .....	19
2.2.1 Katmanlı Esnek Üstyapı Sisteminin Sayısal Simülasyonu .....	19
2.2.2 Granüler Malzemelerin Sayısal Simülasyonu.....	21
3. GENEL BELGİLER .....	23
3.1 Kaplama Çeşitleri .....	23
3.2 Esnek Kaplamalar .....	24
3.3 Düşük Standartlı Esnek Yol Kaplamaları.....	26
3.4 Yüksek Standartlı Esnek Yol Kaplamaları .....	28
3.4.1 Esnek Kaplamalardaki Deformasyon Çeşitleri .....	30
3.4.2 Esnek Kaplamaların Yaşlanması .....	30
3.4.3 Esnek Kaplamaların Timsah Sırtı Çatlama.....	31
3.4.4 Esnek Üstyapılarda Çökme Deformasyonu .....	33

<b>3.4.5 Boyuna ve Enine Çatlama.....</b>	<b>34</b>
<b>3.5 Termal Çatlama .....</b>	<b>36</b>
<b>3.6 Düşük Sıcaklıkta Çatlama.....</b>	<b>38</b>
<b>3.7 Termal Yorulma Çatlaması .....</b>	<b>41</b>
<b>4. MATERYAL VE METOT .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1 ABAQUS Programının Kullanımı.....</b>	<b>43</b>
<b>4.2 Kaplama Modelinin Analizi .....</b>	<b>52</b>
<b>4.2.1 Model Geometri .....</b>	<b>53</b>
<b>4.2.2 Malzeme Özellikleri.....</b>	<b>54</b>
<b>4.2.3 Yük Özellikleri.....</b>	<b>54</b>
<b>4.2.4 Sonlu Elemanler Mesh yapısı .....</b>	<b>56</b>
<b>5. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>58</b>
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>70</b>
<b>6.1 Sonuç .....</b>	<b>70</b>
<b>6.2 Öneriler .....</b>	<b>71</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>72</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>78</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>88</b>

## SİMGELER DİZİNİ

$\text{Kg/m}^3$	Kilogram bölü metreküp
KPa	Kilopascal
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
$\nu$	Poisson oranı
%	Yüzde
$^{\circ}\text{C}$	Derece



## KISALTMALAR DİZİNİ

AASHTO	Amerikan devlet karayolu ve ulaştırma yetkilileri birliği
ABD	Amerika birleşik devletleri
AC	Asfalt beton
DEM	Ayrık elemanlar yöntemi
ESAL	Standart aks yükü
FE	Sonlu elemanlar
FEA	Sonlu elemanlar analizi
FEM	Sonlu elemanlar yöntemi
HMA	Sıcak karışımlar asfalt
ME	Mekanik ampirik
RCA	Geri kazanılmış beton agrega
UGM	Bağlanmamış granüler malzemeleri

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	GFEM konsepti (Al-Qadi ve diğerleri 2010).....	19
Şekil 3.1	Rijit kaplama ve esnek kaplama (Aboutcivil 2017).....	23
Şekil 3.2	Esnek ve rijit kaplamalar arasındaki fark (Strucore 2017).....	24
Şekil 3.3	Esnek bir kaplamanın tipik kesiti (Taher 2020 ).....	25
Şekil 3.4	Esnek kaplama kesiti (Engineeringdiscoveries 2019) .....	26
Şekil 3.5	Üst yapılarda oluşan yük dağılımları (Globalsecurity 2019 ).....	27
Şekil 3.6	Esnek kaplamada derinliğe sahip gerilme dağılımları. a) Doğrudan tekerlek yükünün altındaki yüksek gerilim alanı. b) Zemin seviyesinde azaltılmış yük ( Afaj 2019) .....	28
Şekil 3.7	Timsah çatlama (Shaikh 2022) .....	31
Şekil 3.8	Timsah çatlama (Bhatin and Gill 2019).....	32
Şekil 3.9	Timsah çatlama onarımı (Basheer and Ahmad 2020).....	33
Şekil 3.10	a). Asfalt esnek kaplamada boyuna çatlama b). Asfalt esnek kaplamada enine çatlama ( Basheer and Ahmad 2020) .....	34
Şekil 3.11	Boyuna çatlama (Mostafiz 2021).....	35
Şekil 3.12	Enine çatlama (Mostafiz 2021).....	36
Şekil 3.13	Termal çatlakların yeri (Tanzadeh 2016).....	38
Şekil 3.14	Yolun asfalt beton kaplamasının düşük sıcaklıkta çatlama (Bagdat 2016).....	39
Şekil 3.15	Oksidasyon sonucu oluşan termal çatlaklar. (a) Asfalt kaplamadaki tipik termal çatlama modeli. (b) Termal çatlama oluşumu ve kaplama kalınlığı boyunca termal gerilmelerin düzgün olmayan dağılımı (Behnia 2018) .....	40
Şekil 3.16	Aşınma sürecinde hacimsel büzülme nedeniyle çekme gerilimi geliştirme mekanizması (Reza 2020) .....	40
Şekil 3.17	Kaplama yoluyla termal stres gradyanlarının değişimi (Başak 2019) .....	41
Şekil 3.18	Farklı test numuneleri için termal gerilime karşı sıcaklık ilişkisi (Reza 2020) .....	42
Şekil 4.1	ABQUS Programının açılış görüntüsü.....	44
Şekil 4.2	Programdaki sekmeler .....	45
Şekil 4.3	Part oluşturma görüntüsü .....	46
Şekil 4.4	Yol tabakaları oluşturma görüntüsü.....	46
Şekil 4.5	Temel tabakasının oluşturulması .....	47
Şekil 4.6	ABAQUS'ta tabaka oluşturma .....	47
Şekil 4.7	ABAQUS aks modellemesi .....	48
Şekil 4.8	Malzeme özellikleri .....	48
Şekil 4.9	ABAQUS'ta özellik yaratımı .....	49
Şekil 4.10	Adımlar modülü .....	49
Şekil 4.11	ABAQUS ile sınır durumu ve yük oluşturma.....	50
Şekil 4.12	Kaplama bölümünün meshi .....	51
Şekil 4.13	Job modülü.....	51

Şekil 4.14	Çalışma kapsamında izlenen yol.....	52
Şekil 4.15	Abaqus programıyla kaplama katmanlarının 3 boyutlu modelinin genel geometrisi .....	53
Şekil 4.16	ABAQUS'ta yükleme ve modelde gösterilen araç aks yükü .....	55
Şekil 4.17	ABAQUS'ta kullanılan adımlar .....	55
Şekil 4.18	Zaman bağlı gerilme ve gerinim grafiklesi.....	56
Şekil 4.19	C3D8R elemanı (Alabdullah 2017) .....	57
Şekil 4.20	Tüm tabakaların mesh boyutlarının belirlenmesi .....	57
Şekil 5.1	0.700 MPa yük altındaki basınç elemanı için hesaplanan a) von-mises gerilme değerleri (MPa), b) gerinim değerleri, c) yer değiştirme değerleri (mm)....	59
Şekil 5.2	0.700 MPa yük altındaki ve sıcaklık 15 derece basınç elemanı için hesaplanan a) von-Mises gerilme değerleri (MPa), b) gerinim değerleri, c) yer değiştirme değerleri (mm).....	60
Şekil 5.3	0.700 MPa yük altındaki ve sıcaklık 30 derece basınç elemanı için hesaplanan a) von-Mises gerilme değerleri (MPa), b) gerinim değerleri, c) yer değiştirme değerleri (mm).....	61
Şekil 5.4	0.900 MPa yük altındaki basınç elemanı için hesaplanan a) von-Mises gerilme değerleri (MPa), b) gerinim değerleri, c) yer değiştirme değerleri (mm).....	63
Şekil 5.5	0.900 MPa yük altındaki ve sıcaklık 15 derece basınç elemanı için hesaplanan a) von-Mises gerilme değerleri (MPa), b) gerinim değerleri, c) yer değiştirme değerleri (mm).....	64
Şekil 5.6	0.900 MPa yük altındaki ve sıcaklık 30 derece basınç elemanı için hesaplanan a) von-Mises gerilme değerleri (MPa), b) gerinim değerleri, c) yer değiştirme değerleri (mm).....	65
Şekil 5.7	4.5 MPa yük altındaki basınç elemanı için hesaplanan a) von-Mises gerilme değerleri (MPa), b) gerinim değerleri, c) yer değiştirme değerleri (mm).....	67
Şekil 5.8	4.5 MPa yük altındaki ve sıcaklık 15 derece basınç elemanı için hesaplanan a) von-Mises gerilme değerleri (MPa), b) gerinim değerleri, c) yer değiştirme değerleri (mm).....	68
Şekil 5.9	4.5 MPa yük altındaki ve sıcaklık 30 derece basınç elemanı için hesaplanan a) von-Mises gerilme değerleri (MPa), b) gerinim değerleri, c) yer değiştirme değerleri (mm).....	69

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizilge 4.1 Esnek kaplamamın malzeme özellikleri .....	54
--	----



## 1. GİRİŞ

Yol kaplamaları,ülke ekonomisinin gelişiminde önemli bir rol oynamakta olup, bu gerçek göz ardı edilemez. Gelişmiş karayolları ve karayolları altyapısı ile etkin ulaşım sistemi, herhangi bir ülkede kalkınmanın temel faktörlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasında altyapı farkı yüksek ve açıktır. Ayrıca, temel yol altyapısına sahip olmayan bazı az gelişmiş ülkeler de bulunmaktadır. Bununla birlikte iyi altyapıya olan talep, yalnızca ekonomiyi değil aynı zamanda ülkenin endüstriyel gelişimini de artırma kabiliyeti nedeniyle tüm ülkelerde önemli ölçüde artmaktadır. Esnek kaplamalar ve sert kaplamalar olmak üzere iki yaygın kaplama türü bulunmaktadır. Bitümden tasarlanan esnek kaplamalar ve betondan tasarlanan sert kaplamalardır. Gelişmekte olan ülkelerin çoğunda mevcut yolların trendi bitümlü kaplamadır. Bunun nedeni bu ülkelerin herhangi bir üstyapı inşa etme çabası göstermeden esnek üstyapı inşa etme arayışında olmaları ve üstyapı geliştirmek için doğru seçimi yapmak açısından önemli görülen üstyapı türleri arasında karşılaştırma analizi yapmalarıdır (El-Basyouny 2002).

Son zamanlarda karayolu ağında büyük miktarda deformasyon nedeniyle yüksek aks yükleri kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek trafik yoğunluğu nedeniyle daha düşük hızlara sahip birçok konum da tanıtılmıştır. Bütün bunlar ve daha fazlası kaldırımda deformasyonlara neden olabilmektedir. Deformasyon kaplama rahatsızlığı şeklinde gözlemlenebilmektedir. En yaygın kusurlar oluklar, sarkmalar, dalgalanmalar, çatlaklar vb.'dir. Kaldırım sorunları araçlar ve kullanıcılar açısından pek çok soruna neden olmaktadır (Gillespie 1994). Bu sorunların devam ettirilmesi yüksek bütçe gerektirebilir ve uzun zaman almaktadır. Dolayısıyla bakım ve onarım işlemleri sırasında trafik sorunları yaşanmasına neden olabilir. Esnek kaplamaların tasarımı büyük ölçüde tecrübeye dayanmaktadır. Ancak şu anda daha mekanik tasarım tekniklerine doğru devam eden bir değişim mevcuttur. Esnek kaplamalardaki gerilmeleri ve yer değiştirmeleri belirlemek için genellikle katmanlı elastik analiz ve 2 boyutlu sonlu elemanlar yöntemleri kullanılmıştır (Uddin 1994 ve Huang 2004).

Yansıtıcı çatlakları kontrol etmek veya tekerlek izi direncini arttırmak için kullanılan, ticari olarak temin edilebilen birçok takviye ürünü (örneğin, çelik ağ, fiberglas ağ, karbon fiber ağ vb.) bulunmaktadır (Saad 2006). Ancak takviye ürünlerinin fonksiyon ve performansını etkileyen birçok faktör nedeniyle saha performanslarını tahmin etmek oldukça zordur. Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği'nin son yayını (AASHTO 2001), geosentetik takviyelerin esnek bir kaplama sistemine dahil edilmesi için tavsiye edilen bir uygulama kılavuzu sunmaktadır. Ancak bu kılavuzun amacı, geosentetik takviye katmanının eklenmesiyle sağlanan yapısal faydaları ele almamaktır. Takviye geosentetiklerinin kullanımı nedeniyle esnek bir kaplama sistemine eklenen faydaların değerlendirilmesi, Amerika Birleşik Devletleri'nde başlatılan birçok yeni araştırma projesinin hedefi olmuştur (Akbulut 2005).

## **2. LİTERATÜR ÖZETİ**

Bu konuyla ilgili yapılan çalışmalar ile ulusal ve uluslararası literatür incelenmiştir. Konuyla ilgili daha önce yapılan çalışmalardan ve öz olarak aşağıda bahsedilmiştir.

Singh Avinash Kumar ve diğerleri (2020) Bu çalışma, düşük hacimli yol tasarımı için, genellikle ince bir asfalt tabakasıyla veya asfaltsız olarak doğrudan alt zeminin üzerine yerleştirilen kalın granüler bir tabandan oluşan iki katmanlı esnek kaplamaları analiz etmektedir. Alçak yüzeyli ince veya düz yollarda kalıcı deformasyon veya tekerlek izi bozulmanın ana şeklidir. Bu çalışmada, iki katmanlı bir kaplama sistemi için hem standart tek dingilli hem de çift dingilli tekerlek düzeneğinin yüzey ve arayüz sapmalarını belirlemek için yeni bir formül önerilmiştir. Mevcut formülasyon, dikdörtgen çerçevenin kapladığı alan, tanecikli taban modülü, kaplama kalınlığı ve kaplama modülünün etkisi ve alt tabaka oranı dikkate alınarak ABAQUS kullanılarak 3 boyutlu sonlu elemanlar yazılımından elde edilen mekanik yaklaşım ve çözümlere dayalı olarak geliştirilmiştir. Poisson oranının granüler taban ve altlık üzerindeki etkisinin çok küçük olduğu gözlenmiştir. Yüzey ve cephe sapmalarını tahmin etmek için, kaplama ve taban modülü oranının, kaplama kalınlığının ve çerçeve genişliği oranının bir fonksiyonu olarak boyutsuz grafikler şeklinde sapma faktörleri üretilir.

Chaojia Liu'nun (2022) çalışması, uçak tekerlek yükleri altında prekast beton pistler için çimento kaplamaların mekanik özelliklerini incelemeyi ve prekast beton kaplamaların yapım sürecini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmada elastik tabaka hesaplama teorisi, ABAQUS sonlu elemanlar sayısal modeli, gerilme dağılım kanunu, kaplama döşemesinin farklı konumlarına etki eden düzlem tekerlek yükünün yer değiştirmesi ve buna eklenen kama çubuğunun etkisi esas alınarak, yük aktarımı kaldırım döşemesi ile döşemeler arasında elde edilmiştir. Sonuçlar tekerlek yük seviyesi döşeme kenarını ve bağlantı noktalarını etkilediğinde, bitişik döşeme kenarının dikey basıncının en büyük olduğunu, ardından döşemenin ortasının ve ardından bağlantının geldiğini göstermektedir. Maksimum dikey basınç 0.295 MPa'dır. Ayrıca düz tekerlek yükü ve döşeme kenarındaki birleşik dikey yer değiştirme, döşemenin ortasındakilerden daha büyüktür ve bitişik döşeme kenarının teğetsel yer değiştirmesinin zayıflama katsayısı yaklaşıktır. Ayrıca düzlem tekerlek yükü başka bir yüksüz plakaya yakın olduğunda saplama çubuğunun yük aktarım verimliliği daha düşüktür. Son olarak simülasyon sonuçlarının geçerliliği ve doğruluğu laboratuvar test verileriyle doğrulanmıştır. Bu sonuçlar havaalanı pistleri için prekast beton kaplamaların tasarımı ve üretimi için referans ve öneriler sağlamıştır.

Alkaissi ve Zainab Ahmed (2020) Bu araştırma, ABAQUS sürüm (6.12.1) sonlu elemanlar yazılımını kullanarak analiz için iki model kullanarak yüksek sıcaklıkların esnek kaplamadaki tekerlek izi hasarı üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamaktadır. İlk model trafik yükünün etkisini simüle ederken, ikincisi birleşik trafik ve termal yükleme koşullarını dikkate almaktadır. Elde edilen sonuçlar hem termal hem de trafik yükleme koşullarının esnek kaplamadaki tekerlek izi hasarı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Yüksek sıcaklıkların, özellikle Asfalt tabakası, temel tabakası ve alt zemin tabakası için sırasıyla (2, 29, 3,1 ve 4,3) kat tekerlek izi derinliklerinde önemli ölçüde artışa yol açtığı bulunmuştur. Yalnızca, trafik yükünü dikkate alan ilk modelde, maksimum kritik düşey şekil değiştirme alt zemin tabakasının üst kısmında yoğunlaşmıştır. Ancak trafik ve termal yükleme koşullarının birleşik etkisi altında, bu kritik maksimum değerler, artan sıcaklık nedeniyle taban katmanına kadar uzanır ve bu da daha büyük gerilimlere neden olur. Ayrıca esnek kaplamanın yüzeyindeki yerel sıcaklığın yaklaşık 45°C'ye yükseltilmesi, tekerlek izi oluşması için gereken maksimum

tekrar sayısında bir azalmaya yol açarak, yalnızca trafik yüküne dayalı tekerlek izi modeline kıyasla yaklaşık üç kat daha az hale getirmiştir. Bu, esnek kaplamada tekerlek izi oluşumuna karşı direnci değerlendirirken hem yüksek sıcaklıkların hem de trafik yükünün etkisinin dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır. Özellikle yalnızca trafik yükünü dikkate alan modellerle karşılaştırıldığında, birleşik termal ve trafik yükleme koşulları altında daha yüksek hasar meydana gelmektedir.

Ajab Khurshid ve diğerleri (2021) çalışmalarında, kaplama yapısını oluşturan farklı katmanları dikkate alırken, asfalt tabakasının iyi huylu etkilerini daha doğru bir şekilde birleştiren, kaplama yapısının 3 boyutlu bir modelini oluşturmak için yapılan çalışmayı göstermektedir. UMAT alt yordamı yoluyla Maxwell modelini kullanan doğrusal viskoelastik modellemeden, ABAQUS'un yerleşik malzeme kütüphanesinde bulunan Prony serisini kullanan entegre viskoelastik tepkiye kadar uzanan bir dizi yaklaşım dikkate alındı ve bu çalışma sırasında, CREEP'in ayrı bir alt programı aracılığıyla dahil edilen sürünmenin neden olduğu viskoelastik davranış da dahil olmak üzere diğer etkiler de dikkate alınmıştır. Viskoelastik tepkinin doğrusal olmayan etkisini de tahmin etmek amacıyla, iyi bilinen Shaperi doğrusal olmayan viskoelastik yapısal model dikkate alınmıştır. 3D Schapery modeli, yine UMAT Kullanıcı Malzemeleri alt yordamı kullanılarak uygulanabilir. Doğrusal olmayan bir viskoelastik modelin kullanılmasının kaplama tepkisinde önemli bir değişikliğe yol açtığı bulunmuştur. Döngüsel bir yükleme uygulamasını simüle etmek amacıyla çok adımlı bir analiz oluşturmak için bir dizi Python betiği geliştirilmiştir.

Ibrahim ve diğerleri (2014) Esnek kaplamanın kalınlığı yol inşaatının maliyetinde çok önemli bir faktördür. Bu çalışmada kaplama kalınlığının değiştirilmesinin yol oluklarına etkisi incelenmiştir. İki yaklaşım benimsendi, bunlardan ilki, 600 mm uzunluğunda, 500 mm genişliğinde ve 400 mm derinliğinde çelik bir kutu kullanılarak üç kat asfalt yol kaplama ve iki kat asfalt yol simüle edilerek yapılan laboratuvar testleridir. Kum tepeleri, %55,7 bağıl yoğunluğa sahip tekrarlanan yükler altında esnek bir kaplama yapısının parçası olarak kullanılarak davranışlarını incelemek için bir taban katmanı olarak kullanılmıştır. Asfalt tabakasının kalınlığındaki değişimin kalıcı deformasyona etkisi de sıfırdan (kaplamasız), 50 mm ve 100 mm'den başlayarak üç farklı kalınlığa sahip üç

model kullanılarak incelenmiştir. İkinci yaklaşım, laboratuvar testlerini simüle etmek için ABAQUS sürüm (6.12-3) kullanarak esnek kaplamalar için üç boyutlu bir sonlu eleman modeli geliştirmektir. Sonuçlar, esnek kaplamanın kalınlığının sıfırdan (asfaltsız) 50 mm'ye çıkarılmasının geçiş sayısını yaklaşık %971,42 artırdığını, kalınlığın 50 mm'den 100 mm'ye arttırılmasının ise geçiş sayısının %517,33 arttığını göstermektedir. Ayrıca, ABAQUS'un sonuçları laboratuvar testlerinin sonuçlarına oldukça benzerlik göstermektedir.

Abed, A. ve diğerleri (2012) araştırmalarında amacı yerel esnek kaplamalardaki tekerlek izi derinliğini tahmin etmektir. Üstyapı performansında tahmin modeli, üstyapı yapısı, çevre durumu ve trafik yüküne ilişkin parametre değerlerinin tahmin edilmesinde kullanılan süreçtir. Çevre ve trafik koşullarını içeren kalıcı deformasyonu hesaplamak için farklı yerel ampirik modeller kullanılmıştır. ANSYS bilgisayar yazılımı aracılığıyla sonlu elemanlar analizi, iki boyutlu doğrusal elastik düzlemsel şekil değiştirme problemini (Düzlem 82) elemanlarla analiz etmek için kullanılır. Çift lastik setli bir aksa 18 kip (80 kN) yüklemeli Standart Aks Yüğü (ESAL), tekerlek aralığı 13,5 inçtir (343 mm) ve 87 psi (0,6 MPa) lastik temas basıncı kullanılır. Üstyapı sisteminin, her katmanın izotropik, belirli esneklik modülü ve Poisson oranına sahip homojen olduğu elastik çok katmanlı bir sistem olduğu varsayılmaktadır. Her katman yatay yönde sonsuza kadar uzanacak ve alt katman dışında sonlu bir kalınlığa sahip olacaktır. Sonuçların analizi, tesviye tabakasında gerilme seviyesinin %14 ve temel tabakasında %27 oranında azalmasına rağmen, malzeme özelliklerinin değişmesi nedeniyle bu tabakalarda tekerlek izi derinliğinin sırasıyla %12 ve %28 arttığını göstermektedir.

Ahmed, Z. ve diğerleri (2014) çalışmalarında, kaplama çok katmanlı bir sistem olarak tanımlanır ve her katmanın gücü kaplamanın tamamına yansıtılır. Taban katmanı olarak iki tip malzeme kullanılır; geleneksel granül malzemeler ve geri kazanılmış beton agrega (RCA) malzemeleri. Bu çalışma, esnek üstyapılar için üç boyutlu sonlu elemanlar modelinin ABAQUS'un (6.12-1) son versiyonu ile geliştirilmesini içermektedir. Bu programla toplam (8) model, 3D eleman (C3D8R) kullanılarak simüle edilir. Bu çalışma ile farklı tipte stabilizatörlerin taban tabakasının mukavemetine etkisi tartışılmıştır. Stabilizatör olarak % (1, 3, 5, 7) ile kireç - silis dumanı (LS) ve % (0,5, 1,5) ile çimento

kombinasyonu kullanılmaktadır. Kaplama uygulamasına yönelik ABAQUS programından deformasyon sonuçları elde edilir. Kireç-silika dumanı ile stabilize edilmiş taban için (%5) oranı, stabilize edilmemiş Al-Nibae taban katmanı modeline göre yüzey deformasyonunda yaklaşık (%88,66) daha yüksek bir azalma göstermektedir. Çimento stabilizeli bazda (%1,5) oranı yüzey deformasyonunda (%79,91) azalma olduğunu göstermektedir. Geri kazanılmış taban katmanı modeli, yüzey deformasyonunda (%73,48) azalma olduğunu gösterir. Son olarak erişim yeteneği taban katman modelini güçlendirir ve bu programdan daha az yüzey deformasyon değeri elde edilebilir.

Ahmed Mohamady ve diğerleri (2013), çalışmalarında amacı çelik hasır kullanımının kaplama bölümlerinin performansına etkisini belirlemektedir. Güçlendirilmiş kaplama bölümleri 2 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Çalışma adına sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada üç kaldırım kesiti analiz edilmiştir. Birinci bölüm yerel yolların asfaltlanmasında, ikinci bölüm karayollarında, üçüncü bölüm ise otoyollarda yaygın olarak kullanılan bölümlerden biridir. Takviye farklı derinliklerde düzenlenmiştir. Çelik tel örgü takviyeli bölümlerin sonuçları, sentetik örgü takviyeli bölümlerin yanı sıra Mısır'da yaygın olarak kullanılan tipik katı kaplama bölümleriyle karşılaştırılmıştır. Analiz, incelenen tüm kaplama bölümlerinde güçlendirme için en iyi konumun temel katmanının altı olduğunu tespit edilmiştir. Karşılaştırmalar, çelik hasırla güçlendirilmiş bölümlerin performansının, geosentetik ağla güçlendirilmiş bölümlere göre arttığını ve katı bölümlerinkine neredeyse yakın olduğunu göstermektedir.

Khodary, F. ve diğerleri (2019) Esnek kaplama yapısı, birden fazla katmandan ve farklı malzemelerden oluşan karmaşık bir sistemdir. Tekerlek izi oluşumu en yaygın kaplama hatasıdır, ancak laboratuvar çalışmaları çok katmanlı kaplamalar için tekerlek izi oluşumunu tahmin etmede etkili olmayabilir. Sonlu elemanlar programları, karmaşık yapısal özelliklerin kaplama davranışı üzerindeki etkisini incelemek için kullanılmıştır. 3 boyutlu model, çatlak tahmini için ABAQUS yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Esnek asfalt kaplamaların tekerlek izi davranışı üzerindeki malzeme özelliklerini (elastikiyet modülü) ve katman kalınlığını incelemek için sonlu elemanlar analizi (FEM) ve KENLAYER yöntemi kullanılır. KENLAYER - FEM yöntemi ve modeli, kaplamanın

spesifik karmaşık yapısal tepkilerine bağı olarak elastik davranışı varsayar. Alt zemin modülü, kaplama bölümünün aşınma direncini arttırmanın anahtarıdır. Toprak ünitesi yüzey ünitesi, temel ve alt temele göre tekerlek izi oluşumunu azaltmada etkili bir etkiye sahiptir. Tekerlek izi oluşumu, malzeme özelliklerine kıyasla tabaka kalınlığındaki değişime duyarlı olmayabilir. KENLAYER'den hesaplanan oluk derinliği, FEM taramasından elde edilen eşdeğer derinlikten daha düşüktür. FEM simülasyonu, temel katman, alt temel ve alt zemin katmanındaki olukların anlık derinliğinin, asfalt katmanındaki olukların derinliğinden sırasıyla yaklaşık %4,50, %9,50 ve %20 azaldığını göstermiştir.

Rahman ve diğeri (2011) Esnek kaplamanın tasarımı büyük ölçüde katmanlı elastik ve iki boyutlu sonlu elemanlar (FE) analizini kullanan ampirik yöntemlere dayanmaktadır. Şu anda kaplama analizinde gerilim, gerinim ve yer değiştirmenin belirlenmesindeki sınırlamaları en aza indirmek için daha mekanik tasarım tekniklerine doğru bir geçiş sürmektedir. Bu araştırma, çeşitli trafik faktörlerine maruz kalan mekanik davranışı ve kaplama performansını tahmin etmek için 3 boyutlu sonlu elemanlar uygulamasının kullanımını belgelemektedir. Kaplama yaşlanması ve kalıcı deformasyon açısından kaplama hasarının başlatılması üzerindeki önemli etkiyi analiz etmek için burada farklı aks konfigürasyonu, lastik izi alanları ve şişirme basıncı araştırılmaktadır. Bu çalışmada, çalışmanın istenen doğruluğu ve yakınsamasına ulaşmak için model boyutları, eleman tipleri ve ağ oluşturma stratejilerinin ardışık deneme yanılma yoluyla alındığı ABAQUS yazılımı kullanılarak esnek üstyapı modellemesi yapılmıştır. Böylece çeşitli aks konfigürasyonları için ekonomik kaplama tasarımında uygulanacak uygun lastik izi alanı belirlenmiştir.

Serin, S. ve diğeri (2021), dünyanın birçok ülkesinde hem sert hem de esnek kaplamalar yaygın kullanım alanı bulunmaktadır. Gerilmeler ve yer değiştirmeler gibi çeşitli dış faktörler, yüzey, temel ve alt temel dahil kaplama katmanlarının tasarımında önemli bir rol oynar. Kaplama katmanlarını hesaplamak ve tasarlamak için geleneksel olarak tarihsel ampirik formüller ve yöntemler kullanılmış olsada, modern ulaşım mühendisliğinin karmaşıklığı, ampirik formüllere güvenmekten uzaklaşmayı gerektirmektedir. Günümüzde bilgisayar destekli yazılımların gelişmiş analitik yetenekleri

sayesinde karmaşık problemler etkin bir şekilde simüle edilebilmekte ve çözülebilmektedir. Bu araştırma kapsamında, farklı kaplama katmanı kalınlıklarına (30 mm, 50 mm, 70 mm, 100 mm ve 150 mm) sahip hem rijit hem de esnek kaplamalarda, trafik yüklerinin neden olduğu gerilme dağılımları ve yer değiştirmelerini incelemek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Dolayısıyla esnek ayaklardaki düşey yer değiştirmenin, rijit ayaklardaki yer değiştirmeyi %5 oranında aştığı görülmüştür. Gerilme dağılımı sonuçları, esnek iskelelerdeki gerilme değerlerinin, rijit iskelelerdekilere göre önemli ölçüde %60 oranında daha düşük olduğunu ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, rijit kaplamalardaki gerilimlerin esas olarak kaplama tabakası içinde yoğunlaştığı, esnek kaplamalarda ise bu gerilimlerin tabana ve alt temele yayıldığı gösterilmiştir. Ayrıca katman kalınlığına bağlı olarak gerilme ve yer değiştirmeyi tahmin etmek için regresyon modelleri geliştirilmektedir. Bu modeller hem esnek hem de sert kaplamalar için güçlü korelasyon ve yüksek belirleme katsayısı değerleri ( $>0,90$ ) göstermiştir.

Kuo, C. M. ve diğerleri (2004) çalışmada, esnek kaplamalar için tasarlanmış bir 3 boyutlu sonlu eleman modelinin geliştirilmesini rapor etmektedir. ABAQUS yazılımı kullanılarak modelin oluşturulması ve statik analizin yapılması süreci sunulmaktadır. Analiz verimliliğini artırmak amacıyla ideal eleman şekillerini ve sonlu eleman model boyutlarını belirlemek için kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Doğruluğun sağlanması için modelin, yükleme noktasında merkezlendiğinde yükleme çapının üç katına kadar uzanan sonlu elemanlar içermesi gerektiği ve sonlu eleman limitleri dışında sonsuz elemanların kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Model, sonuçları yarı sonsuz elastik malzemeler için POC çözümleriyle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Yüzey katmanının modellenmesinde, tekerlek yüküne tepki olarak viskoelastik davranış, asfalt betonunun sürünme testi verileri kullanılarak gösterilmiştir. Model, hesaplanan sonuçların saha testi verileriyle karşılaştırılması yoluyla daha da doğrulanmaktadır. Devam eden çabalar arasında modelin laboratuvar test sonuçlarıyla karşılaştırılarak geliştirilmesi de yer alınmıştır. Makale ayrıca geogridle güçlendirilmiş asfalt beton kaplamanın çelik kaplama üzerine yerleştirilmesini gösteren modelin pratik bir uygulamasını da sunmaktadır. Özellikle, bu uygulama asfalt betonu tabanındaki çekme gerilmelerinde önemli bir azalmaya yol açarak geogrid takviyesinin faydalarını ortaya koymuştur.

Al-Sherrawi Mohannad H. ve Muhammed Abdul Sada (2021) çalışmalarında, elastik kaplamaların tasarımı ve analizi geçmişte, kaplama katmanlarının elastik özellikleri kullanılarak yarı deneysel yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. Farklı katmanlar arasındaki karmaşık etkileşimler ve zaman tüketimi nedeniyle, geleneksel üstyapı analiz ve tasarım yöntemlerinin yerini sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve ayrık elemanlar yöntemi (DEM) gibi hızlı ve güçlü yöntemler almıştır. FEM daha az hesaplama gücü gerektirir ve sürekli ortamlar için daha uygundur. Bu çalışmada 5 katmandan (yüzey, bağ, temel, alt temel, alt zemin) oluşan esnek bir kaplamanın FEM kullanılarak analizi yapılmıştır. Alt zemin derinliğinin düşey gerilmeler ve yer değiştirmeler üzerindeki etkisini incelemek için ABAQUS yazılımı (6.14-2) kullanılmıştır. Üç farklı kalınlık (10, 20, 30 cm) benimsenirken, diğer kaplama katmanlarının kalınlıkları sabit kalmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, taban katmanının kalınlığı 10 cm'den 30 cm'ye çıktığında taban katmanının üst kısmındaki gerilme seviyelerinin yaklaşık %37 arttığını, taban katmanının üst kısmındaki gerilme seviyelerinin ise yaklaşık %64 azaldığını göstermiştir. Taban katmanının kalınlığı 10'dan 20'ye, 20'den 30'a ve 10'dan 30 cm'ye çıktığında dikey yer değiştirme sırasıyla %18, %24 ve %37 azalmıştır.

Shen, W ve David J. Kirkner (2001) çalışmalarında, asfalt-beton kaplamaların termal çatlamasını, termal çatlama olgusunun çok ölçekli doğasını, asfalt betonunun viskoelastisitesini ve kaplama arayüzündeki sürtünme kısıtlamasını hesaba katan yarı analitik bir model kullanarak incelemektedir. Bu makale, asfalt-beton viskoelastisitesinin etkilerini ve ana parametrelerin etkilerine ilişkin bir çalışmayı içerecek şekilde önceki çalışmaları genişletmektedir. Sayısal simülasyonlar, gerçek esnek kaplama yapılarının saha gözlemlerine benzer şekilde neredeyse eşit aralıklı termal çatlaklara yol açmaktadır. Bir parametre çalışması, malzeme homojenliğinin, asfalt-beton sünekliğinin, arayüzdeki sürtünme kısıtlamasının ve soğuma hızının, asfalt beton kaplamaların termal çatlamasını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

Wang, Y. ve diğerleri (2017), sonlu eleman oluk tahmin modelinin doğruluğunu arttırmak ve kamyon parametrelerinin (tekerlek grubu, aks grubu, araç hareket hızı ve lastik basıncı) oluklar üzerindeki etkilerini değerlendirmek için bu çalışmada değiştirilmiş bir 3 boyutlu kaplama modeli oluşturulmuştur. Yeni model, kaplama üzerinde tekrarlı

yükleme gerçekleştirmek için hareketli tekerlek yükünü benimsedi ve gerinim sertleşmesi formülasyonu, asfalt karışımı için sünme kanunu olarak kullanılmıştır. Sonuçlar, tek arka aksı olan bir kamyonun ön aksının, kaplama aşınması açısından arka akstan daha az önemli olmadığını göstermektedir. Çift dingilli bir kamyon, kaplamayı tek dingilli bir kamyonu göre daha kolay aşındırabilir ve çift dingilli tekerleklerin yükü, kaplamanın aşınmasını %33 oranında artırır. Ayrıca, yavaş hızda giden bir araç, kaldırım çatlamlarını büyük oranda artırabilir. Tekerlek yükü hareket hızı 80 km/saat'ten 60 km/saat'e düştüğünde eğim %60 artar. Yüksek lastik basıncı ciddi depresyona neden olur. Lastik basıncı 0,70 MPa'dan 0,90 MPa'ya çıktığında kaplamadaki maksimum düşüş %7 oranında artar. Sonuçlar, asfalt karışımının kaplama tasarımı ve kesme mukavemeti tasarımı için bir referans sağlamaktadır.

## **2.1 ABAQUS Esnek Yol Kaplaması Tasarım İlkeleri**

Üstyapı tasarımına yönelik ilk yaklaşımlarda ampirizm, alana asıl katkıyı yapmıştır. Yakın dönemde bile deney ve saha gözleminin rolü yadsınamaz. Hunag'a (2004) göre, 1920'lerden önce üstyapı tasarımı yalnızca deneyim ve gözleme dayanıyordu. Diğer birçok önemli faktör gibi alt zemin toprağının kaplama kalınlığı üzerindeki etkisi de göz ardı edilmiştir. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra ortaya çıkan ağır araç yükü, ampirik olarak tasarlanan mevcut kaplamanın başarısız olmasına neden olmuştur. 1961'de Amerikan Devlet Karayolu Yetkilileri Birliği (AASHTO) tam ölçekli bir test gerçekleştirdi (Bodhinayake 2008). Bu tanınmış test, yeni nesil tasarım kodlarının geliştirilmesine büyük bir katkıda bulunmuştur. Yükselen araç kullanımı, otoyol gelişmeleri ve teknolojide ilerlemeler, tasarım prosedürlerinde önemli ilerlemelerde neden olmuştur. 20. Yüzyılda, belirli konular veya koşullar için bir dizi farklı kod geliştirilmiştir. Örneğin, ABD'de geliştirilen AASHTO kodu bazı dünya bölgelerinde kabul edilmiştir. Avustralya'nın her yerinde kullanılan Austroads kodu ise kaldırım tasarımına odaklanmaktadır.

### 2.1.1 Üstayapı Tasarımında Temel Kavramlar

Genellikle 'yol kaplaması'ndan bahsettiğimizde, araçlar için sağlam bir yüzey oluşturmak üzere diğer katmanların veya doğal toprağın üzerine döşenen inşaat malzemelerinden oluşan esnek bir katman anlamına gelir. Birincil işlevi, araç trafiğinin neden olduğu sürekli strese ve zorlanmaya dayanmak ve birçok kullanım döngüsü boyunca bütünlüğünü korumaktır.

Tipik olarak, orijinal formundaki doğal toprak (alt zemin olarak bilinir), trafikten kaynaklanan tekrarlanan strese dayanmak için gereken mukavemetten yoksundur. Bu sorunu çözmek için inşaat mühendisliği, katmanlı inşaat malzemelerinden oluşan, kaldırım olarak bilinen özel bir yapı kullanır. Bu entegre sistem, belirli bir süre boyunca belirli trafik yüklerine dayanacak ve dayanıklılık ile maliyet etkinliği arasında optimum dengeyi sağlayacak şekilde tasarlandığı için çok önemlidir. Ayrıca yapının genellikle değişen çevresel koşullar altında trafik yüklerine hizmet edebilmesi beklenir. Bu nedenle kaplamanın çevresel yükü de dikkate alınmalıdır ve buna sıcaklık ve nem koşulları da dahildir.

Farklı malzemeler, kaplama katmanları için kullanılır, bunlar yüksek kaliteli granüller, çimento veya kireç gibi kimyasal katkı maddeleri, geri dönüştürülmüş malzemeler, bitüm ve benzer olabilir. Kaplama genellikle iki ana kategoriye ayrılır: esnek ve sert kaplama.

Sert kaplama, beton malzemeleri oluşturan çimento ve granülün birleşimidir. Bu özel kaplama yönteminin sözleri 19. yüzyılın sonlarına kadar uzanıyor. Beton levhalar, uçak boyutuna eşdeğer önemli yükleri taşıyabilme kapasiteleri nedeniyle dayanıklılıkları nedeniyle öne çıkmıştır (Huang 2004).

Tersine, esnek kaplama, bağlayıcı malzeme olarak bitümden ve yapıyı oluşturan granüler parçacıklardan oluşan bir asfalt betonudur. ABD'de asfalt yüzeyli kaplamanın ilk

kullanımı 1876 yılında Washington D.C.'deki Pennsylvania Bulvarı'nda olmuştur (Huang 2004).

Kaplama türlerinin sınıflandırılması yalnızca bileşenlerine göre değil, önemli ölçüde her birinin mekanik özelliklerine göre yapılır. Sert bir kaplama yapısında beklenen mekanik davranış kırılma eğilimindedir; bu da yük sınırına ulaştıktan sonra aniden azalan yüksek bir başlangıç dayanımına işaret eder. Pek çok senaryoda ani arıza özelliği istenmeyen bir durum olabilir. Esnek kaplama ise kademeli deformasyon yoluyla maddi hasara uğrar. Nihai mukavemetinin sert beton kaplamaya göre daha düşük olmasına rağmen, kademeli arıza mekanizması tamir ve bakıma olanak tanıyarak kayda değer bir avantaj sunar. Burada özetlenen araştırma özellikle katmanlı esnek kaplamalara yoğunlaşmıştır, dolayısıyla bu incelemenin sonraki odağı bu özel kaplama tipine odaklanmıştır.

Yollar için esnek üstyapı tasarımı öncelikle iki yaklaşımı takip eder: ampirik yöntem, daha önceki bir gelişme ve daha yeni olan mekanik-ampirik yöntem.

Ampirik üstyapı tasarımının kökenleri, toprak sınıflandırmasının oluşturulmasıyla aynı zamana denk gelen 1929 yılına kadar uzanır (Huang 2004). Bu kavram geliştirdi ve artık AASHTO yöntemi olarak bilinen toprak sınıflandırması için grup indeksi yönteminin ortaya çıkmasına neden oldu. Bu sınıflandırma kapsamında, granüler alt zemin toprakları ve agrega karışımları a-1'den a-7'ye kadar kategorize edilir ve her kategori yol inşaatında özel anlamlar ve uygulamalar taşır.

Kaliforniya taşıma oranı (CBR) test yönteminin geliştirilmesinde toprak dayanımının kaplama kalınlığına katkısı dikkate alınmıştır. (CBR) belirli bir alt zeminin penetrasyona karşı direncinin, kırılmış kayanın aynı penetrasyona karşı direncine oranı olarak tanımlanır.

### **2.1.2 Ampirik Yöntemler**

CBR'ye dayanan ampirik yöntemler tipik olarak, geçerli CBR tarafından belirlenen gerekli kaplama kalınlığı ile Eşdeğer Standart Aks Sayısı (ESA) olarak ölçülen tahmini trafik yükleri arasında bir bağlantı kurulmasını içerir. Bu korelasyon AASHTO'da (Bodhinayake 2008) belirtilmektedir; burada eşdeğer standart dingil sayısı, 80 kN'yi aşan tek dingil yükünün dört katının oranı olarak tanımlanmaktadır.

Uzun süredir kullanılmasına rağmen ampirik tasarım yönteminin sınırlamaları giderek daha belirgin hale gelmiştir. Bu yaklaşım büyük ölçüde saha gözlemlerine dayanmaktadır ancak kaplamanın mekanik davranışına ilişkin kapsamlı bilgiler sunma konusunda yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, bu araştırmaya dayalı herhangi bir formülün genişletilmesi şüpheli olabilir. Ampirik yöntemin uygulanması, yükleme ve çevre koşullarının yanı sıra kullanılan malzemelerdeki değişiklikler gibi önemli faktörlerle sınırlıdır.

Kaplama tasarımına yönelik daha bilimsel bir yaklaşım geliştirmek için ortaya çıkan bilgi ve teknolojiye dayanarak yararlanmaya yönelik artan bir baskı var. Bu yöntem sadece laboratuvar gözlemlerine değil aynı zamanda analitik bilime de dayanmayı amaçlamaktadır. Amaç, çeşitli çevresel koşullara uyarlanabilen ve yeni durumlara daha kolay uygulanabilen bir tasarım prosedürü oluşturmaktır.

### **2.1.3 Mekanistik Ampirik Tasarım**

Mekanik-deneysel (ME) süreç, kaplama tasarımına yönelik modernleştirilmiş bir yaklaşımı temsil eder ve mekanik bilimini deneysel gözlemlerle bütünleştirir. Bu yöntem, katmanlı sistemin mekanik analizi yoluyla kaplamanın birincil tepkisinin (gerilme, gerinim ve yer değiştirme gibi) hesaplanmasını içerir. Bu önemli değerleri daha sonra gerçek kaplama performansı ile ilişkilendirilerek kullanılan ampirik formüllerle birleştirilir. Genel amaç daha sürdürülebilir bir kaplama sistemi oluşturmaktır.

Bu yöntem, süreklilik, denge gibi mekanik ilkeleri ve katmanlı bir sistem içinde sanal iş ilkesini kullanır. Malzemeler esneklik, plastisite ve viskoelastisite gibi özellikler dikkate alınarak modellenir. ME tasarım süreci belirli adımları takip eder: başlangıçta katmanlı kaplama sistemi, analitik (kapalı form) veya sayısal (FE) çözüm olabilen seçilmiş bir mekanik model kullanılarak çözülür. Malzemeler, von Mises, Tresca, Drucker-Prager, Mohr-Coulomb gibi elastik, doğrusal olmayan elastik, esneklik modülü veya elastoplastik ve sertleşme veya sürekli akma gibi farklı şekillerde modellenebilir (Desai ve Whitenack 2001). İkinci adımda, mekanik modellerden hesaplanan kritik değerler tekerlek izi, hasar, mekanik ve termal yükler altında çatlama ve arızaya kadar olan döngüleri tahmin etmek için ampirik formüllere girilir. Genellikle bu son hesaplama için asfalt tabakasının altındaki çekme gerilimi, alt zemin tabakasının üstündeki dikey basınç gerilimi, tekerlek yükü altındaki dikey gerilim ve tekerlek yükü altındaki yüzey sapması gibi tek eksenli değerler kullanılır (Huang 1993).

Gerilimler deformasyona neden olur ve elemana uygulanan gerilimle aynı hızda gerininin oluşmasına yol açar. Benzer şekilde gerinim iki türe ayrılabilir:  $\varepsilon$  ile temsil edilen normal gerinim ve  $\gamma$  ile sembolize edilen kayma gerinimi.

Sürekli ortam mekaniği alanında, gerilim ve gerinim arasındaki bağlantı, malzeme davranışıyla tanımlanır. Bu korelasyonun basit bir örneği, malzemeler için doğrusal elastikiyetin varsayılmasını ve gerilim-gerinim ilişkisinin Denklem 2-1 ve Denklem 2-2 aracılığıyla ifade edilmesini içerir:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2-1)$$

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (2-2)$$

Burada E ve G sırasıyla Young ve kayma modülüdür.

#### 2.1.4 Analitik Modeller

Kaplama katmanlarının çeşitli davranışlarını modellemeye yönelik çalışmalar çoğunlukla 20. yüzyılda gerçekleştirilmiştir. Ancak Boussinesq'in (1885) teorisi daha sonra geliştirilen tüm çözümlerin temellerinden biriydi. Boussinesq (1885), yarı sonsuz ve homojen bir ortamı doğrusal elastik malzemeler üzerinden ele alarak çalışmıştır. Statik denge manipülasyonu ve bünyesel ve kinematik denklemlerin kullanımı yoluyla bir çözüm sunarak aksel simetrik bir koordinat üzerindeki konsantre bir yükü ele aldı. Ancak gerçek bir kaplama sisteminde her biri farklı elastik özelliklere sahip çeşitli katmanların varlığı nedeniyle bu çözüm kaplama mühendisliği alanına sorunsuz bir şekilde aktarılamaz.

Boussinesq (1885), tarafından geliştirilen çözümde yük, konsantre bir yükü. Bir lastik yükünü daha iyi değerlendirmek için, (Foster ve Ahlvin 1958). Boussinesq'in çözümünün entegrasyonu yoluyla çözümü dairesel bir yükleme alanı için genişletmiştir. Daha sonra, Grafiklerde ortamın yatay ve dikey gerilim ve gerinim açısından tepkisi.

Kaplamadaki çok katmanlı koşulları hesaba katmak için Burmister (1945), kaplama mühendisliğini önemli ölçüde etkileyen iki ve üç katmanlı elastik yarı uzayın çözümlerini araştırmıştır. Çözüm aynı zamanda çok katmanlı sistemlerin yanıtlarını toplama olanağı da sağlamıştır. Bu çalışmada katmanların homojen, izotrop ve doğrusal elastik olduğu varsayılmaktadır katmanların ağırlığı dikkate alınmaz, Yükleme dairesel bir alan üzerine düzgün bir basınç olarak uygulanır ve katman arayüzü süreklidir.

#### 2.1.5 Deneysel Modeller

Bu bölüm, laboratuvar deneyleri veya saha gözlemlerini kullanarak, esnek kaplama katmanları içindeki Bağlanmamış Granüler Malzeme (UGM) davranışını modellemeyi amaçlayan bilimsel çalışmalara kısa bir genel bakış sunmaktadır.

Modelleme için çok sayıda Bağlanmamış Granüler Malzeme (UGM) özelliği mevcut olmasına rağmen, bu bölüm dikkatini UGM'nin mekanik yönlerine yönlendirmektedir. Özellikle elastik davranış (hem doğrusal hem de doğrusal olmayan) ve plastik davranış hakkındaki araştırmaları gözden geçirir. Amaç, katmanlı sistemlerin nihai sayısal simülasyonu için bir temel oluşturmaktır.

Bağlanmamış Granüler Malzemenin (UGM) döngüsel davranışı ağırlıklı olarak elastik değildir ve her döngüde plastik deformasyon sergiler. Her döngüde yaşanan gerilim hem elastik hem de plastik bileşenlerden oluşur. Elastik gerinim boşaltma sırasında iyileşebilirken, plastik gerinim kalıcı kalır. Esneklik modülü, Denklem 2-3'te ifade edildiği gibi elastik gerinime dayalı olarak ölçülür.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (2-3)$$

$M_R$ =Esneklik modülü

$\sigma_d$ =Sapma gerilimi

$\varepsilon_r$ =Tekrarlanan yük altında geri kazanılabilir gerinim için eksenel gerinim

Esneklik modülü genellikle tekrarlı yük altında serbest basınç testleri ve üç eksenli tekrarlı yük basınç testleri ile belirlenir. Austroads (2004), mevcut CBR'yi dikkate alarak alt zeminin esneklik modülünü tahmin etmek için Denklem 2-4'ü önermektedir. Bu tahmin, Direnç Modülü ( $M_R$ ) değerleri 150 MPa'dan düşük olan nispeten daha yumuşak alt zeminler için geçerlidir.

$$M_R(MPa) = 10CBR \quad (2-4)$$

Seed ve diğerleri (1962) çeşitli faktörlerin  $M_R$  üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmalarda, malzeme özellikleri ile  $M_R$  arasındaki ilişkiyi belirlemek için üç eksenli bir aparat kullanılmıştır.

Selig (1987) tarafından yapılan bir çalışma, ilk yükleme döngüsü sırasında UGM'de büyük bir yanal plastik şekil değiştirme olduğunu, sonraki döngülerde ise UGM'nin elastik davranışa doğru yöneldiğini göstermiştir. UGM'nin tabanındaki çekme geriliminin ilk birkaç döngüde indüklendiği ve sonraki döngülerde indüklenen plastik gerinim tarafından iptal edildiği anlaşılmıştır.

Brown ve Pell (1974) tarafından yapılan araştırmada, geri kazanılabilir gerinim (elastik gerinim) ve gerilme döngüleri ile kalıcı gerinim ve gerilme döngüleri arasındaki korelasyon araştırılmıştır. Ek olarak, bu çalışma strese direnme ile deviatorik stres arasında bir ilişki tespit etmiştir.

Malzeme esneklik modülü ile gerilim durumu arasındaki ilişki kaplama mühendisleri tarafından bilinmektedir. UGM'nin esneklik modülü, sınırlayıcı basınçtaki artışa bağlı olarak artar ve bu, UGM'nin doğrusal olmayan elastik davranışıyla sonuçlanır. İlk doğrusal olmayan modellerden biri K- $\theta$  olarak adlandırılır burada  $M_R$ , Denklem 2-5'te gösterildiği gibi toplu gerilime bağlıdır :

$$M_R = k \left( \frac{\theta}{P_1} \right)^n \quad (2-5)$$

Burada K ve n laboratuvarında belirlenen malzeme özellikleri,  $\theta$  kütleli gerilme ve  $P_1$  ise  $\theta$ 'yı boyutsuz bir değer haline getirecek birim basınçtır. (Seed ve diğerleri. 1962). Bunu UGM'nin tekrarlanan yükleme altındaki tepkisini araştırmak için kullandı. Seed ve diğerleri bu kavramı tanıttıktan sonra, 1971'de başta Hicks ve Monismith olmak üzere araştırmacılar arasında daha fazla ilgi ortaya çıktı. Bununla birlikte, bu model ön gerilimin Bağlanmamış Granüler Malzemeler (UGM) üzerindeki etkisini gözden kaçırmaktadır.

### 2.1.6 Sayısal Modeller

Bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeler, kaplama araştırmacılarının sayısal modellemeyle fiziksel problemleri ele almaya olan ilgisini artırdı. Bu tür modeller, çeşitli sorunlara yönelik kolayca oluşturulabilir ve uyarlanabilir .

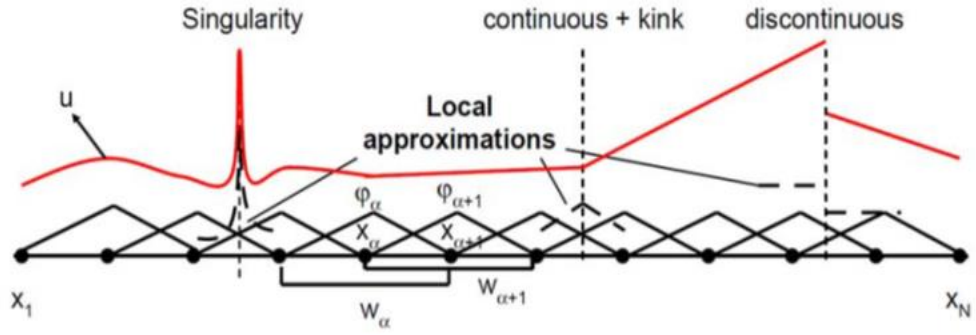
Bu bölümde esnek üstyapının sayısal modellemesinin genel bir incelemesi sunulmaktadır. Sayısal modelleme, statik veya dinamik olabilen analiz türü, modelin boyutları (eksenel simetrik, düzlem-gerinim veya üç boyutlu) dahil olmak üzere modelin geometrik özelliklerinden ve son olarak kullanılan tekniklerden de dahil olmak üzere çeşitli yönlerden incelenebilir.

FEM'in yanı sıra, üstyapı yapısını simüle etmek için başka kullanılan yöntemler de bulunmaktadır. Bunlar arasında genelleştirilmiş sonlu elemanlar, ayırık elemanlar yöntemleri ve yapay zeka gibi yaklaşımlar yer alır (Al Qadi ve diğerleri 2010).

Bu bölümün 2.2. Kısmı kaplama katmanlarının simülasyonunda FEM uygulamasını detaylı olarak ele almaktadır. Ayrıca, FEM dışındaki yaklaşımları inceleyen önemli yayınlardan bazıları da bu bölümde gözden geçirilmektedir.

Al-Qadi ve diğerleri (2010), yüzeye yakın çatlamayı incelemek için Genelleştirilmiş Sonlu Elemanlar Yöntemi'ni (GFEM) kullandı. GFEM, Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) çerçevesinde çatlak modelleme için hesaplama yetenekleri sunar. GFEM'de bir zenginleştirme fonksiyonu, elemanların Şekil fonksiyonlarının kapasitesini arttırır. Şekil 2.1 bu geliştirilmiş Şekil fonksiyonunun konseptini göstermektedir.

Zenginleştirme fonksiyonu, süreksiz, bükülme veya tekil noktalar gibi düzensizlikler boyunca yer değiştirmenin tahmin edilmesini sağlayarak FEM'in geleneksel Şekil fonksiyonunu destekler. GFEM, FEM'e çatlakları simüle etme yetkisi verirken, bu yaklaşımın dezavantajı ise artan hesaplama giderleridir. Yüzeyler arasındaki etkileşim nedeniyle dinamik yüklemelerde bu yöntemi FEM ile entegre etmek zordur.



Şekil 2.1 GFEM konsepti (Al-Qadi ve diğerleri 2010)

## 2.2 Esnek Üstyapı Sisteminin Sayısal Modellenmesinde Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanması

Bilgisayar teknolojisinden yararlanan çağdaş bir mühendislik yöntemi olan FEM, karmaşık mühendislik problemlerini ele alır. Belirli matematiksel sınır değerlerine sahip bir dizi diferansiyel denklemin çözümlerine yaklaşmayı amaçlayan sayısal bir tekniktir. FEM, önceden tanımlanmış bir hata fonksiyonunu en aza indirmek için çeşitli hesaplama yöntemleri kullanır. Bu metodolojide, fiziksel problem ortamı, elementler olarak adlandırılan daha küçük alanlara ayrıştırılır ve her bir element içinde kısmi bir diferansiyel denklem (denge denklemi gibi) çözülür. Bu elemanlar arasındaki bağlantının, genellikle süreklilik olmak üzere belirli koşulları karşılaması gerekirken, çözümün de tanımlanmış yükleme ve sınır koşullarına uyması gerekir. Bireysel eleman problemleri çözüldükten sonra tüm alan için kapsamlı bir çözüm elde edilebilir.

Son zamanlarda, kaplama mühendisliğinde FEM, kaplama yapısını büyük ölçekte simüle etmek için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu bölümde, FEM'in esnek kaplama simülasyonunda nasıl kullanıldığı incelenmektedir.

### 2.2.1 Katmanlı Esnek Üstyapı Sisteminin Sayısal Simülasyonu

Bölüm 2.2.1'de doğrusal esneklik altında katmanlı malzeme tepkilerinin hesaplanmasına yönelik ilk kavramlar özetlenmiştir. (Boussinesq 1885 ve Burmister 1945) tarafından yapılan çalışmalardan türetilen analitik çözümlere dayanan sayısal bir simülasyonu

tanıttı. Bu analitik çözümler çeşitli kaplama yazılımı uygulamalarının temelini oluşturmuştur.

Wardle (1977), 1977 yılında kaldırım tasarımına yönelik bir program olan CIRCLY'yi tanıttı. Bu yazılım, özellikle katmanlı yarı sonsuz yarı uzay için doğrusal elastik teoriyi kullanır. Doğrusal bir elastik gerilim-gerinim ilişkisini varsayar ve modellenen ortamı yatay olarak sınırsız, üstte gerilimsiz bir yüzey ve aşağı doğru sonsuz derinlik ile yalnızca dikey olarak sınırlandırılmış olarak kabul eder.

CIRCLY, yatay yönde yarı elastik modülün tanımlanmasını sağlayarak Bağlanmamış Granüler Malzemelerin (UGM) anizotropisini barındırır. Ancak yazılımın 0,5'te sabit bir anizotropi oranı vardır ve modifikasyona izin vermez. Ayrıca her yönde tekdüze bir Poisson oranı varsayılmaktadır.

CIRCLY, lastik basıncını simüle ederken bunu dairesel bir temas yüzeyine etki eden eşit dağıtılmış bir yük olarak ele alır. Malzemelerin doğrusal elastik davranış sergilediği varsayıldığından yazılım, tüm analiz adımları boyunca süperpozisyon ilkesinin geçerliliğini korur.

Esnek kaplama katmanlarını modellemek için Sonlu Elemanlar Yöntemi'nin (FEM) kullanılması sürecinde, ilk değerlendirme geometrik boyutlar etrafında döner. FEM modelleme amacıyla üç spesifik geometrik tür incelenmiştir: iki boyutlu düzlem-gerinim modeli, azaltılmış üç boyutlu aksenal simetrik model ve tam üç boyutlu model. Modelin boyutlarının hesaplama süresini önemli ölçüde etkilediğini unutmamak çok önemlidir. Üç boyutlu bir ortamdaki elastik teoride, gerilim-gerinim ilişkisi Denklemler 2-6'den 2-8'e kadar açıklanmaktadır (Yu 2006).

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})] \quad (2-6)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} - \sigma_{zz})] \quad (2-7)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})] \quad (2-8)$$

$\sigma$  = normal gerilim

$\varepsilon$  = normal gerinim

E = malzemelerin elastik modülü.

$\nu$  = Poisson oranı

Daha önce tanımlanan semboller, aksi açıkça belirtilmediği sürece bu tez boyunca tüm denklemler için geçerlidir.

### 2.2.2 Granüler Malzemelerin Sayısal Simülasyonu

Katmanlı esnek bir kaplama yapısı içinde granüler malzemelerin statik ve dinamik yüklere maruz kaldığında nasıl davrandığını anlamak, kaplama mühendisliğinde önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Bu karmaşıklık, yükün büyüklüğü, çevresel koşullar, parçacık özellikleri ve yükleme döngüleri dahil olmak üzere, Bağlanmamış Granül Malzemelerin (UGM) davranışını etkileyen çeşitli faktörlerden kaynaklanmaktadır. Ek olarak, bu malzemelerin Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanılarak modellenmesi zorluklar yaratır çünkü FEM bir sürekli ortamı temsil edecek şekilde tasarlanmıştır, oysa UGM bu açıklamaya tam olarak uymaz. Temel sorun, UGM'nin sınırlı gerilim kapasitesinden veya mevcut gerilim kapasitesinden kaynaklanmakta olup gerilim altında hızlı başarısızlığa yol açmaktadır. Bu benzersiz durumu, elemanların birbirine bağlı olduğu bir süreklilik alanı içinde simüle etmeye çalışmak, fiziksel ortamda gözlemlenen gerçek davranıştan önemli farklılıklara neden olabilir.

Kaldırım mühendisliği alanında uzmanlar, Bağlanmamış Granül Malzemelerin (UGM) davranışlarıyla ilişkili karmaşık karmaşıklıkların üstesinden gelmek için yeni

formülasyonlar oluşturmaya çalışmıştır. Bu bölüm geçmiş araştırma çabalarına genel bir bakış sağlar ve devam eden geliştirme sürecinin mevcut durumunu değerlendirir.

Bağlanmamış Granüler Malzemelerin (UGM) davranışını kopyalamak için kullanılan ilk yaklaşım, doğrusal elastikiyeti içerir burada gerilim-gerinim ilişkisi Denklem 2-6'ya uygundur. Bu metodoloji, (Ghadimi ve diğerleri 2013, Huang 1993) dahil olmak üzere çeşitli araştırmacılar tarafından kullanılmıştır. Bu yaklaşım hesaplamalarda ve formülasyonda basitlik sunarken, strese bağlı ve zamana bağlı malzeme davranışlarını karşılama kapasitesinden yoksundur. Sonuç olarak bu sınırlama, özellikle dinamik analiz gerektiren senaryolarda yanlışlıklara yol açabilmektedir.

Doğrusal elastik formülasyon, en kapsamlı araştırılan formülasyonlardan biri olarak göze çarpmaktadır ve öncelikle karşılaştırma amacıyla değerlidir. Bu tür karşılaştırmalar yapmak, bağlanmamış granüler malzemeler (UGM) ile tamamen elastik malzemeler arasındaki kontrastın boyutunun anlaşılmasını kolaylaştırır ve aralarındaki farkların anlaşılmasını sağlar.

Bağlanmamış Granüler Malzemelerin (UGM) dikkate değer önemli bir yönü, yön bağımlı tepkilerle karakterize edilen anizotropik yapılarıdır. Bu farklı davranış, malzemenin mikroyapısal özellikleriyle yakından bağlantılıdır. Buna karşılık, izotropik modeller yönsüz malzeme tepkilerini varsayar ve dolayısıyla (Sadd 2009), tarafından vurgulandığı gibi UGM'nin yönelimli davranışlarının etkisini göz ardı eder.

Malzemelerdeki farklı anizotropik davranış biçimleri (Sadd 2009), tarafından tartışıldığı gibi, sergiledikleri simetrik tepkilere göre sınıflandırılır. Bağlanmamış Granüler Malzemelerde (UGM) sıklıkla gözlemlenen yaygın bir form, çapraz anizotropik davranış olarak adlandırılır. Bu varyant, malzemenin davranışının iki (veya tam ortotropi durumunda üç) dik ekseninde farklılık gösterdiği ortotropik anizotropinin daha az belirgin bir versiyonunu temsil eder.

### 3. GENEL BELGİLER

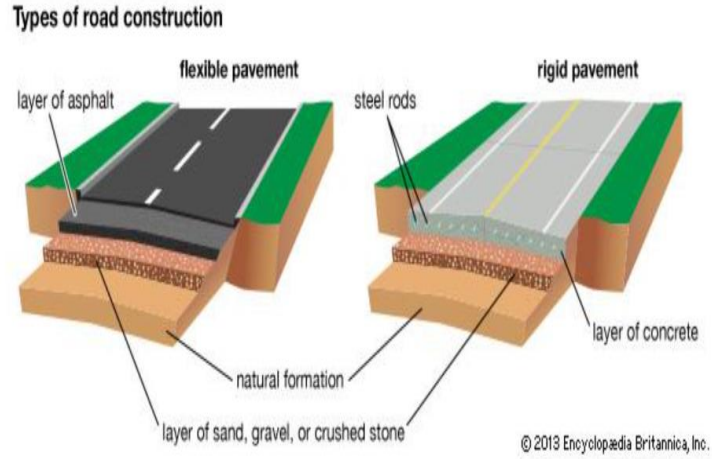
#### 3.1 Kaplama Çeşitleri

Tasarım hususları ve yükleri alt zemine dağıtma yöntemine dayanarak, aşağıdaki Şekil 3.1'de gösterildiği gibi rijit kaplama ve esnek kaplama olmak üzere iki tür kaplama mevcuttur (Thomas ve diğerleri 2003).



Şekil 3.1 Rijit kaplama ve esnek kaplama (Aboutcivil 2017)

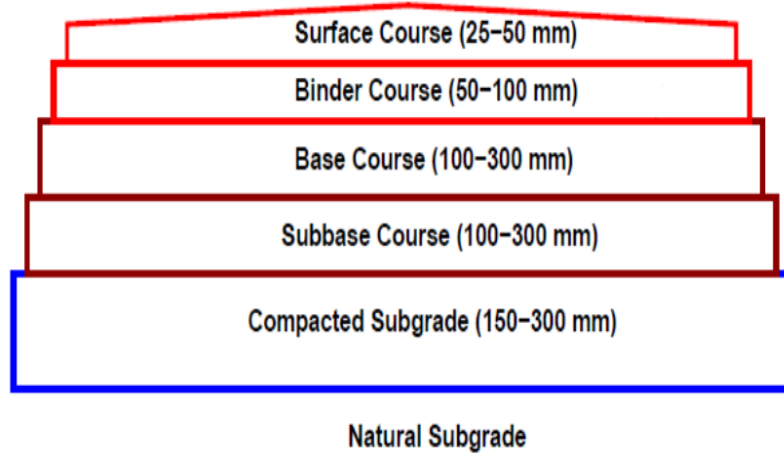
Yapısal performanslarına bağlı olarak her birinin özelliklerini bilmek gerektirir. Şekil 3.2 esnek kaplamaları ve sert kaplamaları göstermektedir. Tekerlek yükleri, granüler yapıdan geçerken birbirleriyle temas eden esnek kaplamalarda agrega tarafından aktarılır. Düşük bükülme mukavemetinden dolayı esnek kaplama esnek bir levha gibi davranır (örn. bitümlü yol). Öte yandan, rijit kaplamaların bükülme kuvveti tekerlek yüklerini zemin altına aktarır (Strucore 2017).



**Şekil 3.2** Esnek ve rijit kaplamalar arasındaki fark (Strucore 2017)

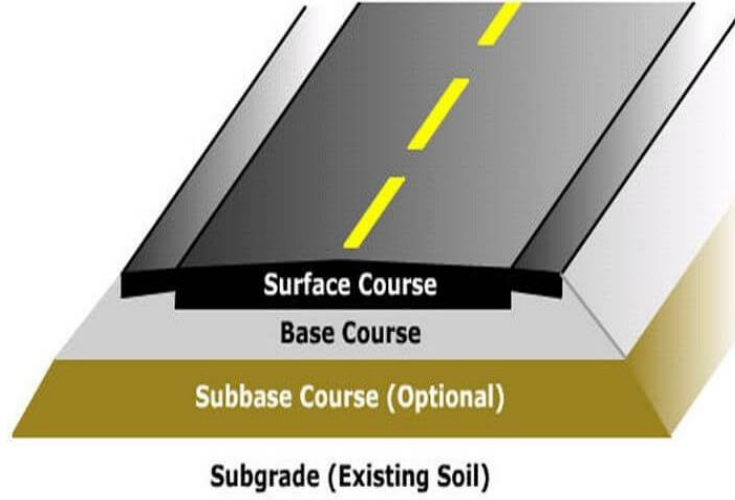
### 3.2 Esnek Kaplamalar

Bu tip kaplamalar esnek katmanlar gibi davranır çünkü toplam yapı trafik yükleri altında esner. Esnek kaplamalar normalde birkaç katmana sahiptir. Bu nedenle esnek kaplama tasarımında katmanlı sistem konsepti kullanılmaktadır. Esnek kaplamalar şoku absorbe edecek yeterli plastiğe sahiptir (Abolghasem 2018). Tanecikli yapı sırasında tekerlek yüklerini tanecik ile temas eden agregaya aktararak esnek bir tabaka olarak çalışır. Bitümlü malzemeden bir bağlayıcı ile sağlamlaştırılan kırma taş veya çakıl ve kumu içerir. Esnek kaplama tipik olarak yüzey tabakası, alt temel tabakası ve doğal olarak sıkıştırılmış alt zemin tabakaları üzerindeki alt zeminden oluşur (Şekil 3.3). Altta kalan katmanlar, temel ve alt temel tabakası için kullanılan malzemeler kırma taş veya çakıl olup bunlar ya serbest granüler olabilir ya da asfalt, kireç veya çimento ile işlenebilir (AASHTO 1993). Esnek kaplamanın yüzey katmanı, soğutulduğunda ortam sıcaklıklarında güçlü ve sert bir yapı oluşturmak için belirli sıcaklıklarda bitüm ve agrega karışımından oluşan harmanlama denklemine göre sıcak karışım asfalttan (HMA) yapılmıştır. HMA asfalt, asfalt betonu (AC), asfalt beton kaplama (ACP), bitüm veya asfalt betonu gibi birçok isimle bilinir. Esnek kaplamaların üç ana türü yaygın olarak kullanılmaktadır: geleneksel katmanlı esnek kaplama, içerikli kaya asfalt matı ve tam derinlikli asfalt kaplama (Mohod ve Kadam 2016).



**Şekil 3.3** Esnek bir kaplamanın tipik kesiti (Taher 2020 )

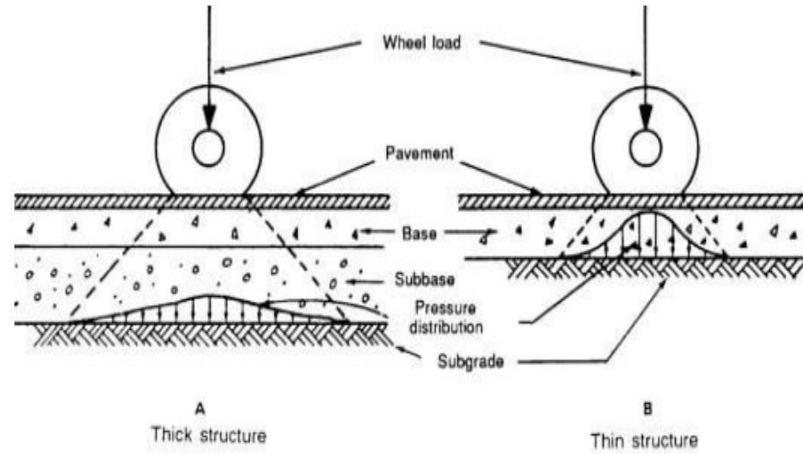
Genellikle, bitümlü malzemeler plastik büyük deformasyonlara izin veren ve viskoz özelliklere sahip malzemelerdir. Bazı asfalt yüzeyler doğrudan "tam derinlikte" inşa edilmekle birlikte, asfalt yüzeylerin çoğu çakıl temel üzerine inşa edilmektedir. Sıcak Karışımlar Asfalt (HMA), temperlenmiş, sıcak asfalt veya soğuk asfalt karışımıdır. Buna kaplama denir ve trafik yükü için sonraki tüm katmanların genel sapmasını yansıtır. Esnek kaplamanın tasarımı katmanlı sistemin özelliklerine bağlıdır. Esnek kaplama oldukça küçük bir alt tabaka yükü alanı yükler. Esnek platformun ilk kurulumunun maliyeti Rijit olana göre daha düşüktür. Dolayısıyla bu tip kaplamaların inşaat parası sağladığı düşünülür. Bununla birlikte esnek yolların birkaç yılda bir rutin bakıma ihtiyacı vardır. Ayrıca esnek yol yüzeyi hızla azalır, delinme ve çatlaklar meydana gelebilir. Zayıf drenaj ve yoğun trafik hareketi nedeniyle kullanılan malzemelerin kalitesi ve esnek malzemeler iki tipe ayrılabilir. Yüzeye yakın yerlerde kullanılan veya esas olarak yüzeye yüksek güç istenen malzemelerdir. Bu nedenle kaldırma kuvveti kaplamaya iletilir. Genellikle esnek kaplamanın kalınlığını etkiler. Şekil 3.4 esnek kaplamanın bileşenlerini göstermektedir (İbrahim 2020).



**Şekil 3.4** Esnek kaplama kesiti (Engineeringdiscoveries 2019)

### **3.3 Düşük Standartlı Esnek Yol Kaplamaları**

Lastik yükünün yolun daha geniş bir alanına dağıtılmasıyla basınç azaltılır, genel olarak esnek kaplamalar, gerilim dağıtım özelliğine sahip birçok katmana sahiptir. Gerilme altındaki kaplama tasarımı katman sistemi konseptini kullanır. Esnek yol yüzeyi çok katmanlı sistem konseptini kullanılabilir. Birkaç katman halinde monte edilebilir ve maksimum basıncı ve kompresörün üst katmanını korumak için üst katın en iyi kaliteye sahip olması gerekir. Alt tabaka daha az strese maruz kalır ve daha düşük kaliteli malzemelerle kullanılabilir. Esnek platform bitümlü malzemeler kullanılarak oluşturulmuştur. Bunlar bir tür yüzey işlemi (örneğin, daha düşük standartlı yollardan başlayarak asfalt yüzey işlemi) veya beton asfalt yüzey kaplamaları (yüksek kapasiteli yollarda, genellikle ulusal yollarda kullanılabilir) olmaktır. Kalın tabaka, alt tabakanın yüzeydeki deformasyonunu yansıtır. Elastik darbe durumunda tasarım, esnek platformun genel performansına bağlı olacaktır ve ortaya çıkan gerilim, toplam kaplama zemininin izin verilen geriliminden daha az kalmalıdır. Böylece düşük seviyeli veya düşük kaliteli katmanlar yüzeyin altında tutulurken diğerleri yüzeyde veya yüzeye yakın tutulur ve bu, kaplamanın farklı kısımlarındaki stres ve yüklerin etkin yönetimine yardımcı olur. Şekil 3.5 iskenin yapısını göstermektedir (Globalsecurityorg 2019).

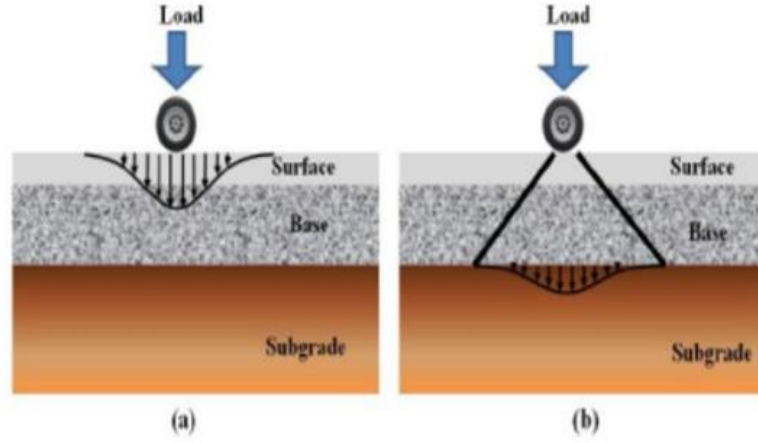


**Şekil 3.5** Üst yapılarda oluşan yük dağılımları (Globalsecurity 2019 )

Genellikle %75 ila %90 arasında değişen doygunluk dereceleriyle doymun olmayan sıkıştırılmış toprak da inşa edilmiş kaplamalarda kullanılır. Zemin parçacıkları arasında suyun bulunmasından kaynaklanan negatif boşluk suyu basıncı (toprak emme), kaplama temellerinin sağlamlığı ve mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. İnşaat sırasında, negatif gözeneklilik nedeniyle alt zeminin kesme dayanımı yüksektir. Otoyolun yüksek taşıma kapasitesine sahip olması ve tasarlandığı gibi çalışması gibi su basınçları, zamanla üstyapı yapısının en zayıf kısmına (alt zemin) su girişi, hacim değişimi ve üst toprağın deformasyonu nedeniyle kaplama yüzey pürüzlülük indeksinde bir artışa neden olmaktadır ( Afaj ve diğerleri 2019).

Bu nedenle üstyapı yapısı, araç yükleme hareketinden kaynaklanan yükleri destekleyecek ve bunları temel zeminine güvenli bir şekilde dağıtacak şekilde oluşturulur ve bu, üstyapının her katmanındaki gerilme, şekil değiştirme ve düşey sehim gelişmelerine yansır. Şekil 3.6 derinlikle birlikte basınçların dağılımını göstermektedir (Faheem 2014). Yapı içerisinde belirli alanlarda oluşan kritik değerler bulunmaktadır. Bunlar kaplamayı etkiler ve temel olarak performansını etkilerdir (Ntirenganya 2016). Hareketli yükün kaplama üzerindeki etkisi, kaplamanın her katmanında düşey gerilmelerin, kayma gerilmelerinin, eğilme gerilmelerinin ve şekil değiştirmelerin gelişmesinin sonucudur. Hareket eden araçların tekerlekleri tarafından dağıtılan düşey yükler kaplamada basınç gerilmesine neden olur, gerilmeler kaplama yüzeyinde kalıcı deformasyona ve dolayısıyla

tekerlek izlerine yol açarken, deformasyonun hızı kaplama malzemelerinin mukavemet özelliklerine bağlıdır (Faheem 2014).



**Şekil 3.6** Esnek kaplamada derinliğe sahip gerilme dağılımları a) Doğrudan tekerlek yükünün altındaki yüksek gerilim alanı. b) Zemin seviyesinde azaltılmış yük ( Afaj 2019)

### 3.4 Yüksek Standartlı Esnek Yol Kaplamaları

Yüksek düzeyde esnek kaplama, kaplamayı inşa etmek ve stabiliteyi sağlamak için pahalı hammaddelerin kullanımını içerir. Üretim için farklı türde malzemeler kullanmak mümkündür. Geleneksel elastik yol yüzeyi, düşük kaliteli, esnemeyen malzemelerin yanı sıra pahalı hammaddelerin yüksek düzeyde gerilime maruz bırakıldığı birkaç katmandan oluşmaktadır. Alternatif olarak asfalt tabakasının doğrudan zemin zemine yerleştirilmesiyle tam asfalt kaplama oluşturulmuştur. Trafiğin yoğun olduğu ve yerel malzemelerin bulunmadığı durumlarda bu daha uygundur. Ayrıca kompakt asfalt kaplama, iki asfalt tabakası arasına kalın ve yoğun bir tabaka yerleştirilerek oluşturulur. Tabana iyileştirilmiş asfalt betonu yerleştirilir ve bu da dikey toprak basıncını açıkça azaltır ve yüzey suyunu önler, bitümlü tabaka aynı zamanda bitümlü yüzey kaplama olarak da adlandırılır ve kaplamayı iyileştir. Genel trafik koşulları ve yapıldığı alanın veya dış ortamın sıcaklığı dikkate alınarak inşa edilmiştir. Halının kalınlığı 25 mm'ye kadar olup, yüzey işlemleri yolun toplam kalınlığına dahil edilmemelidir. Yüksek standartlara sahip esnek serimin temel amacı, lastik yükleri nedeniyle iletilen gerilimleri, taban

katmanının taşıma kapasitesini aşmayacak şekilde azaltmaktır ( Engineeringdiscoveries 2019).

Aşağıdaki adımlarda esnek üstyapıların avantajları kısaca verilmektedir:

- Esnek üstyapı inşa etmenin maliyeti genellikle sert üstyapının maliyetinden daha azdır.
- Daha spesifik olarak faz inşaatı olarak adlandırılan bir inşaat türü olarak kabul edilmektedir.
- Kolayca değişim veya bakım yapılması mümkündür.
- Araçların hareket sırasında herhangi bir dirençle karşılaşmadığı, yağ kullanımını teşvik eden ve daha iyi kondisyon sağlayan düzgün yollar sayesinde yağ tüketimini verimli bir şekilde yönetmek mümkündür.
- Pürüzsüz inşaat kaplamalarından söz ettiğimizde lastiklerin yırtılma veya hasar görme ihtimali daha azdır çünkü direnç etkisi lastiklere olan etkisinden daha az olur ve daha uzun ömür sağlar.

Esnek kaplamaların dezavantajları şu şekilde özetlenebilir:

- Yollarda gücü azaltır. Bunun yanı sıra daha fazla destek katmanına ihtiyaç var. Düşük güç de sınırlıdır.
- Yol ömrü boyunca inşaat içerisinde oluşan drenaj ve gözenekleri engeller. İlave drenaj süresinin zayıf olması kaplamanın dayanıklılığının azalmasına ve ömrünün kısılmasına neden olmaktadır.
- Sürekli bakım gerektirir. Üstelik bakım maliyetinin yüksek olması kaplamayı pahalı bir program haline getirmektedir.
- Karayollarında olduğu gibi yoğun trafik koşullarında esnek kaplamalar pek verimli olmaz ve kullanım ömrü oldukça kısa olur.

### **3.4.1 Esnek Kaplamalardaki Deformasyon Çeşitleri**

Asfalt yol, kaplama üzerindeki yüksek gerilim nedeniyle birçok sıkıntıya maruz kalmakta, bu da çatlaklara ve birçok kusura neden olmaktadır. Bu deformasyonlar yol kullanıcıları için rahatsızlık ve yolun güvenli olmaması gibi pek çok soruna neden olur. Etkilenen aşırı yük, sıcaklık değişim oranı, iklim etkisi (yağmur) ve diğer faktörlerin bir sonucu olarak her türlü kaplamanın uygun bakıma ihtiyacı vardır. Yol yüzeyinde onu etkileyen faktörlerden birinden dolayı çatlaklar meydana gelirse, bakım çalışması gerektirir ancak bazen çatlakları tedavi etmek veya yeniden inşa etmek için bakım pahalı olabilir.

Yol bakımı, tüm yol sisteminin önemli bileşenlerinden biridir. Karayolları iyi tasarlanmış ve inşa edilmiş olsa bile bakım gerektirebilmektedir. Yol bakımı, yolun orijinal inşa edilmiş durumunda korunması, çevredeki kaynakların ve kullanıcı güvenliğinin korunması ve güzergah boyunca verimli, rahat seyahatin sağlanması için gerekli ve gereklidir. Ne yazık ki, bakım sıklıkla ihmal ediliyor veya yanlış yapılıyor, bu da yolun hızla bozulmasına ve sonuçta hem iklim hem de araç kullanımından kaynaklanan etkilerden dolayı arıza yapılmasına neden olur. Bakım gerektirmeyen bir yolun inşa edilmesi ve kullanılması mümkün değildir (Alaamri ve diğerleri 2017).

Esnek kaplamalardaki deformasyon çeşitleri aşağıdaki gibi gösterilmektedir:

### **3.4.2 Esnek Kaplamaların Yaşlanması**

Asfalt yaşlanması, asfalt bağlayıcıların sertleşmesine ve hem uygulama hem de servis sırasında gevreklemeye neden olan ve kaplama yüzeylerinin bozulmasına önemli ölçüde katkıda bulunan çok karmaşık bir süreçtir (Bell ve diğerleri 1994). Asfalt bağlayıcılar, üretim, karıştırma, döşeme işlemleri sırasında ve aynı zamanda bir kaplama sisteminin hizmet ömrü boyunca mekanik özellikleri ve kimyasal yapıları zamanla değişen organik maddelerdir (Vallerga 1981). Basit bir deyişle, oksidatif yaşlanma asfalt bağlayıcının sertleşmesine ve dolayısıyla kaplamanın bozulmasına neden oluyordur. Birçok araştırma,

asfalt yaşlanmasının temel olarak iki aşamada meydana geldiğini ortaya koymuştur: kısa vadeli ve uzun vadeli yaşlanma koşulları (Bell 1989). Kısa süreli yaşlanma aşaması, asfalt bağlayıcıların agregalarla harmanlanması, karıştırılması ve sıkıştırılması işlemlerini içeren yüksek sıcaklıktaki üretim aşamasında meydana gelir. Karışımın üretilmesinden sonra sıcaklıklar soğumasına rağmen, asfalt bağlayıcılardaki yağlar gibi uçucu fraksiyonların kaybı, bağlayıcıların oksitlenmesinde önemli rol oynar. Asfalt kaplama malzemesi performansı ve hizmeti sırasında, sıcaklık, trafik yükü ve çevresel etkiler gibi çok sayıda faktör nedeniyle bağlayıcıların uzun süreli yaşlanması meydana gelir (Lee 1973). Asfalt kaplama sisteminin üretiminden hizmet ömrüne kadar olan koşullar ne olursa olsun, yaşlanmanın dayanıklılık kaybıyla sonuçlanacağı kesindir (Kumbargeri ve Biligiri 2016).

### **3.4.3 Esnek Kaplamaların Timsah Sırtı Çatlaması**

Timsah çatlağı, granüler ve bakımsız tabanlı asfalt kaplamalarda en sık görülen yapısal sıkıntıdır ve Şekil3.7'de gösterildiği gibi yorulma bozulması sonucu oluşmaktadır. Timsah çatlağı, tekerlek yollarında paralel uzunlamasına kırıklar olarak başlar ve birbirine bağlı çatlaklardan oluşan bir ağa dönüşür timsah derisine benzemektedir (Shaikh ve diğerleri 2022)



**Şekil 3.7** Timsah çatlama (Shaikh 2022)

Timsah çatlağı, küçük, düzensiz şekilli kaldırım parçaları oluşturan bir dizi birbirine bağlı çatlak olarak tanımlanır. Bu düzensiz şekilli parçaların boyutları 12 inçten 24 inç'e kadar değişmektedir. Çatlama deseni timsah derisinde bulunan desene benzemektedir ve dolayısıyla isminin kaynağıdır. Bu tür çatlamanın nedeni, yüzeyin parçalanmasına ve sonuçta çukurlara neden olan tekrarlanan trafik yüklemeleri nedeniyle sınır tabakasının hasar görmesidir. Çatlama, yüzey tabakasının alt kısmında veya çekme gerilmelerinin en yüksek olduğu stabilize tabanda gözden uzakta başlar. Kaplama tekrarlanan tekerlek yüklemeleri altında esnedikçe çatlak yüzeye doğru yukarıya doğru hareket eder ve sonunda kırılmaya yol açar. Tekerlek yüklemesi devam ettikçe daha fazla çatlak oluşmaktadır. Onarım - Onarımın türü, arıza alanının kapsamına ve ciddiyetine bağlıdır. Timsah çatlağının derecelendirilmesinde kullanılan üç şiddet düzeyi vardır (Bhati and Gill 2019).



**Şekil 3.8** Timsah çatlama (Bhatin and Gill 2019)

Timsah çatlaklarına harita çatlama da denilmektedir. Bu asfalt betonunda meydana gelen yorulma hasarıdır. Timsah çatlama genellikle araçların sürekli olarak durdurulduğu kavşaklarda görmektedir (Şekil 3.8) (Basheer and Ahmad 2020).

Bu deformasyonların onarımı Şekil 3.9'da görüldüğü gibi ısıtılmış bitümün, çatlaklar üzerine dökülmesiyle gerçekleştirilmektedir.



**Şekil 3.9** Timsah çatlama onarımı (Basheer and Ahmad 2020)

#### **3.4.4 Esnek Üstyapılarda Çökme Deformasyonu**

Yol yüzeyinde meydana gelen çökme, genellikle gerçek kaplama yüzeyinden daha düşük, çatlaklı ve çatlaksız lokalize alanlar oluşturur. Bu çöküntülerin derinlikleri 2,5 cm'den fazla olduğu için yağışlı havalarda su birikimine neden olmaktadır. Su birikimi sadece sürücüler için değil, aynı zamanda yol kullanıcıları için de ciddi bir tehlike oluşturur. Bu durum, sürücülerin kontrol kaybına uğramasına neden olabilir ve yol güvenliğini olumsuz etkileyebilir. Bu çöküntülerin düzeltilmesi, sürüş güvenliğini artırmak ve yolun dayanıklılığını sağlamak adına önemli bir bakım gerekliliğidir ( Hamza 2022).

Çökme, kaldırımın tasarlandığı kapasitenin üzerinde bir trafik yükü aldığı anda ortaya çıkar ve genellikle doğal zemindeki çökme veya yer değiştirmenin bir sonucudur. Bu olgu zaman içinde giderek büyür ve yolların kontrolünü kaybetmesine yol açabilir. Çökmenin ana nedenleri şunlar gibi sıralanmaktadır :

- Temel ve alt temelin yetersiz sıkıştırılması.
- Kaplamanın belirli bölgelerde yetersiz sıkıştırılması.
- Yetersiz drenajın neden olduğu su birikimi.

- Temel ve alt temel malzemelerinin kil ile karışması.
- Kaplamanın taşıyabileceği daha ağır trafik yükü ile karşılaşma gibi faktörler bulunmaktadır.

### 3.4.5 Boyuna ve Enine Çatlama

Bu sıkıntı yapısal veya çevresel bir sıkıntı olarak değerlendirilebilir bunlar yolun merkez çizgisine paralel uzanan uzun çatlamalardır. Enine çatlama kaplamanın merkez çizgisine dik olarak ve yolun merkez çizgisine yaklaşık olarak dik açılarda oluşmaktadır Şekil 3.10.



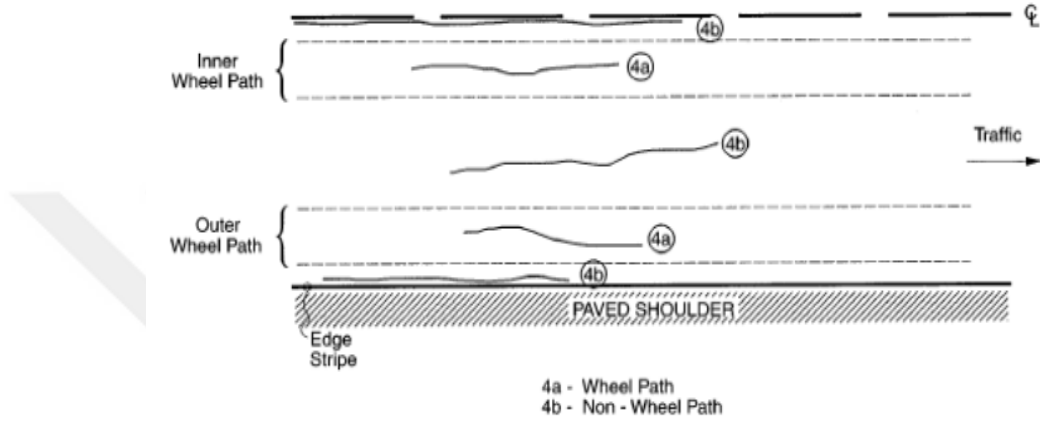
**Şekil 3.10** a). Asfalt esnek kaplamada boyuna çatlama, b). Asfalt esnek eaplamada enine çatlama ( Basheer and Ahmad 2020)

#### ***Boyuna Çatlama :***

Ağırlıklı olarak kaplamanın merkez çizgisine paralel olan boyuna çatlama, tekerlek yolu boylamsal çatlamasını ve tekerlek yolu dışı uzunlamasına çatlamaı içerir. Boyuna çatlama, doğrusal feet / metre cinsinden ölçülmektedir.

Ortalama genişliği 6 mm'den az olan bir çatlak, boyuna çatlamanın düşük şiddetli seviyesi olarak kabul edilmiştir. Ortalama derinliği 6 mm ila 19 mm arasında olan bir çatlama, orta şiddette boyuna çatlama olarak kabul edilir. Ortalama çatlak derinliği 19 mm'den

büyükse, yüksek şiddette boyuna çatlama olarak kabul etmektedir. Şekil 3.11, tekerlek yolu ile tekerlek yolu olmayan uzunlamasına çatlama arasındaki farkı açıklamaktadır (Mostafiz 2021).

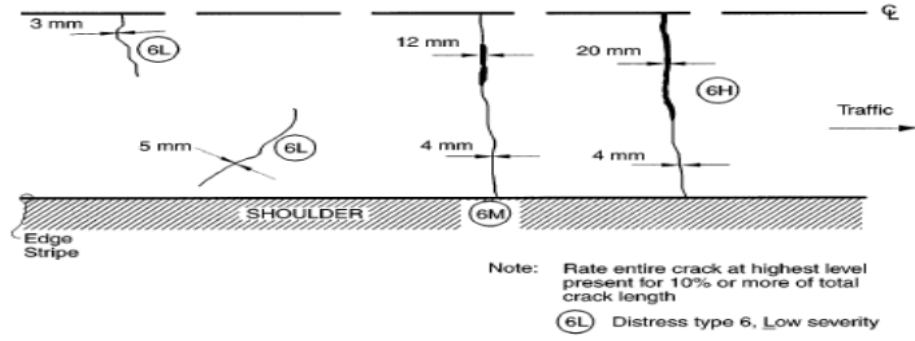


Şekil 3.11 Boyuna çatlama (Mostafiz 2021)

### ***Enine Çatlama :***

Enine çatlama, çoğunlukla kaplamanın merkez hattına dik olan çatlama olarak adlandırılır doğrusal feet (metre) cinsinden ölçülmektedir.

Ortalama çatlak genişliği 6 mm'den küçükse düşük şiddette yansıma çatlaması, ortalama çatlama genişliği 6 mm ile 19 mm arasındaysa orta şiddette yansıma çatlaması, ortalama çatlama genişliği 19 mm'yi geçiyorsa yüksek şiddette yansıma çatlaması olarak adlandırılır şiddetli yansıma çatlamasıdır (Mostafiz 2021).



Şekil 3.12 Enine çatlama (Mostafiz 2021)

### 3.5 Termal Çatlama

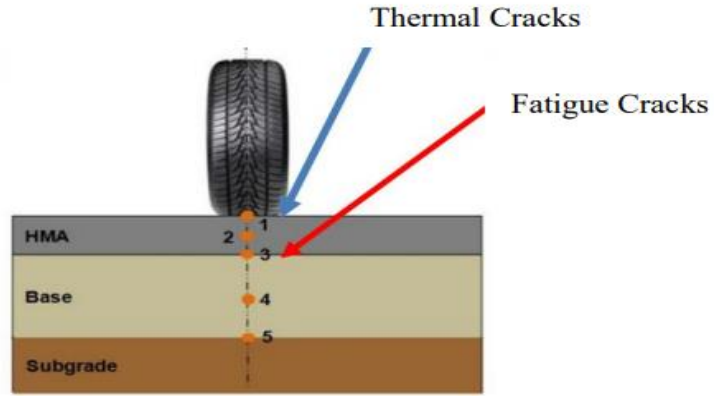
Termal çatlama, esnek kaplamada, trafik yönüne dik, tekdüze, genellikle eşit aralıklı çatlama deseni ile kendini gösteren ciddi bir sorundur. Bu sıkıntı kritiktir çünkü yüksek onarım maliyetleri ve su sızması yoluyla alt temel ve agrega katmanlarının zayıflaması, sıcak karışım asfalt (HMA) katmanlarının soyulması ve alt temel desteğinin kaybı gibi diğer arıza mekanizmalarının hızlanmasıyla ilişkilidir. Genellikle iki ana mekanizma HMA'nın termal çatlmasına neden olur: düşük sıcaklıkta çatlama ve termal yorulma çatlaması. Belirli bir sıcaklıkta çekme gerilimi HMA'nın çekme mukavemetini aştığında düşük sıcaklıkta çatlama meydana gelmektedir. Bu durumda çatlak genellikle kaplama yüzeyinde başlar ve daha sonra ek termal döngüler uygulandığında HMA'nın tüm derinliği boyunca yayılır. Termal yorulma çatlaması, çok düşük bir sıcaklık seviyesine ulaşılmasını gerektirmez. Buna karşılık, sıcaklık aralığı kontrol faktörüdür. Yüke bağlı yorulma çatlama olduğu gibi, termal yorulma çatlama tekrarlanan termal döngülerden kaynaklanır ve bu da HMA'da genellikle malzemenin mukavemetinden daha düşük bir gerilime neden olmaktadır. Malzemedeki dalgalanan gerilim ve gerinimlerin ve onarılamaz deformasyonların birikmesinin neden olduğu ilerleyici lokal hasardır. Superpave bağlayıcı spesifikasyon sistemi, malzemenin sertliğini ve sürünme oranını (m değeri) kontrol ederek tek olaylı termal çatlamanın (düşük sıcaklıkta çatlama) oluşumunu sınırlamaya odaklanmaktadır (Al-Qadi 2004).

Termal çatlama 1960'lı yılların başından beri araştırılmaktadır ve şu anda esnek kaplamalardaki başlıca hasar mekanizmalarından biri olarak kabul edilmektedir. 1964

yılında Schmidt, farklı HMA bileşenlerinin düşük sıcaklıkta çatlama direnci üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. O zamanlar, daha yüksek asfalt içeriği kullanılarak çatlama direncinin artırılabilceği açıldı, ancak termal yorulma çatlaklarının esnek kaplamada enine çatlamanın başlamasına ve yayılmasına neden olabileceği henüz kabul edilmemiştir. Kaplama mühendisleri, kaplamaların genellikle aşırı düşük sıcaklıklara maruz kalmadığı Teksas'ta ciddi enine çatlakların görünümünü ilk kez 1970'lerin başlarında fark etmiştir. Bununla birlikte, termal yorulmanın genellikle çok yavaş bir frekansta meydana gelmesi nedeniyle, bu başarısızlık mekanizmasının çatlakları başlatacak ve ilerletecek kadar yeterli hasara neden olamayacağı hala düşünülüyordur. 1980'lerin başında, termal yorulmanın nispeten yüksek bir stres seviyesinde meydana gelebilmesi nedeniyle, HMA'nın yorulma servis ömrünün termal modda yüke bağlı moda göre çok daha az olabileceği belirtildi, laboratuvar testlerine dayanarak Sugawara ve Moriyoshi, HMA'nın yorulma ömrünün termal modda normal trafikle ilişkili moda göre çok daha kısa olduğunu doğrulamıştır. Termal yorulmanın önemini farkında olan Lytton ve Shanmugham, doğrusal elastik kırılma mekaniği temelinde termal çatlama karşı kaplama hizmet ömrünü tahmin etmek için mekanik bir model geliştirmiştir. (Al-Qadi 2004).

Yapılan çalışmalara göre asfalt kaplamanın kritik noktalarındaki termal yorulma çatlama ve termal çatlama şu şekilde tanımlanmaktadır (Tanzadeh 2016) :

- Asfalt karışımlarının çekme mukavemetinde termal stresin bir sonucu olarak termal çatlaklar meydana gelip bu çatlama kaplama yüzeyinin 1. noktasından yukarıdan aşağıya doğru kaynaklanır.
- Yorulma çatlama ise asfalt tabakasının alt kısmındaki (nokta 3) yükten kaynaklanan yorulma nedeniyle oluşur ve asfalt tabakasının altından üstüne doğru büyür. Asfalt kaplamada hasar yeri Şekil 3.13'te gösterilmektedir. Asfalt kaplamada çatlakların neden olduğu kritik noktalar Şekil 3.13'te gösterilmektedir.



**Şekil 3.13** Termal çatlakların yeri (Tanzadeh 2016)

Genel olarak asfalt yüksek sıcaklıkta viskoelastik davranışa sahip olduğundan, düşük sıcaklığın neden olduğu termal stres, gevşeme stresi ile azaltıp, ayrıca asfalt kaplamada çatlama olasılığını da azaltır. Ancak düşük sıcaklık aralığında asfalt elastik bir davranışa sahiptir. Dolayısıyla düşük sıcaklığın neden olduğu termal gerilim azalmayacaktır. Bu nedenle termal gerilme asfaltın çekme dayanımından büyükse çatlama meydana gelecektir. Dolayısıyla malzemenin sünme katsayısı ve gevşeme katsayısına bağlı olarak termal çatlamlar iki yoldan biriyle azaltılabilir, çünkü sünme katsayısı ve gevşeme katsayısı termal çatlamlara etki eden temel faktörler arasındadır (Tanzadeh 2016).

### 3.6 Düşük Sıcaklıkta Çatlama

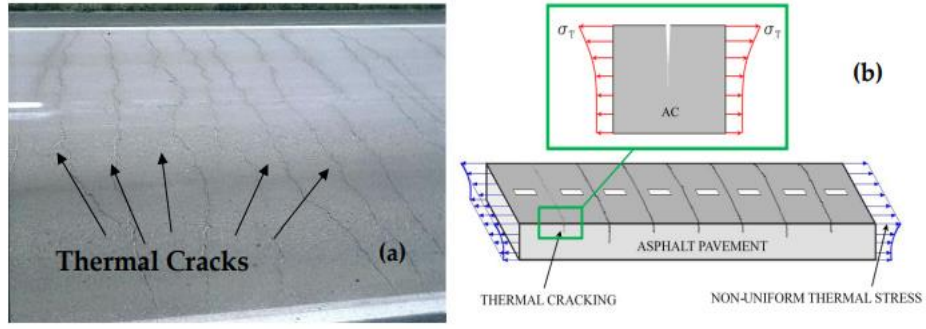
Asfalt beton kaplamalarda düşük sıcaklık çatlakları, genellikle hava sıcaklığının eksi 20°C'nin altına düştüğü veya oluşan termal gerilmenin asfalt betonunun termal dayanımını aşacak kadar düşük olduğu ve çatlaklara neden olduğu bölgelerde görülür. Düşük sıcaklıktaki çatlaklar, çatlaklar nedeniyle yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla yolun sürüş konforunu azaltır, eriyen kar ve yağmur suyunun yüzey çatlaklarından alt zemine sızmasına ve taşıma kapasitesinin kaybına neden olur. Trafik yükünün yol açtığı aksamayla birleştiğinde, düşük sıcaklıktaki çatlaklar kaplamanın yapısal bütünlüğünü zayıflatır ve sonuç olarak yol bakım ve rehabilitasyon maliyetlerini artırır. (Witezak 2005) tarafından yapılan araştırmaya göre, düşük sıcaklıktaki çatlaklar, Amerika Birleşik Devletleri'nde karayolu bakım ve onarım maliyetlerinde ikinci faktör olarak sıralanan

kaplama bozulmasının ana nedenlerinden biridir. Düşük sıcaklık çatlaması ilerleme yönüne dik olarak gelişir ve genellikle 1 ila 100 m arasında değişen eşit aralıklarla oluşur (Şekil 3.14).



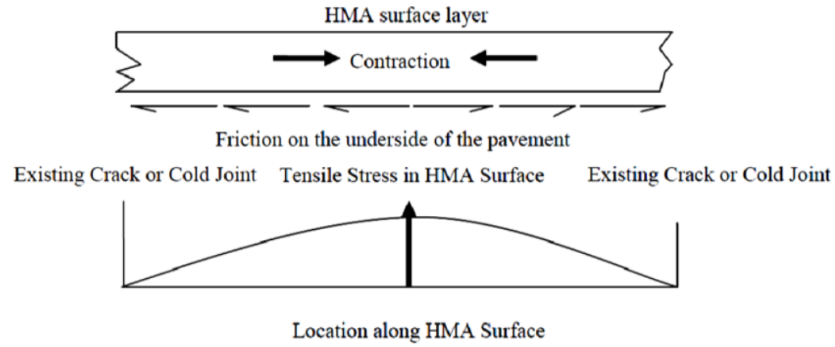
**Şekil 3.14** Yolun asfalt beton kaplamasının düşük sıcaklıkta çatlaması (Bagdat 2016)

Termal çatlama olgusu, kaplamalarda bir grup paralel, eşit aralıklı, enine yönelimli, yüzey tarafından başlatılan çatlaklar olarak kendini gösterir. Asfalt kaplamalardaki tipik bir termal çatlama modeli Şekil 3.15 a'da gösterilmektedir. Sıcaklık düştükçe, asfalt kaplamanın "sınırlandırılmış" sürekli tabakasının büzülme eğilimi nedeniyle kaplamada termal gerilimler oluşur. Kaplama kalınlığı boyunca termal gerilimlerin dağılımı düzgün değildir; en yüksek gerilimler kaplama yüzeyinde meydana gelir. Şekil 3.15-b. Termal çatlaklar, termal olarak indüklenen gerilimler malzemenin kırılma mukavemetini aştığında meydana gelir ( Behnia 2018).



**Şekil 3.15** Oksidasyon sonucu oluşan termal çatlaklar, (a) asfalt kaplamadaki tipik termal çatlama modeli, (b) termal çatlama oluşumu ve kaplama kalınlığı boyunca termal gerilmelerin düzgün olmayan dağılımı (Behnia 2018)

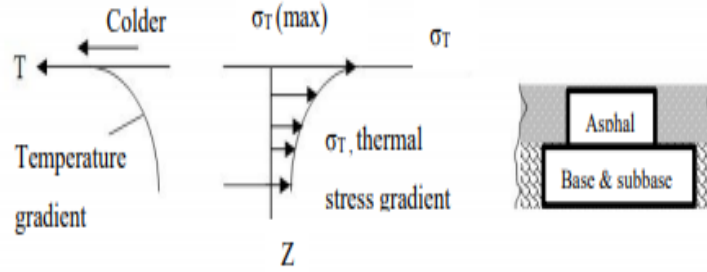
Düşük sıcaklıktaki çatlama sorumlu olan mekanizma, alan sıcaklığındaki ciddi azalmanın, düşük sıcaklıktaki çatlama geliştirecek kadar düşük olmasıyla açıklanmaktadır. Yani hava sıcaklığı düştüğünde kaplama büzülme maruz kalır ve kaplama ile taban tabakası arasındaki sürtünme büzülme karşı direnç göstererek çekme gerilmesinin artmasına neden olur. Kaplamada oluşan çekme gerilmesi asfalt betonunun mukavemetini aştığında kaplamanın kenarında ve yüzeyinde mikro çatlaklar oluşacaktır Şekil 3.16. Daha düşük sıcaklıklarda veya tekrarlanan sıcaklık döngülerinde çatlaklar asfalt betonu tabakasının tüm derinliğine ve genişliğine yayılacaktır (Reza 2020).



**Şekil 3.16** Aşınma sürecinde hacimsel büzülme nedeniyle çekme gerilimi geliştirme mekanizması (Reza 2020)

Asfalt betonunun yüzey tabakasında termal gerilmenin en yüksek değere ulaştığını ve derinlikle birlikte sürekli olarak azaldığını belirtmiştir. Bu eylem, kaplama temeli ile hava arasında kalan sıcaklık gradyanı nedeniyle meydana gelir. Yüzeyin üst kısmı termal

çatlamaya daha yatkındır. Şekil 3.17 derinliğe göre değişen termal gerilim gradyanlarını göstermektedir (Başak 2019).



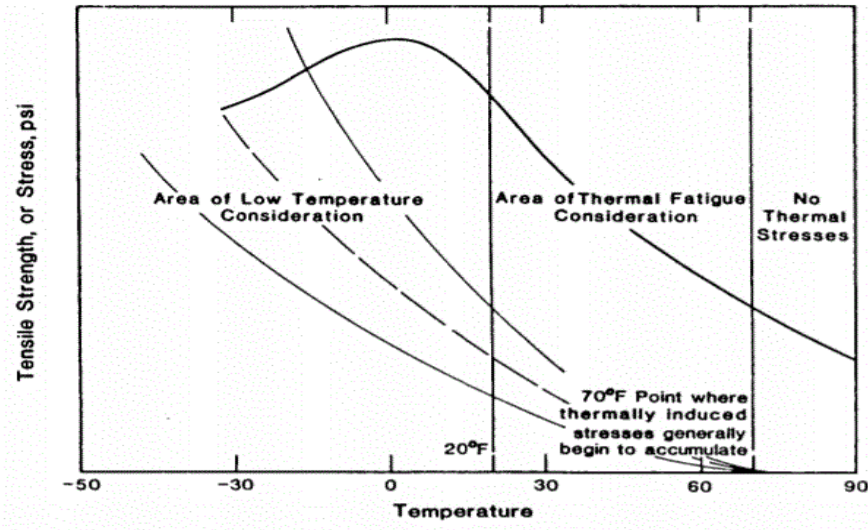
Şekil 3.17 Kaplama yoluyla termal stres gradyanlarının değişimi (Başak 2019)

### 3.7 Termal Yorulma Çatlaması

Yetmişli yılların ortalarından itibaren termal yorulma çatlaması gözlem altında tutulmuştur. Bu termal olarak tetiklenen çatlamanın muhtemelen aşırı soğuk iklim koşulları veya trafik yüküyle hiçbir ilgisi yoktur. Ilıman iklimlerde bu tip çatlama, ani çatlamaya neden olacak kadar yüksek miktarda termal stres oluşturamaz. Bununla birlikte, kırılma sıcaklığının üzerindeki döngüsel termal dalgalanmalar kaplamada yorulmaya neden olabilir ve onu daha sonraki termal ve/veya trafiğin neden olduğu gerilmeler altında çatlamaya karşı daha duyarlı hale getirebilir (Gerritsen ve Jongeneel 1988). Batı Teksas'ta bulunan kaplamalarda şiddetli enine termal çatlamanın gelişmesinin ana nedeni, asfalt betonundaki termal yorulma çatlamasına atfedilmiştir (Carpenter, Lytton ve Epps. 1974). Ancak daha sonra yapılan araştırmaların sonuçları, diğer faktörlerin de önemli olabileceğini düşündürmüştür (Carpenter, Lytton 1977 ve Anderson, Epps 1983).

Asfalt beton kaplama taban tabakası tarafından sınırlanır, günlük sıcaklık değişimlerinden dolayı hacimsel büzülme, tekrarlı çekme gerilmelerine neden olur. Asfalt betonunun camsı geçiş sıcaklığının üzerindeki düşük sıcaklıklarda tekrarlı gerilmelerden kaynaklanan enine çatlama, termal yorulma çatlağı olarak anılır. Ilıman iklimlerde, düşük sıcaklıktaki çatlamaya göre daha yüksek sıcaklıklarda günlük sıcaklık değişimi meydana

gelir, dolayısıyla termal gerilimler hızlı bir kırılmaya neden olacak kadar büyük değildir. Ancak zamanla bu termal gerilimler, AC kaplamalarda yüke bağlı yorulmaya benzer şekilde yorulmaya neden olabilir. (Carpenter ve H.S. 1983) tarafından yapılan bir çalışmaya göre,  $-7^{\circ}\text{C}$  ( $20^{\circ}\text{F}$ ) ile  $21^{\circ}\text{C}$  ( $70^{\circ}\text{F}$ ) sıcaklık aralığında termal yorulma oluşması beklenmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda, kaplama gerilim gevşeme modundadır ve  $-7^{\circ}\text{C}$ 'nin altındaki sıcaklıklarda, düşük sıcaklık çatlaması hakim olan bozulma modu haline gelir (Şekil 3.18).



**Şekil 3.18** Farklı test numuneleri için termal gerilime karşı sıcaklık ilişkisi (Reza 2020)

## 4. MATERYAL VE METOT

### 4.1 ABAQUS Programının Kullanımı

ABAQUS, sonlu elemanlar analizi (FEA) için kullanılan güçlü bir yazılım paketidir. Farklı koşullar altında yapılar veya malzemeler içindeki gerilim, gerinim ve deformasyon gibi karmaşık fiziksel davranışları simüle etmek ve analiz etmek için çeşitli mühendislik disiplinlerinde yaygın olarak uygulanır. ABAQUS, mühendislerin ve araştırmacıların, tasarımların ve malzemelerin gerçek dünya senaryolarında nasıl performans göstereceğini anlamak için yapısal, mekanik, termal ve çoklu fizik sorunlarını modellemesine, simüle etmesine ve analiz etmesine olanak tanır.

ABAQUS, çok çeşitli geometrileri etkili bir şekilde modellemesine olanak tanıyan kapsamlı bir eleman türleri koleksiyonuna sahiptir. Ayrıca kütüphanesi, çeşitli malzemelerdeki gerilim ve deformasyonu simüle edebilen çeşitli malzeme modellerini içerir. Bu modeller, düşük ve yüksek sıcaklıklar, gerinim oranları ve gerinim seviyeleri gibi faktörleri göz önünde bulundurarak izotropik ve anizotropik metallere hitap eder. Ek olarak ABAQUS, simülasyon yeteneklerini metallerin ötesindeki malzemeleri de kapsayacak şekilde genişletiyor. Kauçuk, polimer, betonarme, cam, seramik, kırılabilir veya esnek köpüğün yanı sıra toprak ve kaya gibi jeoteknik malzemeleri de etkili bir şekilde modelleyebilir.

Abaqus yeteneklerini gerilim analizinin çok ötesine taşıyor. İletken ve konvektif ısı transferi, kütle difüzyonu, akustik, piezoelektriklik ve elektrokimyanın simülasyonunu sağlar. Bu simülasyonlar bağımsız olarak, sıralı bir şekilde veya gerilim analiziyle tamamen entegre olarak gerçekleştirilebilir. Abaqus'u güç açısından farklı kılan şey modülerliğidir. Kullanıcılar, fiziksel olarak mümkün olan herhangi bir eleman, malzeme, süreç ve yükleme dizisi kombinasyonunu modelleme esnekliğine sahiptir. Esas itibarıyla herhangi bir malzeme hemen hemen her elementle birlikte veya kompozitler söz konusu olduğunda bir elementin bir katmanı içerisinde kullanılabilir. Bu esneklik, çeşitli statik veya dinamik yükleme geçmişlerine maruz kalan modellerin oluşturulmasına olanak tanır.

Abaqus için başlıca yükleme türleri şunlardır:

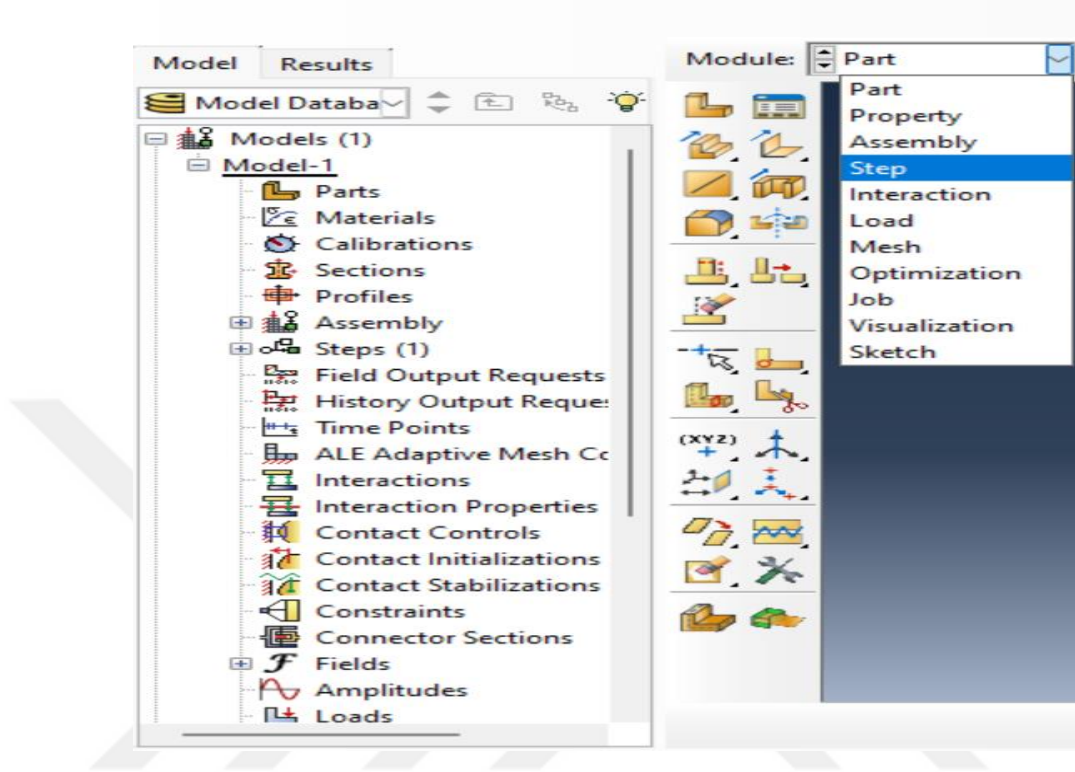
- ABAQUS/Standard, Abaqus yazılım paketinin çok çeşitli yapısal ve yapısal olmayan analizleri gerçekleştirmek için tasarlanmış bir versiyonudur. Statik ve düşük hızlı dinamik olayları içeren senaryolar için özellikle uygundur. Bu çözücü, mukavemet, kararlılık ve geometrik olarak doğrusal olmayan problemler gibi doğrusal ve doğrusal olmayan analizler gerektiren simülasyonlar için kullanılır. Abaqus/Standard, yarı statik yükleri taşıma ve kademeli veya yavaş uygulanan kuvvetlere maruz kalan yapıları analiz etme yetenekleri nedeniyle sıklıkla seçilir. İnşaat mühendisliği, otomotiv, havacılık ve imalat gibi endüstrilerde, çeşitli yapıların ve bileşenlerin farklı yükleme koşulları altındaki davranışlarını simüle etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.
- ABAQUS/Explicit, Yüksek hızlı darbe, çarpışma ve son derece doğrusal olmayan dinamik olaylar için tasarlanmış açık dinamik çözücü. Geçici, şiddetli yükleme koşullarını içeren simülasyonlar için uygundur.

Programın ilk açılış görüntüsü Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



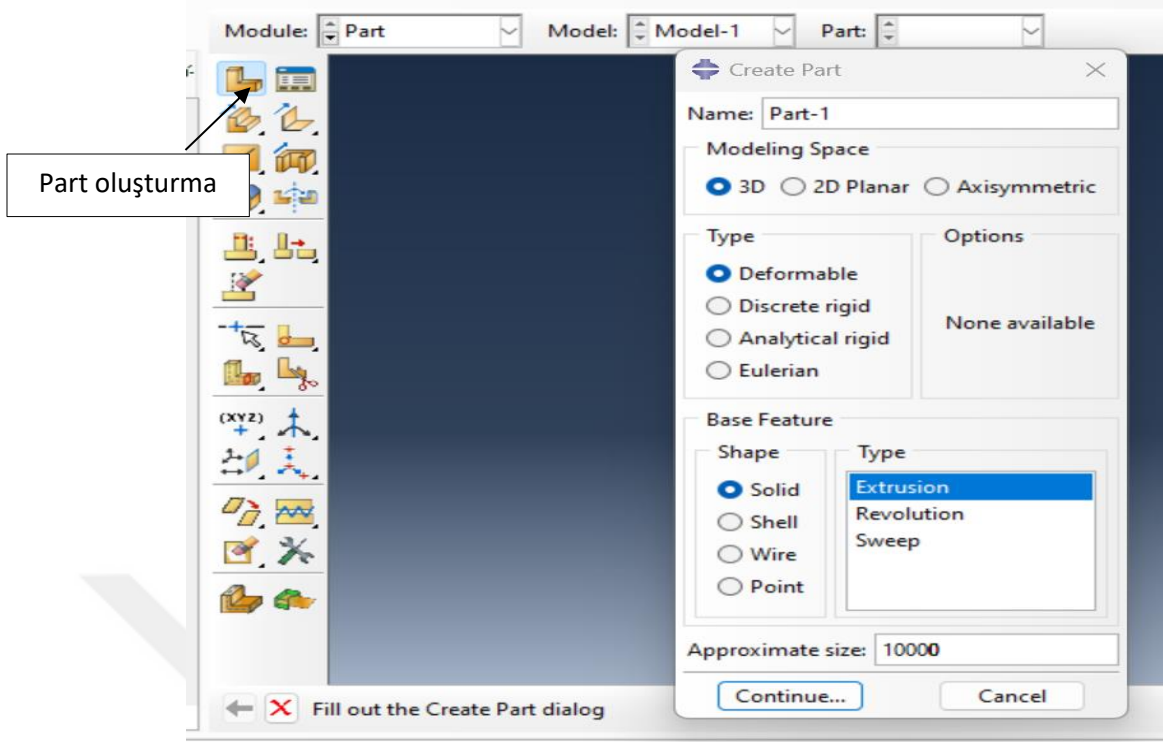
Şekil 4.1 ABQUS programının açılış görüntüsü

Giriş Programı Şekil 4.2'de gösterildiği gibi sırasıyla Part, Property, Assembly, Step, Load, Mesh, Job kullanılmıştır.

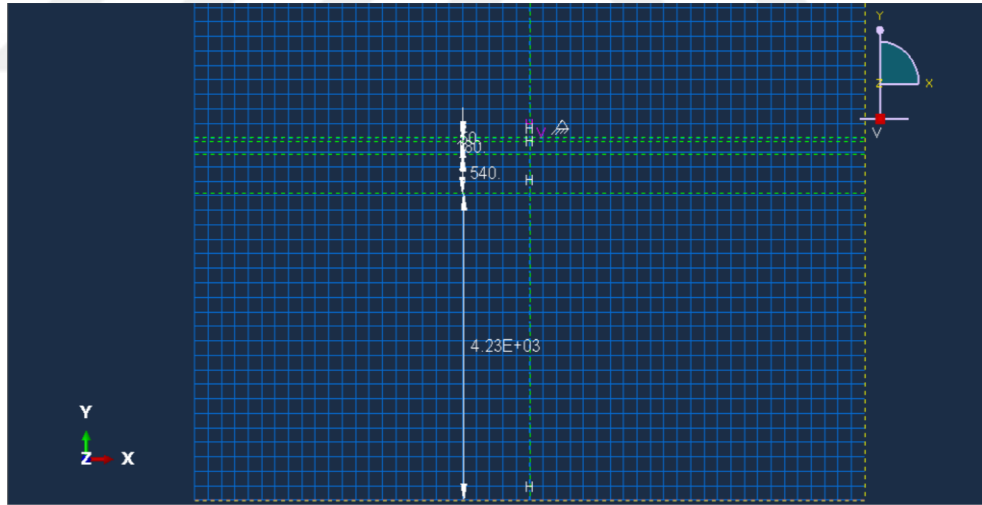


Şekil 4.2 Programdaki sekmeler

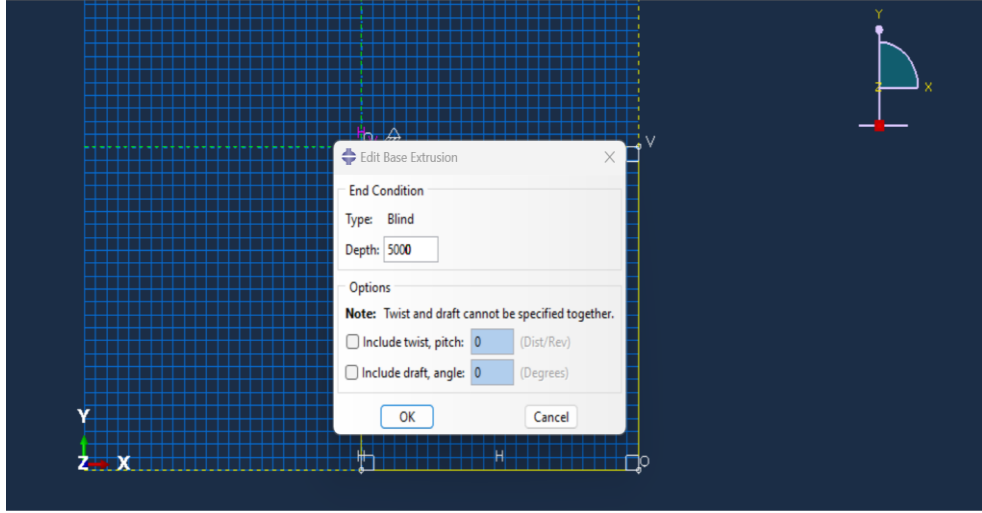
- Part : ABAQUS Part Modülü, kullanıcıların analiz amaçlı bileşenlerin 2D veya 3D geometrilerini oluşturmasına ve değiştirmesine olanak tanır. Diğer modelleme yazılımlarından kaynaklanan parçalar Parça Modülüne aktarılabileceği gibi ABAQUS içerisinde oluşturulan parçalar da harici yazılıma aktarılabilir. Katman oluşturmak için model içerisinde katmanlar tanımlanır. Kompozit yapılar için bu, her katmanın malzeme, mesafe, kalınlık, yön ve istifleme sırası gibi özelliklerinin belirtilmesini içerir. Parça Modülünün arayüzü Şekiller 4.3, 4.4, 4.5, 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Part oluşturma görüntüsü

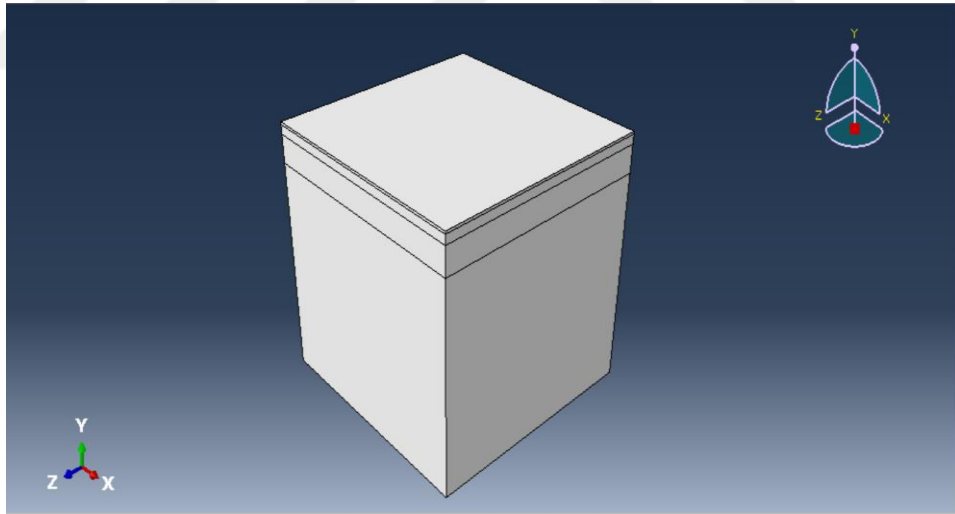


Şekil 4.4 Yol tabakaları oluşturma görüntüsü

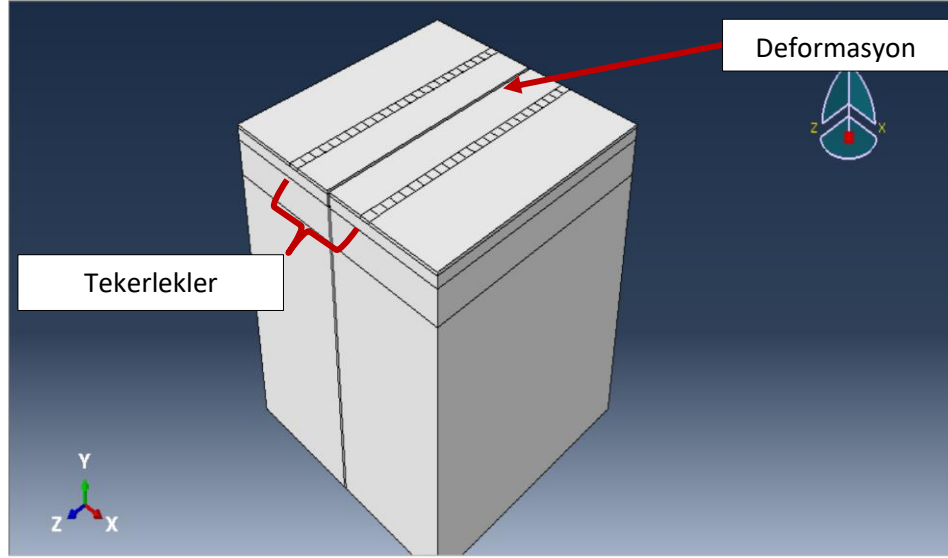


**Şekil 4.5** Temel tabakasının oluşturulması

Kaplama bölümü dört katmandan oluşur: 50 mm Binder , 180 mm Bitümlü ,540 mm temel ve alt temel 4230 mm olarak çalışma kapsamında modellenmiştir. Model (5000x5000x5000mm) boyutlarındadır ,şekil 4.6'da gösterilmektedir.

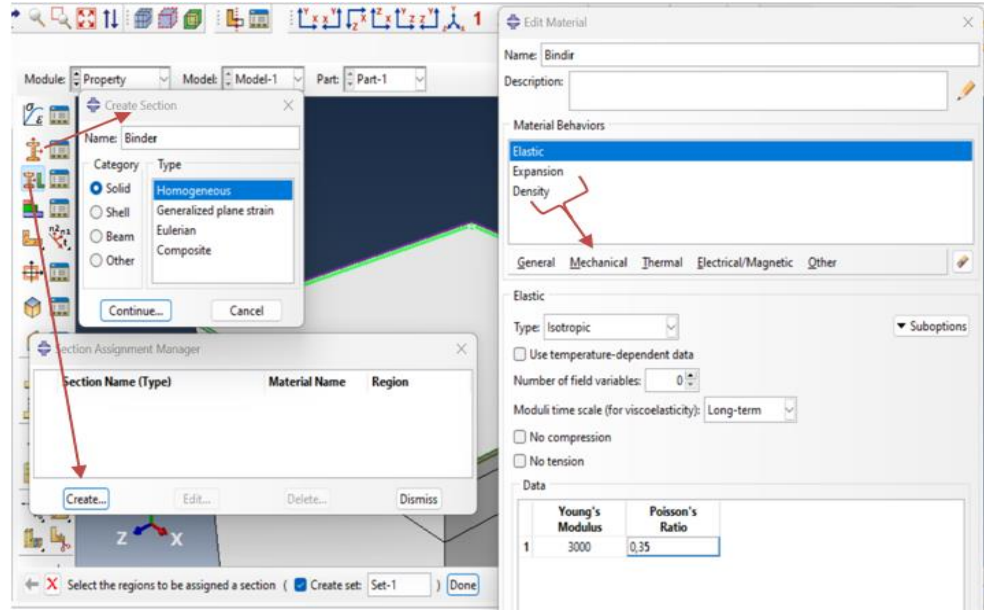


**Şekil 4.6** ABAQUS'ta tabaka oluşturma

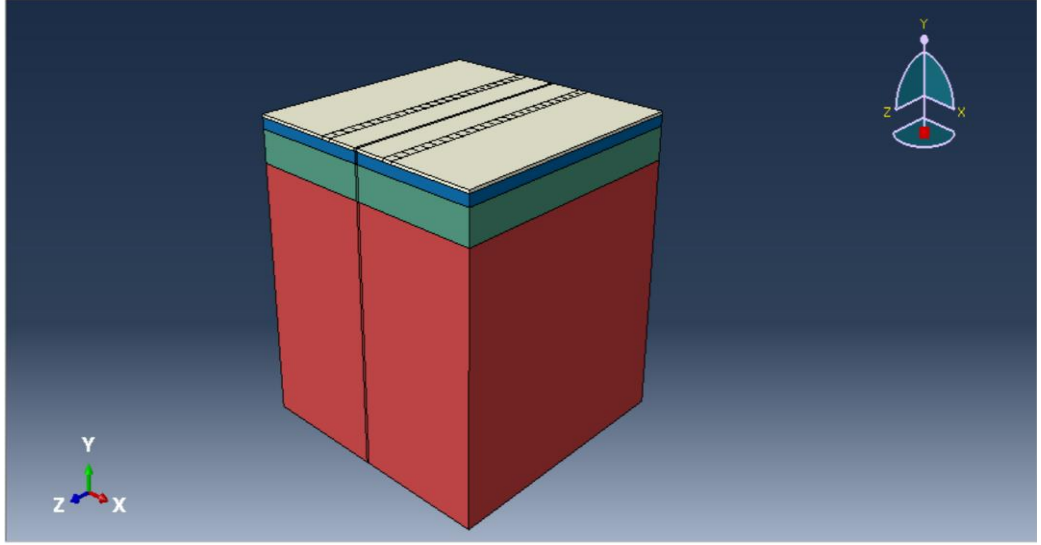


Şekil 4.7 ABAQUS aks modellemesi

- Özellik Modülü (Property) : ABAQUS'ta kullanıcılar, özellik modülünde hacimsel ve mekanik ve termal özellikler gibi malzeme özelliklerini tanımlar. Kesitlerde kullanılan malzemeler katı, kabuk veya kiriş elemanlar olarak tanımlanabilir. Esneklik modülleri ve Poisson oranı gibi malzeme özellikleri bölümlere atanır ve bölümler daha sonra model geometrisine (tipik parçalar) atanır. (Elastisite modülü(elastik), genleşme ve Poisson oranı) bu çalışma için malzeme özellikleri girilmiştir (Şekil 4.8).

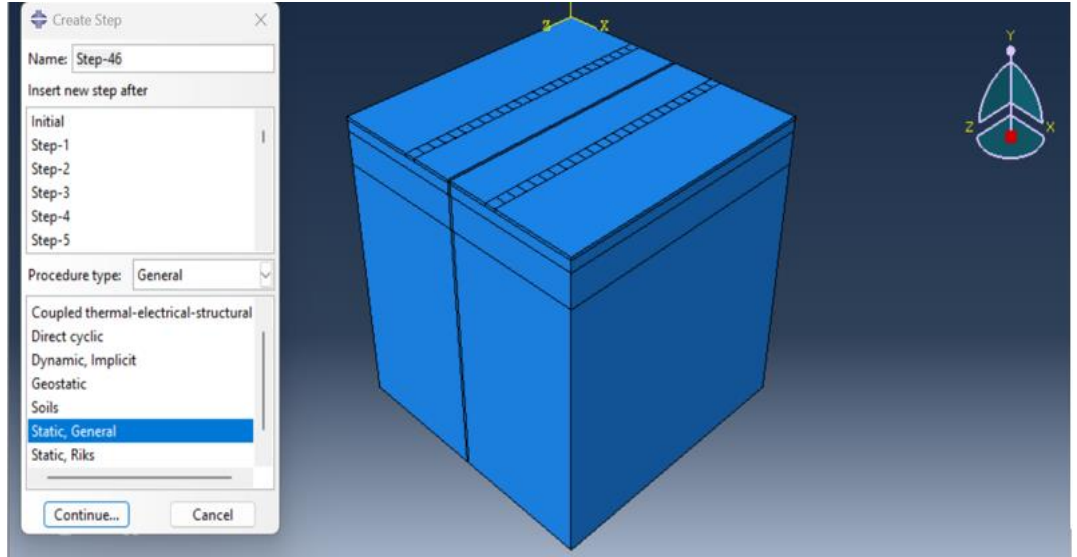


Şekil 4.8 Malzeme özellikleri



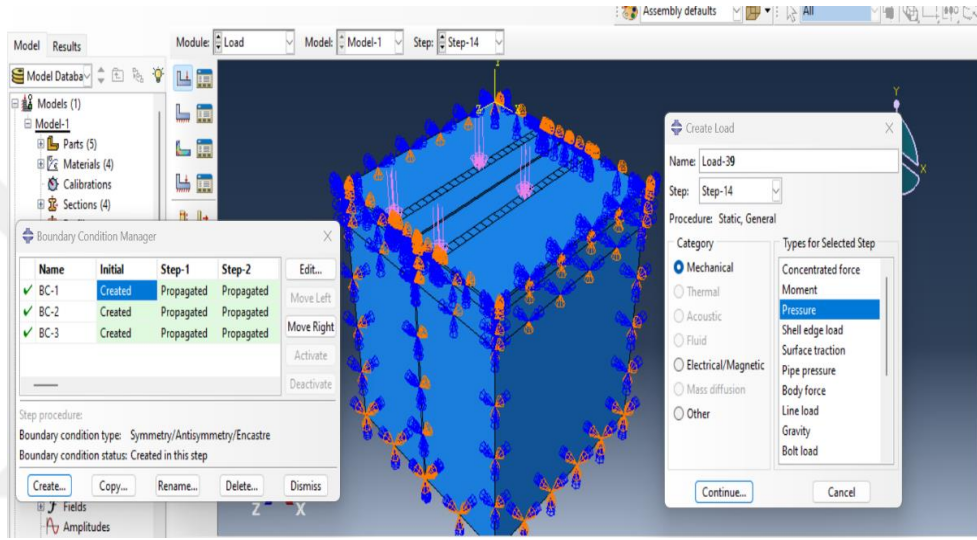
Şekil 4.9 ABAQUS'ta özellik yaratımı

- Adımlar Modülü (Step): Adımlar modülü, analiz adımları oluşturmak ve çıktı isteklerini, uyarlanabilir ızgaraları ve analiz kontrollerini tanımlamak için kullanılır. Model içindeki bir veya daha fazla analiz adımından oluşan bir dizi tanımlanarak bir analiz adımı oluşturulur. Şekil 4.10'da gösterildiği gibi statik olarak seçilmiştir.



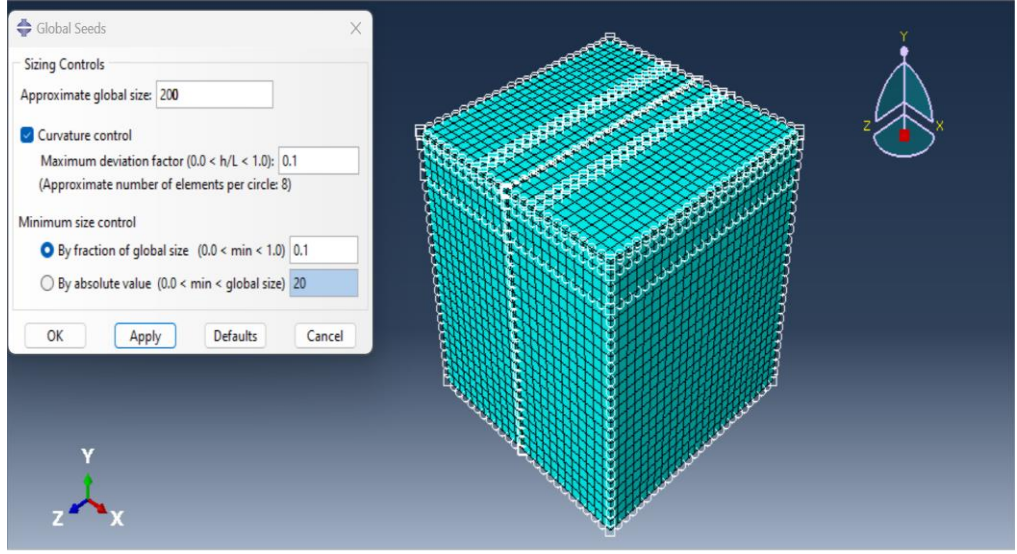
Şekil 4.10 Adımlar modülü

- **Sınır Durumu ve Yük Modülü:** Yük modülü yükleri, sınır koşullarını, önceden tanımlanmış alanları ve yük durumlarını tanımlamak ve yönetmek için kullanılır. Abaqus/CAE'de öngörülen koşullar adıma bağlı nesnelere; bu da bunların aktif oldukları analiz adımlarının belirtilmesi gerektiği anlamına gelir (Şekil 4.10). Hareketli bir yükü simüle etmek için toplam 38 adım oluşturuldu. Şekil 4.11, sınır durumunu ve yük adımı 14'teki hareketli tekerlek yükünü göstermektedir. Sınır koşulları altta sabitlenmiştir.



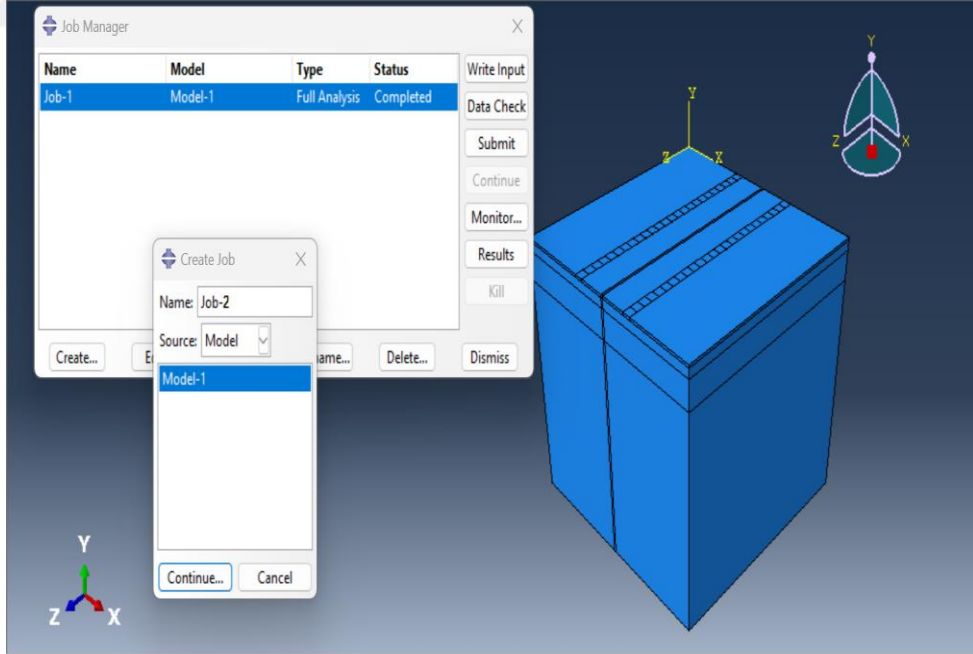
**Şekil 4.11** ABAQUS ile sınır durumu ve yük oluşturma

- **Mesh Modülü:** Analizin tüm bölümleri, ABAQUS'ta mevcut olan sayısal entegrasyona sahip düşük dereceli bir 3D eleman kullanılarak modellenmiştir. Bu eleman, her düğümde büyük bir geometrik ve fiziksel doğrusal katı elemanı temsil etme yeteneğine sahiptir. Ardışık katmanlar arasındaki düğümlerin sürekliliğini korumak için tüm katmanlar aynı şekilde simüle edilir Şekil 4.12.



Şekil 4.12 Kaplama bölümünün meshi

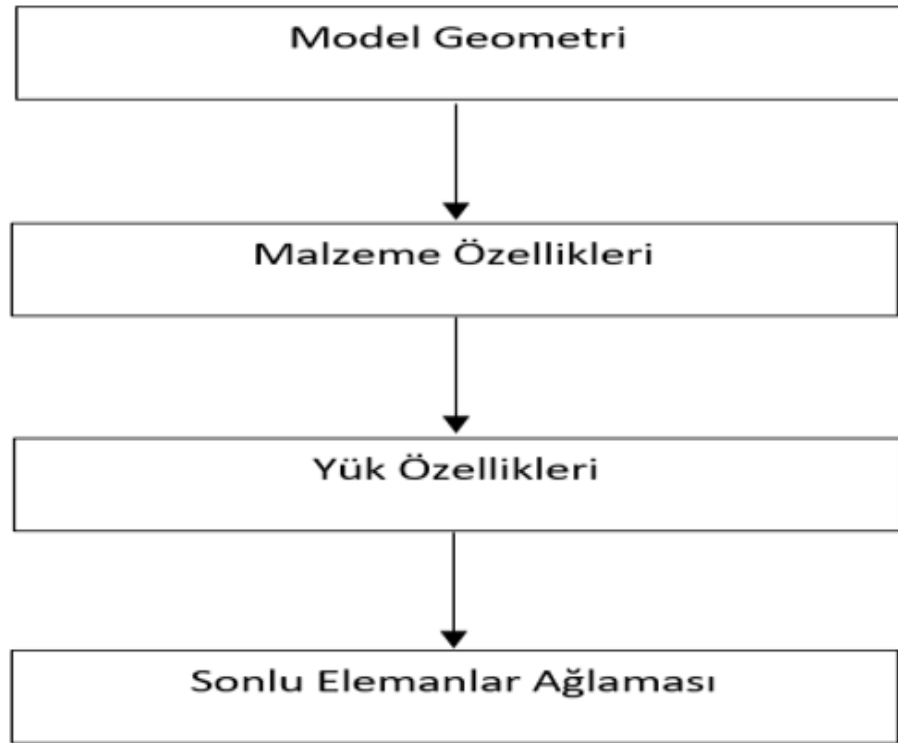
- Job: Job modülü, Şekil 4.13'te gösterildiği gibi, model tanımla ilgili tüm görevler (model geometrisinin tanımlanması, kesit özelliklerinin ayarlanması, temasın tanımlanması vb.) tamamlandıktan sonra modeli analiz etmek için kullanılır.



Şekil 4.13 Job modülü

## 4.2 Kaplama Modelinin Analizi

Tez çalışması kapsamında öncelikle doğal alt zeminin üzerinde üç katmandan oluşan çok katmanlı esnek bir üstyapı yapısı seçilmiştir. Çok katmanlı kaplama yapısı, gerilimin üst katmanlar arasında dağıtılması ve gerilimin her katmandan geçmesi nedeniyle dikey ve yatay gerilmeyi azalttığı ve bunun sonucunda alt zeminde çok az sapma sağlayan minimum gerilimi azalttığı için seçilmiştir. Kaplamanın modellenmesinde ABAQUS sonlu elemanlar (FE) modelleme yazılımı kullanıldığından, model geometrisi sonlu elemanlar modelleme yazılımında oluşturulmuştur. Daha sonra tüm katmanlara uygun mekanik özellikler kazandırıldı. Bundan sonra yükleme tanımlandı ve lastik yükünün esas olarak kaplama üzerindeki gerilimi yaratması nedeniyle yükün büyüklüğü ve genliği verilmiştir (Şekil 4.14). Sonlu elemanlar analizi matematiksel denklemlere bağlı olduğundan, toplam sistemi çok küçük parçalara bölerek karmaşık matematiksel denklemleri çözerek sonuç elde edilebilir (Bathe 2016). Sistemi daha küçük parçalara bölme işlemine meshing denir.



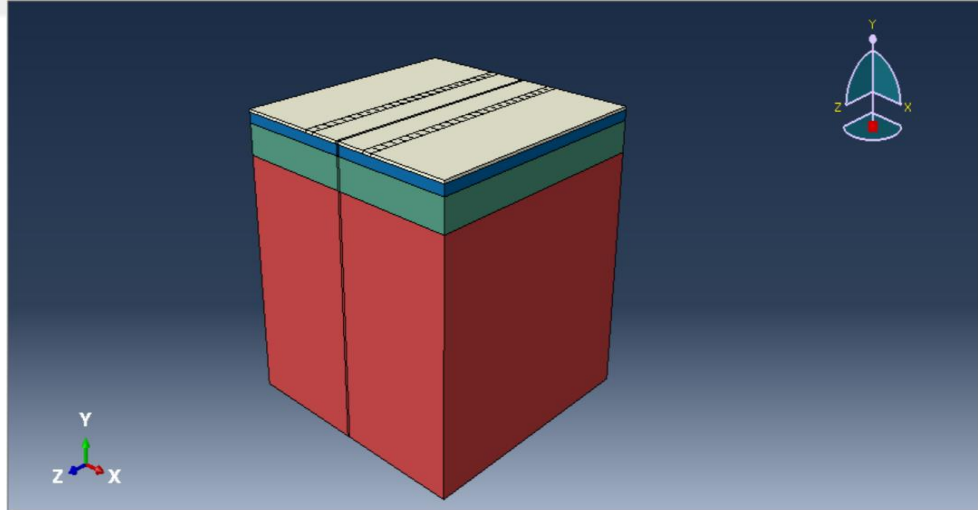
Şekil 4.14 Çalışma kapsamında izlenen yol

#### 4.2.1 Model Geometri

Tez çalışması kapsamında modellenen yol, dört katmanlı olarak modellenmiştir. Bu katmanlar:

- Alt Temel
- Temel
- Bitümlü Temel
- Binder olarak belirlenmiştir.

Kaplama katmanları hacimler halinde modellenmiştir. Şekil 4.15 modelin geometrisini göstermektedir, Kaplama kalınlığı 50 mm, Yüzey katmanı 180 mm, Taban katmanı 540 mm ve Toprak tabanı 4230 mm olarak kabul edilmiştir. Model (5000x5000x5000mm) boyutlarındadır. ABAQUS model girişleri, uygulama için kullanılan modüllerden oluşur (Şekil 4.15).



**Şekil 4.15** Abaqus programıyla kaplama katmanlarının 3 boyutlu modelinin genel geometrisi

#### 4.2.2 Malzeme Özellikleri

3 boyutlu model, farklı tipte aks yükleri ve farklı sıcaklıklar ile elastik modellenerek kaplama katmanları arasındaki deformasyonun dağılımını daha hassas bir şekilde anlamak için sonlu elemanlar programı ABAQUS (6.12-3) kullanılarak oluşturulmuştur.

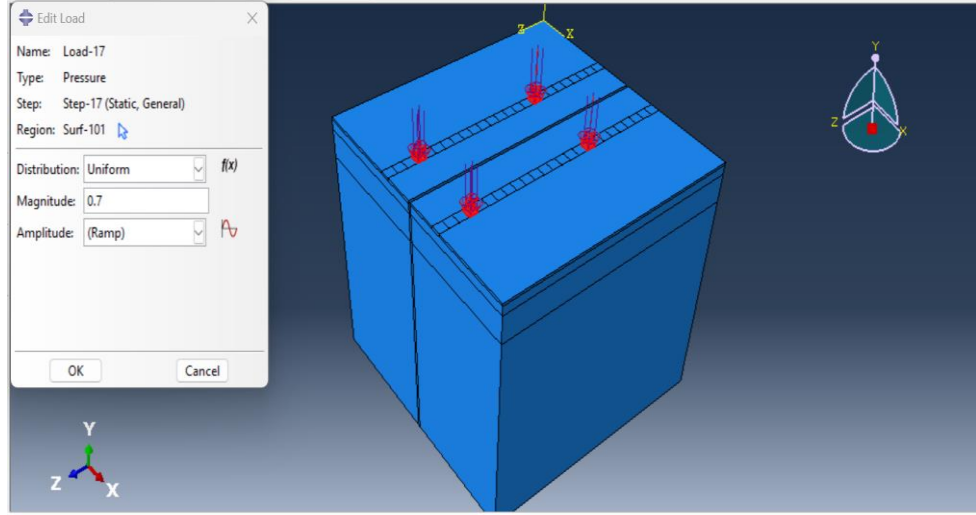
Çalışma kapsamında elde edilen veriler, literatür araştırmaları sonucu elde edilen verilerden derlenmiştir. Bu analizde kullanılan malzemelerin özellikleri Çezilge 4.1'de özetlenmiştir. Bu özellikler programın giriş parametreleriyle ilgilidir. Bu parametreler şunlardır: elastik modül (E), Poisson oranı ( $\nu$ ) ve yoğunluktur.

**Çezilge 4.1** Esnek kaplamanın malzeme özellikleri

Özellik	Binder	Bitümlü Temel	Temel	Alttemel
Elastik Modülüs (MPa)	3000	2500	3000	60.00
Poisson oranı( $\nu$ )	0.35	0.30	0.20	0.35
Yoğunluk(Kg/m <sup>3</sup> )	2300	2300	2100	1800

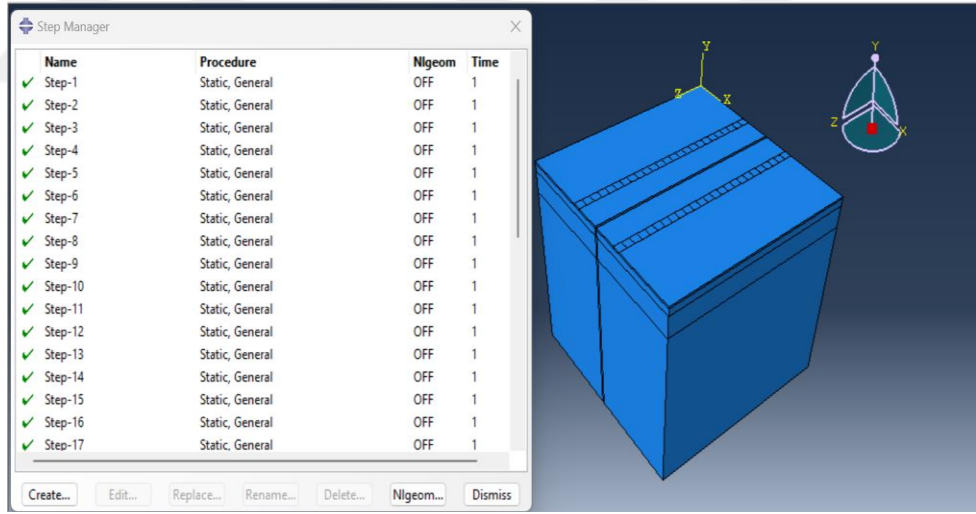
#### 4.2.3 Yük Özellikleri

Trafik yükünü uygun şekilde simüle etmek çok karmaşıktır. Böylece süreci basitleştirerek, kaplamanın lastikle temas alanı olan kaplama alanındaki yükü lastik basıncı olarak almıştır. Basınç araç yükünü temsil eder. Standart aks yükü 80 kN, temas basıncı ise dikdörtgen geometride 0,700 MPa olarak ayarlanmıştır (Şekil 4.16). Yükleme genliği, basınç sıfırdan başlayıp doğrusal olarak maksimum basınca yükselecek şekilde ayarlanmıştır.

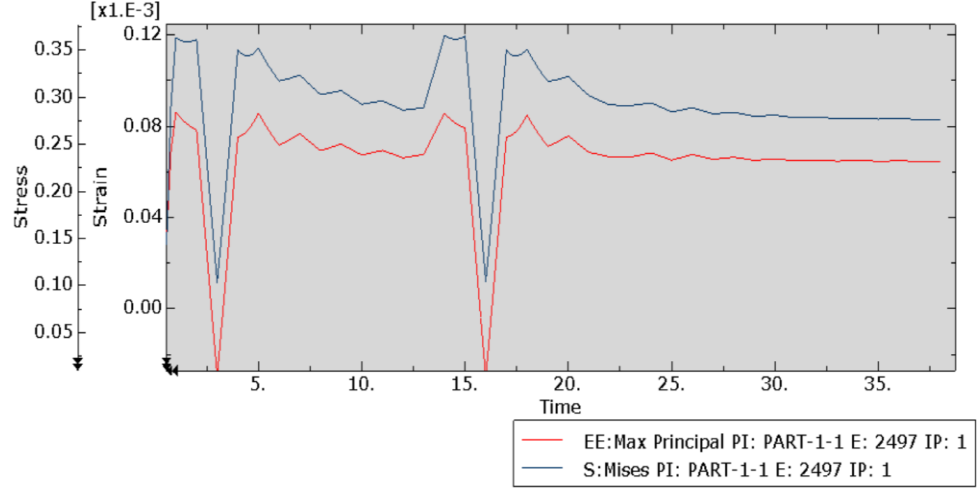


Şekil 4.16 ABAQUS'ta yükleme ve modelde gösterilen araç aks yükü

Testte olduğu gibi kaplama yapısının yüzeyindeki hareketli yükü simüle etmek için kaplama, lastiğin asfalt tabakası üzerindeki izini simüle eden 38 adıma bölünmüştür; her adım, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de gösterildiği gibi zaman-genlik tablosu kullanılarak döngü sayısına sahiptir.



Şekil 4.17 ABAQUS'ta kullanılan adımlar

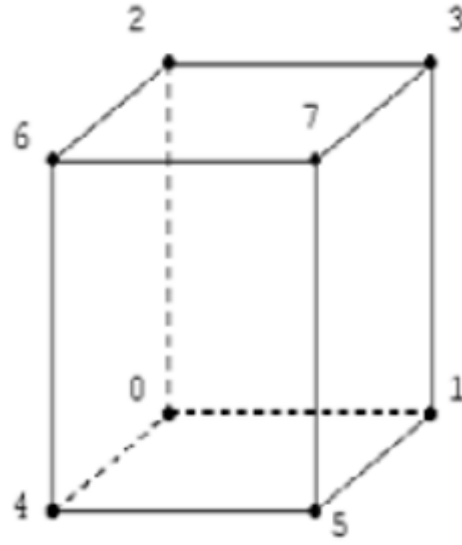


**Şekil 4.18** Zaman bağlı gerilme ve gerinim grafiklesi

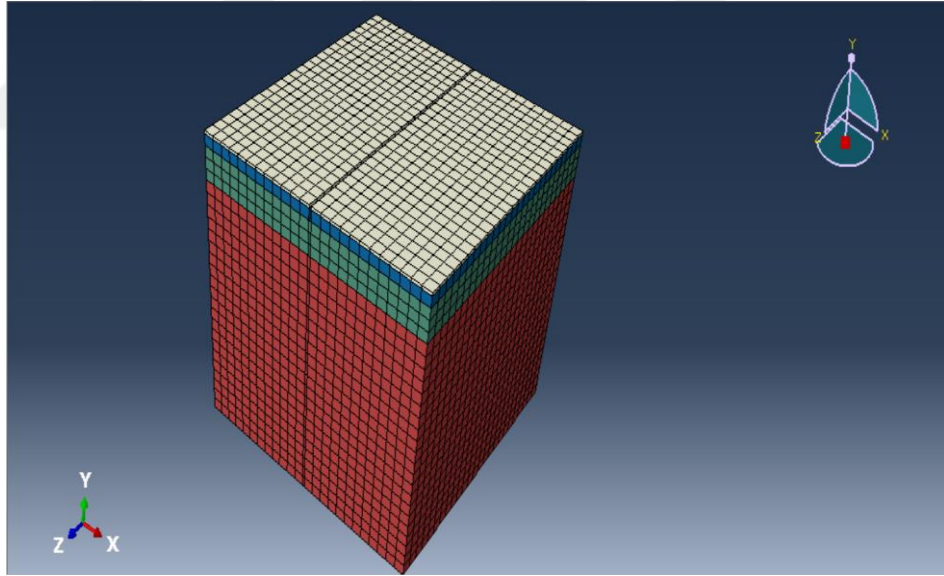
#### 4.2.4 Sonlu Elemanlar Mesh yapısı

Son olarak, yükün kaplama yapısı üzerindeki etkisini analiz etmek için parçayı ince elemanlara bölmek amacıyla ağ oluşturma işlemi yapılır. Meshleme, analiz alanı en ince eleman ağına sahip olacak şekilde yapılır ve yükten kaynaklanan gerilimin bu kadar uzağa dağılması beklenmediğinden, yükleme noktasından ne kadar uzakta olursa o kadar az eleman bulunur.

Model parçalarının tümü, ABAQUS'te (6.12-3) mevcut azaltılmış dereceli sayısal entegrasyona sahip 8 düğümlü sürekli üç boyutlu eleman (C3D8R) kullanılarak modellenmiştir. Oluşturan sonlu eleman yapısında 16200 eleman ve 18252 düğüm noktası elde edilmiştir. Bu eleman, her düğüm noktasında üç serbestlik derecesine sahip olan, büyük deformasyonlu, geometrik ve malzemesel doğrusal olmayan katı elemanı (C3D8R) temsil etme yeteneğine sahiptir, Şekil 4.18. C3D8R Elemanı, Ardışık katmanlar arasındaki düğümlerin sürekliliğini korumak için tüm katmanlar aynı şekil ile taklit edilir (AlAbdullah 2017). Şekil 4.19, toplam model meshlemesini gösterir.



Şekil 4.19 C3D8R elemanı (AlAbdullah 2017)



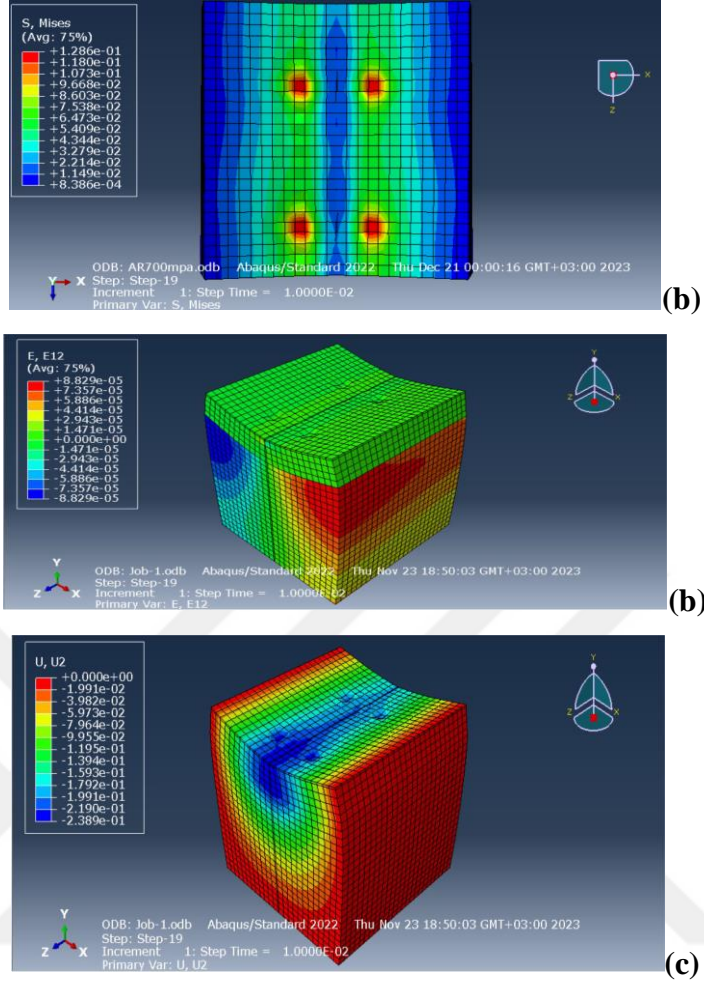
Şekil 4.20 Tüm tabakaların mesh boyutlarının belirlenmesi

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 5.1'de (a), 0.700MPa basınçta sahip aracın tekerlek aksları altında oluşan gerilmeler görülmektedir. Tekerlek altındaki alanlarda S misses değerinin en yüksek değerine ulaştığı gözlenmiştir. Bu değer,  $1.286E-1$  değerindedir. Diğer bölgelerde gerilme değerinin düştüğü gözlenmektedir.

Şekil 5.1'de (b), 0.700 MPa dğerindeki araç aks yükü altında oluşan gerinimlerdeki, Tekerlek altındaki alanlarda E E12 değerinin en yüksek değerine ulaştığı gözlenmiştir. Bu değer,  $8.829E-5$  değerindedir. Diğer bölgelerde gerinime değerinin düştüğü gözlenmektedir.

Şekil 5.1'de (c), 0.700 MPa dğerindeki araç aks yükü altında, yol katmanlarındaki düşey yer değiştirmelerin dağılımında değişiklik olduğu görülmektedir. Bu dikey yer değiştirme, yola uygulanan yükten kaynaklanan sıkışma veya genleşmeyi ifade eder.



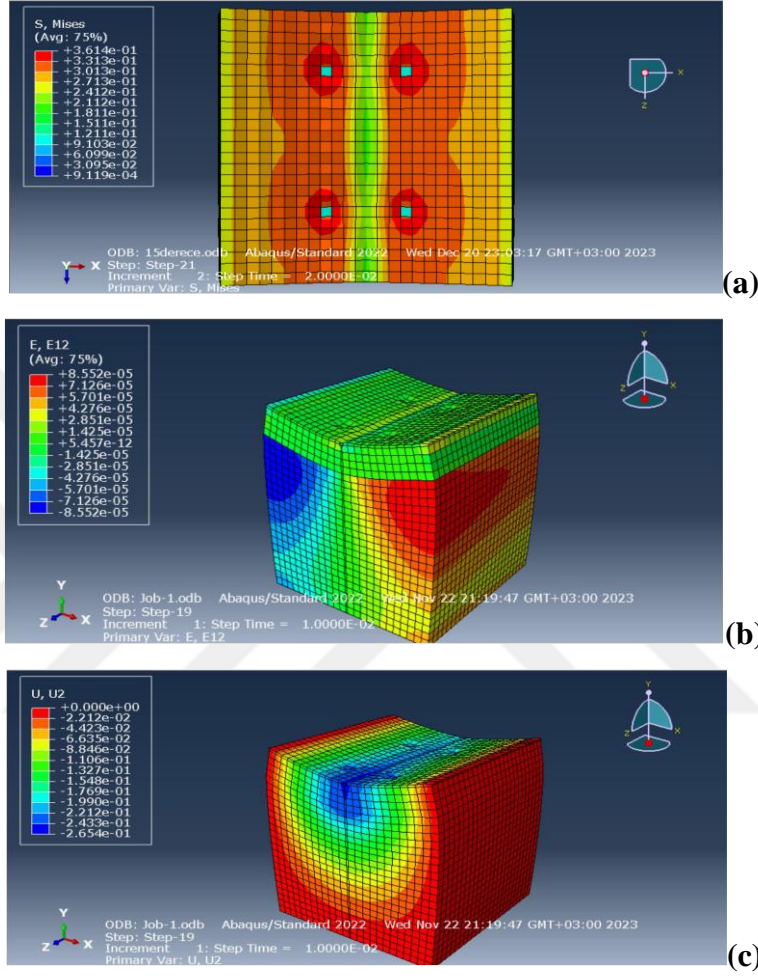
**Şekil 5.1** 0.700 MPa yük altındaki basınç elemanı için hesaplanan a) von-Mises gerilme değerleri (MPa), b) gerinim değerleri, c) yer değiştirme değerleri (mm)

Şekil 5.2'de (a), 0.700MPa dğerindeki araç aks yükü altında oluşan gerilmelerdeki, sıcaklığın 15 dereceye yükselmesi sonucu değışimi görölmektedir. Sıcaklığın yükselmesi, tüm kaplama tabakasında oluşan gerilme değerlerini artıdığı gözlenmektedir.

Şekil 5.2'de(b), 0.700MPa dğerindeki araç aks yükü altında oluşan gerinimlerdeki, sıcaklığın 15 dereceye yükselmesi sonucu değışimi görölmektedir. Sıcaklığın yükselmesi, tüm kaplama tabakasında oluşan gerinime değerlerini artıdığı gözlenmektedir.

Şekil 5.2'de (c), 0.700 MPa dğerindeki araç aks yükü altında oluşan Dikey yer değıştirmenin dağılımlardeki, sıcaklığın 15 dereceye yükselmesi sonucu değışimi

görülmektedir. Yol katmanlarında düşey yer değiştirmelerin dağılımında değişiklik olduğu görülmektedir. Bu dikey yer değiştirme, yola uygulanan yükten kaynaklanan sıkışma veya genişlemeyi ifade eder.



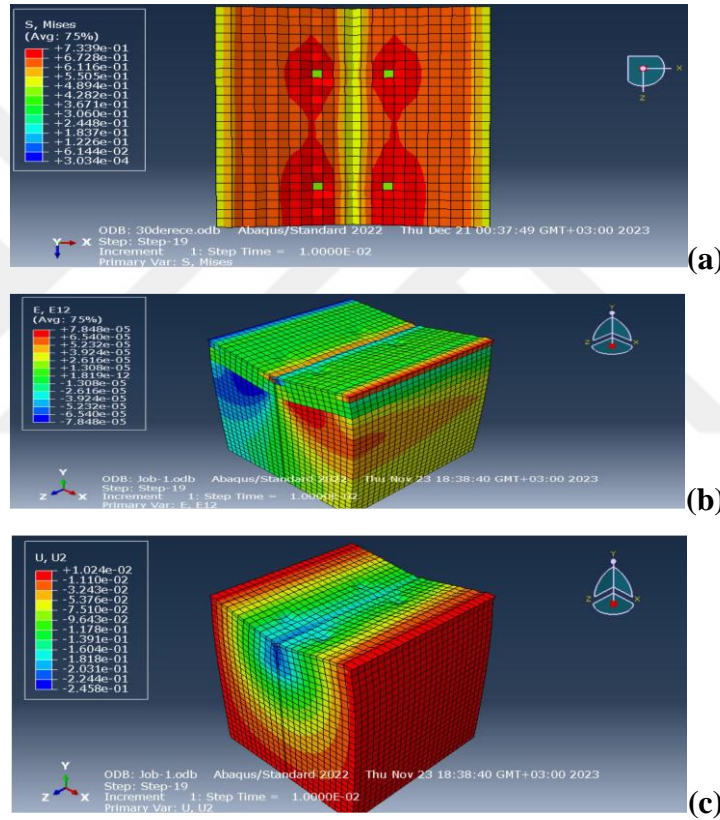
**Şekil 5.2** 0.700 MPa yük altındaki ve sıcaklık 15 derece basınç elemanı için hesaplanan a) von-Mises gerilme değerleri (MPa), b) gerinim değerleri, c) yer değiştirme değerleri (mm)

Şekil 5.3'te (a), 0.700 MPa dğerindeki araç aks yükü altında oluşan gerilmelerdeki, sıcaklığın 30 dereceye yükselmesi sonucu değişimi görülmektedir. Sıcaklığın yükselmesi, tüm kaplama tabakasında oluşan gerilme değerlerini giderek arttırdığı gözlenmektedir.

Şekil 5.3'ta (b), 0.700 MPa dğerindeki araç aks yükü altında oluşan gerinimlerdeki, sıcaklığın 30 dereceye yükselmesi sonucu değişimi görülmektedir. Sıcaklığın

yükselmesi, tüm kaplama tabakasında oluşan gerinime değerlerini giderek düştürdüğü gözlenmektedir.

Şekil 5.3'ta (c), 0.700 MPa dğerindeki araç aks yükü altında oluşan Dikey yer değıştirmenin dağılımlardaki, sıcaklığın 30 dereceye yükselmesi sonucu değışimi görölmektedir. Yol katmanlarında düşey yer değıştirmelerin dağılımında değışiklik olduğu görölmektedir. Bu dikey yer değıştirme, yola uygulanan yükten kaynaklanan sıkışma veya genişlemeyi ifade eder.



**Şekil 5.3** 0.700 MPa yük altındaki ve sıcaklık 30 derece basınç elemanı için hesaplanan a) von-Mises gerilme değerleri (MPa), b) gerinim değerleri, c) yer değıştirme değerleri (mm)

Sıcaklıklar yükseldiğinde yol yapımında kullanılan asfalt genişleme eğilimi gösterir. Bu genişleme asfaltın genişlemesine neden olur, bu da toprağın alt tabakası üzerindeki baskının artmasına neden olur ve zamanla yolun bozulmasına katkıda bulunur. Genel

olarak, yüksek sıcaklıkların bir sonucu olarak yolun üst katmanındaki aşırı yük artar, bu da aşınmanın artmasına ve çatlak ve çukurların ortaya çıkmasına katkıda bulunur.

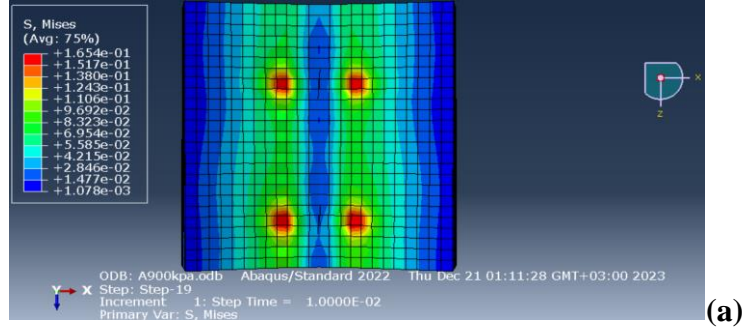
Sıcaklığın artmasıyla birlikte asfalt gibi yol yapımında kullanılan malzemelerin genleşmeye başladığı görülmektedir. Bu genişleme yolun üst katmanının yükselmesine neden olabilir. Bu nedenle üst katmanların ısı kaynaklı şişme veya genleşmeden dolayı düşey yer değiştirmesi azalır.

- **0.900 MPa yük taşıma çalışması**

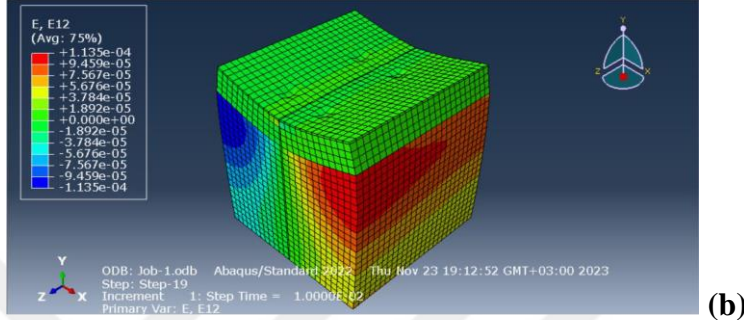
Şekil 5.4'te (a), 0.900 MPa basınca maruz kalan aracın tekerlek aksları altında oluşan gerilmeler gösterilmektedir. Araç tekerleklerinin altındaki bölgelerde, S misses değerinin en yüksek seviyeye ulaştığı tespit edilmiştir. Bu seviye  $1.654E-1$  olarak ölçülmüştür. Diğer bölgelerde ise gerilme değerinin azaldığı gözlenmektedir.

Şekil 5.4'te (b), araç aks yükü altında oluşan 0.900 MPa değerindeki gerinimlerdeki değişim incelenmiştir. Tekerlek altındaki bölgelerde E E12 değerinin en yüksek seviyeye ulaştığı belirlenmiştir ve bu seviye  $1.135E-04$  olarak ölçülmüştür. Diğer bölgelerde ise gerinim değerinin arttığı gözlenmektedir.

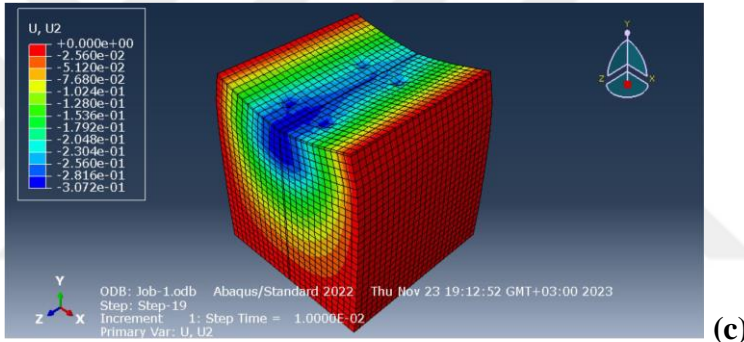
Şekil 5.4'te (c), araç aks yükü altında meydana gelen 0.900 MPa değerindeki gerilmelerde yol katmanlarındaki düşey yer değiştirmelerin dağılımında bir değişiklik gözlenmektedir. Bu dikey yer değiştirme, yolun üzerine uygulanan yükten kaynaklanan sıkışma veya genleşmeyi temsil eder.



(a)



(b)



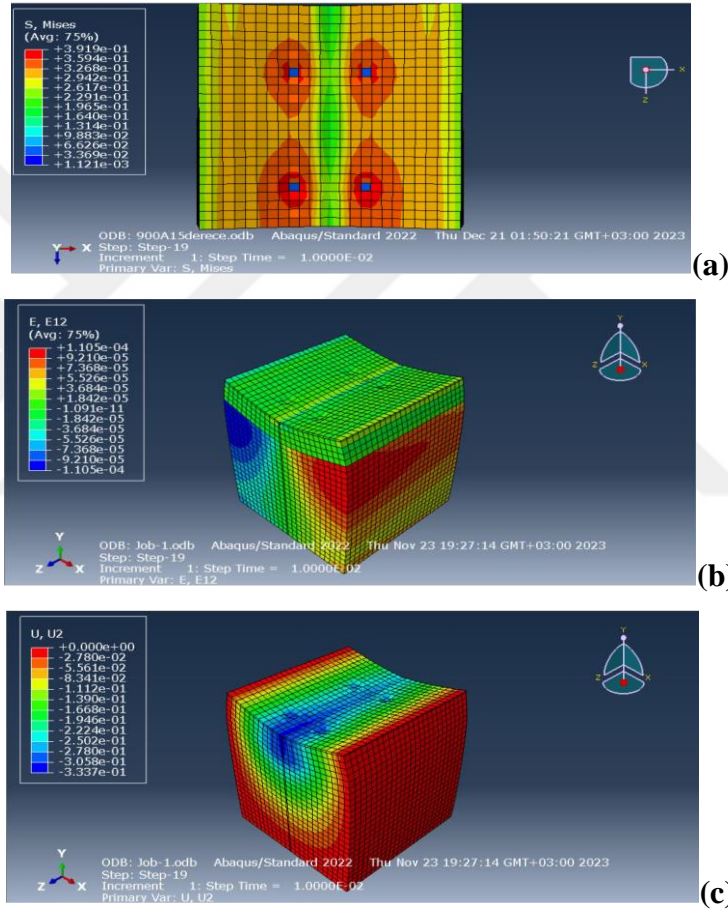
(c)

**Şekil 5.4** 0.900 MPa yük altındaki basınç elemanı için hesaplanan a) von-Mises gerilme değerleri (MPa), b) gerinim değerleri, c) yer değiştirme değerleri (mm)

Şekil 5.5'te (a), araç aks yükü altında oluşan 0.900 MPa değerindeki gerilimlerin, sıcaklığın 15 derece artmasıyla nasıl değiştiği gösterilmektedir. Sıcaklığın yükselmesinin, kaplama tabakasının tümünde meydana gelen gerilim değerlerini artırdığı gözlenmektedir.

Şekil 5.5'te (b), araç aks yükü altında meydana gelen 0.900MPa değerindeki gerinimlerdeki değişim incelenmektedir. Sıcaklığın 15 derece artması sonucunda, kaplama tabakasının tamamında meydana gelen gerinim değerlerinin arttığı gözlenmektedir.

Şekil 5.5'te (c), 0.900 MPa basınç ve 15 derece sıcaklıkta yol katmanlarında meydana gelen düşey yer değiştirmeler, genellikle yolun üzerine uygulanan yükler ve sıcaklık değişiklikleri tarafından etkilenir. Bu değerler altında, yol katmanlarında bir sıkışma veya genişleme olmaktadır. Yüksek basınç, özellikle yol yüzeyine uygulanan ağır yükler veya trafik hareketliliği nedeniyle yolun altındaki katmanlarda sıkışmalara veya deformasyonlara neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, sıcaklık artışı da yol katmanlarının genişmesine yol açabilir.

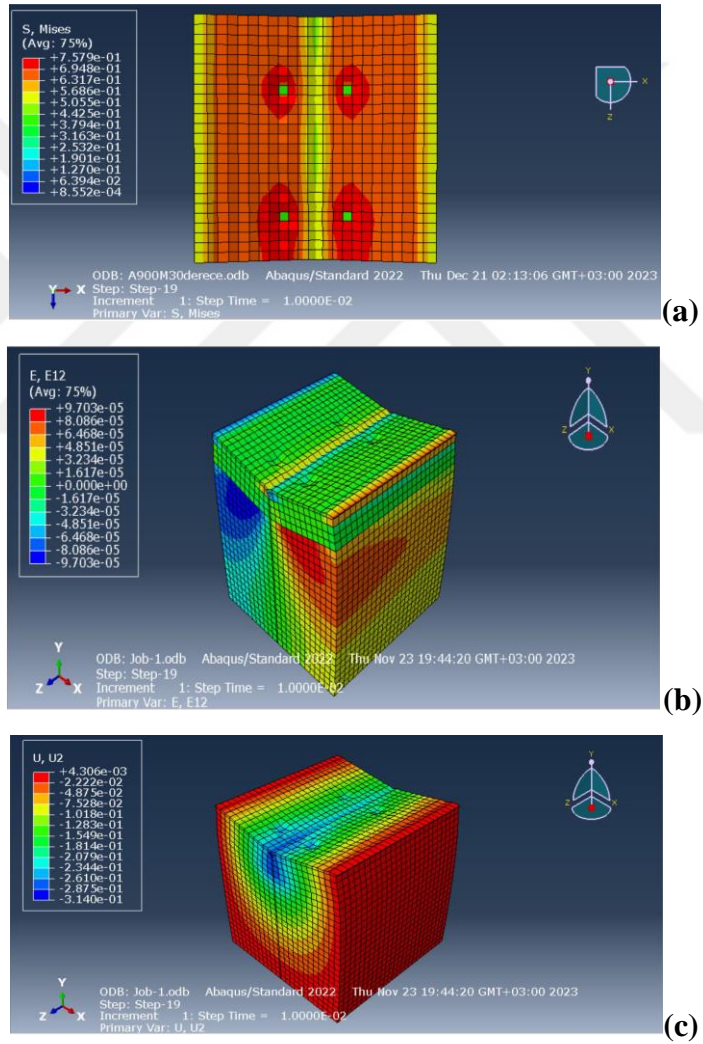


**Şekil 5.5** 0.900 MPa yük altındaki ve sıcaklık 15 derece basınç elemanı için hesaplanan a) von-Mises gerilme değerleri (MPa), b) gerinim değerleri, c) yer değiştirme değerleri (mm)

Şekil 5.6'da (a), araç aks yükü altında oluşan gerilmelerdeki 0.900 değerindeki değişimi sıcaklığın 30 derece artmasıyla incelenmektedir. Sıcaklığın yükselmesi sonucunda, kaplama tabakasının tümünde oluşan gerilme değerlerinin istikrarlı bir şekilde arttığı gözlenmektedir.

Şekil 5.6'da (b), araç aks yükü altında meydana gelen 0.900 MPa değerindeki gerinimlerdeki değişim incelenmektedir. Sıcaklığın 30 derece artması sonucunda, kaplama tabakasının genelinde meydana gelen gerinim değerlerinin arttığı gözlenmektedir.

Şekil 5.6'da (c), 0.900 MPa basınç ve 30 derece sıcaklıkta yol katmanlarındaki düşey yer değiştirmeler genellikle daha büyük bir etki göstermektedir. Bu değerler altında, yolun katmanları genellikle daha fazla genişleme veya sıkışma yaşamaktadır.



Şekil 5.6 0.900 MPa yük altındaki ve sıcaklık 30 derece basınç elemanı için hesaplanan a) von-Mises gerilme değerleri (MPa), b) gerinim değerleri, c) yer değiştirme değerleri (mm)

- **4.5 MPa taşıma kapasitesine sahip bir kamyonun örnek olay incelemesi**

Ağır yüklü kamyonların yol katmanları üzerinde önemli bir etkisi vardır. Kamyonlarla taşınan ağır yükler, yollarda aşağıdakiler de dahil olmak üzere pek çok olumsuz etkiye neden olabilir:

**Yol aşınması:** Ağır yük taşıyan kamyonlar yollardaki aşınma oranını hafif araçlara göre daha hızlı artırır. Kamyonların oluşturduğu yoğun basınç yolun üst katmanlarına zarar vererek çukur ve çatlaklara neden olmaktadır.

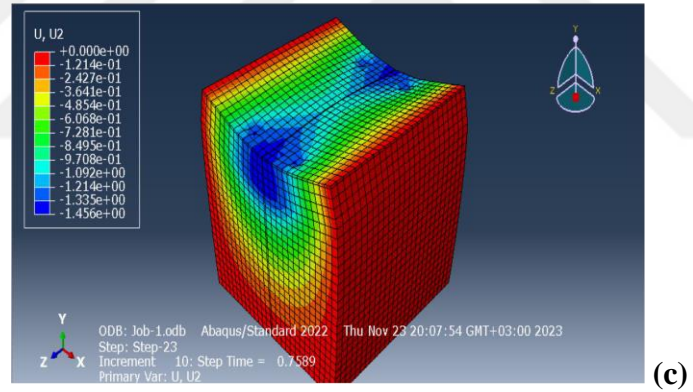
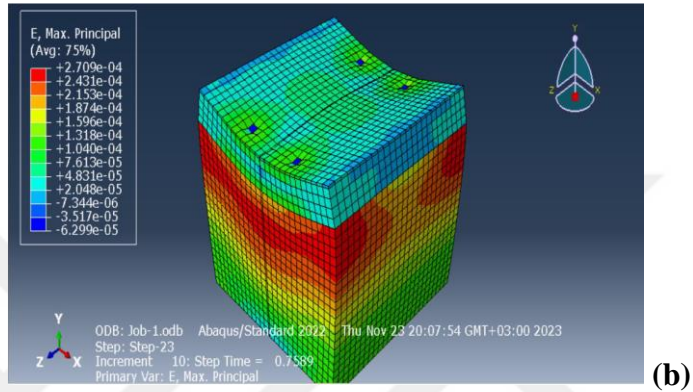
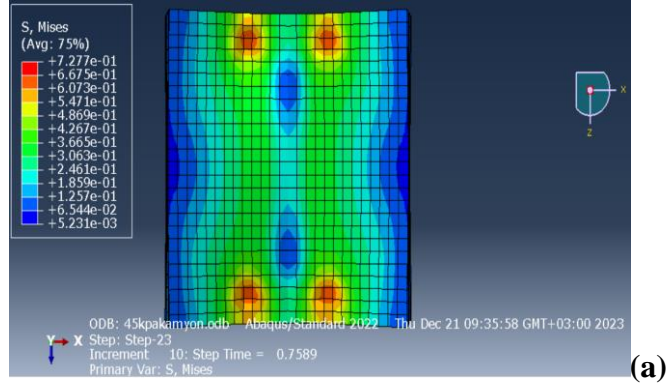
**Yüzey deformasyonu:** Yollardan ağır yüklü kamyonlar geçtiğinde aşırı basınç nedeniyle yol yüzeyinde deformasyonlar meydana gelebilir ve bunun sonucunda oyuklar ve tümsekler ortaya çıkabilir.

**Temel bozulması:** Yollara gelen şiddetli darbeler, üst katmanların dayandığı temelin bozulmasına, çökmelere veya yapısal deformasyonlara neden olur.

Şekil 5.7'de (a), tekerlek aksları 4.5 MPa basınçla oluşan gerilmeler incelenmiştir. S mises değeri tekerlek altındaki bölgelerde en yüksek seviyede, 7.277E-01, olarak belirlenmiştir, Diğer bölgelerde ise gerilmenin azaldığı gözlenmektedir. Yüksek gerilim, malzemenin yorulması veya hasar görmesi olasılığını artırır.

Şekil 5.7'de (b), 4.5 MPa'lık kamyon aks altında meydana gelen gerinimler üzerinde yapılan analizde değişim incelenmiştir. Tekerlek altındaki alanlarda E Max, Principal değerinin en yüksek seviyeye ulaştığı belirlenmiş ve bu seviye 2.709E-04 olarak kaydedilmiştir. Diğer bölgelerde ise gerinim değerlerinde bir azalma gözlenmiştir.

Şekil 5.7'de (c), 4.5 MPa değerindeki kamyon aks yükü altında katmanlarında gözlemlenen gerilmeler, dikey yönde yer değiştirmelerde bir farklılık sergilemektedir. Bu dikey değişim yolun üzerinde binen yükün neden olduğu sıkışma veya genleşmeyi ifade eder.

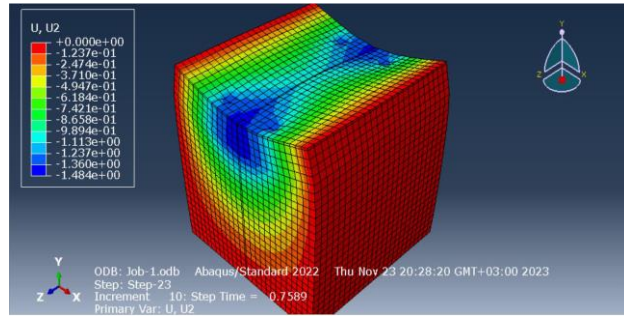
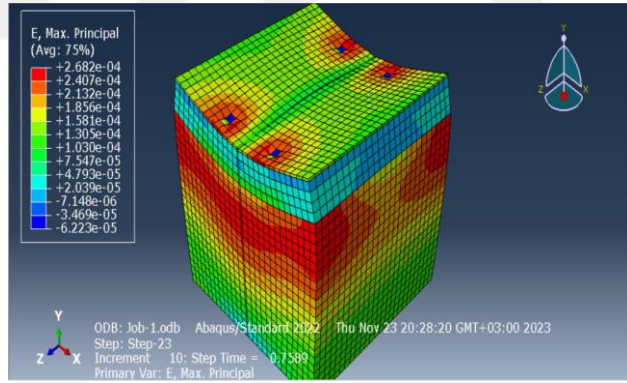
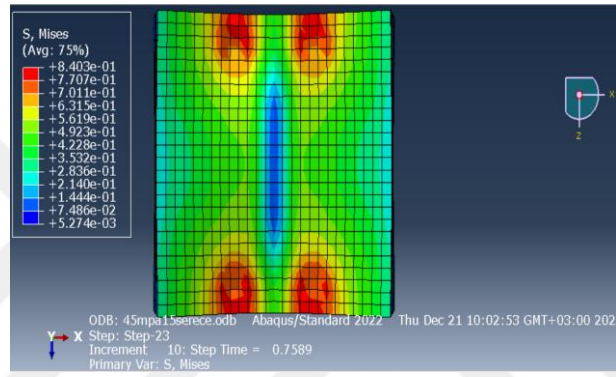


**Şekil 5.7** 4.5 MPa yük altındaki basınç elemanı için hesaplanan a) von-Mises gerilme değerleri (MPa), b) gerinim değerleri, c) yer değiştirme değerleri (mm)

Şekil 5.8'de(a), 4.5 MPa'lık kamyon aks yükü altında meydana gelen gerilmeler üzerinde 15 derece sıcaklık artışının etkisi incelenmiştir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte, tümkaplama tabakasında gerilme değerlerinde artış gözlenmiştir. Sıcaklığın 15 derrecelik artması yol malzemesinin genişlemesine neden olur ve bu genişleme sonucunda yol yüzeyindeki basınç değişir.

Şekil 5.8'de (b), kamyon aks yükü altında oluşan 4.5 MPa değerindeki gerinimlerdeki değişim incelenmiştir. 15 derecelik sıcaklık artışıyla birlikte, kaplama tabakasının genelde gerinim değerlerinde arttığı gözlenmektedir.

Şekil 5.8'deki(c), verilere göre, 4.5 MPa basınç ve 15 derece sıcaklık, yol katmanlarında gözlenen düşey yer değiştirmeleri üzerinde etkilidir. Bu değişimler, yol yüzeyine binen yükler ve sıcaklık değişikliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu durum altında, yol katmanlarında bir tür sıkışma veya genişleme meydana gelir.

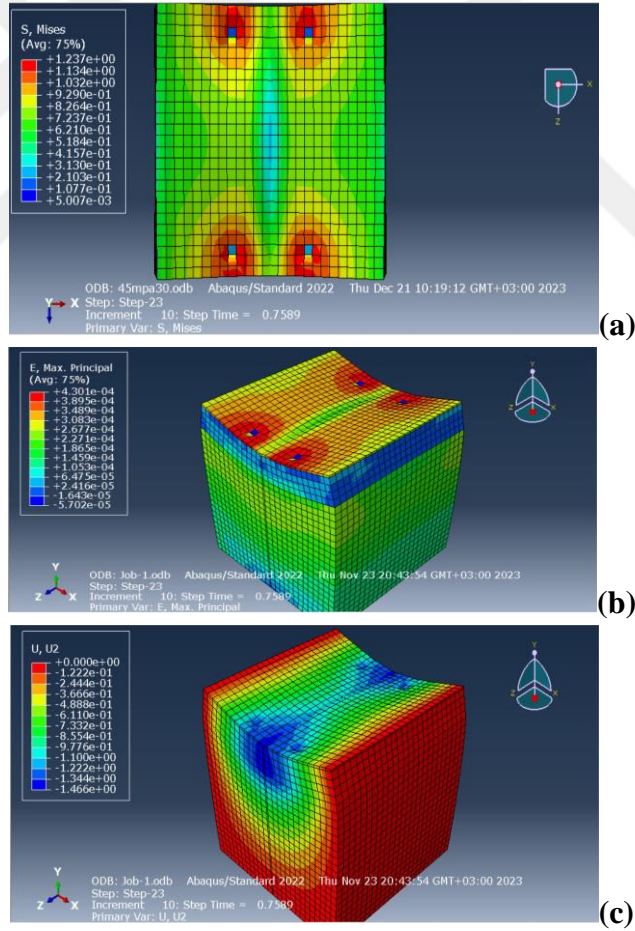


**Şekil 5.8** 4.5 MPa yük altındaki ve sıcaklık 15 derece basınç elemanı için hesaplanan a) von-Mises gerilme derğerleri (MPa), b) gerinim değerleri, c) yer değıştirme değerleri (mm)

Şekil 5.9'da (a), 4.5 MPa'lık kamyon aks yükü altında meydana gelen gerilmeler üzerinde 30 derece sıcaklık artışının etkisi incelenmiştir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte, tümkaplama tabakasında gerilme değerlerinde azalma gözlenmiştir.

Sekil 5.9'da (b), kamyon aks yükü altında oluşan 4.5 MPa değerindeki gerinimlerdeki değişim incelenmiştir. 30 derecelik sıcaklık artışıyla birlikte, kaplama tabakasının genelinde gerinim değerlerinde giderek arttığı gözlenmektedir.

Şekil 5.9'daki (c), verilere göre, 4.5 MPa basınç ve 30 derece sıcaklıkta yol katmalarında meydana gelen düşey yer değiştirmeler genellikle daha belirgin bir etki göstermektedir. Bu koşullarda, yol katmanları genellikle daha fazla genleşme veya sıkışma yaşamaktadır.



**Şekil 5.9** 4.5 MPa yük altındaki ve sıcaklık 30 derece basınç elemanı için hesaplanan a) von-Mises gerilme değerleri (MPa), b) gerinim değerleri, c) yer değiştirme değerleri (mm)

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 6.1 Sonuç

Bu çalışmada asfalt tabakasının kalıcı deformasyonlar açısından sağladığı faydalar araştırılmıştır. Özellikle, dört katmandan (Kaplama, temel, alt temel ve alt zemin) oluşan esnek bir kaplama bölümünün mekanik tepkisi, bir kaplama bölümüyle karşılaştırılmıştır:

- Esnek kaplama simülasyonunda zemin-yapı etkileşimi üzerine sınırlı araştırma göz önüne alındığında, bu çalışma özellikle bu alana odaklanmıştır. Asfalt ve taban katmanları arasında meydana gelen sürtünme davranışını taklit etmek için arayüz elemanları uygulanmıştır. Kaplama-alt zemin etkileşiminin etkilerinin, yükün aktarılması yoluyla daha fazla enerji kaybına neden olduğu bulunmuştur. Ancak bu durum asfalt tabakasının maruz kaldığı çekme gerilmesinin artmasına neden olabilir. Sonuç olarak, bu etki tekerlek izi kriterleri açısından faydalı olabilirken, yorulma hasarı kriterleri açısından olumsuz etkilere sahip olabilir.
- Bu çalışma, katmanlı esnek kaplamanın gerilim, gerinim ve sapmaya ilişkin mekanik reaksiyonunu aydınlattı. Katmanlarda (temel ve alt zemin gibi) farklı malzemelerin kullanılmasından kaynaklanan etkiler araştırılmıştır. Elastik alanda, malzemelerin doğrusal olmama durumu ve stres bağımlılığının etkisinin, kaplama yapısının kritik tepkilerini önemli ölçüde etkileyebileceği bulunmuştur. Değişiklikler, asfalt katmanında faydalı olabilir veya olumsuz etkiler yaratabilir, bunlar genellikle katman geometrisine, malzeme özelliklerine ve belirli yükleme kombinasyonlarına bağlıdır.
- Asfalt karışımı ve taban tabakası elastik modülünün tekerlek izi performansı üzerinde küçük bir etkisi vardır.
- Sıcaklık 0°C, 15°C'den 30°C'ye yükseltildiğinde, kaplama katmanlarında belirgin bir deformasyon ve dikey yer değiştirme meydana gelmiştir.

- Asfalt modelin yüzeyindeki tekerlek izi performansı, katman malzemesinin elastik modülündeki değişime duyarlıdır ve katman kalınlığındaki değişime duyarlı değildir.
- Farklı modellere ve farklı yük koşullarına, sıcaklıklara ve katman parametrelerine sahip çeşitli kaplama yapıları için elde edilen sonuçların diğer durumlarda kural olarak ele alınmaması gerektiğine dikkat edilmelidir.

## 6.2 Öneriler

Sunulan tezde ifade edilenlerden yola çıkarak aynı alanda gelecekte yapılacak çalışmaların yapılmasını kolaylaştırmak amacıyla aşağıdaki öneriler sunulabilir:

- a. Bu çalışmada dikdörtgen bir alana dögüsel düşey basınç uygulanarak bir lastik yükleme modeli tasarlanmıştır. Ancak farklı simülasyon yöntemlerinin etkilerini incelemek yararlı olmaya devam etmektedir. Bu bağlamda aşağıdaki çalışmaların yapılması önerilmektedir:
- b. Yüklemenin etkisinin değerlendirilmesi için yatay ve dikey basınç kombinasyonlarının incelenmesi.
- c. Değişken temas alanlarına sahip dairesel, eliptik ve diğer yükleme konfigürasyonlarının etkilerinin araştırılması.
- d. Yarım daire biçimli, tek tip ve diğerleri gibi farklı basınç dağılımlarının lastik üzerindeki etkisinin incelenmesi.
- e. Değişen yükleme hızlarının etki değerlendirmesi.

## KAYNAKLAR

- AASHTO.1993. Guide for Design of Pavement Structures. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Abed, A. H. and Al-Azzawi, A. A. 2012. Evaluation of rutting depth in flexible pavements by using finite element analysis and local empirical model. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 5(2): 163-169.
- Abolghasem, Y. 2018. Effect of nanopolymer modified binder on hot mix asphalt. MSc. Thesis, University of North Dakota, 5-7 page, Grand Forks.
- ABOUTCIVIL, 2017. Web sitesi. <https://www.aboutcivil.org/simple-asphaltic-concrete-roads.html>. Erişim Tarihi: 20.11.2023.
- Afaj, H. A. H., Mohammed, H. A., and Jaffer, G. N. 2019. Behavior of unsaturated subgrade soil under highway load. Diyala Journal of Engineering Sciences, 23-33.
- Ahmed, Z., Jabbar, A., Ghassan, E. G. and Masood, A. K. K. 2014. Surface deformation of flexible pavement with different base layer using finite element analysis. Researchgate, 332868860: 1-17.
- Ajab Khurshid, D. R. K. and Khan, D. 2021. The application of micromechanical modeling to study the non-linear behavior of flexible pavement under truck loading in pakistan., 20 : 2214-5095.
- Akbulut, H., & Aslantas, K. 2005. Finite element analysis of stress distribution on bituminous pavement and failure mechanism. Materials and design, 26(4): 383-387.
- Alaamri, R. S. N., Kattiparuthi, R. A. and Koya, A. M. 2017. Evaluation of flexible pavement failures-A case study on izki road. International Journal of Advanced Engineering, Management and Science, 3(7): 741-749.
- AlAbdullah, S. F. I. and Taresh, N. S. 2017. Evaluation of soil reinforced with geogrid in subgrade layer using finite element techniques. GEOMATE Journal, 13(35): 174-179.
- Alkaissi, Z. A. 2020. Effect of high temperature and traffic loading on rutting performance of flexible pavement. Journal of King Saud University-Engineering Sciences. 32(1): 1-4

- Al-Qadi, I. L., Elseifi, M. and Yoo, P. J. 2004. In-situ validation of mechanistic pavement finite element modeling. In International Conference on Accelerated Pavement Testing, 01389237: 1-20.
- Al-Qadi, I. L., Wang, H. and Tutumluer, E. (2010). Dynamic analysis of thin asphalt pavements by using cross-anisotropic stress-dependent properties for granular layer. Transportation Research Record, 2154(1): 156-163.
- Al-Sherrawi, M. H. and Hadi, M. A. S. 2021. The influence of base layer thickness in flexible pavements. engineering, technology and applied science research, 11(6): 7904-7909.
- Anderson, K. O. and Epps, J. A. 1983. Asphalt concrete factors related to pavement cracking in west Texas, Texas Transportation Institute, 52: 151-197, USA.
- Austroroad. 2004. Pavement design a guide to the structural design of road pavements. Sundeby, Australia.
- Bagdat, T. 2016. Fresh approach to low temperature cracking in asphalt concrete pavement. Kazakhstan Highway Research Institute, 5 (419): 161-178
- Basheer, S. and Ahmad, E. 2020. Sustainment of Flexible Pavement Failure and Its Remedial Measures.
- Başak, V. B. 2019. Investigation of the effect of hydrated lime on low temperature cracking of asphalt concrete. PhD Thesis, Middle East Technical University, 9 page
- Behnia, B., Buttlar, W., & Reis, H. 2018. Evaluation of low-temperature cracking performance of asphalt pavements using acoustic emission: A review. Applied Sciences, 8(2): 306-307.
- Bell, C. A. 1989. Oregon state university, Summary report on aging of asphalt-aggregate systems, 89 (4): 38-40 page, USA.
- Bell, C. A., AbWahab, Y., Cristi, M. E. and Sosnovske, D. 1994. Selection of laboratory aging procedures for asphalt-aggregate mixtures (202): 334-3774, USA.
- Bhati, M., and Gill, S. 2019. To Study of Pavement Failure in Rigid and Flexible Pavement. International Journal of Engineering Research and Technology, ISSN: 2278-0181, 1-4 page, U.K.
- Bodhinayake, B. C. 2008. A study on nonlinear behaviour of subgrades under cyclic loading for the development of a design chart for flexible pavements.MSc, University of Wollongong,102 page, Australia.

- Boussinesq, J. 1885. Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques: principalement au calcul des deformations et des pressions que produisent, dans ces solides, des efforts quelconques exercés sur une petite partie de leur surface ou de leur intérieur; memoire suivi de notes étendues sur divers points de physique mathématique et d'analyse, 354 page, Gauthier-Villars.
- Brown, S. and Pell, P. 1974. Repeated loading of bituminous materials. Proceedings of the second international conference on asphalt pavement for southern africa.
- Burmister, D.M. 1945. The general theory of stress and displacement in layered systems. Journal of applied physics, 16(2): 89-94.
- Carpenter, and H., S. 1983. Thermal Cracking in Asphalt Pavements: an examination of models and input parameters, 11(6): 477-488.
- Carpenter, S. H. and Lytton, R. L. 1977. Thermal pavement cracking in west texas, Texas Transportation Institute, 18-4F: 10-54.
- Carpenter, S. H., Lytton, R. L. and Epps, J. A. 1974. Environmental factors relevant to pavement cracking in West Texas, Texas Transportation Institute, Texas, 18-1: 25-60.
- Chaojia L., Chong, X., Wang, L., Zhang, J., Chen, Z., Lin, F. and Bai, P. 2022. Numerical analysis on the mechanical properties of the concrete precast pavement of runways under the wheel load. Applied Sciences, 12(19): 9826.
- Desai, C.S., and Whitenack, R. 2001. Review of models and disturbed state concept for thermomechanical analysis in electronic packaging. Journal of electronic packaging 123:19.
- El-Basyouny, M. M. and Witczak, M. 2005. Calibration of alligator fatigue cracking model for 2002 design guide. Transportation research record, 1919(1):76-86.
- ENGINEERINGDISCOVERIES, 2019. Web Sites. [Difference Between Flexible And Rigid Pavement | Engineering Discoveries](#). Erişim Tarihi: 21.11.2023.
- Faheem, H., and Hassan, A. M. 2014. 2D PLAXIS finite element modeling of asphalt-concrete pavement reinforced with geogrid. JES. Journal of Engineering Sciences, 42(6): 1336-1348.
- Foster, C. R. and Ahlvin, R. G. 1958. Development of multiple-wheel CBR design criteria. Journal of the soil mechanics and foundations division, 84(2): 1647-1.

- Gerritsen, A. H. and Jongeneel, D. J. 1988. Fatigue properties of asphalt mixes under conditions of very low loading frequencies (with discussion). In Association of Asphalt Paving Technologists Proc, 57: 94-115 page .
- Ghadimi, B., Nikraz, H., Leek, C. and Nega, A. 2013. A comparison between austroads pavement structural design and AASHTO design in flexible pavement. Advanced materials research, 723: 3-11.
- Gillespie, T. D., and Karamihas, S. M. 1994. Heavy truck properties significant to pavement damage. ASTM Special Technical Publication, 1225, 52-63.
- GLOBALSECURITY, 2019. WebSitesi. [FM 5-430-00-1 Chptr 5 Subgrades and Base Courses \(globalsecurity.org\)](https://www.globalsecurity.org) . Erişim tarihi 21.11.2023.
- Hamza, A. 2022. Esnek kaplamalı karayollarında meydana gelen deformasyonların değerlendirilmesi: Kırıkkale Keskin yolu örneği. Yüksek Lisans Tezi, çankırı karatekin üniversitesi, 20 sayfa.
- Hicks, R.G. and Monismith, C.L. 1971. Factors influencing the resilient response of granular materials. Highway resarch record, 345: 15-31.
- Huang, Y. H. 1993. Pavement analysis and design. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2: 401-409.
- Huang, Y. H. 2004. Pavement analysis and design. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2: 401-409.
- Ibrahim, A. 2020. Hybrid Pavement: Assessment of Rigid and Flexible Pavements Together. MSc. Thesis, Karabük University, 23 page, Karabük.
- Ibrahim, S. F., Sofia, G. G. and Teama, Z. T. 2014. An approach in evaluating of flexible pavement in permanent deformation OF paved AND unpaved roads over sand dunes subgrade under repeated loads. J. Environ. Earth Sci, 4(14): 78-90.
- Khodary, F., Akram, H. and Othman, A. 2019. Prediction of flexible asphalt pavement performances under material properties in variation influence. International journal of advanced research in science, 6(12): 11953-11963.
- Kumbarger, Y. S., & Biligiri, K. P. (2016). Understanding aging behaviour of conventional asphalt binders used in India. Transportation Research Procedia, 17: 282-290.
- Kuo, C. M. and Chou, F. J. 2004. Development of 3-D finite element model for flexible pavements. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 27(5): 707-717.

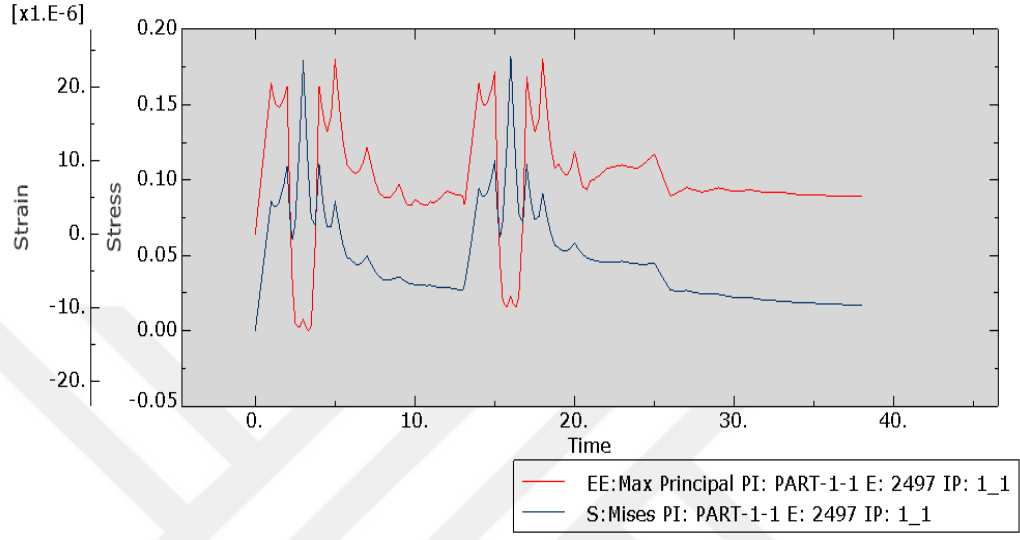
- Lee, D. Y. 1973. Asphalt durability correlation in Iowa, 43-60 page, USA
- Mohamady, A., Elhady, A. B. M. and Eisa, M. S. 2013. Improving of asphalt pavement performance using steel wire grid reinforcement. international journal of engineering inventions, 2(10): 12-22.
- Mohod, M. V. and Kadam, K. N. 2016. A comparative study on rigid and flexible pavement: A review. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), 13(3): 84-88.
- Mostafiz, E. 2021. Quality assessment of flexible pavement automated cracking data in Louisiana. Master's Thesis, Louisiana State University, 115 page.USA
- Ntirenganya, N., Kalumba, D. and De Wet, M. 2016. An investigation of the interlayer adhesion strength in deeper layers of the pavement structure, International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE) Issue 8(3).
- Rahman, M. T., Mahmud, K. and Ahsan, S. 2011. Stress-strain characteristics of flexible pavement using finite element analysis. International journal of civil and structural engineering, 2(1): 233.
- Reza, S. 2020. Development of a new testing procedure to measure thermal fatigue performance of asphalt concrete. PhD Thesis, Middle East Technical University, 11-12 page.
- Saad, B., Mitri, H. and Poorooshasb, H. 2006. 3D FE analysis of flexible pavement with geosynthetic reinforcement. Journal of transportation Engineering, 132(5): 402-415.
- Sadd, M. H. 2009. Elasticity: theory applications and numerics, second edition. Academic Press, 80 page, USA.
- Seed, H. B., Chan, C. K. and Lee, C. E. 1962. Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements, 77-113 page, USA.
- Selig, E. T. 1987. Tensile zone effects on performance of layered systems. Geotechnique, 37(3): 247-254.
- Serin, S., Oğuzhanoglu, M. A. and Kayadelen, C. 2021. Comparative analysis of stress distributions and displacements in rigid and flexible pavements via finite element method. Revista de la construcción, 20(2): 321-331.

- Shaikh, S. G., Mahajan, D. U., Shaikh, M. N. S., and Wadekar, A. P. 2022. Scientific Study of Asphalt Road Surface Distress and Their Role in the Design of Flexible Pavements. *Int. J. Eng. Trends Technol*, 70(1): 220-232.
- Shen, W. and Kirkner, D. J. 2001. Thermal cracking of viscoelastic asphalt-concrete pavement. *Journal of engineering mechanics*, 127(7): 700-709.
- Singh, A. K. and Sahoo, J. P. 2020. Analysis and design of two layered flexible pavement systems: A new mechanistic approach. *Computers and Geotechnics*, 117, 103238.
- STRUCCORE, 2017. Web sitesi. <http://strucore.com/2017/09/18/types-of-pavements/>. Erişim Tarihi: 21.11.2023.
- Taher, S. A., Alyousify, S. and Hassan, H. J. A. 2020. Comparative study of using flexible and rigid pavements for roads: A review study. *Journal of Duhok University*, 23(2): 222-234.
- Tanzadeh, J., and Kianfar, A. 2016. Decreasing thermal cracking on asphalt pavement by nano calcium carbonate (CCN) Modified bitumen. *Journal of Design and Built Environment.*, 65: 1-2.
- Thomas, A. V., Kalidindi, S. N. and Ananthanarayanan, K. A. B. T. 2003. Risk perception analysis of BOT road project participants in India. *Construction management and economics*, 21(4): 393-407.
- Uddin, W., Zhang, D. and Fernandez, F. 1994. Finite element simulation of pavement discontinuities and dynamic load response. *Transportation research record*, (1448).
- Vallerga, B. A. 1981. Pavement deficiencies related to asphalt durability. In *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, 50: 481-491.
- Wang, Y., Lu, Y. J., Si, C. D. and Sun, T. C. 2017. Finite element analysis for rutting prediction of asphalt concrete pavement under moving wheel load. *International Journal of Simulation Modelling*, 16(2): 229-240.
- Wardle, L. J. 1977. *A Computer Program for the Analysis of Multiple Complex Circular Loads on Layered Anisotropic Media*, 62 page, Australia.
- Yu, H. S. and Li, H. X. 2006. A nonlinear programming approach to kinematic shakedown analysis of frictional materials. *International Journal of Solids and Structures*, 43(21): 6594-6614.

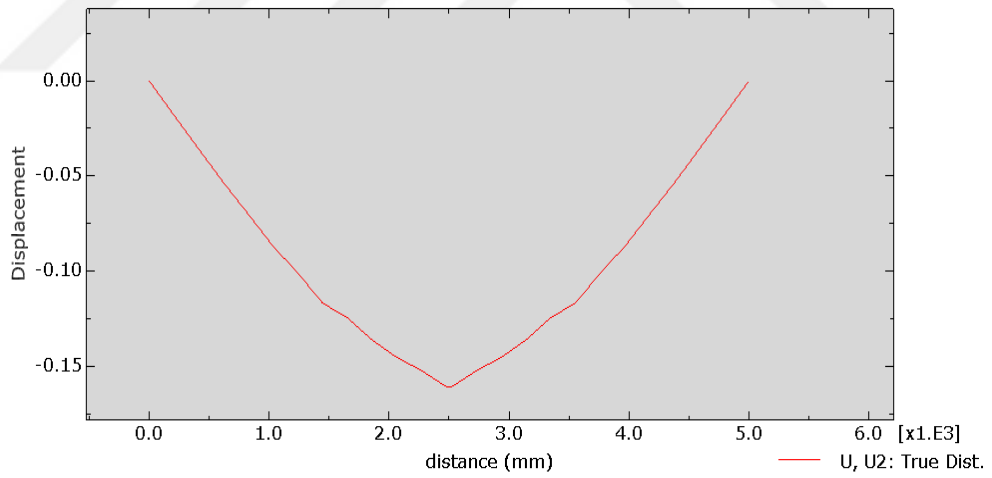
## **EKLER**

- EK 1. 0.700 MPa yük altındaki basınç grafiği a) von-Mises gerilme – gerinim değerleri, b) yer değiştirme değerleri (mm)**
- EK 2. 0.700 MPa yük altındaki ve sıcaklık 15 derece basınç grafiği a) von-Mises gerilme – gerinim değerleri, b) yer değiştirme değerleri (mm)**
- EK 3. 0.700 MPa yük altındaki ve sıcaklık 30 derece basınç grafiği a) von-Mises gerilme – gerinim değerleri, b) yer değiştirme değerleri (mm)**
- EK 4. 0.900 MPa yük altındaki basınç grafiği a) von-Mises gerilme – gerinim değerleri, b) yer değiştirme değerleri (mm)**
- EK 5. 0.900 MPa yük altındaki ve sıcaklık 15 derece basınç grafiği a) von-Mises gerilme – gerinim değerleri, b) yer değiştirme değerleri (mm)**
- EK 6. 0.900 MPa yük altındaki ve sıcaklık 30 derece basınç grafiği a) von-Mises gerilme – gerinim değerleri, b) yer değiştirme değerleri (mm)**
- EK 7. 4.5 MPa yük altındaki basınç grafiği a) von-Mises gerilme – gerinim değerleri, b) yer değiştirme değerleri (mm)**
- EK 8. 4.5 MPa yük altındaki ve sıcaklık 15 derece basınç grafiği a) von-Mises gerilme – gerinim değerleri, b) yer değiştirme değerleri (mm)**
- EK 9. 4.5 MPa yük altındaki ve sıcaklık 30 derece basınç grafiği a) von-Mises gerilme – gerinim değerleri, b) yer değiştirme değerleri (mm)**

**EK 1. 0.700 MPa yük altındaki basınç grafiği a) von-Mises gerilme – gerinim değerleri, b) yer değiştirme değerleri (mm)**

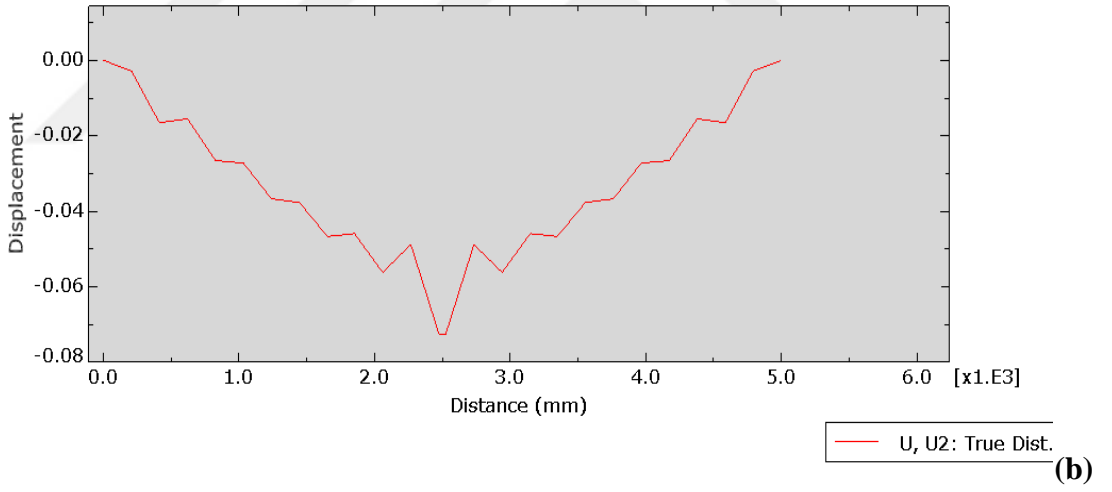
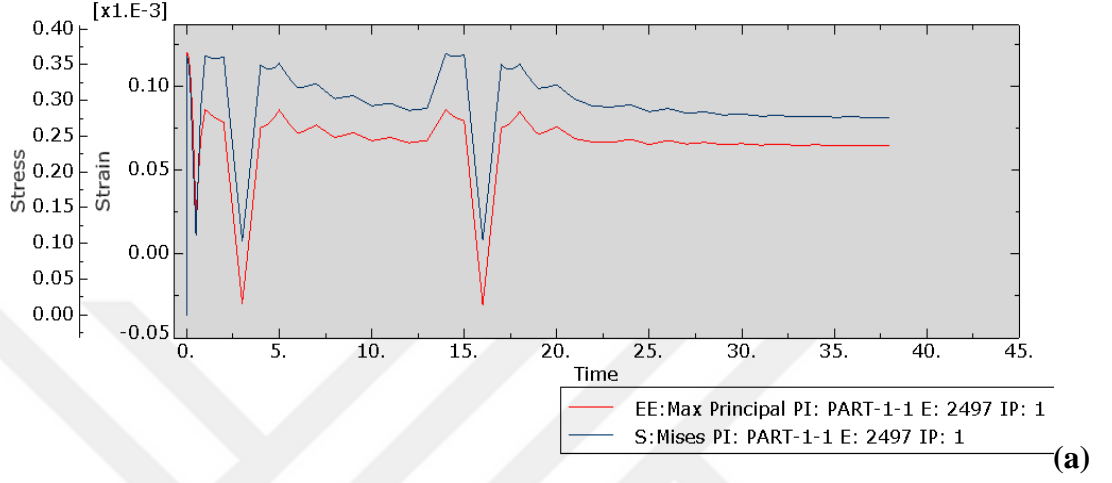


(a)

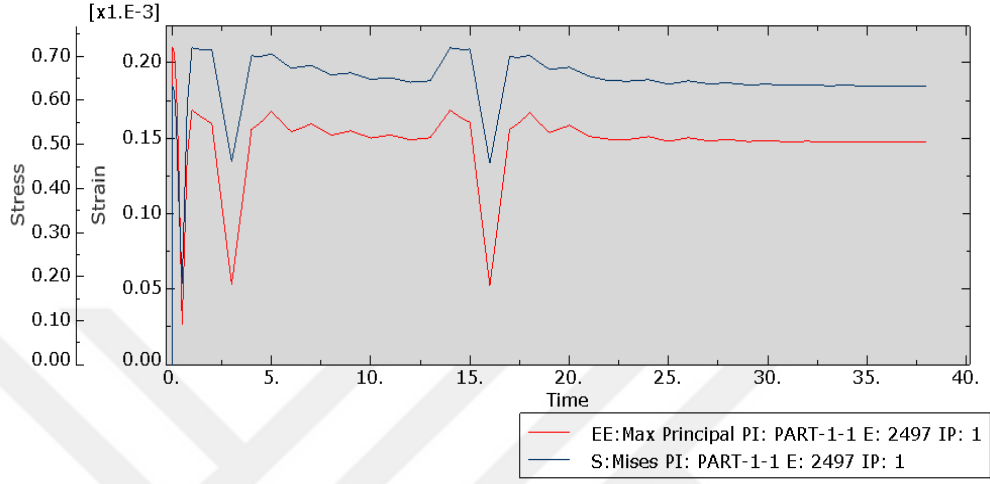


(b)

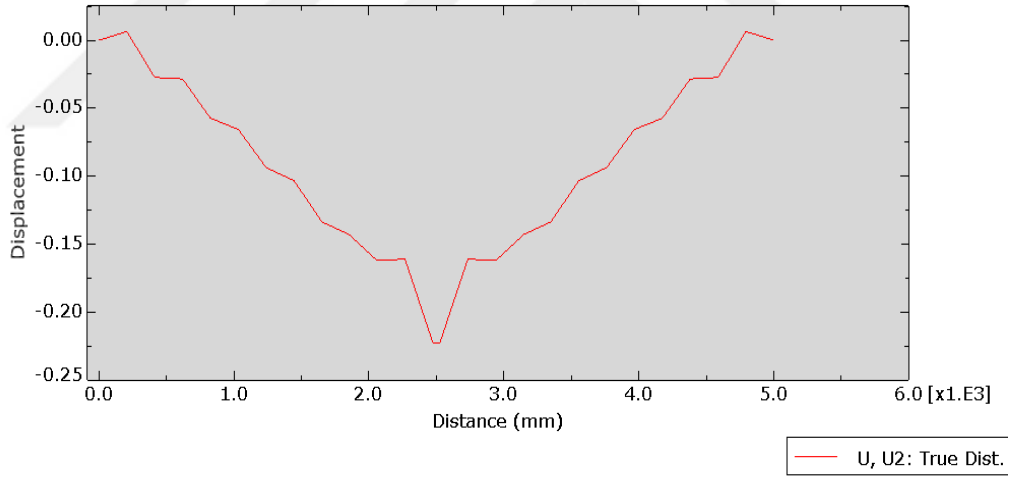
**EK 2. 0.700 MPa yük altındaki ve sıcaklık 15 derece, basınç grafiği a) von-Mises gerilme – gerinim değerleri, b) yer değiştirme değerleri (mm)**



**EK 3. 0.700 MPa yük altındaki ve sıcaklık 30 derece, basınç grafiği a) von-Mises gerilme – gerinim değerleri, b) yer değiştirme değerleri (mm)**

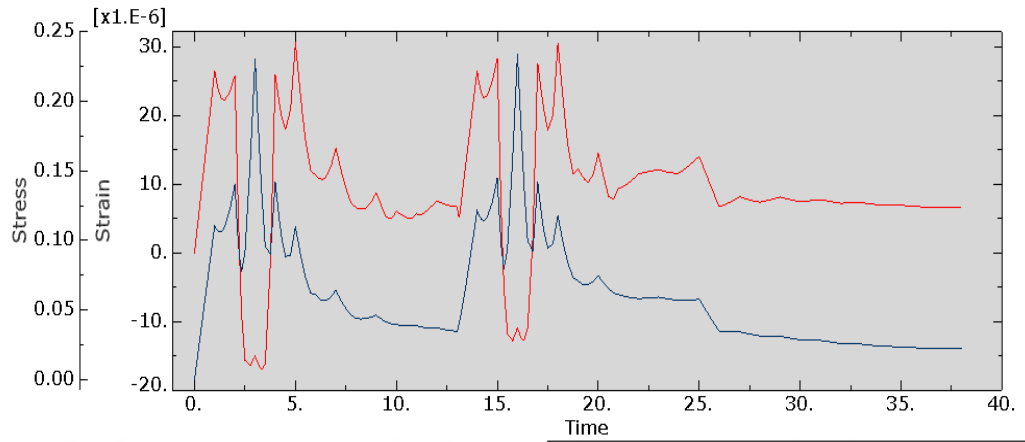


**(a)**



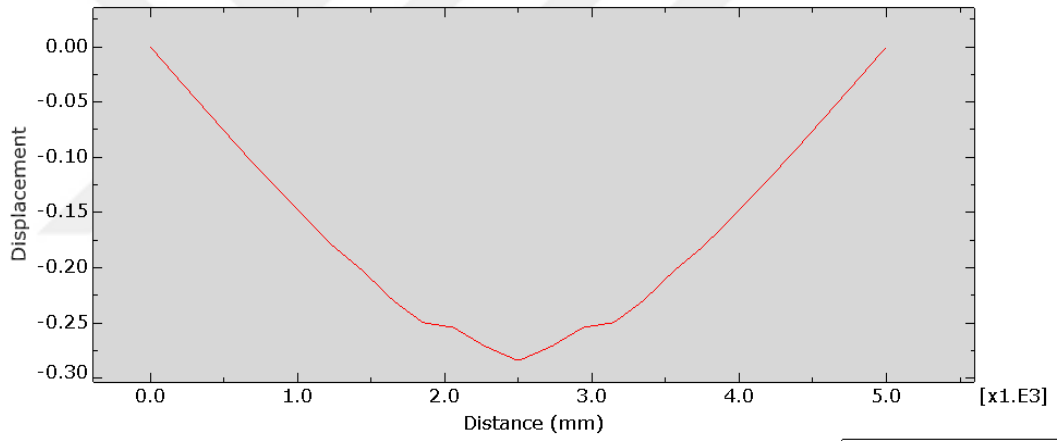
**(b)**

**EK 4. 0.900 MPa yük altındaki basınç grafiği a) von-Mises gerilme – gerinim değerleri, b) yer değiştirme değerleri (mm)**



— EE:Max Principal PI: PART-1-1 E: 2497 IP: 1  
— S:Mises PI: PART-1-1 E: 2497 IP: 1

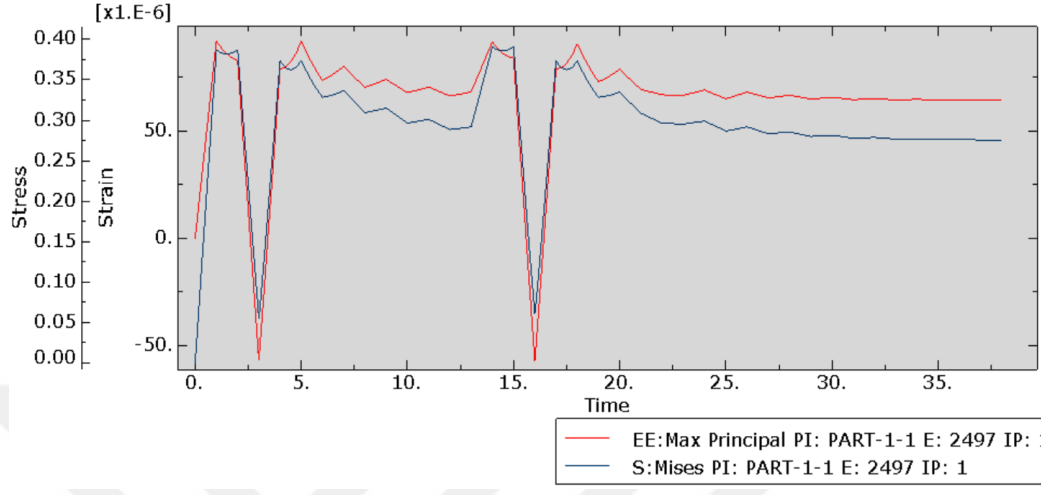
**(a)**



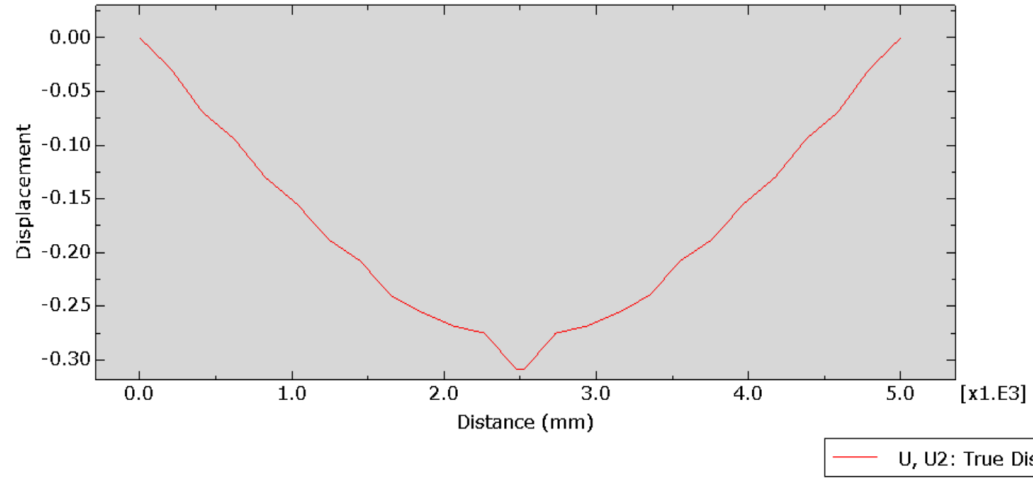
— U, U2: True Dist.

**(b)**

**EK 5. 0.900 MPa yük altındaki ve sıcaklık 15 derece, basınç grafiği a) von-Mises gerilme – gerinim değerleri, b) yer değiştirme değerleri (mm)**

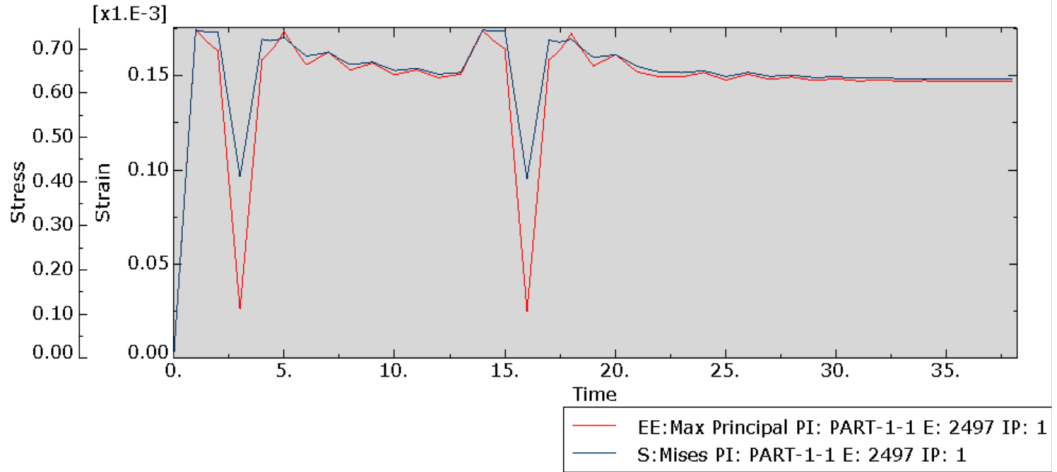


(a)

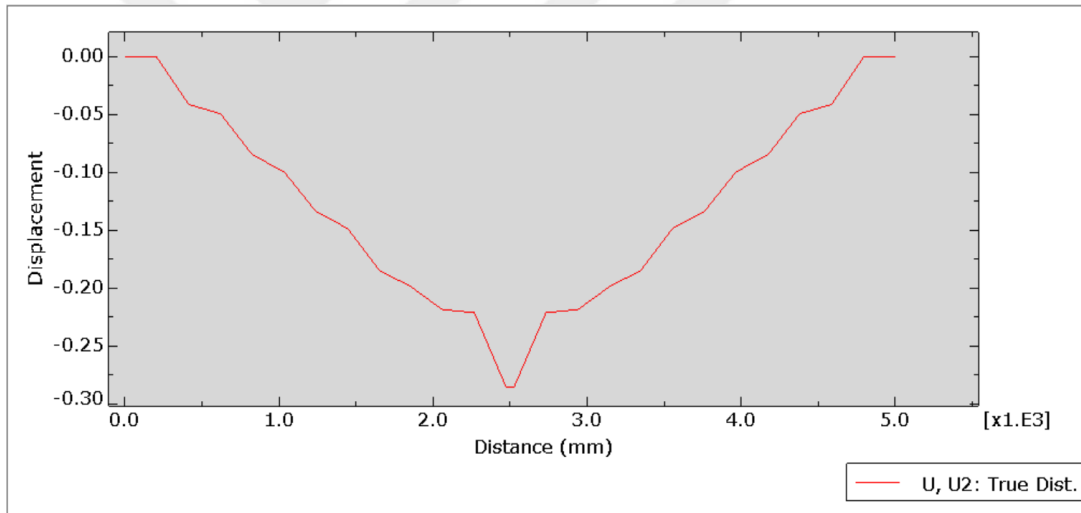


(b)

**EK 6. 0.900 MPa yük altındaki ve sıcaklık 30 derece, basınç grafiği a) von-Mises gerilme – gerinim değerleri, b) yer değiştirme değerleri (mm)**

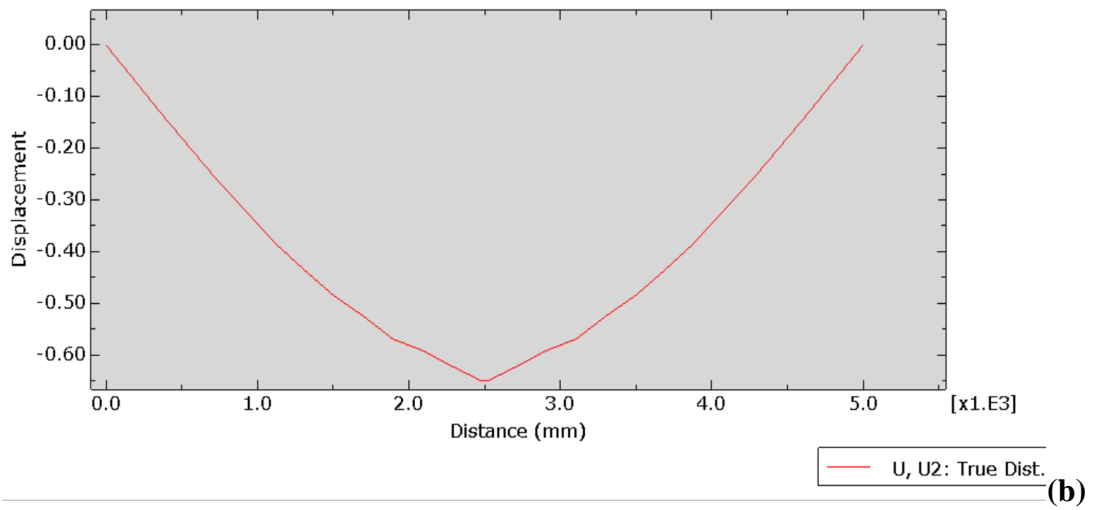
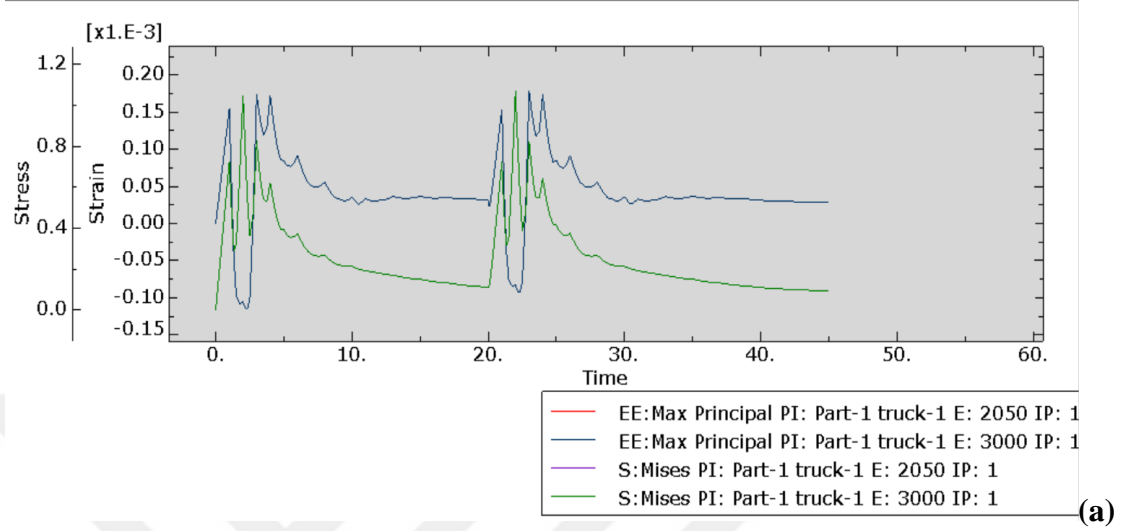


(a)

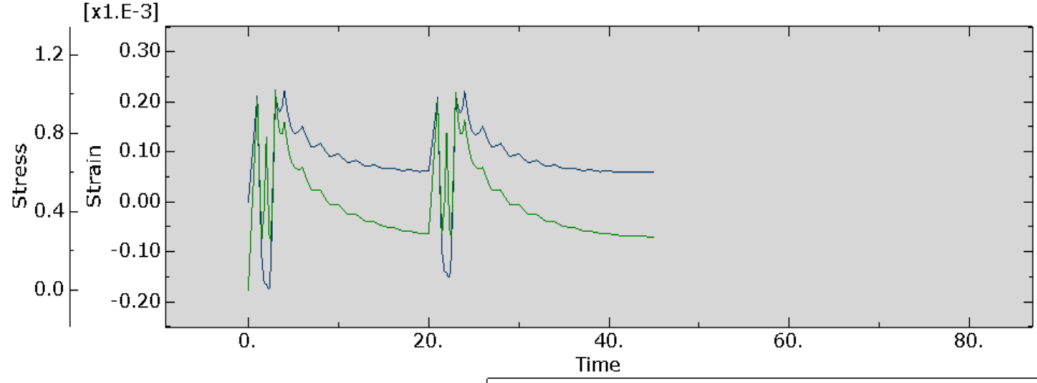


(b)

**EK 7. 4.5 MPa yük altındaki basınç grafiği a) von-Mises gerilme – gerinim değerleri, b) yer değiştirme değerleri (mm)**

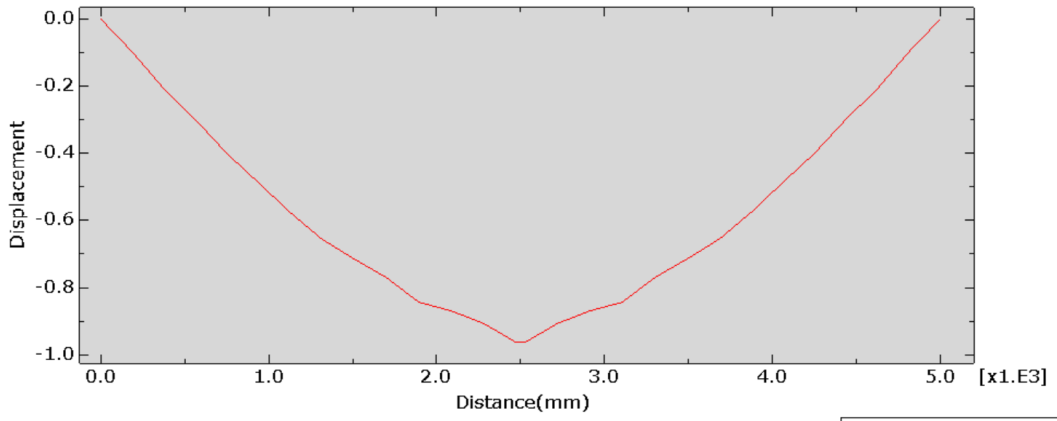


**EK 8. 4.5 MPa yük altındaki ve sıcaklık 15 derece, basınç grafiği a) von-Mises gerilme – gerinim değerleri, b) yer değiştirme değerleri (mm)**



- EE:Max Principal PI: Part-1 truck-1 E: 2050 IP: 1\_1
- EE:Max Principal PI: Part-1 truck-1 E: 3000 IP: 1\_1
- S:Mises PI: Part-1 truck-1 E: 2050 IP: 1\_1
- S:Mises PI: Part-1 truck-1 E: 3000 IP: 1\_1

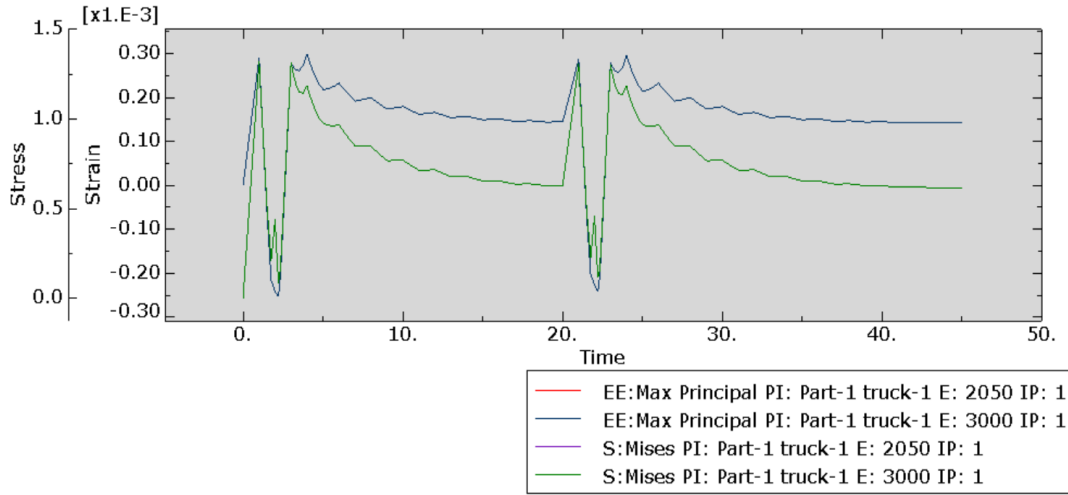
**(a)**



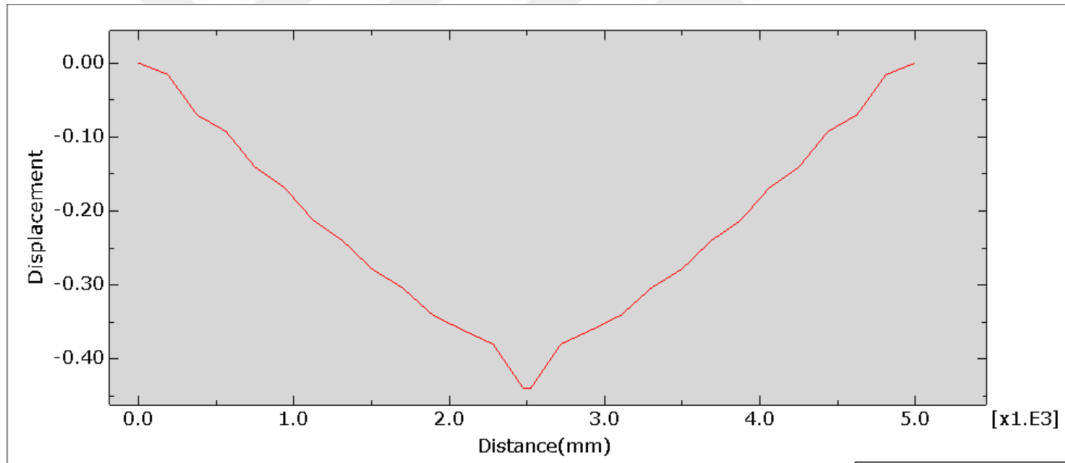
- U, U2: True Dist.

**(b)**

**EK 9. 4.5 MPa yük altındaki ve sıcaklık 30 derece, basınç grafiği a) von-Mises gerilme – gerinim değerleri, b) yer değiştirme değerleri (mm)**



(a)



(b)

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı ve Soyadı : Hamza FAKROUJI

### Eğitim

Yüksek Lisans Çankırı Karatekin Üniversitesi 2024  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Lisans V. Mohammed Üniversitesi 2020  
Mühendislik Fakültesi  
İnşaat Mühendisliği Bölümü