



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KIZLAR (EYYÜBİ) CAMİ ANIT ESERİNİN TAŞIMA YOLU
GÜZERGÂHI ESNEK ÜST YAPISI ÖRNEĞİNDE SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİNİ KULLANARAK İNCELEME VE
UYGULAMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğba ELVAN

DANIŞMAN

Doç. Dr. Hümevra BOLAKAR TOSUN

AKSARAY, 2024

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 222303707 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Tuğba ELVAN tarafından hazırlanan “**KIZLAR (EYYUBİ) CAMİ ANIT ESERİNİN TAŞIMA YOLU GÜZERGÂHI ESNEK ÜSTYAPISI ÖRNEĞİNDE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİ KULLANARAK İNCELEME VE UYGULAMALARI**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ/OY ÇOKLUĞU ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Hümeysra BOLAKAR TOSUN

AKSARAY ÜNİVERSİTESİ

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Üye: Doç. Dr. Can ERENSON

AKSARAY ÜNİVERSİTESİ

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Üye: Prof. Dr. Ahmet TORTUM

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Tez Savunma Tarihi: 27/06/2024

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Mehmet Ali HINIS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptaması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Tuğba ELVAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca tecrübesini, desteğini ve gerekli olan tüm yönlendirmeleri yaparak çalışmamda yardımcı olan tez danışmanım Sn. Doç. Dr. Hümeysra BOLAKAR TOSUN' a,

Tez çalışmamın gerekli verilerini temin ettiğim ve severek çalıştığım Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğüne ve iş arkadaşlarıma, tez çalışmamın her aşamasında emeği geçen değerli meslektaşım Soyhan BAL' a, bu günlere gelmemde emeği olan bütün hocalarıma ve hayatımın her döneminde sabırla, sevgiyle bana destek olan çok sevdiğim aileme teşekkürlerimi sunarım.

Tuğba ELVAN

AKSARAY, 2024

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	2
2.1. Esnek Üstyapı Tasarımı.....	2
2.2. Esnek Yol Üstyapı Tabakaları ve Özellikleri.....	3
2.2.1.Taban zemini.....	4
2.2.2.Alt temel.....	4
2.2.3.Temel.....	4
2.2.3.1.Plent-Miks temel.....	4
2.2.4.Kaplama tabakası	5
2.2.4.1. Sathi kaplamalar.....	5
2.2.4.1.1. Sathi kaplamanın performansını etkileyen faktörler.....	5
2.2.4.1.2. Sathi kaplama tipleri	6
2.2.4.1.3. Sathi kaplamalı üstyapılardaki yüzey bozuklukları.....	6
2.2.4.1.3.1. Timsah sırtı çatlakların derecelendirilmesi ve onarımı	6
2.2.4.1.3.2. Kenar çatlakların derecelendirilmesi ve onarımı.....	7
2.2.4.1.3.3. Enine çatlakların derecelendirilmesi ve onarımı	8
2.2.4.1.3.4. Boyuna çatlakların derecelendirilmesi ve onarımı.....	9
2.2.4.1.3.5. Tekerlek izinde oturmaların derecelendirilmesi ve onarımı.....	10
2.2.4.1.3.6. Ondülasyon ve ötelenmelerin derecelendirilmesi ve onarımı	11
2.2.4.1.3.7. Lokal oturmaların ve kabarmaların derecelendirilmesi ve onarımı.....	13
2.2.4.1.3.8. Çukurların derecelendirilmesi ve onarımı	15
2.2.4.1.3.9. Kaplama agregası kaybının derecelendirilmesi ve onarımı	16
2.2.4.1.3.10. Çizgisel agrega kaybının derecelendirilmesi ve onarımı	18
2.2.4.1.3.11. Asfalt kusmasının derecelendirilmesi ve onarımı	20
2.3. Yol Malzemelerinin Taşıma Gücü	22
2.3.1. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR).....	22
2.3.2. Esneklik Modülü (Resilient Modülü, Mr)	23
2.4. Mekanistik Analizi Çalışmaları.....	24
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	25
3.1. Proje Verileri	25
3.1.1. Esnek yol üstyapısı güzergahı	25
3.1.2. Yol üstyapısı yeri ve ulaşımı.....	26
3.1.3. Yolun jeolojisi.....	28
3.1.4. Depremsellik	30
3.1.5. Afet durumu	32
3.1.6. Yolun geometrik özellikleri	32
3.1.7. Arazide yapılan deneyler.....	33
3.1.7.1. Kaliforniya taşıma oranı (CBR).....	33
3.1.7.2. Standart proktor deneyi.....	35
3.1.8. Esnek yol üstyapısında kullanılan malzeme parametreleri	38

3.1.9. SPMT (Kendinden Tahrikli Modül Taşıyıcı).....	38
3.2. Sonlu Elemanlar Modellemesi	42
3.2.1. Geometrik model.....	42
3.2.2. Eleman tipi ve malzeme özellikleri.....	43
3.2.3. Sonlu elemanlara ayırma (Meshing)	48
3.2.4. Tabakaların ara yüz temalarının modellenmesi.....	48
3.2.5. Mesnetleme ve yükleme.....	49
3.2.6. Tekerleklerle gelen yüklerin modele tanıtılması.....	49
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	53
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ.....	67



YÜKSEK LİSANS TEZİ

KIZLAR (EYYUBİ) CAMİ ANIT ESERİNİN TAŞIMA YOLU GÜZERGÂHI ESNEK ÜSTYAPISI ÖRNEĞİNDE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİ KULLANARAK İNCELEME VE UYGULAMALARI

Tuğba ELVAN

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hümeysra BOLAKAR TOSUN

ÖZET

Yol üstyapısı esnek ve rijit kaplamalı üstyapılar olmak üzere iki türden oluşmaktadır. Bu çalışmada incelediğimiz yol kesiti, Kızlar (Eyyubi) Cami anıt eserinin taşıma yolu güzergâhında ki esnek bir üstyapı sınıfıdır. İncelediğimiz esnek yol üstyapısı kesitini oluşturan tabakalar; çift sathli kaplama, plent-miks temel, alt temel ve doğal zeminden oluşmaktadır. Esnek üstyapıyı oluşturan tabakaların davranışlarını doğru yorumlayabilmek için arazi sahasında elde ettiğimiz malzeme numuneleri ile yapılan deneylerle malzeme karakteristik parametreleri tayini yapıldı ve sonlu elemanlar yöntemi metodu kullanılarak bilgisayar analiz programı yardımıyla esnek yol üst yapı model tanımlaması ve analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. İncelediğimiz esnek üstyapı yol kesitinde 2349 ton (SPMT dâhil) ağırlığındaki Kızlar (Eyyubi) Cami Anıt Eserinin “Kendinden Tahrikli Motorlu Taşıyıcı (SPMT)” ile taşınırken, esnek üstyapıyı oluşturan tabakaların davranışlarını görüp değerlendirmek amacıyla yapılan analiz sonucunda bulunan gerilme şekil değiştirme ilişkileri, şekil değiştirmelere bağlı hasarların olup olmadığının tespiti ve esnek üstyapıyı oluşturan tabakaların Karayolları Teknik Şartnamesine uygun olup olmadığının tespiti 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturularak bilgisayar programı ile gerçekleştirilmiştir.

Analiz sonuçlarına bağlı olarak esnek üstyapı tabakalarını karakterize eden boyutlar ve mevcut malzeme parametreleri ile 2349 ton (SPMT dâhil) ağırlığındaki Kızlar (Eyyubi) Cami Anıt Eserinin “Kendinden Tahrikli Motorlu Taşıyıcı (SPMT)” ile taşınmasıyla esnek üstyapı yol kesitindeki herhangi bir tabakada önemli derecede ciddi bir hasar görülmediği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Esnek yol üst yapısı, arazi deneyleri, sonlu elemanlar metodu, gerilme şekil değiştirme ilişkileri.

Haziran, 2024; 67 sayfa

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION AND APPLICATIONS OF THE KIZLAR (EYYUBİ) MOSQUE MONUMENT USING THE FINITE ELEMENT METHOD IN THE EXAMPLE OF THE FLEXIBLE ROAD PAVEMENT ON THE CARRIAGE ROUTE

Tuğba ELVAN

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Hümeýra BOLAKAR TOSUN

ABSTRACT

Road pavement consists of two types: flexible and rigid paved structures. The road section that we examine in this study is a flexible pavement class on the transportation route of the Kızlar (Eyyubi) Mosque monument. The layers that make up the flexible road pavement section we examined are; It consists of double chip seal, plantmix foundation, subbase and natural ground. In order to correctly interpret the behavior of the layers forming the flexible pavement, material characteristic parameters were determined through experiments conducted with material samples obtained in the field and flexible road structure model definition and analysis were carried out with the help of a computer analysis program using the finite element method. In the flexible pavement road section we examined, while the Kızlar (Eyyubi) Mosque Monument, weighing 2349 tons (including SPMT), was being transported with the "Self-Propelled Modular Transporter (SPMT)", stress-strain relationships found as a result of the analysis carried out to see and evaluate the behavior of the layers forming the flexible pavement and whether there was any damage due to deformations and determination of whether the layers forming the flexible pavement comply with the Highways Technical Specification was carried out using a computer program by creating a 3D finite element model.

Based on the analysis results, the dimensions and existing material parameters characterizing the flexible pavement layers, and the transportation of the Kızlar (Eyyubi) Mosque Monument, weighing 2349 tons (including SPMT), with the "Self-Propelled Modular Transporter (SPMT)", it was concluded that there was no significant damage to the flexible road pavement layers according to the Highways Technical Specification.

Keywords: Flexible road pavement, field tests, finite element method, stress-strain relations.

June, 2024; 67 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Yol üstyapısını oluşturan tabakalar ve tabakaların çeşitleri.	3
Şekil 2.2. Esnek yol üstyapı en kesiti.	4
Şekil 2.3. Sathi kaplama performansına etkidiği düşünülen parametreler.....	6
Şekil 2.4. Hafif şiddette	14
Şekil 2.5. Orta şiddette.....	14
Şekil 2.6. Yüksek şiddette.....	14
Şekil 2.7. Hafif şiddette soyulma/sökülme	17
Şekil 2.8. Orta şiddette soyulma/sökülme	17
Şekil 2.9. Yüksek şiddette soyulma/sökülme	17
Şekil 2.10. Hafif şiddette	19
Şekil 2.11. Orta şiddette.....	19
Şekil 2.12. Yüksek şiddette.....	19
Şekil 2.13. Hafif şiddette kuma	21
Şekil 2.14. Orta şiddette kuma	21
Şekil 2.15. Yüksek şiddette kuma	21
Şekil 2.16. CBR deneyi.....	22
Şekil 2.17. CBR cihazı.....	23
Şekil 2.18. Esneklik modülü deneyi	24
Şekil 3.1. Taşıma yolu güzergahı.....	26
Şekil 3.2. İnceleme alanının Türkiye’deki yeri ve krokisi	27
Şekil 3.3. Güzergaha ait depremsellik haritası.....	31
Şekil 3.4. Güzergahın yakın çevresinde 1900 yılı ve sonrasına ait, aletsel büyüklüğü 2’den büyük olan depremlerin odak noktaları.....	32
Şekil 3.5. Güzergâh tip kesiti.....	33
Şekil 3.6. Arazi CBR aleti ekipmanı.....	34
Şekil 3.7. Yol tabakaları.....	34
Şekil 3.8. CBR kullanılarak yapılan hesaplamalar.	35
Şekil 3.9. Proktor deneyinde kullanılan kalıplar.....	36
Şekil 3.10. Otomatik proktor cihazı.....	37
Şekil 3.11. SPMT teker ve aks arası mesafeler.....	39
Şekil 3.12. SPMT konfigürasyonu.....	39
Şekil 3.13. SPMT konfigürasyonu + taşınacak yapı (plan).	40
Şekil 3.14. SPMT konfigürasyonu + taşınacak yapı (cepheler).	40
Şekil 3.15. SPTM modül taşıyıcı.	40
Şekil 3.16. Yapı + SPTM modül taşıyıcı.	41
Şekil 3.17. Esnek üstyapı karakteristik malzeme tabakaları.....	43
Şekil 3.18. Esnek üstyapı tabakalarının boyutları.....	43
Şekil 3.19. SOLİD185 katı geometrisi.....	44
Şekil 3.20. TARGE170 katı geometrisi	44
Şekil 3.21. CONTA174 katı geometrisi.....	45
Şekil 3.22. Kontak mekanizmasının özellikleri-1.....	46
Şekil 3.23. Kontak mekanizmasının özellikleri-2.....	46
Şekil 3.24. Kontak mekanizmasının özellikleri-3.....	47
Şekil 3.25. Kontak parametre değerleri ve özellikleri	47
Şekil 3.26. Model meshi.	48

Şekil 3.27. Esnek üstyapı modelinin sınır koşulları.....	49
Şekil 3.28. Tekerleklerle gelen yüklerin modele tanıtılması.	50
Şekil 3.29. Esnek üstyapı tabakalarında yükleme sonucu meydana gelen davranışlar	50
Şekil 3.30. Kızlar (Eyyubi) Camii eski konumu.....	51
Şekil 3.31. Kızlar (Eyyubi) Camii güney duvarları.	51
Şekil 3.32. Kızlar (Eyyubi) Camii taşıma görüntüleri.	51
Şekil 3.33. Kızlar (Eyyubi) Camii taşıma görüntüleri.	52
Şekil 3.34. Kızlar (Eyyubi) Camii taşıma görüntüleri.	52
Şekil 3.35. Kızlar (Eyyubi) Camii taşıma görüntüleri.	52
Şekil 4.1. Esnek üstyapı tip kesiti.	53
Şekil 4.2. Yol kesitinde meydana gelen gerilme ve şekil değiştirmeler	55
Şekil 4.3. (Z) yönündeki deformasyonlar	56
Şekil 4.4. (Z) yönündeki gerilmeler.	57
Şekil 4.5. (Z) yönündeki şekil değiştirmeler.....	57
Şekil 4.6. X-Z doğrultusunda boyuna Z yönünde düşey deformasyonlar.	58
Şekil 4.7. X-Z doğrultusunda boyuna Z yönünde düşey gerilme.	58
Şekil 4.8. X-Z doğrultusunda birim şekil değiştirme.....	59
Şekil 4.9. Y-Z doğrultusunda Z yönünde deformasyonlar.	59
Şekil 4.10. Y-Z doğrultusunda Z yönünde gerilmeler.	60
Şekil 4.11. Y-Z doğrultusunda Z yönünde birim şekil değiştirme.	60
Şekil 4.12. X-Y doğrultusunda X yönünde deformasyonlar (boyuna deformasyonlar)	61
Şekil 4.13. X-Y doğrultusunda Y yönünde deformasyonlar (enine deformasyonlar)	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Plent-Miks temel tabakası gradasyon limitleri.	5
Çizelge 2.2. Timsah sırtı çatlakların derecelendirilmesi ve onarımı.	7
Çizelge 2.3. Kenar çatlakların derecelendirilmesi ve onarımı.	8
Çizelge 2.4. Enine çatlakların derecelendirilmesi ve onarımı.	9
Çizelge 2.5. Boyuna çatlakların derecelendirilmesi ve onarımı.	10
Çizelge 2.6. Tekerlek izinde oturmaların derecelendirilmesi ve onarımı.	11
Çizelge 2.7. Ondülasyon ve ötelenmelerin derecelendirilmesi ve onarımı.	12
Çizelge 2.8. Lokal oturmaların ve kabarmaların derecelendirilmesi ve onarımı.	13
Çizelge 2.9. Çukurların derecelendirilmesi ve onarımı	15
Çizelge 2.10. Kaplama agregası kaybının derecelendirilmesi ve onarımı.	16
Çizelge 2.11. Çizgisel agrega kaybının derecelendirilmesi ve onarımı.	18
Çizelge 2.12. Asfalt kusmasının derecelendirilmesi ve onarımı.	20
Çizelge 3.1. Meteorolojik bilgiler.	28
Çizelge 3.2. Deprem bölgeleri için alınabilecek maksimum yatay yer ivmesi.	31
Çizelge 3.3. Taşıma yolları boyunca uygulanacak geometrik standartlar.	33
Çizelge 3.4. Toprağın maksimum dane boyutuna göre kullanılan metotlar.	36
Çizelge 3.5. Kaplamanın malzeme özellikleri.	38
Çizelge 3.6. SPMT taşıyıcı lastik özellikleri.	39

SİMGELER VE KISALTMALAR

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerika Devlet Yolu ve Ulaştırma Görevlileri Derneği)
AB	Asfalt Betonu
ANSYS	Swanson Analysis Systems
CAD	Computer Aided Design
CBR	California Bearing Ratio (Kaliforniya Taşıma Oranı)
DES	Düşey Elektrik Sondaj
DSİ	Devlet Su İşleri
GPR	Ground Penetrating Radar (Yeraltı Radarı)
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
LL	Likit Limit
Mr	Resilient Modülüs
PI	Plastisite İndisi
PL	Plastik Limit
PMT	Plent-Miks Temel
PPU	Power Pack Unit
PU	Power Unit
Qal	Kuvaterner Yaşlı Alüvyon
Qym	Kuvaterner Yaşlı Yamaç Molozu
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
SPMT	Self Propelled Modular Transporter (Kendinden Tahrikli Modül Taşıyıcı)
Tşm	Şelmo Formasyonu
W_{opt}	Optimum Su Muhtevası
2D	2 Boyutlu
3D	3 Boyutlu
A₀	Etkin Yer İvme Katsayısı
C°	Santigrad Derece
cm	Santimetre
cm³	Santimetreküp
E	Elastisite Modülü
g	Yatay Yer İvmesi
kN	Kilonewton
kg	Kilogram
m	Metre
mm	Milimetre
m²	Metrekare
m³	Metreküp
MPa	Megapascal
n	Poisson Oranı
N	Newton
Pa	Pascal
Psi	Pounds Per Square Inch
t	Ton
W	Su Muhtevası
Δ	Deformasyon
σ	Gerilme
ε	Değiştirme

ϵ_z	Z Yönünde Şekil Değişirme
Δz	Z Yönünde Deformasyon
σ_z	Z Yönünde Gerilme
γ	Birim Hacim Ağırlığı
$>$	Büyük
$<$	Küçük
$\geq$	Büyük Eşit
$\%$	Yüzde



1. GİRİŞ

Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından inşa edilen Ilısu Barajı ve HES projesi sebebiyle Batman ilinin 35 km güneydoğusunda bulunan Hasankeyf ilçesindeki tarihi ve kültürel varlıkların yeni yerine taşınma işlemleri, kalkınma-kültürel mirasın korunması dengesinin gözetilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu tez de; Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Barajlar ve HES Dairesi-Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü (2017), Anıt Eserler Taşıma Yolu Güzergahı Projesel Verileri göz önünde bulundurularak Kızlar (Eyyubi) Caminin Koruma ve Taşıma çalışmaları, 2349 ton (SPMT dâhil) ağırlığındaki Kızlar (Eyyubi) Cami Anıt Eserinin “Kendinden Tahrikli Motorlu Taşıyıcı (SPMT)” ile taşınırken, Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirilme Rehberliği (2008) doğrultusunda, esnek üstyapıyı oluşturan tabakalarda meydana gelen analiz sonucu gerilme şekil değiştirme ilişkileri, şekil değiştirmelere bağlı hasarların olup olmadığının tespiti yapılmıştır. Esnek üstyapı modelinin analizinin yapılacağı Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanan ANSYS bilgisayar programı ile 3 Boyutlu modelleme, çözümler ve çıkarımlar yapılmıştır. Analiz sonuçlarına bağlı olarak esnek üstyapı yol tabakalarında gerçekleşecek gerilme ve şekil değiştirme davranışlarını görmek, değerlendirmek ve eğer esnek üstyapı tabakalarında bir hasar oluşacaksa da nicelik ve niteliğini tespit edebilmek bu tezde amaçlanmıştır.

Esnek üstyapılarda, tabakalı bir yapıya sahip olan yol üstyapısının yükler karşısında oluşturacağı gerilmelerin tespiti için laboratuvar koşullarında, uzun uğraşlar sonucunda malzeme karakteristik parametre değerleri elde edilmektedir. Esnek yol üstyapısına ait tabakalarda meydana gelen gerilme ve şekil değiştirme analizlerinin tahmininde birçok bilgisayar programı kullanılmaktadır. Bu tezde sonlu elemanlar programı olan ANSYS v16.0 bilgisayar programı kullanılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu çalışmada kaynak özeti farklı açılardan ele alınmıştır. Kaynak özeti sırasıyla aşağıdaki başlıklar altında incelenmiştir.

- “Esnek Üstyapı Tasarımı” başlığı altında genel olarak genel olarak esnek üstyapı tabakalarını etkileyen faktörlerden bahsedilmiştir.
- Esnek yol üstyapısı tabakaları ve özellikleri başlığı altında tabakaların özellikleri, sathi kaplama ve çeşitleri özetlenmiştir.
- Üçüncü kısımda yol malzemelerinde taşıma gücünün etkisinden bahseden kaynak özetlerine yer verilmiştir.
- Dördüncü kısımda mekanistik analizi çalışmaları başlığı altında esnek üstyapı tasarım analizinin sonlu elemanlar metodu uygulaması ile ilgili bilgilere yer verilmiştir.

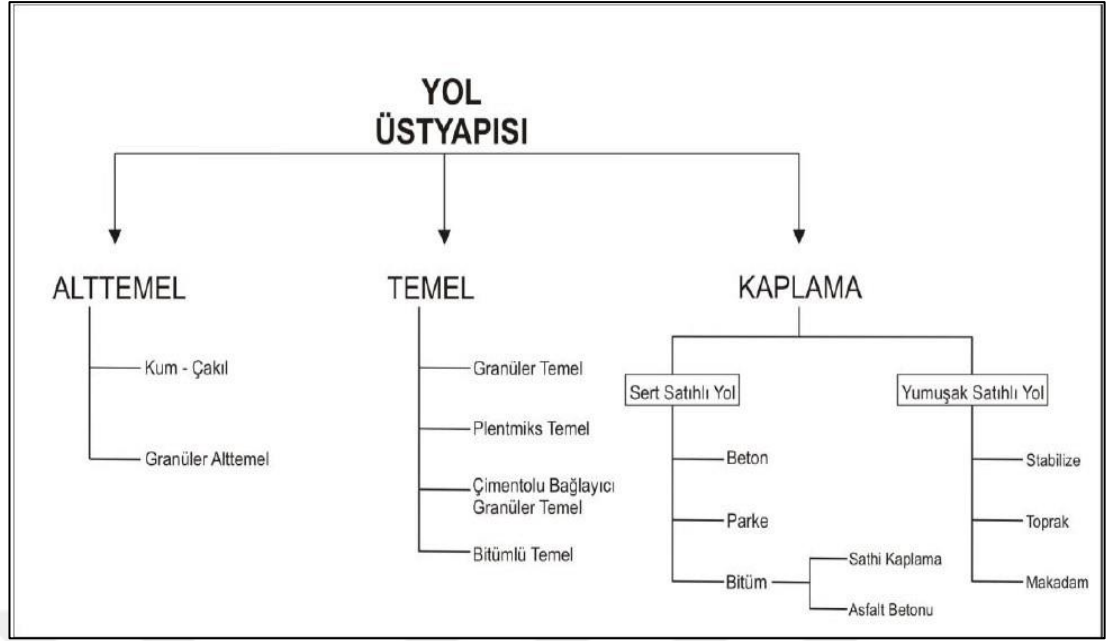
2.1. Esnek Üstyapı Tasarımı

Esnek üstyapının üzerinden her bir yük geçişi ile yol tabakalarında şekil değiştirmeler ve gerilmelerde değişiklikler meydana gelir. Esnek üstyapı yol tabakaları için dikkate alınması gereken önemli faktörlerden biri de düşey deformasyondur.

Esnek üstyapı konusunda araştırma yapan akademisyenlere göre üstyapının bozulmasını etkileyen başlıca faktörler, trafik yükleri, esnek üstyapıyı oluşturan yol tabakalarını karakterize eden malzeme karakteristik parametreleri (yol inceleme sahasında yapılan arazi deneyleri), yapım teknikleri, iklim koşulları, drenaj ve nemdir. (Huang, 2004).

Karayolları ağır taşıt trafiği ve dingil yükleri yol üstyapısında kalıcı deformasyonlara sebebiyet verebilmektedir (Coşgun, 1994).

Yol üstyapısını oluşturan tabakalar ve bu tabakaların çeşitleri Şekil 2.1’ de yer almaktadır (Croney ve Croney 1998).

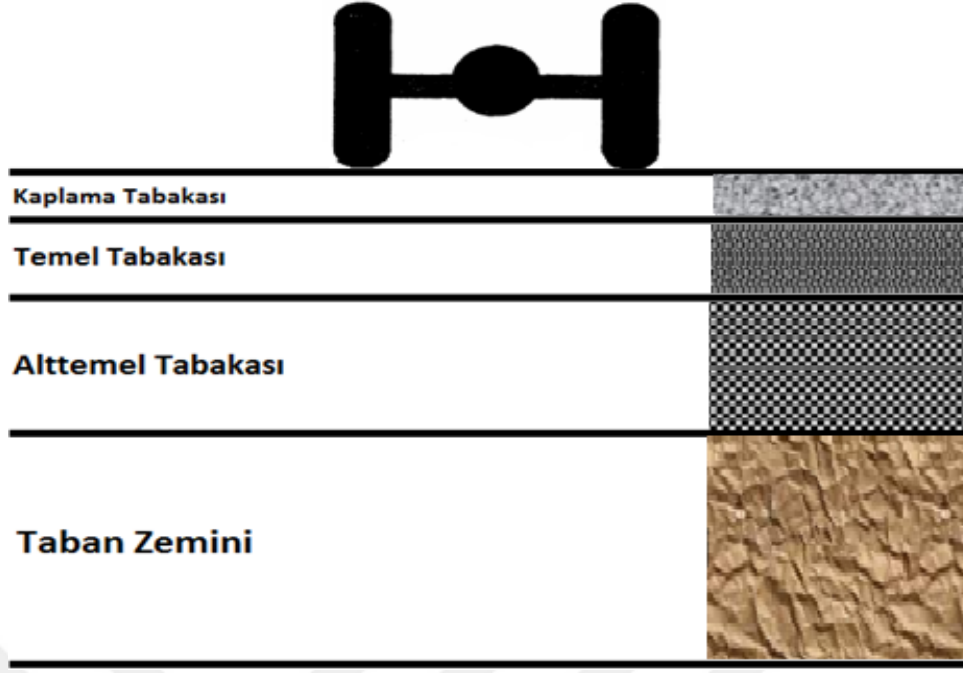


Şekil 2.1. Yol üstyapısını oluşturan tabakalar ve tabakaların çeşitleri.

2.2. Esnek Yol Üstyapı Tabakaları ve Özellikleri

Yol gövdesi altyapı ve üstyapı olmak üzere iki bölümden oluşur. Altyapı yarma ve dolgulardan oluşan bir yapıdır. Üstyapı ise trafik yüklerini altyapıya (taban zeminine) dağıtan tabakalı (kaplama, temel ve alt temel tabakaları) bir yapıdır.

Üstyapının proje ömrü, tabaka tipleri ve kalınlıkları belirlenirken; minimum tabaka kalınlıkları, bölgesel kaynaklar ve diğer ekonomik faktörler göz önünde tutulmalıdır (KGM, 2008). Esnek yol üstyapısına ait bir en kesit Şekil 2.2’ de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Esnek yol üstyapı en kesiti.

2.2.1.Taban zemini

Bir esnek üstyapının davranışı taban zemininin taşıma gücü ile doğru orantılıdır. Bu sebeple taban zemini doğrudan üstyapıyı etkilediği için taban zemini şartnamelere uygun bir şekilde hazırlanmalıdır (Umar ve Ağar 1985).

2.2.2.Alt temel

Alt temel tabakası, ekonomik etkiler göz önünde bulundurularak, bölgede bulunan ve şartname kriterlerine uygun kum-çakıl veya teras malzemesi ile teşkil edilmelidir. Uygun kum-çakıl malzeme yoksa kırmataş alt temel kullanılmalıdır. Kum-çakıl alt temel tabakasının minimum kalınlığı ise 15 cm olmalıdır (KGM, 2008).

2.2.3.Temel

Temel tabakası, üstyapının ana yapısal faktörlerinden biri olup, alt temel ve tabana gelen basınç gerilmelerini kabul edilebilir mertebeye düşürmek ve belirli bir esneklik sağlayarak kaplamanın kırılmasını önlemek gibi görevleri vardır (KGM, 2008).

2.2.3.1.Plent-Miks temel

PMT tabakası kırılmış çakıl, cüruf, kırma taş ve ince malzeme kullanılarak Çizelge 2.1’ de verilen gradasyon limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde kaba

ve ince olmak üzere en az üç ayrı tane boyutu grubunun uygun oranda su ile bir plentte karıştırılmasıyla hazırlanan malzemenin şartnamede belirtilen şekilde hazırlanmış yüzey üzerine projesinde belirtilen plan, profil ve enkesitlere uygun olarak bir ya da birden fazla tabakalar halinde serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır (KGM, 2013).

Çizelge 2.1. Plent-Miks temel tabakası gradasyon limitleri.

Elek Açıklığı		% Geçen	
mm	in	Tip - I	Tip - II
37,5	1 ½	100	
25	1	72 - 100	100
19	¾	60 - 92	80 - 100
9,5	3/8	40 - 75	50 - 82
4,75	No.4	30 - 60	35 - 65
2,00	No.10	20 - 45	23 - 50
0,425	No.40	8 - 25	12 - 30
0,075	No.200	0 -10	2 - 12

2.2.4.Kaplama tabakası

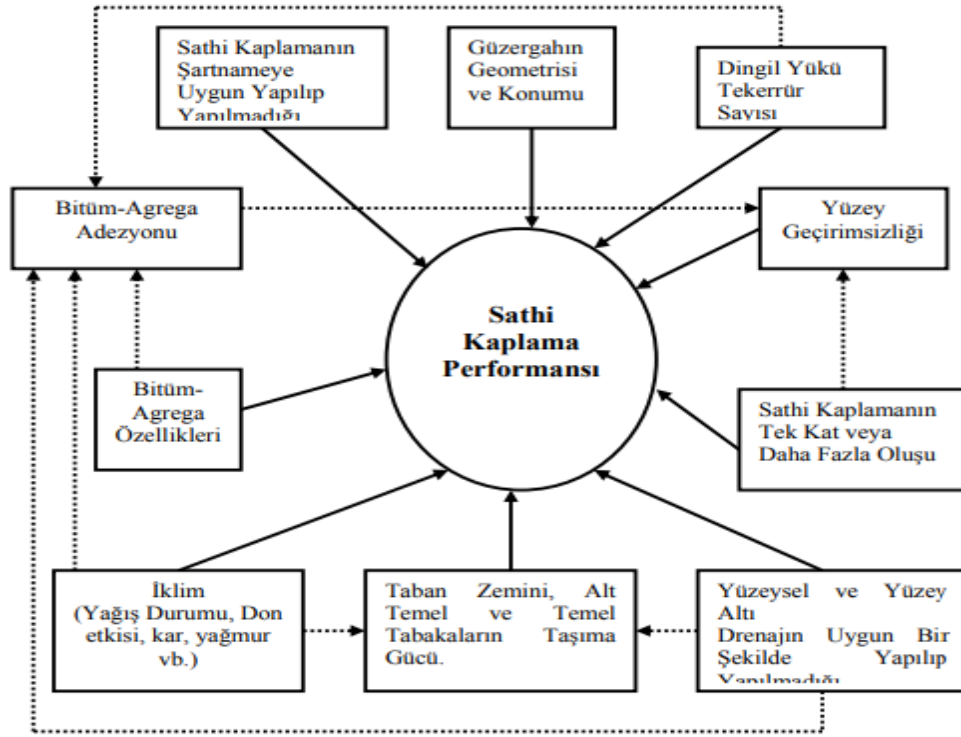
Kaplama tabakası üstyapının trafik yüklerine doğrudan maruz kalan en üst tabakasıdır. Trafik yükleri sebebiyle, oluşan basınç ve çekme gerilmelerinin en yüksek seviyede olması sebebiyle kaplama tabakası, üstyapının diğer tabakalarına göre daha yüksek bir elastisite modülüne sahip olmalıdır (KGM, 2008).

2.2.4.1. Sathi kaplamalar

Sathi kaplama, yolun kabul edilen hizmet süresi boyunca geçecek, tek yönde toplam standart dingil (8.2 ton) sayısı 2x106 dan az olan yollarda uygulanmalıdır. Toplam standart dingil sayısı 500.000’den küçük ise tek kat, bunun üstündeki trafik değerleri için çift kat sathi kaplama yapılmalıdır (KGM, 2008).

2.2.4.1.1. Sathi kaplamanın performansını etkileyen faktörler

Sathi kaplama performansını etkileyen unsurlar literatürde oldukça fazladır. Ülkemizde sathi kaplamaların performansına doğrudan veya dolaylı olarak etki ettiği düşünülen faktörler Şekil 2.3’ de gösterilmiştir. Sathi kaplama performansına etki eden bazı faktörler aşağıda ifade edilmektedir.



Şekil 2.3. Sathi kaplama performansına etki ettiği düşünülen parametreler (Karaşahin ve Gürer, 2007).

2.2.4.1.2. Sathi kaplama tipleri

Sathi kaplama tipleri, tek katlı sathi kaplama, çok katlı sathi kaplama, gömme ve sandviç tipi sathi kaplama ve koruyucu tabaka ve iyileştirme amaçlı sathi kaplama olmak üzere dört gruptan oluşur (Sarioğlu, 2019).

2.2.4.1.3. Sathi kaplamalı üstyapılardaki yüzey bozuklukları

Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberinde, sathi kaplamalı esnek üstyapılardaki yüzey bozuklukları olarak timsah sırtı çatlakları, kenar çatlakları, enine çatlaklar, boyuna çatlaklar, ondülasyonlar ve ötelemeleri, lokal oturmalar ve kabarmalar, çukurlar, tekerlek izi oturmaları vs. derecelendirilmeleri yer almaktadır (KGM, 2008).

2.2.4.1.3.1. Timsah sırtı çatlakların derecelendirilmesi ve onarımı

Timsah sırtı çatlakların derecelendirilmesi, bozuklukların tanımı ve onarımına dair özellikler Çizelge 2.2' de ifade edilmiştir.

Çizelge 2.2. Timsah sırtı çatlakların derecelendirilmesi ve onarımı (KGM, 2008).

BOZULMA ŞİDDETİ	BOZULMANIN YOĞUNLUĞU	BOZUKLUĞUN TANIMI	BOZULMA ŞİDDETİ	ALAN ORANI (%) (50 m platformda)	ONARIM ÇALIŞMASI
0	0	YOK	YOK	YOK	YOK
0	1	Timsah sırtı deseni	Hafif	0-4 %	Bozuklukların gelişimi sürekli gözlenmelidir.
0	2	yeni yeni oluşmaya başlamış, desen		4-10 %	
0	3	oluşumu az sayıda		10-30 %	
0	4	çatlaklarla meydana gelmiştir. Çatlaklar		30-60 %	
0	5	kılcal seviyededir.		>60 %	
1	1	Timsah sırtı oluşumu iyice belirginleşmiş, poligon köşelerindeki kopmalar gözlenebilmektedir.	Orta	0-4 %	Kaplama kalınlığına bağlı olarak çatlaklı bölge düzgün bir şekilde kesilip atılmalı ve sıcak veya soğuk karışım malzemesi ile yamanmalıdır veya lokal sathi kaplama yapılmalıdır. Çatlaklı yüzey sathi kaplama ile kaplanmalıdır.
1	2			4-10 %	
1	3			10-30 %	
1	4			30-60 %	
1	5			>60 %	
2	1	Poligon blokları kopmaya başlamıştır. Bazı oyuklar ve lokal oturmalar oluşmuş, kopmalar ile seviyelere ulaşmıştır.	Yüksek	0-4 %	Çatlaklı bölge düzgün bir şekilde kesilip atılmalı ve sıcak veya soğuk karışım malzemesi ile yamanmalıdır. 1-Sathi kaplama yenilenmelidir. 2-Bozuk kesimler kazılmalı gerekirse temel onarımı ve/veya temel takviyesi ile sathi kaplama yapılmalıdır. 3-Temel takviyesi yapıldıktan sonra sathi kaplama yenilenmelidir.
2	2			4-10 %	
2	3			10-30 %	
2	4			30-60 %	
2	5			>60 %	

2.2.4.1.3.2. Kenar çatlakların derecelendirilmesi ve onarımı

Kenar çatlakların derecelendirilmesi, bozuklukların tanımı ve onarımına dair veriler Çizelge 2.3’ de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Kenar çatlakların derecelendirilmesi ve onarımı (KGM, 2008).

BOZULMA ŞİDDETİ	BOZULMANIN YOĞUNLUĞU	BOZUKLUĞUN TANIMI	BOZULMA ŞİDDETİ	ALAN ORANI (%) (50 m platformda)	ONARIM ÇALIŞMASI
0	0	YOK	YOK	YOK	YOK
0	1	Çatlaklar kaplama kenarına paralel olup bir veya birden çok olabilir. Çatlaklar kaplama kenarından 300 mm içeriye yayılmış olabilir.	Hafif	0-4 %	Bozuklukların gelişimi sürekli gözlenmelidir.
0	2			4-10 %	
0	3			10-30 %	
0	4			30-60 %	
0	5			>60 %	
1	1	Çatlaklar dış tekerlek izine kadar ilerlemiştir. Çatlaklar birbirinden bağımsız boyuna çatlaklar şeklinde olabileceği gibi bazen de dalga veya timsah sırtı çatlak başlangıcı şeklinde olabilir.	Orta	0-4 %	Çatlaklı bölge düzgün şekilde kesilip atıldıktan sonra uygun bir karışımla yamanmalıdır
1	2			4-10 %	
1	3			10-30 %	
1	4			30-60 %	
1	5			>60 %	
2	1	Dalga şeklinde çatlaklar görülmeye başlanmış olup bunlar timsah sırtı desenine yaklaşmış ve kenardan 900 mm'den daha içeri ilerlemiştir. Çatlak timsah sırtı çatlak şekline dönüşmüş ve dış tekerlek izini aşarak eksene yaklaşmıştır. (Eğer çatlaklar timsah sırtı desenine dönmüş ise timsah sırtı olarak değerlendirilecektir.)	Yüksek	0-4 %	Çatlaklı bölge düzgün bir şekilde kesilmeli ve uygun bir karışımla yama yapılmalıdır. Buna ilaveten banket drenajı gerekli bakımla iyileştirilmelidir.
2	2			4-10 %	
2	3			10-30 %	
2	4			30-60 %	
2	5			>60 %	
					1-Sathi kaplama yenilenmelidir. 2-Bozuk kesimler kazılmalı gerekirse temel yapıldıktan sonra sathi kaplama yenilenmelidir. Drenaj sistemleri gözden geçirilmelidir.

2.2.4.1.3.3. Enine çatlakların derecelendirilmesi ve onarımı

Enine çatlakların derecelendirilmesi, bozuklukların tanımı ve onarımına dair veriler Çizelge 2.4’ de yer almıştır.

Çizelge 2.4. Enine çatlakların derecelendirilmesi ve onarımı (KGM, 2008).

BOZULMA ŞİDDETİ	BOZULMANIN YOĞUNLUĞU	BOZUKLUĞUN TANIMI	BOZULMA ŞİDDETİ	ALAN ORANI (%) (50 m platformda)	ONARIM ÇALIŞMASI
0	0	YOK	YOK	YOK	YOK
0	1	Çatlaklar 6 mm'den incedir ve ayrılmamıştır. Çatlaklar kaplama genişliği boyunca değişken uzunluktadır.	Hafif	> 35m	Bozuklukların gelişimi sürekli gözlemlenmelidir.
0	2			25 – 35 m	
0	3			10 – 25 m	
0	4			5 - 10 m	
0	5			< 5 m	
1	1	Çatlaklar 6 ile 15 mm arası genişliğe ulaşmıştır. Çatlak boyunca hafif kopmalar oluşmuş ve kılcal çatlaklar meydana gelmiştir.	Orta	> 35m	Çatlaklar, gerekirse genişletilerek uygun bir dolgu malzemesi ile doldurulmalıdır.
1	2			25 – 35 m	
1	3			10 – 25 m	
1	4			5 - 10 m	
1	5			< 5 m	Sathi kaplama yenilenmelidir.
2	1	Tek veya birden fazla çatlaklar ayrılmaya devam edip 15 mm'den fazla açıklığa ulaşmıştır. Bazı kopma ve bozulmalar oluşmuştur. Çatlakların yanı sıra diğer bozuklukların varlığı bu mertebenin göstergesidir.	Yüksek	> 35m	Çatlaklar, uygun bir dolgu malzemesi ile doldurulmalıdır.
2	2			25 – 35 m	
2	3			10 – 25 m	
2	4			5 - 10 m	
2	5			< 5 m	Sathi kaplama yenilenmelidir.

2.2.4.1.3.4. Boyuna çatlakların derecelendirilmesi ve onarımı

Boyuna çatlakların derecelendirilmesi, bozuklukların tanımı ve onarımına dair özellikler Çizelge 2.5' yer almıştır.

Çizelge 2.5. Boyuna çatlakların derecelendirilmesi ve onarımı (KGM, 2008).

BOZULMA ŞİDDETİ	BOZULMANIN YOĞUNLUĞU	BOZUKLUĞUN TANIMI	BOZULMA ŞİDDETİ	ALAN ORANI (%) (50 m platformda)	ONARIM ÇALIŞMASI
0	0	YOK	YOK	YOK	YOK
0	1	Çatlaklar 6 mm'den incedir ve ayrışmamıştır.	Hafif	< 50m	Bozuklukların gelişimi sürekli gözlemlenmelidir.
0	2	Yek ve birden çok		50 – 100 m	
0	3	olabilir. Çatlak, kaplama		100 – 200 m	
0	4	kenarına paralel,		200 - 250 m	
0	5	diagonal veya kıvrımlar şeklinde dir.		> 250 m	
1	1	Çatlaklar 6 ile 15 mm	Orta	< 50m	Çatlaklar, gerekirse genişletilerek uygun bir dolgu malzemesi ile doldurulmalıdır veya çatlaklı kesimde sathi kaplama yenilenmelidir.
1	2	arası genişliğe ulaşmıştır. Bazı		50 – 100 m	
1	3	ayrışmalar başlamıştır.		100 – 200 m	
1	4	Çok yönlü kılcal		200 - 250 m	
1	5	çatlaklar oluşmuştur.		> 250 m	
2	1	Tek veya çok yönlü çatlaklar ayrışmaya devam edip 15 mm'den fazla açıklığa ulaşmıştır. Ayrışmalar daha derinleşmiştir ve çatlak sayısı artmıştır.	Yüksek	< 50m	Çatlaklar, gerekirse genişletilerek uygun bir dolgu malzemesi ile doldurulmalıdır veya çatlaklı kesimde sathi kaplama yenilenmelidir. Kapsamlı üst yapı etüdü yapılarak bozuklukların sebebi araştırılmalı ve aşağıda belirtilen 1 ve 3 no'lu oluşma sebebinden kaynaklanıyor ise bozuk kesim kazılıp atılmalı, gerekirse temel onarımı ve/veya temel takviyesi yapıldıktan sonra sathi kaplama yenilenmelidir. Eğer 2 no'lu oluşma sebebinden kaynaklanıyor ise dolgu stabilitesi sağlanmalı, drenaj sistemi iyileştirilmeli, gerekirse temel takviyesi yapıldıktan sonra sathi kaplama yenilenmelidir.
2	2			50 – 100 m	
2	3			100 – 200 m	
2	4			200 - 250 m	
2	5			> 250 m	

2.2.4.1.3.5. Tekerlek izinde oturmaların derecelendirilmesi ve onarımı

Tekerlek izinde oturmaların derecelendirilmesi, bozuklukların tanımı ve onarımına dair bilgiler Çizelge 2.6' da ifade edilmiştir.

Çizelge 2.6. Tekerlek izinde oturmaların derecelendirilmesi ve onarımı (KGM, 2008).

BOZULMA ŞİDDETİ	BOZULMANIN YOĞUNLUĞU	BOZUKLUĞUN TANIMI	BOZULMA ŞİDDETİ	ALAN ORANI (%) (50 m platformda)	ONARIM ÇALIŞMASI
0	0	YOK	YOK	YOK	YOK
0	1	Oturmaların derinliği	Hafif	0-4 %	Bozuklukların gelişimi sürekli gözlemlenmelidir.
0	2	15 mm'den daha azdır.		4-10 %	
0	3	Oturmalar üzerinde		10-30 %	
0	4	hafif şiddette		30-60 %	
0	5	çatlamalar olabilir.		>60 %	
1	1	Oturmaların derinliği 15-30 mm arasındadır. Genellikle iz üzerinde çatlamalar vardır.	Orta	0-4 %	Bozuklukların gelişimi sürekli gözlemlenmelidir.
1	2			4-10 %	
1	3			10-30 %	
1	4			30-60 %	
1	5			>60 %	
2	1	Oturmaların derinliği 30 mm'den daha fazladır. Çatlaklar daha belirginleşmiştir.	Yüksek	0-4 %	Tekerlek izinde oturma gözlenen kısım sıcak veya soğuk karışım malzemesi ile yamanmalıdır. Oturma derinliği 5 cm'den fazla ise; oturma derinliği kadar kazılıp mevcut temel iyileştirilmeli. Gerekliyse ise temel takviyesi yapılarak sathi kaplama yenilenmelidir.
2	2			4-10 %	
2	3			10-30 %	
2	4			30-60 %	
2	5			>60 %	

2.2.4.1.3.6. Ondülasyon ve ötelenmelerin derecelendirilmesi ve onarımı

Ondülasyon ve ötelenmelerin derecelendirilmesi, bozuklukların tanımı ve onarımına dair bilgiler Çizelge 2.7' de yer almıştır.

Çizelge 2.7. Ondülasyon ve ötelenmelerin derecelendirilmesi ve onarımı (KGM, 2008).

BOZULMA ŞİDDETİ	BOZULMANIN YOĞUNLUĞU	BOZUKLUĞUN TANIMI	BOZULMA ŞİDDETİ	ALAN ORANI (%) (50 m platformda)	ONARIM ÇALIŞMASI
0	0	YOK	YOK	YOK	YOK
0	1	Çeşitli yüksekliklerde enine hafif ondülasyonlar ve lokal şekil değiştirmeleri oluşmuştur. Sürüş konforunda düşüş hissedilmeye başlanmıştır.	Hafif	0-10 %	Bozuklukların gelişimi sürekli gözlenmelidir.
0	2			10-20 %	
0	3			20-40 %	
0	4			40-60 %	
0	5			>60 %	
1	1	Sürüş konforu belirgin bir şekilde düşmüş, yol yüzeyi tümsekli bir görünüş almıştır.	Orta	0-10 %	Bozuk kesimlerdeki kaplama kazılmalı gerekirse temel havalandırılıp yeniden sıkıştırılarak sathi kaplama yenilenmelidir.
1	2			10-20 %	
1	3			20-40 %	
1	4			40-60 %	
1	5			>60 %	
2	1	Yol yüzeyindeki düzgünsüzlükler iyice artmış, sürüş konforu iyice azalmıştır. Güvenli sürüş için hızın azaltılması zorunluluğu vardır.	Yüksek	0-10 %	Bozuk kesimlerdeki kaplama kazılmalı gerekirse temel havalandırılıp yeniden sıkıştırılarak sathi kaplama yenilenmelidir.
2	2			10-20 %	
2	3			20-40 %	
2	4			40-60 %	
2	5			>60 %	

Ondülasyon ve ötelenmelerin muhtemel oluşma nedenleri;

- 1- Temel tabakasındaki stabilite yetersizliği
- 2- Sathi kaplamada yüksek bitüm yüzdesi
- 3- Kötü işçilik ve yapım hataları (KGM, 2008).

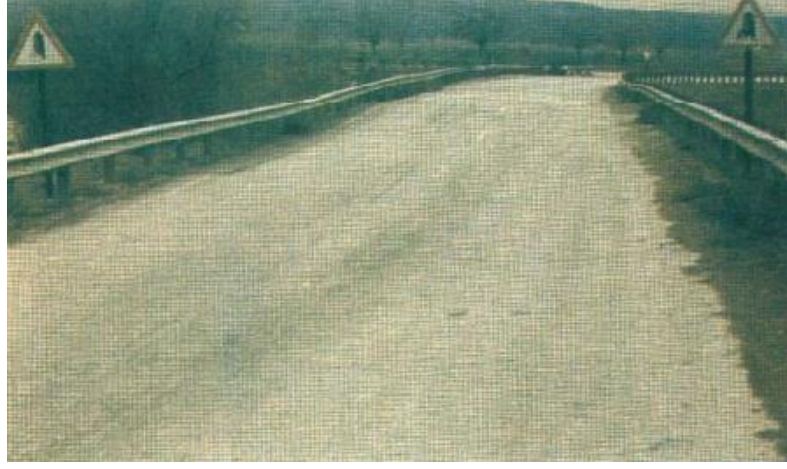
2.2.4.1.3.7. Lokal oturmalara ve kabarmaların derecelendirilmesi ve onarımı

Lokal oturmalara ve kabarmaların derecelendirilmesi, bozuklukların tanımı ve onarımına dair bilgiler Çizelge 2.8’ de ifade edilmiştir.

Çizelge 2.8. Lokal oturmalara ve kabarmaların derecelendirilmesi ve onarımı (KGM, 2008).

BOZULMA ŞİDDETİ	BOZULMANIN YOĞUNLUĞU	BOZUKLUĞUN TANIMI	BOZULMA ŞİDDETİ	ALAN ORANI (%) (50 m platformda)	ONARIM ÇALIŞMASI
0	0	YOK	YOK	YOK	YOK
0	1	Düşey Yönlü	Hafif	0-10 %	Bozuklukların gelişimi sürekli gözlemlenmelidir.
0	2	deplasman 50 mm’den azdır. Sürüş		10-20 %	
0	3	konforunda azalma çok		20-40 %	
0	4	az olup, hafif sarsıntı yaratabilir.		40-60 %	
0	5			>60 %	
1	1	Düşey Yönlü deplasman 50-100 mm arasındadır. Hissedilir seviyede yükselme ve alçalmalar oluşmuştur.	Orta	0-10 %	Oturmalarda; sıcak veya soğuk karışım malzemesi ile yama yapılmalıdır. Kabarmalarda; bozuk yüzey kazılarak temel onarımı ve/veya temel takviyesi yapıldıktan sonra sathi kaplama yenilenmelidir.
1	2			10-20 %	
1	3			20-40 %	
1	4			40-60 %	
1	5			>60 %	
2	1	Düşey Yönlü deplasman 100 mm’nin üzerindedir. Sürekli hale gelen yükselip alçalmalar rahatsızlık verici seviyededir. Hız azaltma zorunluluğu hissedilir.	Yüksek	0-10 %	Orta şiddetteki bozulmalara önerilen onarım çalışmaları bu şiddetteki bozulmalar için de geçerlidir.
2	2			10-20 %	
2	3			20-40 %	
2	4			40-60 %	
2	5			>60 %	

Lokal oturmalarla ait resimler Şekil 2.4, 2.5 ve 2.6’ de yer almaktadır.



Şekil 2.4. Hafif şiddette (KGM, 2008).



Şekil 2.5. Orta şiddette (KGM, 2008).



Şekil 2.6. Yüksek şiddette (KGM, 2008).

2.2.4.1.3.8. Çukurların derecelendirilmesi ve onarımı

Çukurların derecelendirilmesi, bozuklukların tanımı ve onarımına dair bilgiler Çizelge 2.9’ da ifade edilmiştir.

Çizelge 2.9. Çukurların derecelendirilmesi ve onarımı (KGM, 2008).

BOZULMA ŞİDDETİ	BOZULMANIN YOĞUNLUĞU	BOZUKLUĞUN TANIMI	BOZULMA ŞİDDETİ	ALAN ORANI (%) (50 m platformda)	ONARIM ÇALIŞMASI
0	0	YOK	YOK	YOK	YOK
0	1	Çukurun derinliği 5 cm’den çapı 10 cm’den azdır.	Hafif	0-10 %	Çukur uygun bir şekilde düzeltip soğuk veya sıcak karışım ile yamanmalıdır.
0	2			10-20 %	
0	3			20-40 %	
0	4			40-60 %	
0	5			>60 %	
1	1	Çukurların derinliği $5 < H < 10$ cm çapı $10 < R < 30$ cm’dir.	Orta	0-10 %	Çukur uygun bir şekilde düzeltip soğuk veya sıcak karışım ile yama yapılmalıdır.
1	2			10-20 %	
1	3			20-40 %	
1	4			40-60 %	
1	5			>60 %	Temel takviyesi yapıp sathi kaplama yenilenmelidir.
2	1	Çukurların derinliği $H > 10$ cm ve çapı $R > 30$ cm’dir.	Yüksek	0-10 %	Çukur uygun bir şekilde düzeltip soğuk veya sıcak karışım ile yama yapılmalıdır.
2	2			10-20 %	
2	3			20-40 %	
2	4			40-60 %	Temel takviyesi yapıp sathi kaplama yenilenmelidir.
2	5			>60 %	

2.2.4.1.3.9. Kaplama agregası kaybının derecelendirilmesi ve onarımı

Kaplama agregası kaybının derecelendirilmesi, bozuklukların tanımı ve onarımına dair bilgiler Çizelge 2.10' da ifade edilmiştir.

Çizelge 2.10. Kaplama agregası kaybının derecelendirilmesi ve onarımı (KGM, 2008).

BOZULMA ŞİDDETİ	BOZULMANIN YOĞUNLUĞU	BOZUKLUĞUN TANIMI	BOZULMA ŞİDDETİ	ALAN ORANI (%) (50 m platformda)	ONARIM ÇALIŞMASI
0	0	YOK	YOK	YOK	YOK
0	1	Az oranda agregası kaybı söz konusudur.	Hafif	0-10 %	Bozuklukların gelişimi sürekli gözlenmelidir.
0	2			10-20 %	
0	3			20-40 %	
0	4			40-60 %	
0	5			>60 %	
1	1	Agregası kaybı artmıştır. Kaplama yüzeyinde sığ bir ayrışma görülür ve yüzeyde bitüm lekeleri açığa çıkmıştır.	Orta	0-10 %	Bozuk kesimler sathı kaplama yenilenmelidir.
1	2			10-20 %	
1	3			20-40 %	
1	4			40-60 %	
1	5			>60 %	
2	1	Agregası kaybının daha da artması sonucunda, yüzeyde derin olmayan çukurlar, agregasız alanlar oluşmuştur. Yüzeyin görüntüsü agreganın soyulması nedeni ile siyahlaşmıştır. Yüzeyde serbest malzeme görülür.	Yüksek	0-10 %	Bozuk kesimler sathı kaplama yenilenmelidir.
2	2			10-20 %	
2	3			20-40 %	
2	4			40-60 %	
2	5			>60 %	

Kaplama agregası kaybına ait resimler Şekil 2.7, 2.8 ve 2.9' de yer almaktadır.



Şekil 2.7. Hafif şiddette soyulma/sökülme (KGM, 2008).



Şekil 2.8. Orta şiddette soyulma/sökülme (KGM, 2008).



Şekil 2.9. Yüksek şiddette soyulma/sökülme (KGM, 2008).

2.2.4.1.3.10. Çizgisel agregâ kaybının derecelendirilmesi ve onarımı

Kaplama agregâsı kaybının derecelendirilmesi, bozuklukların tanımı ve onarımına dair bilgiler Çizelge 2.11’ de ifade edilmiştir.

Çizelge 2.11. Çizgisel agregâ kaybının derecelendirilmesi ve onarımı (KGM, 2008).

BOZULMA ŞİDDETİ	BOZULMANIN YOĞUNLUĞU	BOZUKLUĞUN TANIMI	BOZULMA ŞİDDETİ	ALAN ORANI (%) (50 m platformda)	ONARIM ÇALIŞMASI
0	0	YOK	YOK	YOK	YOK
0	1	Az oranda agregâ kaybı söz konusudur. Bu kayıp doğrusal bir formasyondadır. Düşük seviyede doku artışı gözlenir.	Hafif	0-10 %	Bozuklukların gelişimi sürekli gözlenmelidir.
0	2			10-20 %	
0	3			20-40 %	
0	4			40-60 %	
0	5			>60 %	
1	1	Çizgi halindeki agregâ kaybı belirginleşmiştir. Bu kayıplar sığ bir ayrışma gösterir.	Orta	0-10 %	Soyulmuş kesimler sathi kaplama ile kaplanmalıdır.
1	2			10-20 %	
1	3			20-40 %	
1	4			40-60 %	
1	5			>60 %	
2	1	Agregâ kaybının devamı açık dokulu bir kaplama yüzeyi oluşturur. Fakat çizgi halinde agregâ kaybı hala gözlenebilir.	Yüksek	0-10 %	Soyulmuş kesimler sathi kaplama ile kaplanmalıdır.
2	2			10-20 %	
2	3			20-40 %	
2	4			40-60 %	
2	5			>60 %	

Çizgisel agregâ kaybına ait resimler Şekil 2.10, 2.11 ve 2.12’ de yer almaktadır.



Şekil 2.10. Hafif şiddette (KGM, 2008).



Şekil 2.11. Orta şiddette (KGM, 2008).



Şekil 2.12. Yüksek şiddette (KGM, 2008).

2.2.4.1.3.11. Asfalt kusmasının derecelendirilmesi ve onarımı

Asfalt kusmasının derecelendirilmesi, bozuklukların tanımı ve onarımına dair bilgiler Çizelge 2.12’ de ifade edilmiştir.

Çizelge 2.12. Asfalt kusmasının derecelendirilmesi ve onarımı (KGM, 2008).

BOZULMA ŞİDDETİ	BOZULMANIN YOĞUNLUĞU	BOZUKLUĞUN TANIMI	BOZULMA ŞİDDETİ	ALAN ORANI (%) (50 m platformda)	ONARIM ÇALIŞMASI
0	0	YOK	YOK	YOK	YOK
0	1	Kaplama üzerinde, özellikle tekerlek izlerinde, çok hafif siyahlaşmalar görülebilir.	Hafif	0-4 %	Bozuklukların gelişimi sürekli gözlenmelidir.
0	2			4-10 %	
0	3			10-30 %	
0	4			30-60 %	
0	5			>60 %	
1	1	Siyahlaşmanın tonu koyulaşmıştır. Yüzeyde fazla bitüm görüntüsü hissedilmektedir.	Orta	0-4 %	Çok sıcak havalarda kuma görülen yerlere uygun boyutta agrega serilmeli ve gerekli ise silindirlenmelidir.
1	2			4-10 %	
1	3			10-30 %	
1	4			30-60 %	
1	5			>60 %	
2	1	Yüzeyde çok fazla bitüm görülmektedir. Yer yer lastik desenleri oluşmuştur.	Yüksek	0-4 %	Çok sıcak havalarda kuma görülen yerlere uygun boyutta agrega serilmeli ve gerekli ise silindirlenmelidir.
2	2			4-10 %	
2	3			10-30 %	
2	4			30-60 %	
2	5			>60 %	

Asfalt kusmasına ait resimler Şekil 2.13, 2.14 ve 2.15’ de yer almaktadır.



Şekil 2.13. Hafif şiddette kuma (KGM, 2008).



Şekil 2.14. Orta şiddette kuma (KGM, 2008).



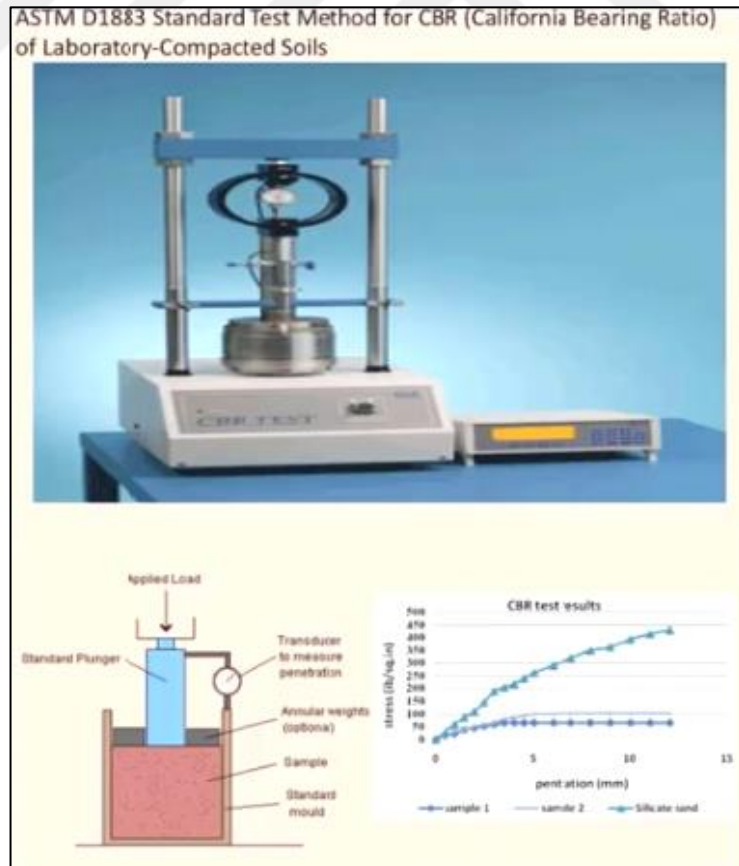
Şekil 2.15. Yüksek şiddette kuma (KGM, 2008).

2.3. Yol Malzemelerinin Taşıma Gücü

Bir üstyapının oluşturulması aşamasında taşıma gücü zayıf zeminlerin iyileştirilmesi gereklidir. Çünkü üstyapının taşıma gücünün yetersiz oluşu üstyapılardaki yüzey bozukluklarına sebebiyet vermekte ve aynı zamanda kaplama performansını etkileyen faktörler arasında da önemli bir etkiye sahip olmaktadır.

2.3.1. Kaliforniya taşıma oranı (CBR)

Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), belirli bir su muhtevasındaki ve yoğunluğundaki zeminin kayma direncinin bir ölçüsüdür. İçinde ince malzeme olan kum - çakıl karışımı granüler malzemelerde, optimum su içeriğindeki sapmalar, CBR değerlerini etkiler. Su içeriğindeki artışlarda, CBR değerlerinde ani düşmeler olur. Bunun nedeni, granüler malzemenin içindeki ince malzemenin, düşük su içeriklerinde bağlayıcı özellikte; artan su içeriklerinde ise, ayrıştırıcı özellikte olmasıdır. Genel olarak, malzemenin kuru birim ağırlığı arttıkça, CBR değeri de artmaktadır (KGM, 2021).



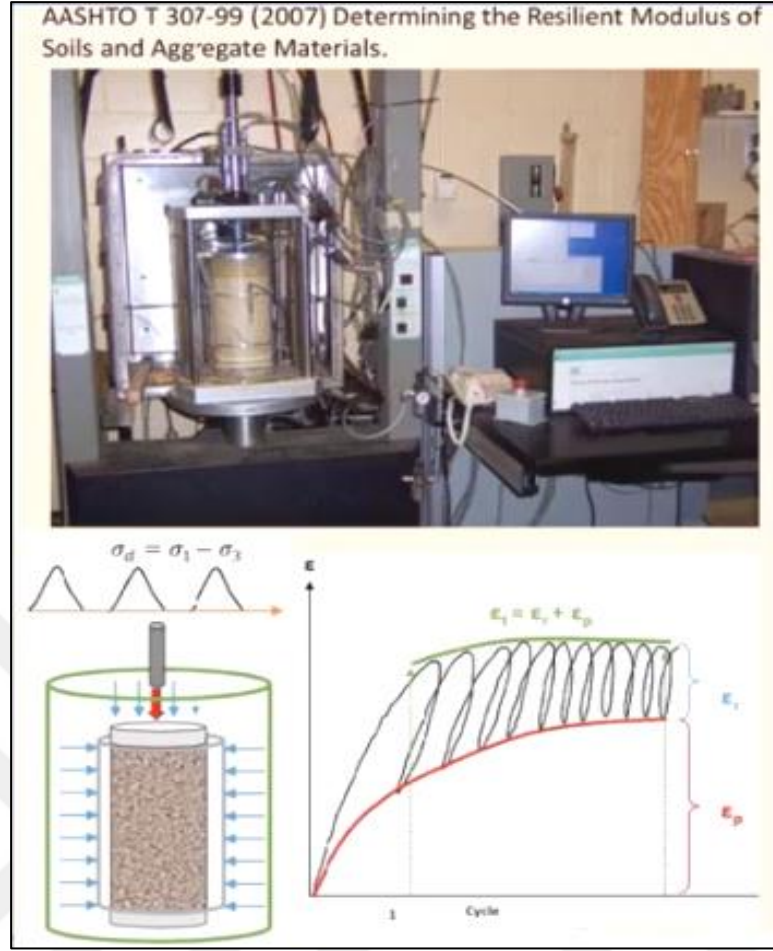
Şekil 2.16. CBR deneyi (Abut, 2020).



Şekil 2.17. CBR cihazı (KGM, 2021).

2.3.2. Esneklik modülü (Resilient Modülü, M_r)

Esneklik modülü, elastik teoreminin uygulaması olup, üstyapı malzemelerinin statik yükten ziyade tekerrür eden trafik yükleri altındaki elastikiyet modülünün tespiti için geliştirilmiş bir yaklaşımdır. Üstyapı malzemeleri normal olarak elastik değildir ve her yük tekrarından sonra bir miktar plastik (kalıcı) deformasyon gösterirler. Bununla beraber, eğer trafik yükü malzemenin mukavemetine nazaran küçük ise, belirli miktarda yük tekerrüründen sonra malzeme elastik davranış göstermeye başlar (KGM, 2008).



Şekil 2.18. Esneklik modülü deneyi (Abut, 2020).

2.4. Mekanistik Analizi Çalışmaları

Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) sistemleri sonlu sayıda düğümlerle, genelde farklı gerilme deformasyon durumlarında olan (çubuk, membran, plak, kabuk, tam-solid, vs.) elemanlara parçalayarak, sistemin rijitlik matrisine onu oluşturan elemanların ayrı-ayrılıkta düzenlenmiş rijitlik matrislerinin toplamı şeklinde kurmak düşüncesi temelinde oluşturulmuştur. SEM' in uygulanması ile yazılmış analiz programlarında, ona değer kazandıran esas özelliklerden birincisi, çok karışık, değişik gerilme-deformasyon durumlarına uygun gelebilecek çok sayıda sonlu eleman türlerini içermesi ile geniş uygulama alanına sahip olmasıdır. Bu hususlardan dolayı, SEM mühendis sistemlerinin simülasyon ve modellenmesinde zorunlu bir teknoloji olmuş, teknik üniversitelerin eğitim programlarına sokulması zorunluluğu ortaya çıkmış, otomatlaştırılmış projelendirme hesaplama komplekslerine iddialı, sağlam bağlarla girmiştir (Kasımzade, 2011).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmamızda yapacağımız esnek üstyapı ile ilgili proje verilerinin, jeoteknik-jeofizik raporların ve yol tabakalarına ait malzeme karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılan laboratuvar deney sonuçlarından elden edilen veriler, girdi parametreleri olarak kullanılarak üç boyutlu esnek yol üstyapı modellemesi ve analizi, sonlu elemanlar yazılımını kullanan ANSYS bilgisayar programı ile gerçekleştirilmiştir.

ANSYS, esnek üstyapı modeline ait girdi verileri ile lineer ve lineer olmayan malzeme davranışını uygulayabilen, 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu modellemeye imkân veren sonlu elemanlar yöntemi kullanan popüler bir bilgisayar programıdır. Analiz sonucunda, esnek üstyapı tabakalarında meydana gelen, her tip gerilme ve şekil değiştirme sonuçlarının yanı sıra esnek üst yapı ömrü ile ilgili sonuç çıkarımına yönelik altlık verileri de alınabilmektedir.

Esnek üstyapı tabakalarının projesinde belirtilen boyutlarda bilgisayar ortamında modellemesi ve verilerin tanımlanması yapıldıktan sonra esnek üstyapı modellemesinin gerçek simülasyon davranışını kavrayabilmek için 3 boyutlu model oluşturma, dış yükler altında problemimize uygun olan lineer sonlu elemanlar analiz yöntemlerini seçerek modelimizin davranışlarının en iyi şekilde anlayabilmek amaçlanmaktadır.

3.1. Proje Verileri

3.1.1. Esnek yol üstyapısı güzergahı

Hasankeyf ilçesinde yer alan, Kızlar (Eyyubi) Cami taşıma yoluna ait güzergâh Şekil 3.1' de yer almıştır.

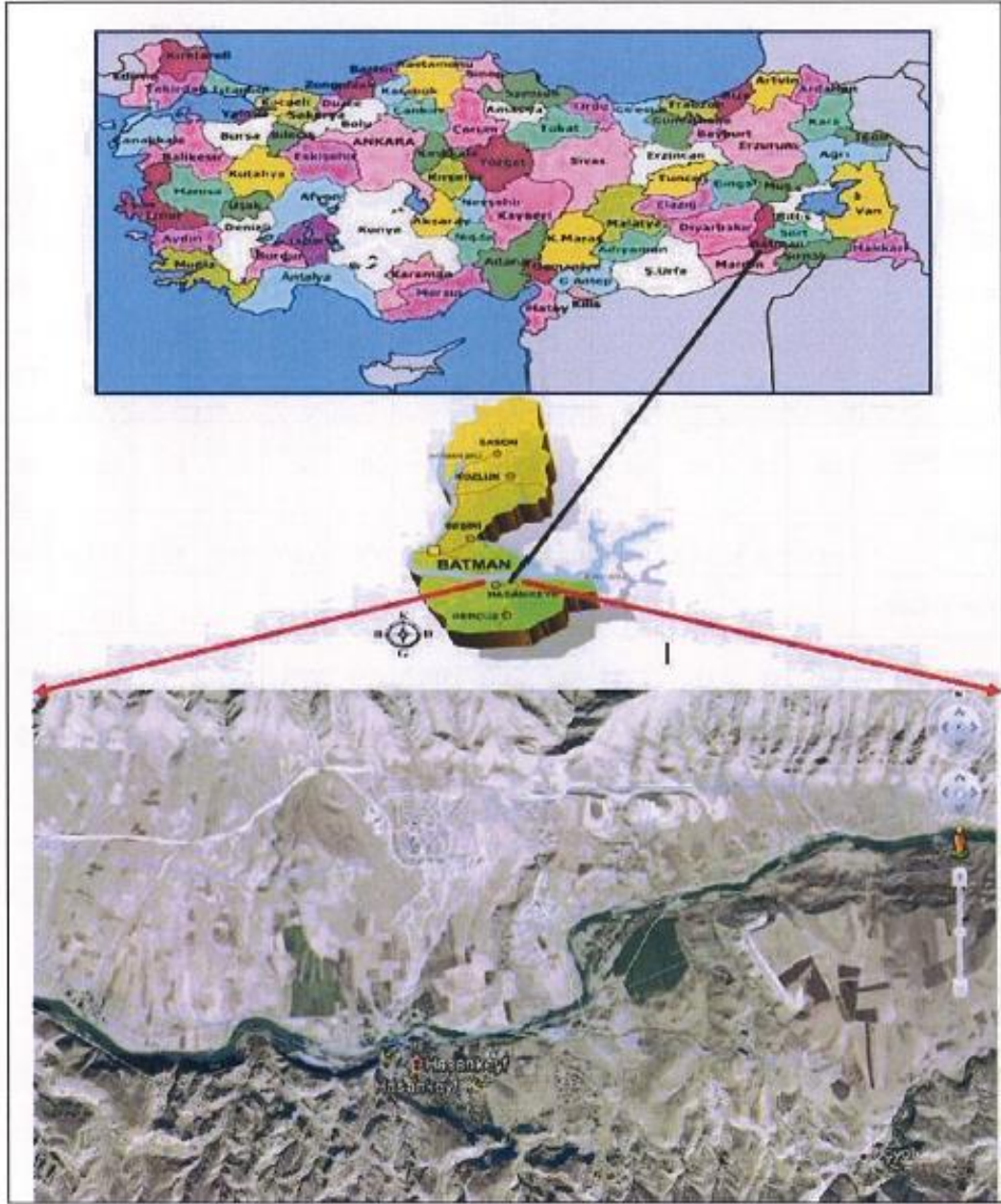


Şekil 3.1. Taşıma yolu güzergahı (Üstyapı Tek. R., 2017).

3.1.2. Yol üstyapısı yeri ve ulaşımı

Proje alanı Dicle Nehri'nin güneyinde, Batman –Mardin karayolunun güney ve batısında, Hasanköy ilçe merkezinde yer almaktadır.

İnceleme alanının Türkiye'deki yeri ve krokisi Şekil 3.2' de bulunmaktadır.



Şekil 3.2. İnceleme alanının Türkiye’deki yeri ve krokisi.

Yol alanı, Dicle Nehri’nin güneyinde, Batman-Mardin Karayolunun güney ve batısında, Hasankeyf ilçe merkezinde yer almaktadır.

Bölgeye ait meteorolojik veriler aşağıda Çizelge 3.1’ de bulunmaktadır.

Çizelge 3.1. Meteorolojik bilgiler.

Meteorolojik	AYLAR												Yıllık
Parametreler	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Miktar
Ort. Sıcaklık (°C)	2.8	4.5	9.2	13.7	18.7	25.5	30.2	29.4	24.0	16.5	9.9	4.8	15.8
Ort. Nispi Nem (%)	80	79	70	68	60	38	28	27	34	55	74	82	58
Ort. Yağış (mm)	97.3	78.2	64.1	43.4	38.8	23.7	5.2	5.5	34.7	29.7	77.1	152.4	665.2
Ort. Kar Y. Gün	1.3	0.8	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	0.6	3.2
En Hızlı Rüzgâr Yönü ve Hızı (m/s)	GD 11.2	G 10.0	G 12.9	GB 12.3	BG 8.2	KD 8.2	BK 9.6	KD 6.8	GG 6.6	GG 7.2	GG 11.8	GGB 12.2	GGB 12.9

3.1.3. Yolun jeolojisi

Zemin durumunun değerlendirilmesinde 2017 tarihinde hazırlanan Hasankeyf'te bulunan anıt eserlerin taşıma ve koruma proje yapımı kapsamında Anıt Eserler Taşıma Yolu Güzergâhı 2.Etap Jeolojik-Jeoteknik Etüt raporundan faydalanılmıştır.

Yol güzergâhının ve yakın çevresinde açılan jeoteknik araştırma çukurlarının jeolojisini Kuvaterner yaşlı alüvyon (Qal) ile yamaç molozu (Qym) ve bu birimin hemen altındaki Orta-Üst Miyosen yaşlı Şelmo Formasyonuna (Tmş) ait birimler oluşturmaktadır. Kuvaterner yaşlı alüvyal birimler (Qal) kahverengi, sarımsı, yeşilimsi gri renkli, yer yer çakıl ve kum içeren orta-düşük plastisiteli siltli killerden meydana gelmektedir.

Kuvaterner yaşlı yamaç molozu (Qym) genellikle açık kahverengi, sarımsı, matriksli killi, siltli, kumlu olup genellikle köşeli, az yuvarlak, yer yer yuvarlak çakıl ve bloklardan meydana gelmektedir. Kuvaterner yaşlı birimlerin hemen altında yer alan Şelmo Formasyonu (Tşm), kırmızı, kızılımsı kahverengi, gri, yeşilimsi gri renkli, ince-orta-kalın, yer yer çapraz tabakalı, yer yer ayrılmış, az tutturulmuş, kumlu çakıllı yer yer bloklu konglomera ve kıltaşı, silttaşı, kumtaşı ile kireçtaşlarından meydana gelmektedir.

Bu yol (Güney Taşıma Yolu), Er Rızk Camisinden başlayarak Süleyman-Kızlar Camileri yolu ile birleşen 5.010 km uzunluğundadır. Bu yolun güzergâhı boyunca derin kazılara ihtiyaç duyulmuştur. Bu yolda kazıların maksimum derinliği 25 m olarak öngörülmüştür. Güzergâh boyunca genel olarak zemin profili çok farklılık göstermemektedir. Bu sebeple yapılan analizlerde aynı parametreler analizlerin yapıldığı kilometrelerden bağımsız olarak alınmış ve farklı kazı derinlikleri için analiz yapılmıştır.

İnceleme alanında her bir tabakanın sismik hızları kullanılarak izin verilebilir taşıma gücü değerleri bulunmuştur.

Yol güzergâhı, geçici stok alanları ile yeni konumlarındaki olası zemin anomalilerinin (karstik – arkeolojik boşluklar/arkeolojik yapı kalıntıları v.b.) belirlenerek, zeminin jeolojik jeoteknik mühendislik parametreleri ve jeofizik dinamik elastik özelliklerinin tespitine yönelik araştırmalar yapılmıştır. İnceleme alanında jeolojik etüt çalışmaları kapsamında araştırma çukurları açılmıştır. Jeofizik etüt çalışmaları kapsamında ise vaziyet planında belirtilen alanlarda 2-3 (D) boyutlu yer radarı (GPR) ölçümü, sismik kırılma MASW ölçümleri ve düşey elektrik sondaj (DES) ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

İnceleme alanında yapılan araştırma çukurlarında yeraltı suyuna rastlanmamıştır.

Araştırma çukurlarından ve taşıma güzergâhı dolgu malzemesi olarak kullanılacak malzemeden alınan örnekler üzerinde Standart Proctor, CBR (California Bearing Ratio-Kaliforniya Taşıma Oranı) deneyleri yapılmıştır. Yapılan Standart Proctor deneyleri sonucunda optimum su muhtevasının (w_{opt}) %6,5 - %17,2 arasında değiştiği; maksimum kuru yoğunluk değerinin 16,31 – 19,53 kN/m³ arasında değiştiği belirlenmiştir. Örnekler üzerinde yapılan CBR deneyleri sonucunda şişme yüzdesinin 0,00 ile 2,37 arasında değiştiği belirlenmiştir (Jeo. Etüt R., 2017).

Laboratuvar ve arazide yapılan deneylerin sonuçlarına göre el örneği alındığı ve kumçakıl oranı fazla olduğu için konsolidasyon deneyi şişme yüzdesi değerleri tespit edilmemiştir (Üstyapı Tek. R., 2017).

Araştırma çukurlarından ve taşıma güzergâhı dolgu malzemesi olarak kullanılacak malzemeden alınan örnekler üzerinde Standart Proctor, CBR (California Bearing

Ratio- Kaliforniya aşırma Oranı) deneyleri yaptırılmıştır. Yapılan Standart Proctor deneyleri sonucunda optimum su muhtevasının (w_{opt}) %6,5 - %17,2 arasında değiştiği; maksimum kuru yoğunluk değerinin 16,3 – 19,53 kN/m³ arasında değiştiği belirlenmiştir. Örnekler üzerinde yapılan CBR deneyleri sonucunda şişme yüzdesinin 0,00 ile 2,37 arasında değiştiği belirlenmiştir (Üstyapı Tek. R., 2017).

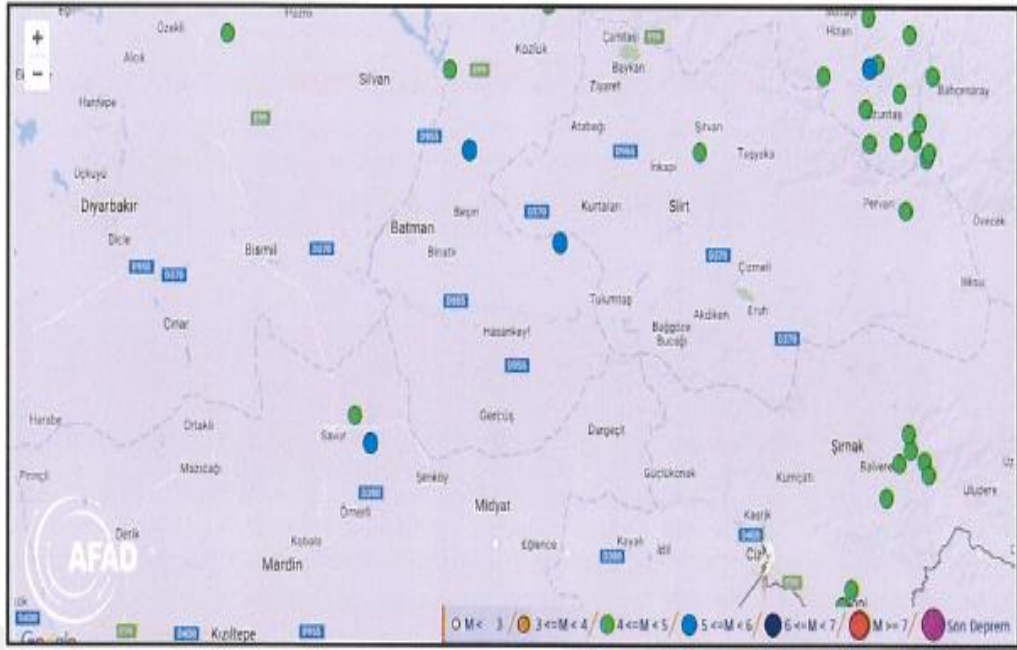
Yol güzergahında yer alan dolgularda ($h \geq 8.0$ m) ve yarmalarda ($h \geq 15.0$ m) uygulanacak şev oranlarının güvenli olarak belirlenmesi amacı ile K.G.M Araştırma Mühendislik Hizmetleri Teknik Şartnamesinde belirtilen stabilite analizleri yapılmıştır. Bu analizler neticesinde güzergâhta yer alan yarmaların ve dolguların güvenli olduğu belirlenmiştir (Üstyapı Tek. R., 2017).

Güzergâh boyunca yüzeylenen birimler ve yakın çevresinde yapılan Jeoteknik etütler ve değerlendirmelere göre yol bileşenlerini olumsuz yönde etkileyecek; şev stabilitesi, heyelan, taşıma gücü problemi, oturma, sıvılaşma niteliğinde olabilecek alan bulunmamaktadır (Üstyapı Tek. R., 2017).

Zemin koşulları ve trafik sayımları birlikte değerlendirilerek, üst yapı tabaka kalınlıkları belirlenmiştir. Buna göre 0,40 cm PMT ve ayrıca üstyapı tabanı (Alt temel) 0,20 cm koruyucu tabaka tüm yarma ve imlada kullanılıp, çift kat sathi kaplama önerilmiştir (Üstyapı Tek. R., 2017).

3.1.4. Depremsellik

Çalışma sahası Bayındırlık ve İskân Bakanlığına göre ikinci derece deprem bölgesi içerisinde yer almaktadır (Çizelge 3.2). Bu bölgede yapılacak olan sanat yapıları için yatay deprem ivmesi $A_0 = 0.3g$, toprak yapıları (yarma-dolgu) için ise $A_0 = 0.15g$ 'dir (Üstyapı Tek. R., 2017).



Şekil 3.4. Güzergâhın yakın çevresinde 1900 yılı ve sonrasına ait, aletsel büyüklüğü 2’den büyük olan depremlerin odak noktaları (Üstyapı Tek. R., 2017).

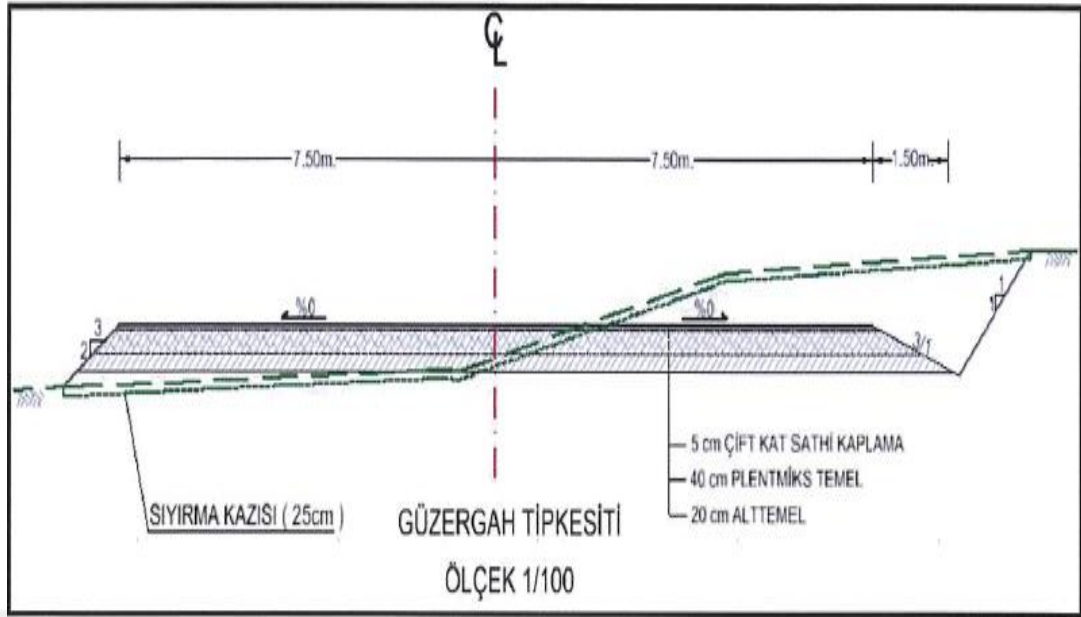
3.1.5. Afet durumu

İnceleme alanında deprem dışında yer kayması, kaya düşmesi, çığ, sel gibi olmuş ve olabilecek afetler gözlenmemiştir. Basınç deneyi sonucu incelendiğinde zeminin yarı katı olduğu, dolayısıyla heyelan potansiyelinin olmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca sahada eğimler genellikle % 0-10 arasında değişmekte olup zeminde yapılaşma sonucu heyelan olması beklenemez.

İnceleme alanı ve yakın çevresinde diri fay olgusuna rastlanmamıştır ve imar planına esas jeolojik raporlara göre afet kapsamında bulunmamaktadır. Saha içinde akma, kabarma ve bataklık gibi zeminden kaynaklanan ve zemin ıslahını gerektirecek herhangi bir kesim yoktur (Jeo. Etüt R., 2017).

3.1.6. Yolum geometrik özellikleri

Güney taşıma yolunun genelinde yollarında platform genişliği 15m’dir. Taşıma yolunun güzergâh tip kesiti aşağıdaki Şekil 3.5’ de ifade edilmektedir.



Şekil 3.5. Güzergâh tip kesiti (Üstyapı Tek. R., 2017).

Anıt eserlerin taşınacağı yolların geometrik özellikleri ise Çizelge 3.3’ de ifade edilmektedir.

Çizelge 3.3. Taşıma yolları boyunca uygulanacak geometrik standartlar.

GÜZERGAH ADI	Güney (2.Etap) Taşıma Yolları
Yolun Cinsi	Tek Yol
Şerit Sayısı	2x1
Şerit Genişliği	7.5 m
Refüj Genişliği	-
Platform Genişliği	15.0 m
Maksimum Boyuna Eğim	%2
Üst Yapı Cinsi	Çift Kat Sathi Kaplama

3.1.7. Arazide yapılan deneyler

3.1.7.1. Kaliforniya taşıma oranı (CBR)

Bu deney temel tabakalarının ve tabanın CBR değerini kontrol etmek veya mevcut taban ve temellerin taşıma gücü hakkında fikir sahibi olmak için yapılır (KGM, 2021).

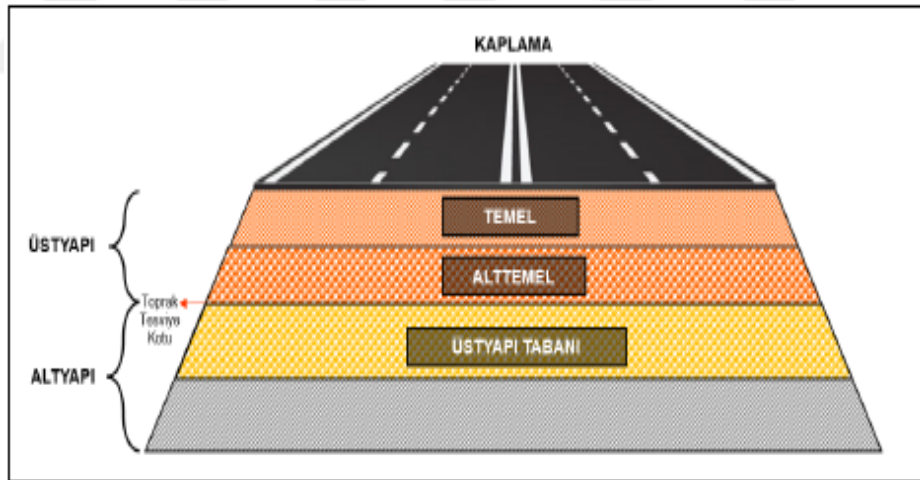
Arazi CBR aletleri ekipmanı Şekil 3.6’ da yer almaktadır.



Şekil 3.6. Arazi CBR aleti ekipmanı (KGM, 2021).

Arazi sahasında araştırma çukurlarından ve taşıma güzergahı dolgu malzemesi olarak kullanılacak malzemeden alınan örnekler üzerinde, CBR (California Bearing Ratio- Kaliforniya Taşıma Oranı) deneyleri yapılmıştır (Jeo. Etüt R., 2017).

Esnek üstyapı projelendirmede sıklıkla karşılaşılan bir tip kesit Şekil 3.7’ de yer almaktadır.



Şekil 3.7. Yol tabakaları (KGM, 2021).

Burada yol tabakaları 2 kısma ayrılıyor. Altyapı dediğimiz 1.kısım dolgu malzemeleri yani üstyapı tabanı (seçme malzemeler) ile taban zemini dediğimiz doğal zeminden oluşuyor. Bunun hemen üzerindeki 2.kısma üstyapı denilmektedir. Taban zemini üzerinde yer alan seçme malzeme çok zorunlu değildir. Bu tabaka biraz daha taban zemininin taşıma kapasitesi ile alakalıdır. Genel anlamda eğer taban zemini CBR

değeri %8'in ($CBR < 8$) altındaysa burada seçme malzemenin kullanılması gerekmektedir.

Üstyapı incelendiğinde sırasıyla alt temel, temel ve kaplama tabakaları görülmektedir. Su bazlı malzemeler yani suyun bir bağlayıcı olarak kullanıldığı tabakalara bakıldığında (alt temel, temel, varsa seçme malzeme) temel kavramı CBR ile nitelendirildiği veya teşkil edildiği söylenebilir. Doğal zeminden temele kadar bu tabaka teşkili taşıma kapasitesi CBR deneyi ile ilişkilendirilmiştir.

Esnek üstyapıların projelendirilmesinde CBR değeri ile taşıma gücü arasındaki ilişki aşağıdaki denklem takımlarında (Şekil 3.8) belirtilmiştir (Abut, 2020).

<u>SHELL (Heukelommy Foster, 1960)</u>	<u>TRRL NCHRP1-37A</u>
$Mr \text{ (psi)} = 1.500 \times CBR$	$Mr \text{ (psi)} = 2.555 \times CBR^{0.64}$
$Mr \text{ (Mpa)} = 10.3 \times CBR$	$Mr \text{ (Mpa)} = 17.62 \times CBR^{0.64}$
<u>USACE (Greeny Hall, 1975)</u>	<u>Georgia DOT</u>
$Mr \text{ (psi)} = 5.409 \times CBR^{0.711}$	$Mr \text{ (psi)} = 3.116 \times CBR^{0.478}$
$Mr \text{ (Mpa)} = 38.0 \times CBR^{0.711}$	$Mr \text{ (Mpa)} = 21.50 \times CBR^{0.478}$
<u>CSIR (Consejo de Investigaciones Cientificas e Industriales de Surafrica) (Avres, 1997)</u>	<u>Ohio DOT (2008)</u>
$Mr \text{ (psi)} = 3.000 \times CBR^{0.65}$	$Mr \text{ (psi)} = 1.200 \times CBR$
$Mr \text{ (Mpa)} = 21.0 \times CBR^{0.65}$	

Şekil 3.8. CBR kullanılarak yapılan hesaplamalar.

3.1.7.2. Standart proktor deneyi

Bu deney, belirli bir yöntemle sıkıştırılmış bir zeminde, maksimum kuru birim hacim ağırlığı veren su muhtevasının bulunması ile alakalıdır.

Toprakların dane büyüklüklerinin dağılımına göre kuru birim ağırlık - su içeriği ilişkileri Çizelge 3.4' de yer alan 4 ayrı yöntemle bulunur (KGM, 2021).

Çizelge 3.4. Toprağın maksimum dane boyutuna göre kullanılan metotlar.

Metot	Kullanılacak Kalıp Çapı	Toprağın cinsi
A	101.6 (4'') mm	4,75 mm elekten geçen
B	152.4 (6'') mm	4,75 mm elekten geçen
C	101,6 (4'') mm	19 mm elekten geçen
D	152,4 (6'') mm	19 mm elekten geçen

Proktor deneylerinde kullanılan 4'' ve 6'' kalıplar Şekil 3.9' da bulunmaktadır.



Şekil 3.9. Proktor deneyinde kullanılan kalıplar (KGM, 2021).



Şekil 3.10. Otomatik proktor cihazı (KGM, 2021).

Alınan örselenmemiş numunelerin jeoteknik ve mühendislik özelliklerinin ortaya çıkarılması amacı ile laboratuvarda atterberg limitleri, kuru birim hacim ağırlık tayini, tabi birim hacim ağırlık tayini, basınç deneyleri, su muhtevası, zemin sınıfı deneyleri, elek analizi deneyleri yapılmıştır. Çalışmalar esnasında izlenen yöntem kısaca aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir.

-Birim hacim ağırlık tayini

-Elek analizi

-Atterberg limitlerinin saptanması

-Zemin şişme özelliği; Temel zeminini oluşturan birimin, laboratuvar ve arazide yapılan deney sonuçlarından elde edilen verilere göre el örneği alındığı ve kum-çakıl oranı fazla olduğu için konsolidasyon deneyi şişme yüzdesi değerleri tespit edilmemiştir.

-Diğer arazi deneyleri; sismik etüt çalışmaları, elektrik özdirenç etüt çalışmaları (DES) arazide yapılmış, Maksimum kayma (shear) modülü değerleri, zemin yoğunluk değerleri, yer radarı (GPR) ölçümleri vs. incelenmiştir.

3.1.8. Esnek yol üstyapısında kullanılan malzeme parametreleri

İncelediğimiz esnek yol üstyapısındaki kesite ait bütün tabakaların malzeme özellikleri lineer, elastik ve izotropik olarak modellenmiştir (elastisite modülü, birim hacim ağırlığı ve poisson oranı ile tanımlanan malzeme). Esnek üstyapı modelimiz çift sathi kaplama, plent-miks temel, alt temel ve zemin olmak üzere 4 tabakadan oluşmaktadır. Tabakalara ait malzeme özellikleri Çizelge 3.5’ de gösterilmektedir.

Çizelge 3.5. Kaplamanın malzeme özellikleri.

Tabaka	Elastisite modülü, N/m ²	Birim Hacim Ağırlık, kg/m ³	Poisson oranı
Çift Sathi Kaplama	2.98x10 ⁸	2400	0.35
Plent-miks Temel	2.28 x10 ⁸	2300	0.35
Alt Temel	1.28x10 ⁸	2300	0.35
Zemin	9.84x10 ⁸	1695	0.35

Elastisite Modülü (E): Zeminlerin dayanımı ve sağlamlığı hakkında bilgi verir. Bir doğrultuda streslerin strainlere oranı olarak tanımlanır. Kayalarda Elastisite Modülü değeri yüksek, alüvyal zeminlerde ise düşüktür.

Birim hacim ağırlığı (γ): Zeminlerin ağırlıklarının hacimlerine oranları hakkında bilgi verir.

Poisson Oranı (n): Formasyonun enine birim değiştirmesinin boyuna birim değiştirmesine oranı olarak nitelendirilir. Zeminin su içeriği hakkında bilgi verir (Jeo. Etüt R., 2017).

3.1.9. SPMT (Kendinden Tahrikli Modül Taşıyıcı)

Anıt eserlerin taşınmaları için yapılacak olan taşıma yollarında Self Propelled Modular Transporter (SPMT, Kendinden Tahrikli Modül Taşıyıcı) kullanılmaktadır. SPMT çok ağır yüklerin taşınmasında kullanılan bir araç olup aracın lastik bilgileri Çizelge 3.6’ da ifade edilmektedir.

Çizelge 3.6. SPMT taşıyıcı lastik bilgileri.

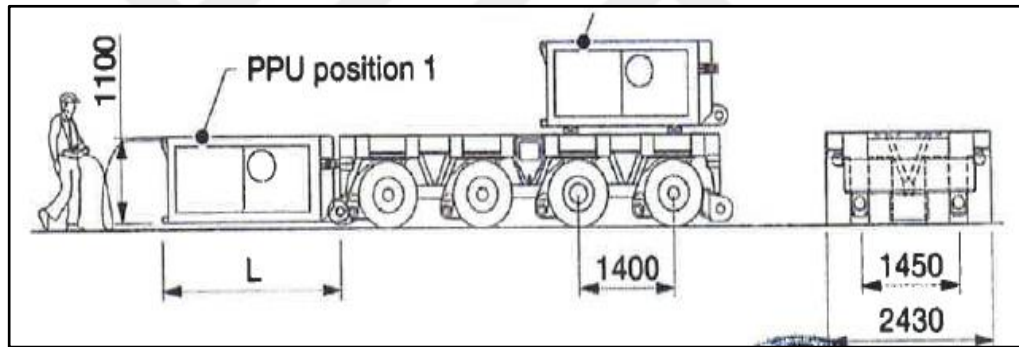
Pneumatik Lastik	355/65-15PR24 IC40
Lastik Basıncı	10 bar/145 psi
Ground Pressure for tire pressure (10 bar)	95 N/cm ² / 130.5 lbf/in ²

Tarihi eserler bir bütün olarak, düzgün yayılı bir yük oluşması amacı ile SPMT' lerin yan yana getirilmesi ile oluşturulacak bir grup ile taşınacaktır. SPMT' lerin kendi ağırlığı dahil toplam aks başına taşıma kapasitesi 40 tondur.

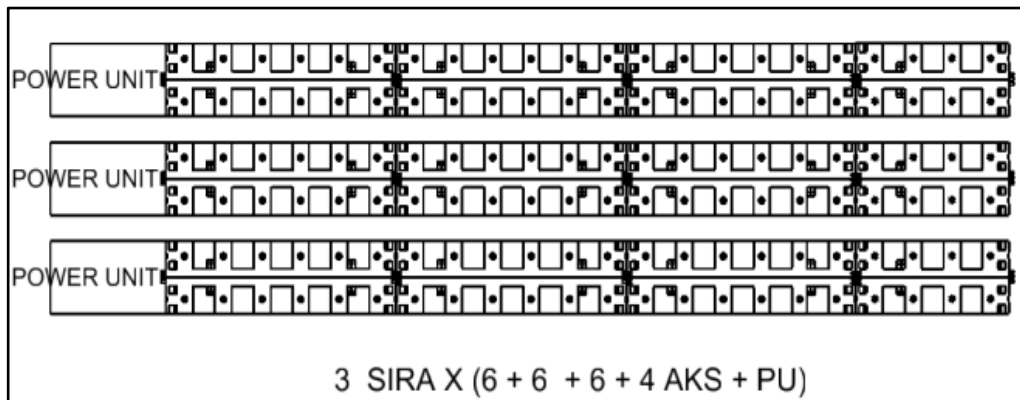
Aks üzerindeki teker grubu ara mesafe : 1.45 m

Aks arası mesafe : 1.40 m

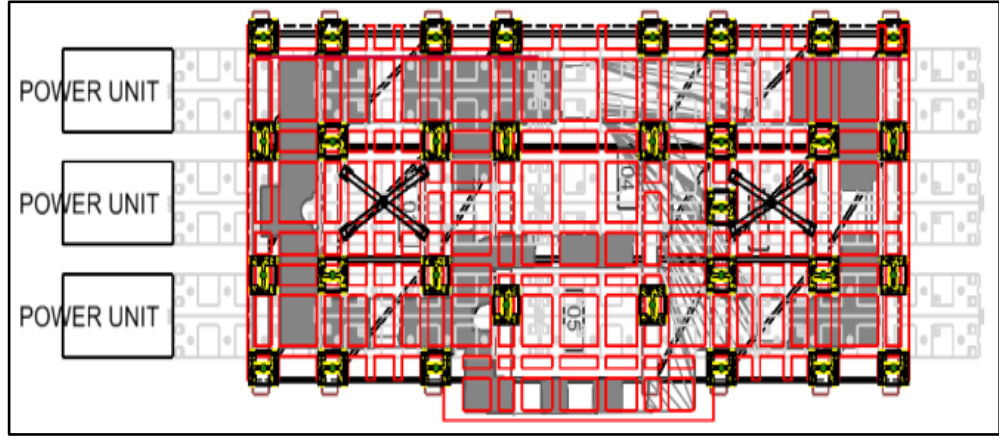
Ara. Yüğü, yayılı yük değeri : $40/(1.45 \times 1.4) = 19,7 \text{ t/m}^2$ =(yaklaşık) 20t/m² bulunmuştur.



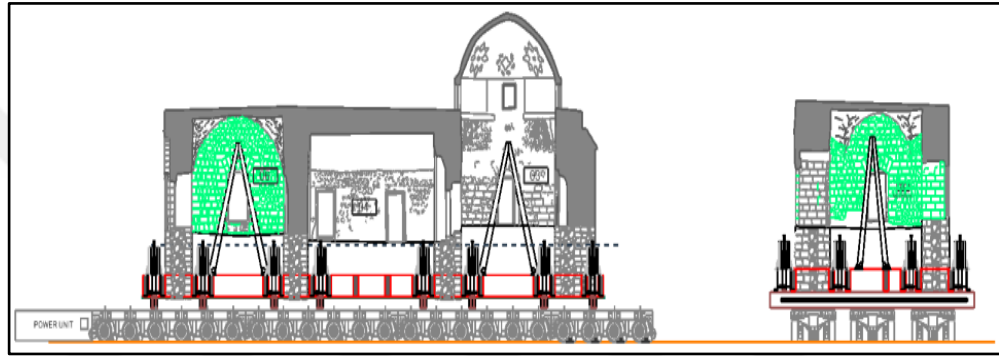
Şekil 3.11. SPMT teker ve aks arası mesafeler.



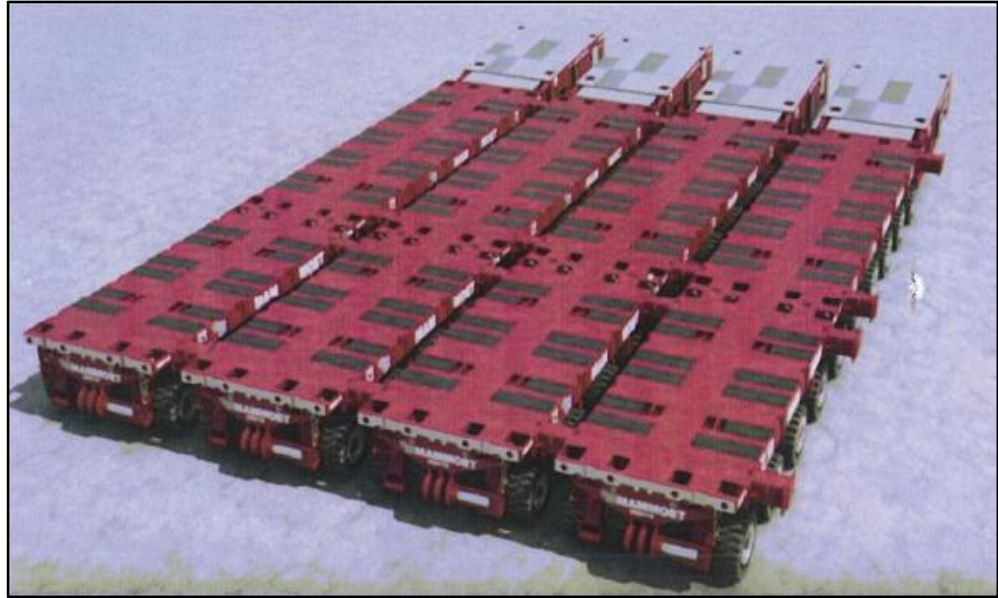
Şekil 3.12. SPMT konfigürasyonu.



Şekil 3.13. SPMT konfigürasyonu + taşınacak yapı (plan).



Şekil 3.14. SPMT konfigürasyonu + taşınacak yapı (cepheler).



Şekil 3.15. SPTM modül taşıyıcı.



Şekil 3.16. Yapı + SPTM modül taşıyıcı.

Taşınacak yapının toplam ağırlığı: 2.085,00 ton,

SPTM toplam ağırlığı: 264,00 ton,

Toplam yük (Yapı + SPTM): 2.349,00 ton,

Kızlar Cami Doğu Bloğu ve SPMT toplam ağırlığı 2.349,00 ton olarak belirlenmiştir.

SPMT toplam 3 sıra ve 6+6+6+4 aks olduğundan $3 \times 22 = 66$ aks bulunmaktadır.

PMT yapıdan dolayı aks başına gelen yük $2085/66 = 31,60$ ton

Yapı + SPMT aks başına gelen yük ise $2349/66 = 35,60$ tondur.

Her aksta 2 basınç noktası olduğundan $66 \times 2 = 132$ adet basınç noktası vardır. Her basınç noktasında $2349/132 = 17,80$ ton noktasal yük oluşacaktır.

Noktasal yükün dağılma alanı olarak, en gayri müsait alan (Noktasal yük dağılımı en dar olan alan) $1,16\text{m} \times 1,10\text{m} = 1,27\text{ m}^2$ hesaba alınmıştır. Sonuç olarak 17,80 tonluk bir yük $1,27\text{ m}^2$ lik bir alanda etki edecektir. Buna göre birim alana etki edecek basınç kuvveti $17,80/1,27 = 14,01\text{ t/m}^2$ olarak bulunmaktadır.

SPMT modül taşıyıcıda her bir dingile gelen yük 8,2 ton değerinden fazla ve sistem özel olduğundan, dingil yükü eşdeğerlilik faktörü tespiti için mevcut abak ya da tabloların kullanılması mümkün değildir. Özel analiz yapılmıştır. SPMT modül taşıyıcının bir geçişinde 8,2 ton standart dingil yükü cinsinden geçiş sayısı hesabında Aloysius TJAN ve Chai FUNG'un (2005) makalesinden yararlanılmıştır.

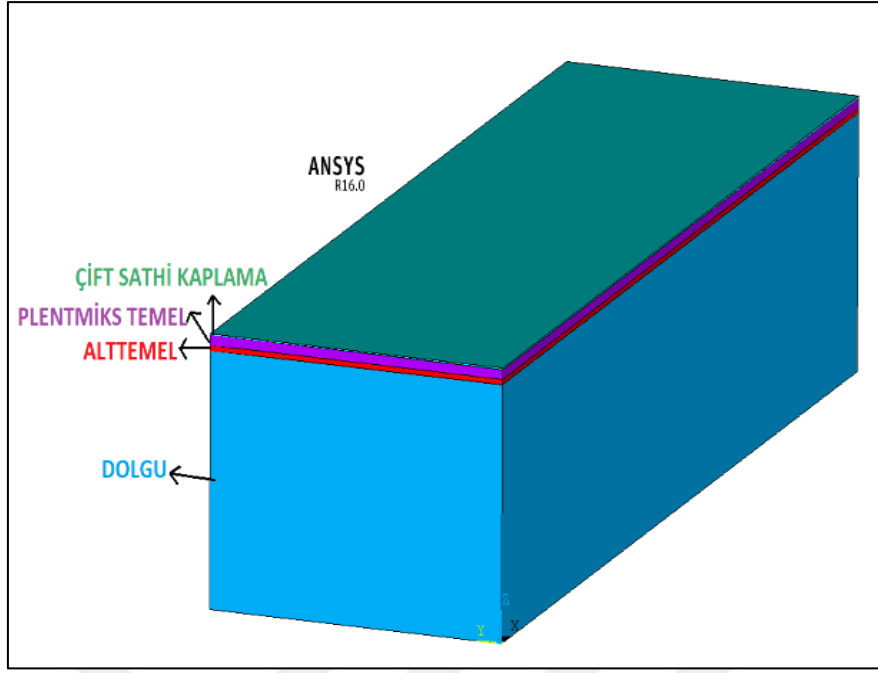
3.2. Sonlu Elemanlar Modellemesi

Sonlu elemanlar programı olan ANSYS yazılımı hem dışarıdan CAD datalarını alabilmekte hem de içindeki işlem olanakları ile geometri oluşturulmasına izin vermektedir. Yine aynı işlemci içinde hesaplama için gerekli olan sonlu elemanlar modeli yani mesh de oluşturulmaktadır. Yükler ve mesnet veya sınır koşulları (boundary conditions, restraints) tanımlandıktan sonra ve gerçekleştirilen analiz sonucunda, sonuçlar sayısal ve grafiksel olarak elde edilebilmektedir (Li, 1994; Gallego et al., 2004).

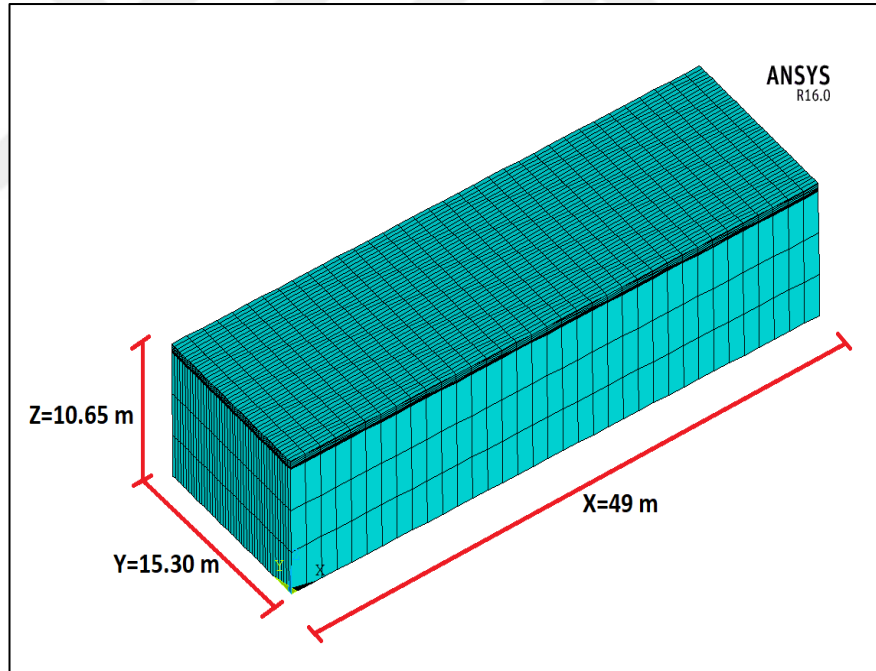
Genel olarak ANSYS adlı sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan bilgisayar programında bir analiz Preprocessor, Solution ve Postprocessor olmak üzere 3 kategoriden oluşmaktadır.

3.2.1. Geometrik model

Kızlar (Eyyubi) Caminin Koruma ve Taşıma çalışmaları kapsamına dayanılarak tipik dört tabakalı esnek üstyapı tanımlanmıştır. Esnek üstyapı karakteristik malzeme tabakaları modeli Şekil 3.17'de gösterilmiştir. Mevcut esnek üstyapı katmanlarının toplam kalınlığı 10,65 m olup, 0,05 m çift sathi kaplama kalınlığı, 0,4 m plent-miks temel kalınlığı, 0,2 m alt temel kalınlığı ve 10 m dolgu tabakası kalınlığı seçilmiştir. Esnek üstyapı tabakalarının boyutları Şekil 3.18' de verilmiştir.



Şekil 3.17. Esnek üstyapı karakteristik malzeme tabakaları.



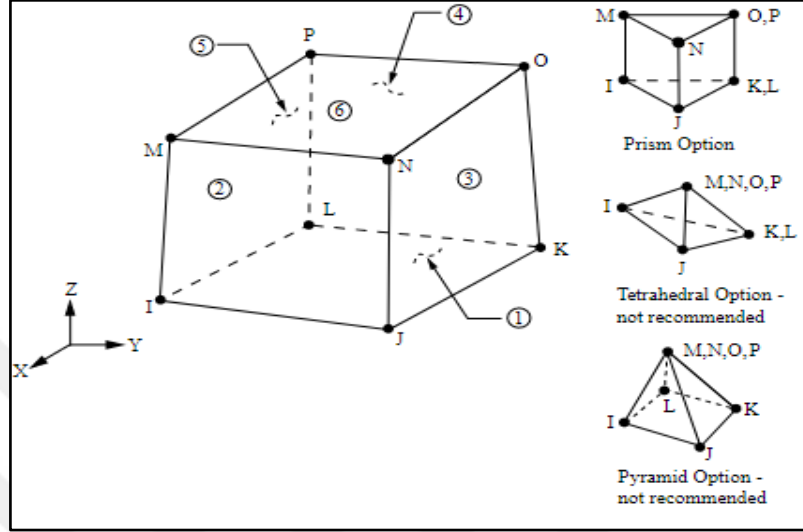
Şekil 3.18. Esnek üstyapı tabakalarının boyutları.

3.2.2. Eleman tipi ve malzeme özellikleri

Esnek üstyapı yol tabakalarını modellemek için 8 tane düğümle tanımlanan her bir düğümde 3 tane serbestlik derecesine sahip olan (x, y ve z yönlerinde ötelenmelere

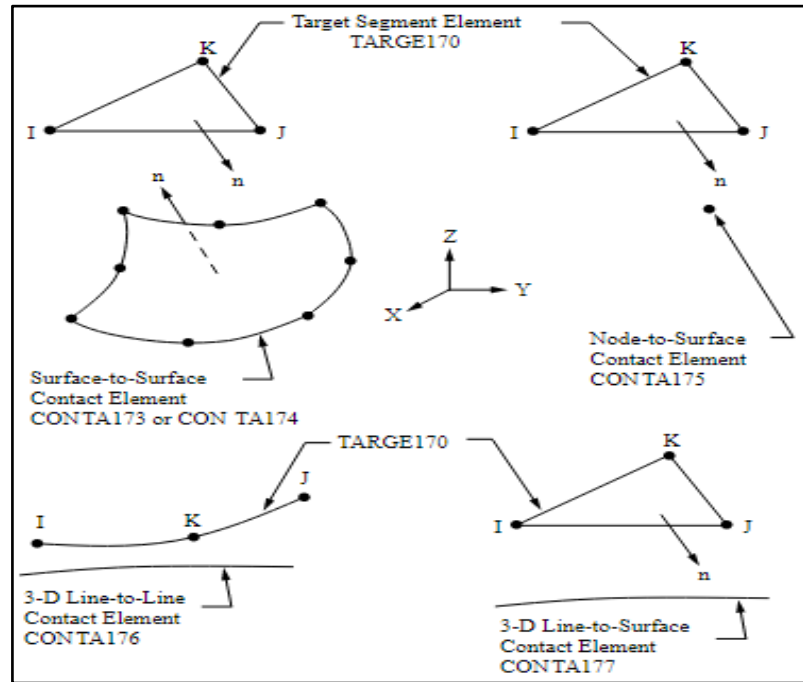
sahip) 3 boyutlu katı yapı modellemelerimiz için SOLID185, TARGE170, CONTA174 elemanları kullanıldı.

SOLID185 elemanı plastiklik, hiperelastiklik, gerilme rijitli, sürünme, büyük deformasyon ve büyük gerilim kapasitelerine sahiptir.



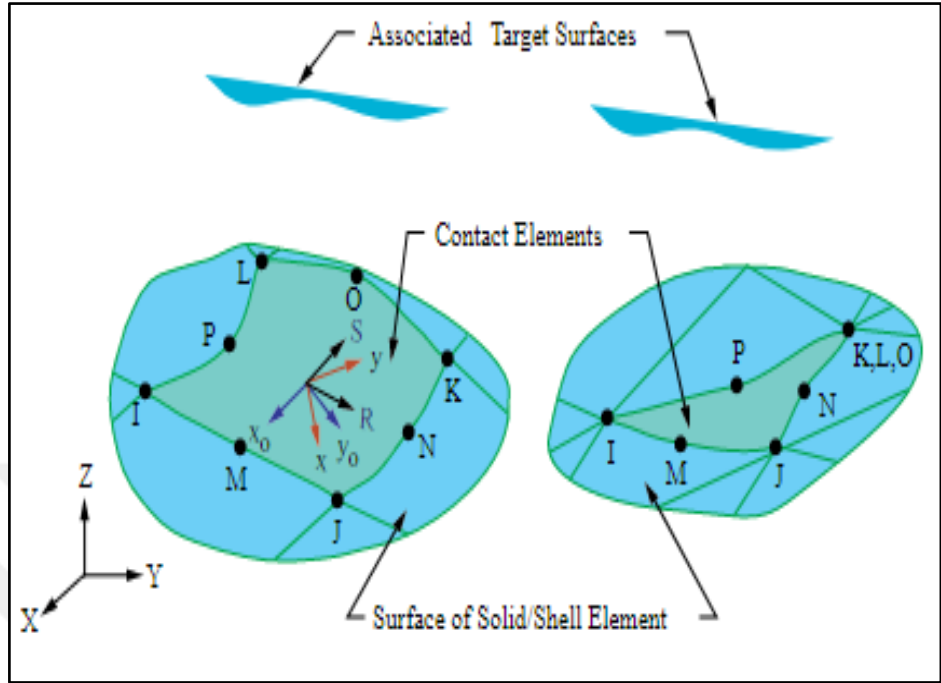
Şekil 3.19. SOLİD185 katı geometrisi (URL-2).

TARGE170 üç boyutlu (hedef) yüzey kontakt eleman ilişkilendirilmek için kullanıldı.



Şekil 3.20. TARGE170 katı geometrisi (URL-3).

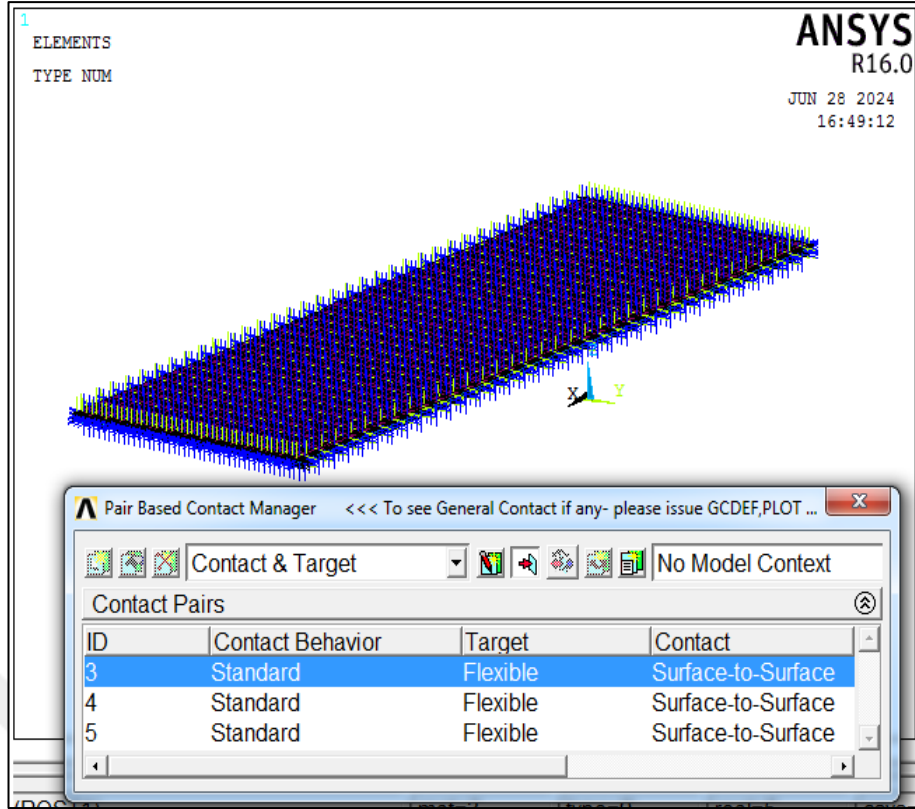
CONTA174 üç boyutlu yüzey (hedef) ve deforme edilebilir yüzey arasında kontakt ve kaymayı temsil etmek için kullanıldı.



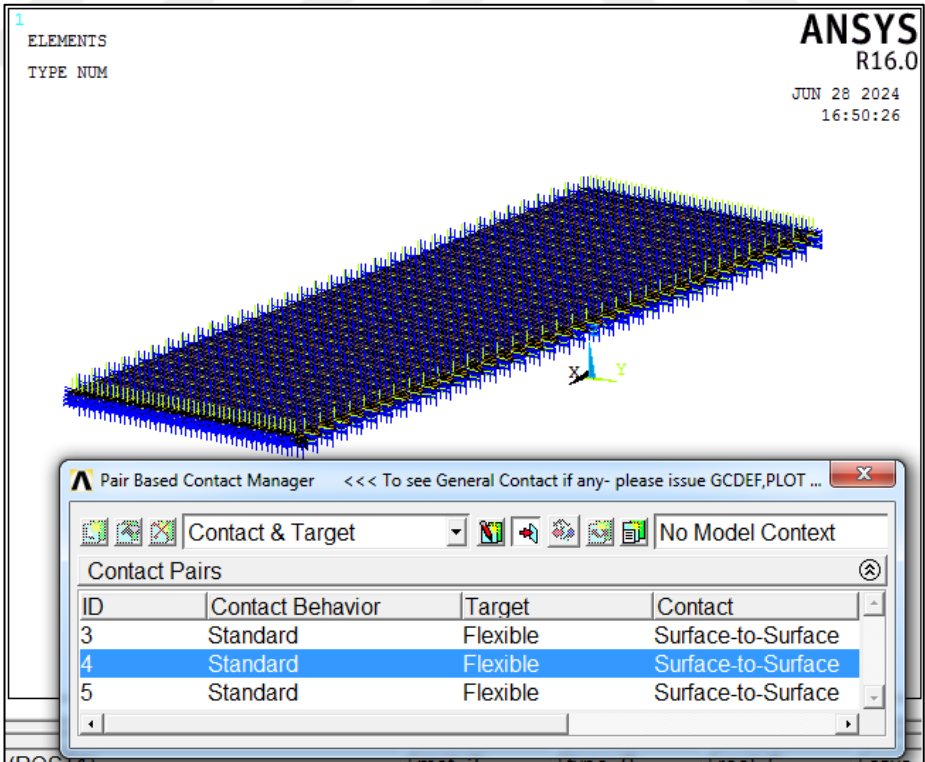
Şekil 3.21. CONTA174 katı geometrisi (URL-4).

Kızlar (Eyyubi) Cami anıt eserinin taşıma yolu güzergâhı esnek üstyapısı örneğinde sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analizi gerçekleştirildi. ANSYS programında modellenen üç boyutlu esnek yol üstyapısı kesitimiz 4 tane hacim (volumes), 24 tane alan (areas), 48 tane çubuk (lines), 26.496 tane düğüm (nodes) ve 41.592 tane elemandan oluşmaktadır.

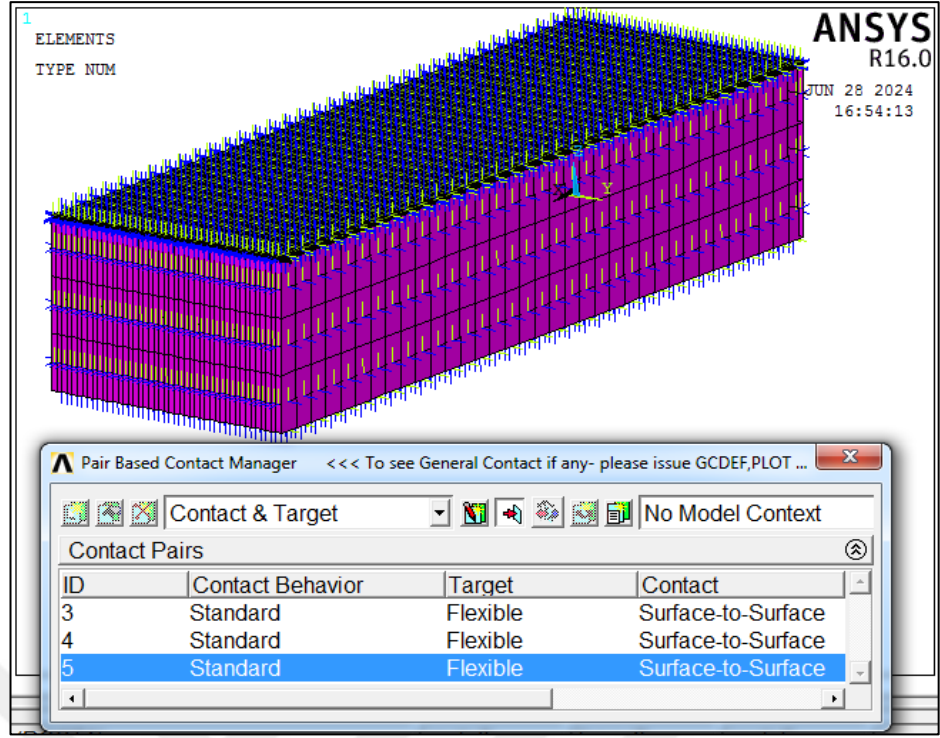
Kontakt parametreleri hakkındaki genel bilgiler Şekil 3.22, 3.23 ve 3.24 ve 3.25’ de yer almaktadır.



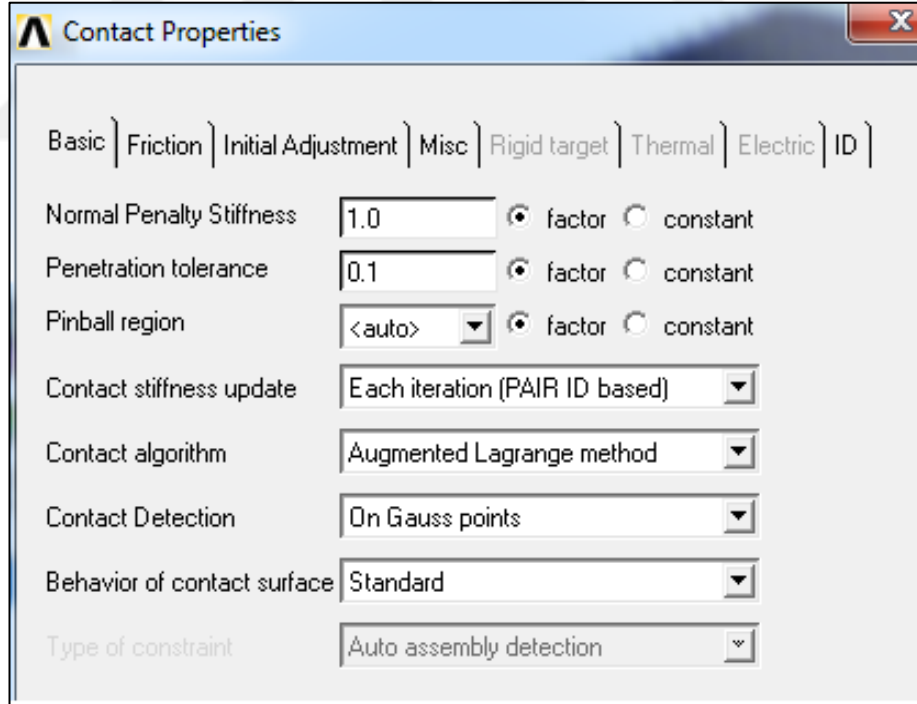
Şekil 3.22. Kontak mekanizmasının özellikleri-1.



Şekil 3.23. Kontak mekanizmasının özellikleri-2.



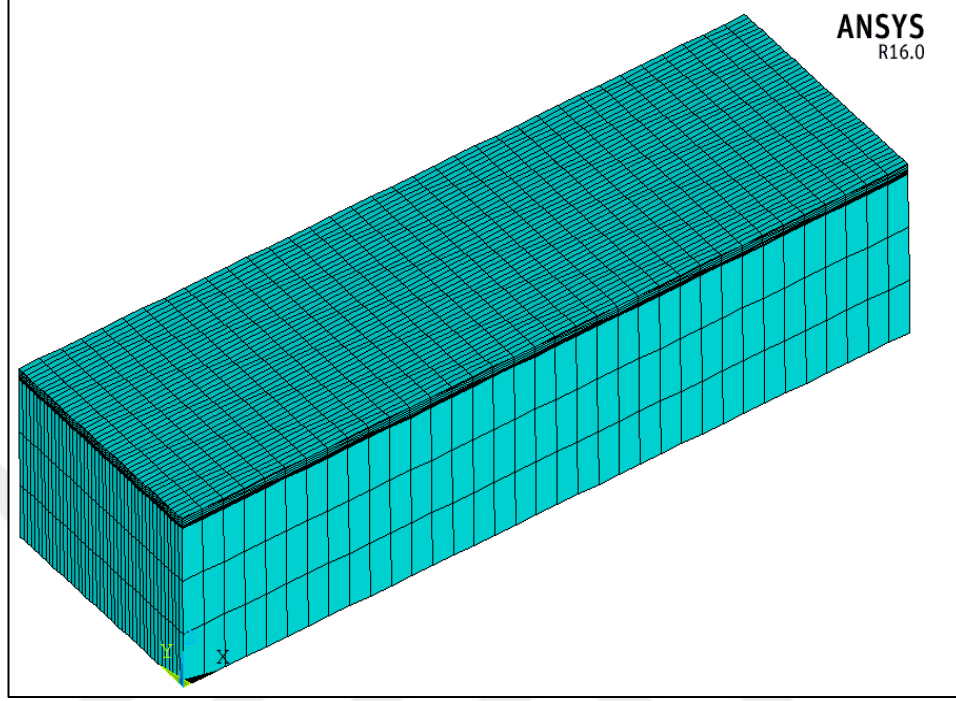
Şekil 3.24. Kontak mekanizmasının özellikleri-3.



Şekil 3.25. Kontak parametre değerleri ve özellikleri.

3.2.3. Sonlu elemanlara ayırma (Meshing)

3 boyutlu modelimizin mesh (ağ) hali aşağıdaki Şekil 3.26' de bulunmaktadır.



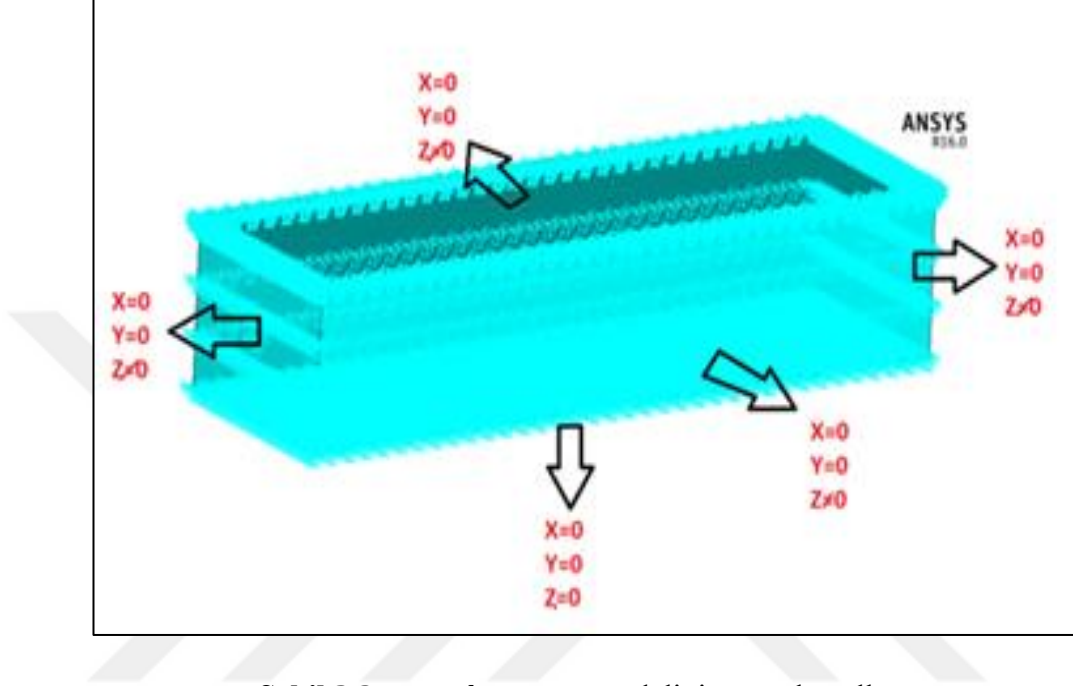
Şekil 3.26. Model meshi.

3.2.4. Tabakaların ara yüz temalarının modellenmesi

Bu çalışmanın amaçlarından biri de, esnek yol üst yapısı üzerindeki temas yüzeylerinin durumunun gerilmeler ve şekil değiştirmeler üzerindeki etkilerini incelemektir. ANSYS sonlu elemanlar yazılımında ara yüzey temaslar çift (pair) elemanlarıyla temsil edilir. "node – surface" veya "surface – surface" opsiyonları kullanılabilir. Bu çalışmada, yüzey – yüzey "surface – surface" temas opsiyonu kullanılmıştır. Yüzey – yüzey temas modellemek için, birkaç seçenek bulunmaktadır. Bunlar, “standard”, “rough”, “bonded”, “always bonded” ve “no separation”. Bu çalışmada, esnek yol üst yapısı tam bağlı ara yüzleri için “standard” atayarak modelleme yapılmıştır. Bu modelde, mevcut kaplamadaki tüm tabakaları yapışık olmayan “standard” olarak modellenmiştir (Ansys Ins, 2013).

3.2.5. Mesnetleme ve yükleme

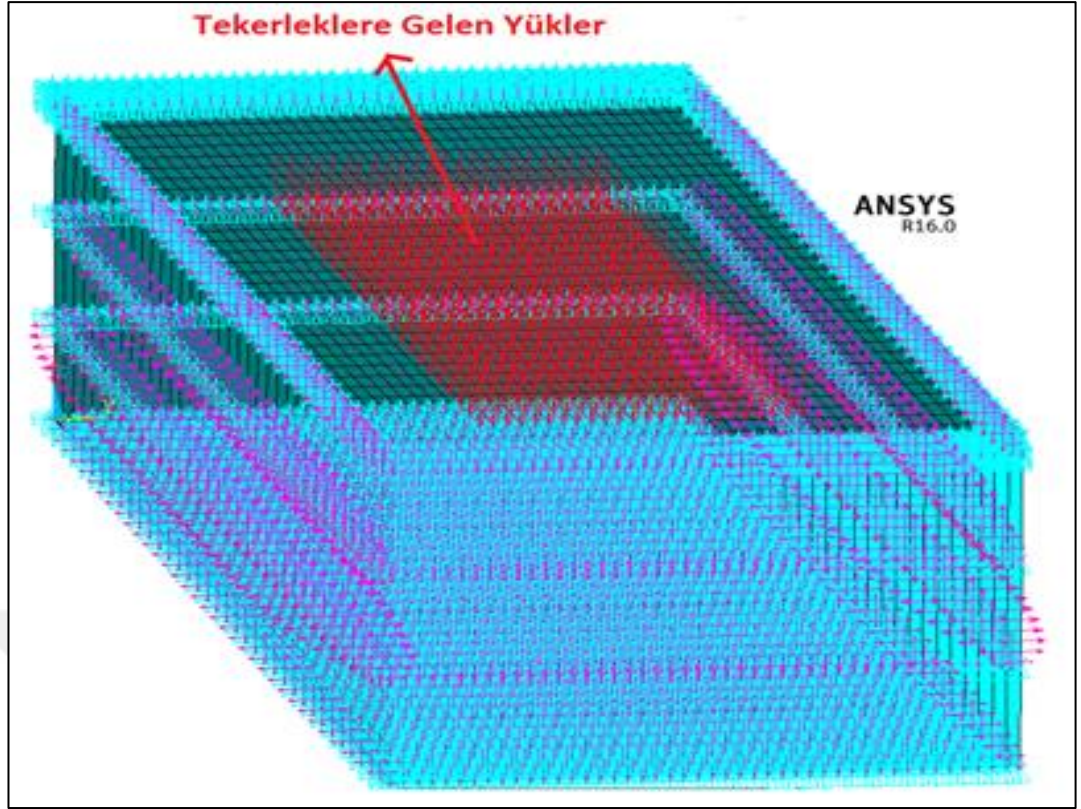
Bu modelin mesnetlenmesi en alttaki tabakanın tüm düğümler her doğrultuda ankastre tutturulurken, yanlardaki düğümler sadece Z yönünde serbest bırakılarak modellemede sınır koşulları belirlenmiştir.



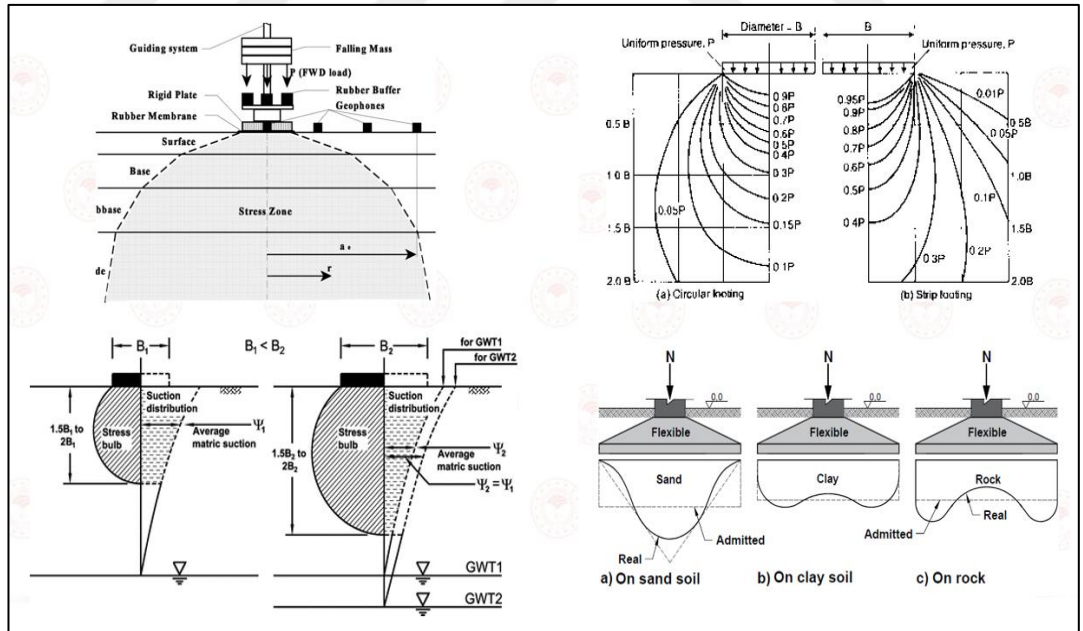
Şekil 3.27. Esnek üstyapı modelinin sınır koşulları.

3.2.6. Tekerleklere gelen yüklerin modele tanıtılması

Trafik yükünün esnek yol üst yapısı katmanlarına etkilerini inceleyebilmek için analizini yapacağımız üç boyutlu yol modeline SPMT aracına ait her bir tekerleğe gelen yükler ANSYS programında Şekil 3.28’ de gösterildiği gibi tanıtıldı.



Şekil 3.28. Tekerleklerle gelen yüklerin modele tanıtılması.



Şekil 3.29. Esnek üstyapı tabakalarında yükleme sonucu meydana gelen davranışlar (TAKK, 2018).

Kızlar (Eyyubi) Camii'ne ait bazı taşıma görüntüleri aşağıda Şekil 3.30, 3.31, 3.32, 3.33, 3.34 ve 3.35' de yer almaktadır.



Şekil 3.30. Kızlar (Eyyubi) Camii eski konumu.



Şekil 3.31. Kızlar (Eyyubi) Camii güney duvarları.



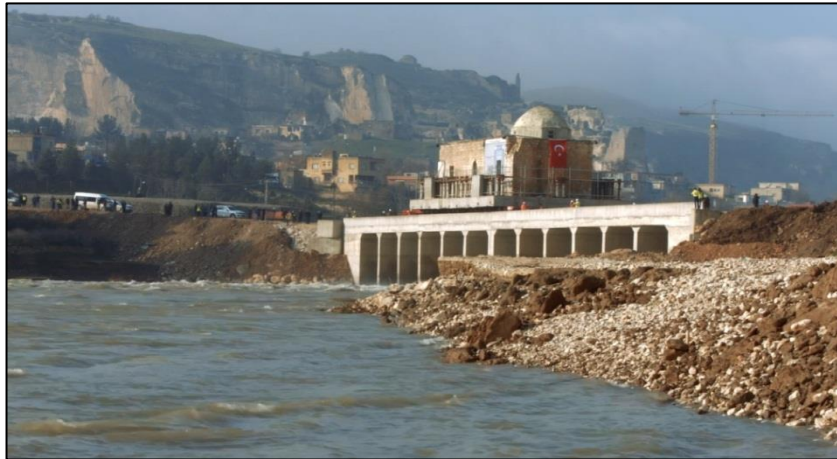
Şekil 3.32. Kızlar (Eyyubi) Camii taşıma görüntüleri.



Şekil 3.33. Kızlar (Eyyubi) Camii taşıma görüntüleri.



Şekil 3.34. Kızlar (Eyyubi) Camii taşıma görüntüleri.

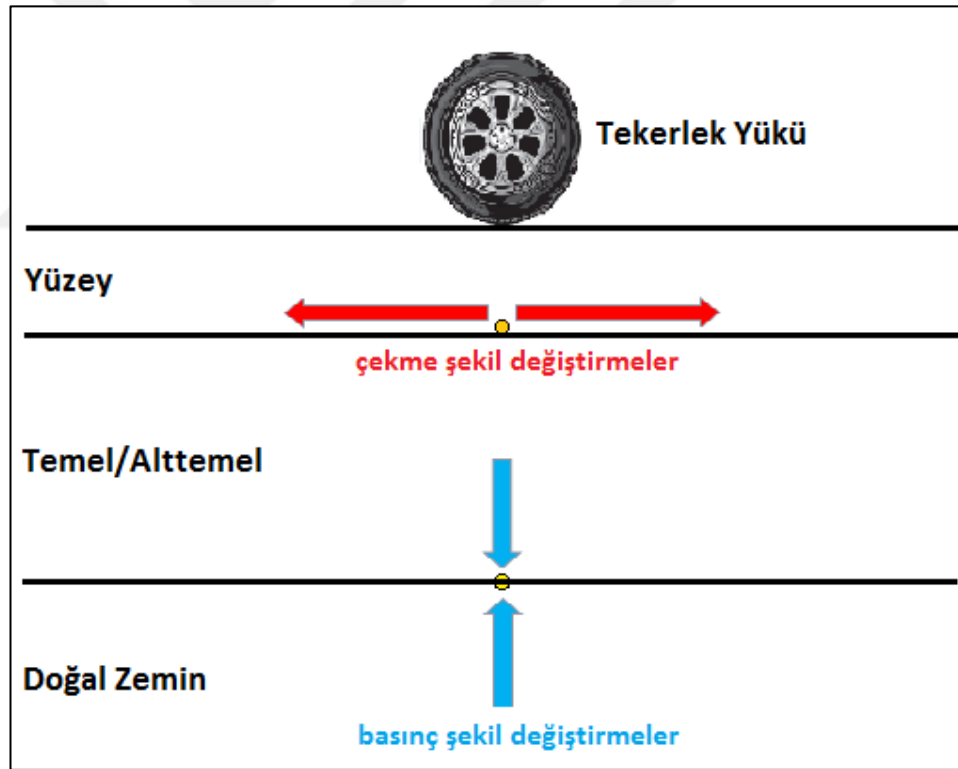


Şekil 3.35. Kızlar (Eyyubi) Camii taşıma görüntüleri.

4.ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Ülkemizde ulaştırma türleri yolcu ve yük taşımacılığı bakımından incelendiğinde, Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı (2022) resmi kaynağına göre (URL-5), Türkiye karayolu ile yurtiçi yolcu taşıma oranı %91,2 ve karayolu ile yurtiçi yük taşıma oranı ise %89,3' unu kapsamaktadır. Bu nedenle Karayollarında yer alan esnek üstyapının inşası iyi bir mühendislik araştırması ve hesabı gerektirmektedir.

Bu çalışmada, ANSYS bilgisayar programını kullanarak statik bir trafik dingil yükü ile yüklenmiş çift sathi kaplamalı esnek yol üst yapısının mekanik tepkilerini temsil edecek bir 3 boyutlu sonlu elemanlar geliştirilmiştir. İncelenen tepkiler, çift sathi kaplamanın altındaki mak. yatay çekme şekil değişimleri (tensile strain) ile doğal zemin ve alt temel arasındaki gerçekleşecek basınç şekil değiştirmeleridir (compressive strain). Şekil 4.1' de esnek üstyapıya ait bir tip kesit görülmektedir.



Şekil 4.1. Esnek üstyapı tip kesiti.

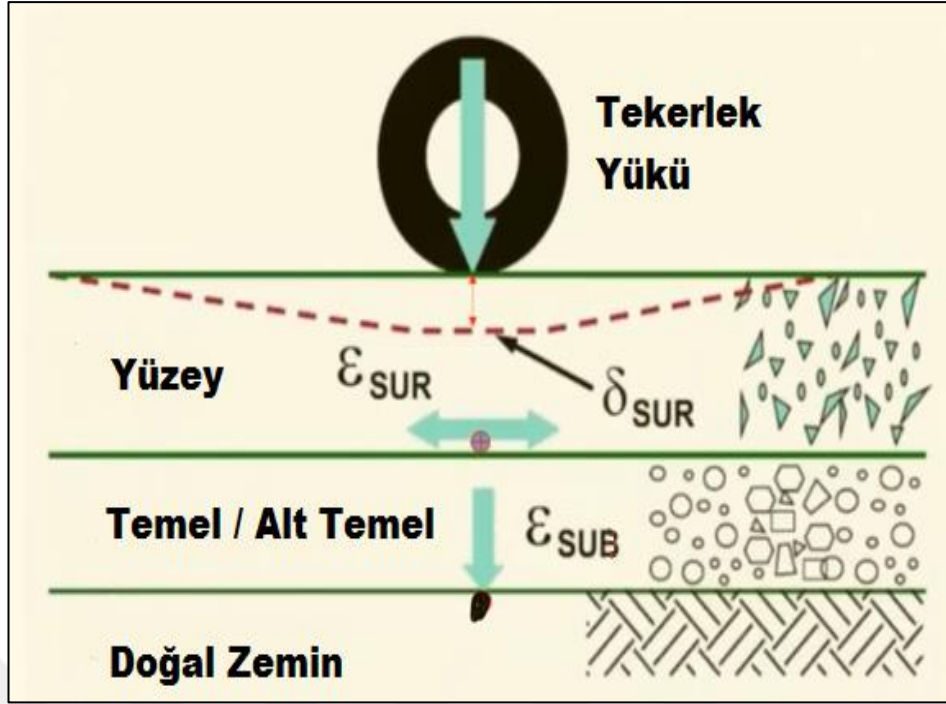
Bir tekerlek yükü etkisi altında gerilme davranışı aşağıya doğru yayılarak devam eder. Bir trapez şeklinde dağılım söz konusudur. Bu gerilme dağılımı en aşağıda en az hasar oluşacak şekilde (alt bölgede alan daha fazla, aşağıya doğru gidildikçe alan artıyor) tabakalı bir yapı söz konusudur. Bu tabaka sayısı ne kadar yüksek olursa ne kadar kalın

olursa aşıya gelen ykler yani gerilme davranışı, gerilme miktarları azalacaktır. Tabaka sayısının artması ekonomi ile de alakalı bir durumdur. Burada aslında detay olarak odaklandığımız kısım üstyapı dediğimiz kısımdır. Yani bu tabakaların yüksekliklerinin ne kadar olacağı, örneğin alt temel kalınlığının temel kalınlığının ne olacağı gibi. Bu kalınlıklar Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberinde yer alan kıstaslara, tabakaların taşıma kapasitelerine (taşıma kapasiteleri de Marshall deneyine göre belirlenir) göre belirlenir.

Ayrıca burada çevresel etkilerin maruz kaldığı bir coğrafyada sadece dingil yklerine bağı olarak bu kaplama tabakası tasarımı düşünülemez. Bu çevresel etkiler, termal etki, yağmur, kar vs. olabilir. Bu yağmur, kar etkisi taban zemininde veya temel düzeyinde olabilir. Bir takım su rezervleri meydana getirebilir. Eğer iyi bir kaplama yapılmazsa, geçirimli bir kaplama söz konusuysa buradan içeriye su sızabilir ve burada bir rezerv oluşturup kaplama tabakasını bozabilir.

Yine boşluklu bir yapı söz konusuysa donma-çözölme riski dediğimiz bir risk gerçekleşebilir. Yani bu yağmur suları sızdıktan sonra donma-çözölme yaparak kaplama tabakasını bozabilir. Dolayısıyla üstyapı tabaka kalınlıkları ne kadar doğru seçilirse, dizayn aşamasına (Marshall dizaynı, karışım dizaynı vs.), karışım tasarımına ne kadar uygun yapılırsa aslında hem dingil yklerine bağı olarak hem de çevresel etkilere (termal, yağmur, buz vs. etkisi) karşı yol muhafaza edilmiş olur. Aslında temel anlamda üstyapı analizinin, üstyapı tabaka tahkikinin yapılmasının bir gerekçesi de budur.

Yol yüzeyinde tekerlek ykü ile uygulanan basınç etkisiyle Şekil 4.2' de görüleceğı üzere kaplamada bir takım gerilme ve şekil değıştirmeler meydana gelmektedir.



Şekil 4.2. Yol kesitinde meydana gelen gerilme ve şekil değiştirmeler (Abut, 2020).

Tipik bir esnek üst yol yapısının tekerlek yükü altındaki davranışı incelendiğinde;

Yüzey altında meydana gelen çekme birim şekil değiştirme (ϵ_{SUR}), yol katmanında deformasyona sebep olmaktadır. Bu aksenal birim şekil değiştirme aslında yorulma tipi bir göçme durumudur.

Doğal zemin üzerindeki kalıcı bir deformasyon olan (ϵ_{SUB}), göçme durumu meydana getirebilecek bir kalıcı deformasyondur (Tekerlek İzi).

Yol kesitleri, ya yüzey tabakasında meydana gelen şekil değiştirmeden (ϵ_{SUR}) ya da doğal zemin üzerindeki ‘Tekerlek İzi’ adı verilen kalıcı şekil değiştirmeden (ϵ_{SUB}) göçmektedir. Bunlardan herhangi birisi ya da her ikisi de kritik olabilir. Bunlar göçtüğü zaman kaplamada tekerlek izi deformasyonu veya yorulma dediğimiz hasarlar meydana gelmektedir.

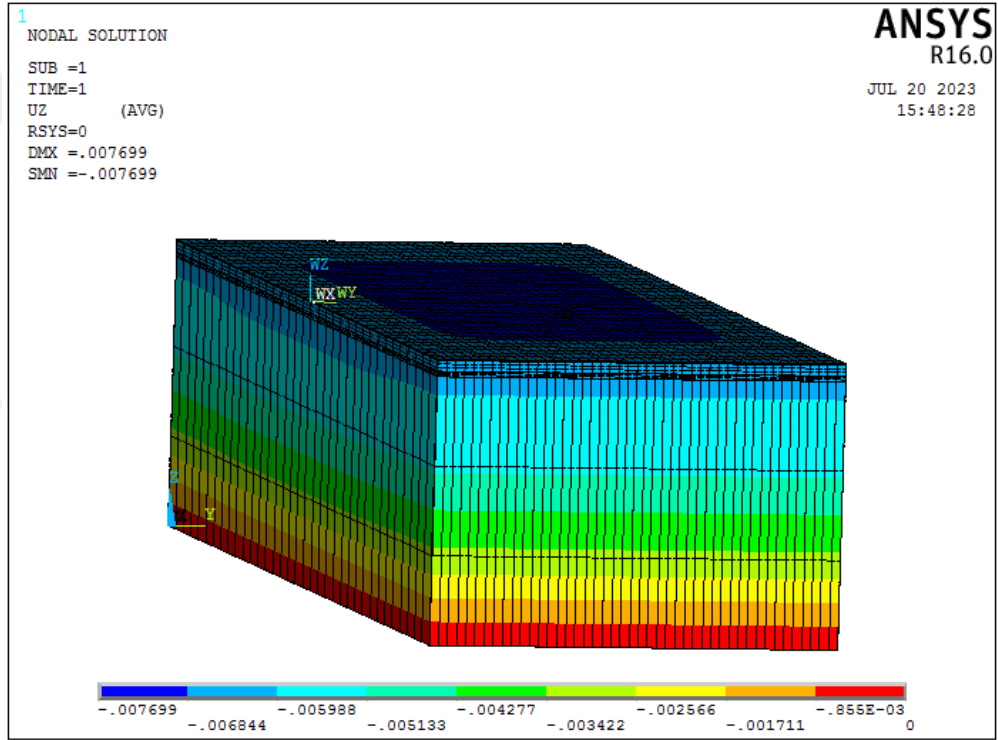
ϵ_{SUR} = Yüzeyden kaynaklı aksenal şekil değiştirme (yorulma hasarı)

ϵ_{SUB} = Taban zemini kaynaklı basınç kalıcı deformasyon (tekerlek izi hasarı)

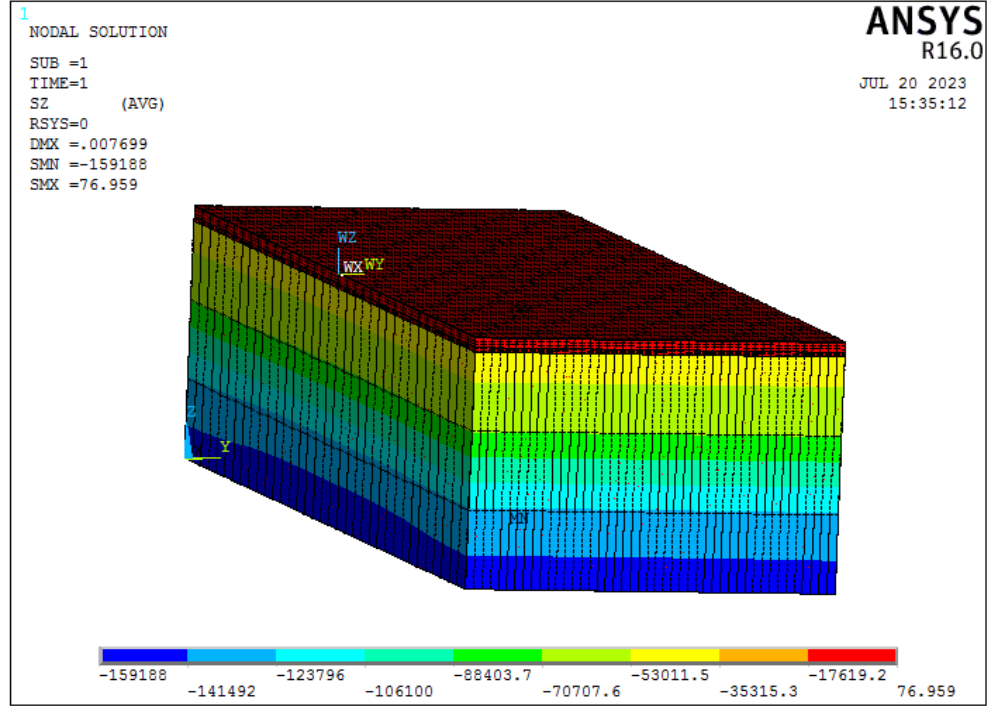
İşte bu iki kritik unsuru (ϵ_{SUR} , ϵ_{SUB}) veren birim şekil değiştirmelere bakılarak, sonlu elemanlar yöntemi metodu kullanılmasıyla yol tabaka kalınlıklarının uygunlukları

“Karayolları Esnek Üst Yapı Projelendirme Rehberi” doğrultusunda incelenebilmektedir.

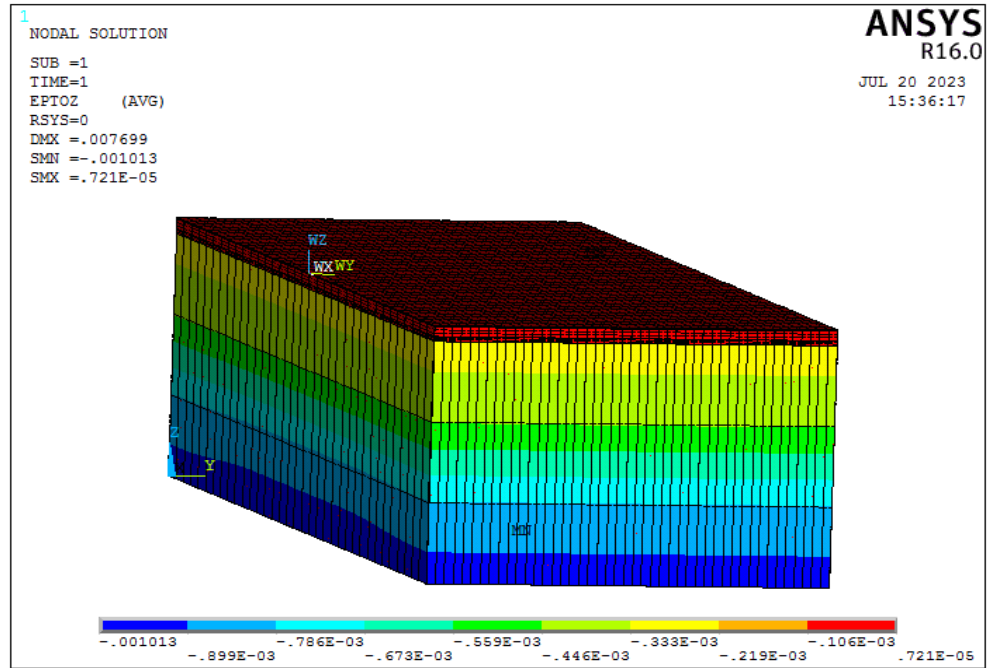
Modelimizde kritik gerilmeleri, esnek üst yapı tabaka kalınlıkları, elastisite modülü, kaplama tabakaları arasındaki ara yüz bağ koşulu için hesaplama yapıldı. Tüm bu parametrelerdeki değişimler göz önüne alındığında, esnek üst yapıyı oluşturan yol katmanlarının tabakanın altındaki gerilme ve şekil değiştirmeler aşağıdaki kontur diyagramlarında verilmektedir. Şekillerdeki renkler, farklı gerilme seviyelerini ifade eder. Örneğin, kırmızı renk yüksek (çekme +) gerilmeyi ifade ederken mavi renk en düşük (basınç -) gerilmeyi ifade etmektedir.



Şekil 4.3. (Z) yönündeki deformasyonlar.

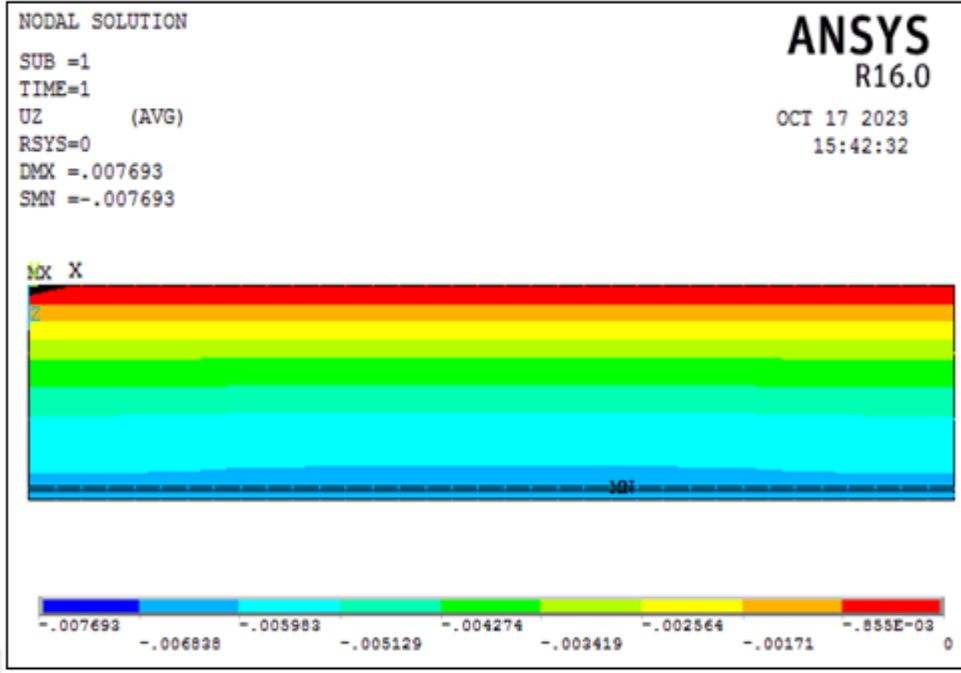


Şekil 4.4. (Z) yönündeki gerilmeler.

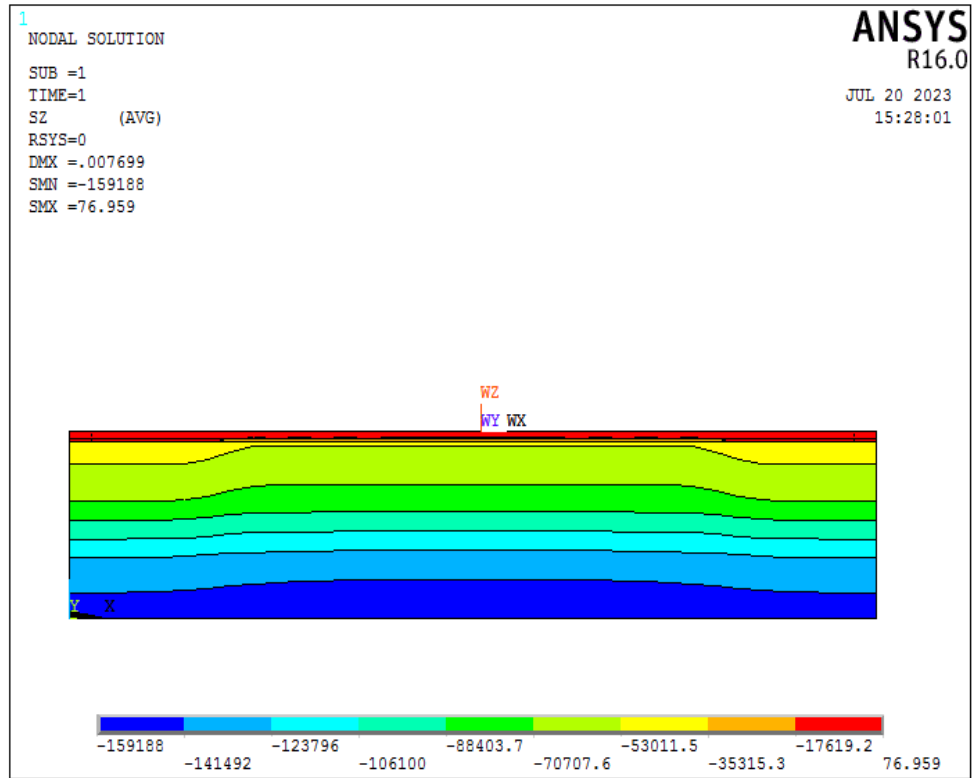


Şekil 4.5. (Z) yönündeki şekil değiştirmeler.

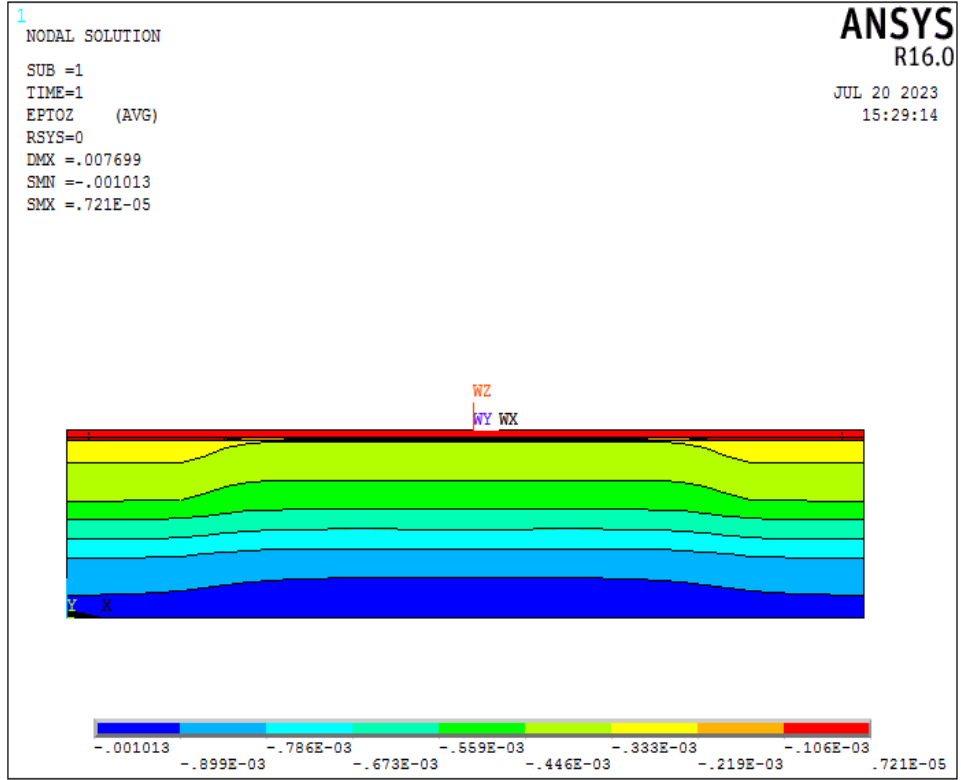
Trafik yükü, seçtiğimiz kesite ait üç boyutlu yol üst yapısı katmanlarına uygulandığı zaman karşımıza çıkan analiz sonuçları x, y ve z doğrultusu boyunca çekme ve basınç gerilmeleri, deformasyonlar ve şekil değiştirmeler aşağıdaki kontur diyagramlarında gösterilmektedir.



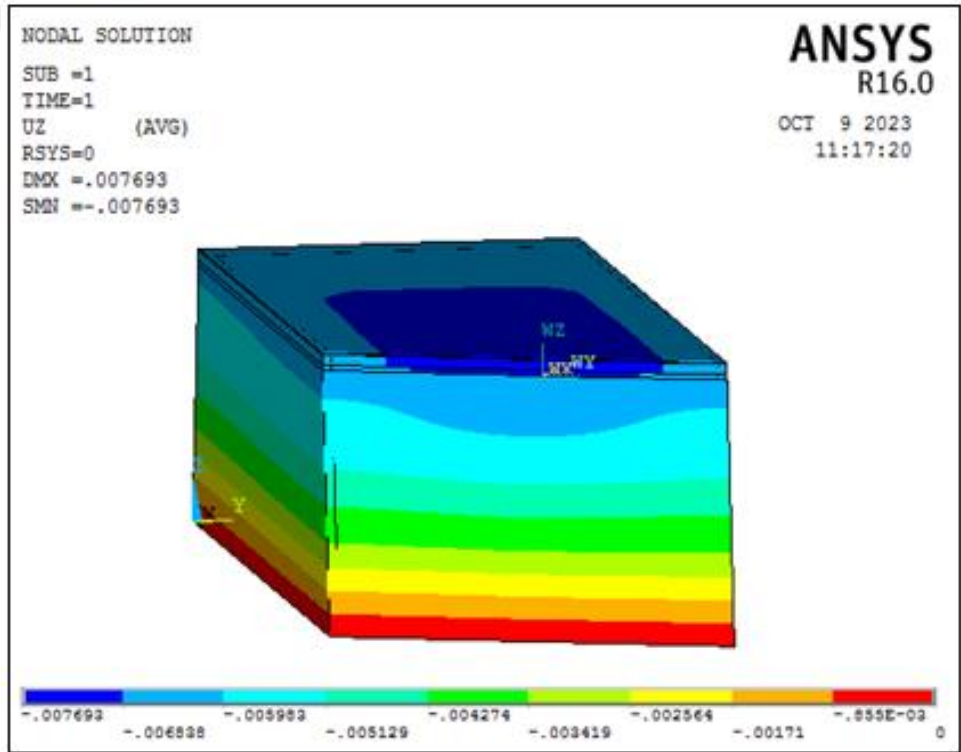
Şekil 4.6. X-Z doğrultusunda boyuna Z yönünde düşey deformasyonlar.



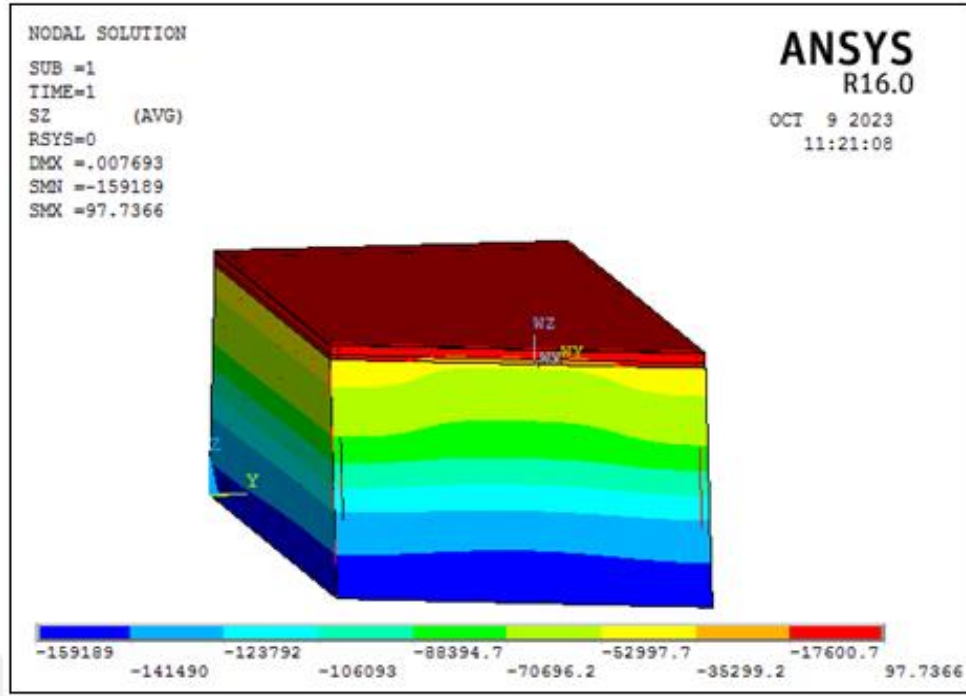
Şekil 4.7. X-Z doğrultusunda boyuna Z yönünde düşey gerilme.



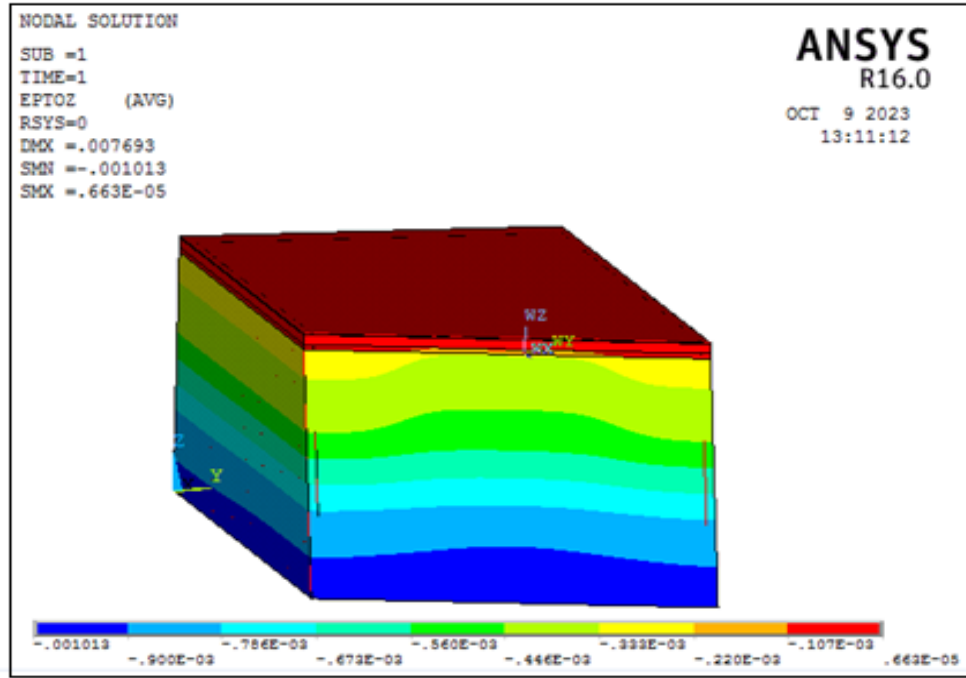
Şekil 4.8. X-Z doğrultusunda birim şekil değiştirme.



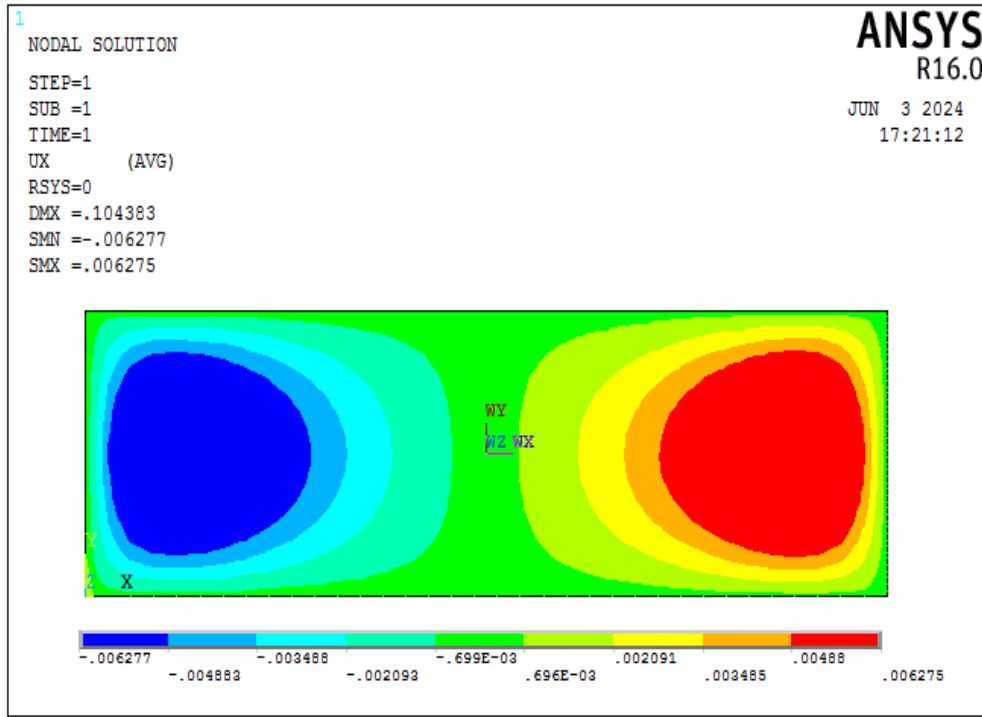
Şekil 4.9. Y-Z doğrultusunda Z yönünde deformasyonlar.



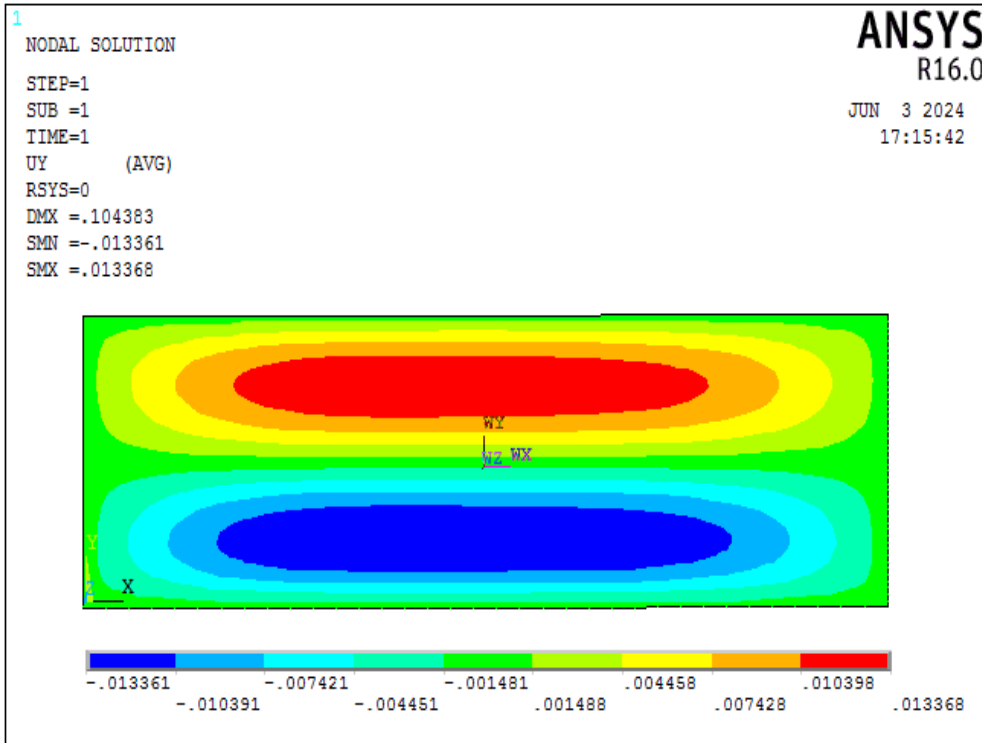
Şekil 4.10. Y-Z doğrultusunda Z yönünde gerilmeler.



Şekil 4.11. Y-Z doğrultusunda Z yönünde birim şekil değiştirme.



Şekil 4.12. X-Y doğrultusunda X yönünde deformasyonlar (boyuna deformasyonlar)



Şekil 4.13. X-Y doğrultusunda Y yönünde deformasyonlar (enine deformasyonlar)

Analiz sonuçları incelendiğinde boyuna (X-Z doğrultusu) pozisyonunda Z yönündeki düşey deformasyon (Δ_z) için maksimum $0.7693 \text{ cm} - 0.855 \cdot 10^{-1} \text{ cm}$ değer skalasına, Z

yönündeki gerilme (σ_z) için maksimum -17619.2 Pa-76.959 Pa değer skalasına ve birim şekil değiştirme (ϵ_z) için maksimum $-0.106.10^{-3}$ - $0.721.10^{-5}$ değer skalasına ulaşılmıştır.

Analiz sonuç değerleri incelendiğinde enine (Y-Z doğrultusu) çekme gerilme ve şekil değiştirmenin boyuna doğrultudakinden (Z-doğrultusu) daha kritik olduğu anlaşılmıştır. Bu durumda Y-Z doğrultusundaki Z yönündeki düşey deformasyon (Δ_z) için maksimum 0.76 cm-0.09 cm değer skalasına, Z yönündeki gerilme (σ_z) için maksimum -17600 Pa-97.7366 Pa değer skalasına ve birim şekil değiştirme (ϵ_z) için maksimum $-0.107.10^{-3}$ - $0.663.10^{-5}$ değer skalasına ulaşılmıştır.

Çekme gerilmeleri, dingil yükünün uygulama yeri şekil değiştirmeden daha duyarlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca dingil yükünün uygulama yerine bağlı olarak Y-Z / X-Z doğrultularındaki Z yönündeki düşey deformasyon (Δ_z) için %1-5 aralığında, gerilme (σ_z) büyüklüğünün değişimi %1-26,25 aralığında ve birim şekil değiştirme (ϵ_z) için %1-8,7 değişim görülmüştür.

Analiz sonuçları incelendiğinde X-Y doğrultusunda X yönündeki deformasyon (Δ_x) için maksimum 0.498 cm-0.63 cm ve X-Y doğrultusunda Y yönündeki deformasyon (Δ_y) için maksimum 1.04 cm-1.34 cm değer skalasına, ulaşılmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sonlu eleman programı olan ANSYS' den yararlanarak bu çalışmanın amacına ulaşabilmek için, öncelikle 3B (3 boyutlu) sonlu elemanlar modeli tanımlanmıştır. Esnek üstyapı yol tabakalarını oluşturan malzeme karakteristik parametreleri, 2349 ton (SPMT dâhil) ağırlığındaki Kızlar (Eyyubi) Cami Anıt Eserinin “Kendinden Tahrikli Motorlu Taşıyıcı (SPMT)” dış yükü ve analiz durumları simüle edilerek esnek üstyapı yol katmanlarında oluşacak gerilme ve şekil değiştirmelerin davranışı ile ilgili fikir sahibi olunmuştur.

İncelediğimiz 3 boyutlu esnek yol üstyapısı modelinde tekerlek izinin bulunduğu lokasyonda deformasyon (oturma) miktarı, gerilme, birim şekil değiştirme değerleri 3 boyutlu doğrultularda ele alınmıştır.

Modelimizde birden fazla tekerleği olan ve ağır bir vasıta olarak sınıflandırılan treylerin yol tabakalarına etkisinin Z yönündeki deformasyon miktarının üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analiz sonucu maksimum 0.7 cm olduğu bulunmuştur. Bu sonuç değeri Karayolları Esnek Üst Yapı Projelendirme Rehberine göre “Sathi Kaplamalı Üst Yapılardaki Yüzey Bozuklukları-Tekerlek İzinde Oturmaların Derecelendirilmesi ve Onarımı” başlığına göre değerlendirildiğinde, bozulma şiddeti hafif mertebesinde olmaktadır. Onarım çalışması yapılması durumunda ise “Bozuklukların gelişimi sürekli gözlemlenmelidir” ifadesi yer almaktadır.

“Sathi Kaplamalı Üst Yapılardaki Yüzey Bozuklukları-Lokal Oturmaların ve Kabarmaların Derecelendirilmesi ve Onarımı” başlığına göre değerlendirildiğinde, bozulma şiddeti hafif mertebesinde olmaktadır. Onarım çalışması yapılması durumunda ise “Bozuklukların gelişimi sürekli gözlemlenmelidir” ifadesi yer almaktadır.

Modelimizde birden fazla tekerleği olan ve ağır bir vasıta olarak sınıflandırılan treylerin yol tabakalarına etkisinin X yönündeki deformasyon miktarının üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analiz sonucu maksimum 0.63 cm olduğu bulunmuştur. Bu sonuç değeri Karayolları Esnek Üst Yapı Projelendirme Rehberine göre “Sathi Kaplamalı Üst Yapılardaki Yüzey Bozuklukları-Boyuna Çatlakların Derecelendirilmesi ve Onarımı” başlığına göre değerlendirildiğinde, bozulma şiddeti

orta mertebesinde olmaktadır. Onarım çalışması yapılması durumunda ise “çatlaklar, gerekirse genişletilerek uygun bir dolgu malzemesi ile doldurulmalıdır veya çatlaklı kesimde sathi kaplama yenilenmelidir” ifadesi yer almaktadır.

Modelimizde birden fazla tekerleği olan ve ağır bir vasıta olarak sınıflandırılan treylerin yol tabakalarına etkisinin Y yönündeki deformasyon miktarının üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analiz sonucu maksimum 1.34 cm olduğu bulunmuştur. Bu sonuç değeri Karayolları Esnek Üst Yapı Projelendirme Rehberine göre “Sathi Kaplamalı Üst Yapılardaki Yüzey Bozuklukları-Enine Çatlakların Derecelendirilmesi ve Onarımı” başlığına göre değerlendirildiğinde, bozulma şiddeti orta mertebesinde olmaktadır. Onarım çalışması yapılması durumunda ise “çatlaklar, gerekirse genişletilerek uygun bir dolgu malzemesi ile doldurulmalıdır” ifadesi yer almaktadır.

Mühendislik alanında yapılan çalışmalar incelendiğinde sonuca ulaşmanın zor ve karışık olduğu problemler sonlu elemanlar metodu ile modellenerek sonuca daha az zamanda ulaşılabilir. Bu açıdan sonlu elemanlar metodunun yol mühendisliğinin farklı alanlarındaki problemlerin analiz ve çözümlemesinde de kullanılması faydalı olacaktır. Bununla birlikte yapılan çalışmalar sonucunda sonlu elemanlar metodu kullanılan bilgisayar programlarında problemlerin başarılı bir şekilde çözülebilmesi için irdelenen problemin iyi bir şekilde modellenmesine, yerinde yapılan arazi deneylerinden elde edilen malzeme parametrelerine, model analiz türünün teorik bilgilerine ve sonlu elemanlar yöntemine hâkim olup, çıkan sonuçları bilimsel olarak yorumlayabilmekte saklıdır.

Öneriler;

3 eksenli laboratuvar deneyi yardımıyla her bir yol katmanına ait malzeme parametreleri (kohezyon, içsel sürtünme açısı, G/Gmax) elde edilerek lineer olmayan sonlu elemanlar metodu yöntemiyle de analiz gerçekleştirilebilir.

Bu tez çalışmasında analiz sonucunda esnek yol üstyapısında bulduğumuz deformasyon değerleri ile esnek yol üst yapısı yerinde yapılacak inceleme ile deformasyonun doğruluğu ölçüm aletleri yardımıyla kontrol edilmelidir.

KAYNAKLAR

- Abut, Y., 2020. Karayolu Üst Yapı Hesaplamaları, Yalova Üniversitesi, Yalova.
- ANSYS, I., 2013. ANSYS Mechanical APDL Element Reference (Vol. 15317), Canonsburg.
- Asphalt Institute. 1989. The Asphalt Handbook.Manuel Series No:4(MS-4). Edition.
- Coşgun, T., 1994. Dingil Yüklerinin Karayolu Üstyapısının Projelendirilmesine Etkisinin Değerlendirilmesi.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü-Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü, 2017. Anıt Eserler Taşıma Yolu Güzergahı Projesel Veriler, Ankara.
- Gallego, E., Goodey, R.J., Ayuga, F., Brown, C.J., 2004. Some practical features in modelling silos with finite elements. An ASABE Meeting Presentation Paper Number: 044150.
- Huang, Y.H., 2004. Pavement Analysis and Design (2nd ed.) New Jersey: Pearson Pretice Hall.
- Jeo.Etüt R., 2017. Anıt Eserler Taşıma Yolu Güzergahı 2.Etap Jeolojik-Jeoteknik Etüt Raporu Cilt 1.
- Karaşahin, M., Gürer, C., 2007.Sathi Kaplamalarının Performansına Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi ve Bir Performans Modeli Geliştirilmesi. Karayolları Genel Müdürlüğüne Verilmiş Brifing Notları.
- Kasımzade, A. A., 2011. Sonlu Elemanlar Metodu Temelleri ve Yapı Mekaniğinde Uygulamaları. Birsan Yayınevi, İstanbul.
- KGM, 2008. Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- KGM, 2013. Karayolu Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- KGM, 2021. Toprak ve Stabilizasyon Laboratuvar El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara
- Li, H.Y. 1994. Analysis of steel silo structures on discrete supports. Department of Civil Engineering & Building Science, The University of Edinburgh, Ph.D. Thesis.
- Sarioğlu, O., 2019. Sathi Kaplamalı Yolların Yapısal Performansının Değerlendirilmesi, Süleyman Demirel üniversitesi, Isparta.
- TAKK, 2018. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Kalite Kontrol Dairesi, Ankara.

Tjan A., Fung C., 2005. Determination Of Equivalent Axle Load Factor Of Trailer With Multiple Axles On Flexible Pavement Structures, Indonesia.

Asphalt Layer Interface Bonding, Kansas State University, Manhattan, Kansas.

Yol Üstyapısı Tek. R., 2017. Anıt Eserler Taşıma Yolu Güzergahı 2.Etap Yol Üstyapı Teknik Raporu.

URL-1 < <https://www.afad.gov.tr/turkiye-deprem-tehlike-haritasi> >, Erişim tarihi: 24.05.2024.

URL-2

<https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SOLID185.html>, Erişim tarihi: 15.02.2024.

URL-3

<https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_TARGE170.html>, Erişim tarihi: 15.02.2024.

URL-4

<https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_CONTA174.html>, Erişim tarihi: 15.02.2024.

URL-5 <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/ulastirma-turlerine-gore-tasinan-yolcu-ve-yuk-miktari-i-85789#:~:text=De%C4%9Ferlendirme%3A,48%25%20olmu%C5%9Ftur%5Bi%5D_>, Erişim tarihi: 20.05.2024.

URL-6 < <https://www.sondakika.com/guncel/haber-ordu-da-tunel-cikisinda-heyelan-sonucu-yol-coktu-16105123/> > Erişim tarihi: 24.05.2024.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Tuğba ELVAN

Adres : Ankara

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
2005-2009

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim
Dalı, 2022-2024

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Limak-Türkerler Adi Ortaklığı, Ankara Keçiören Metrosu / Yaz Stajı
2. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü / İnşaat Mühendisi (2012-devam)

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Kongrelerde Sunulan Makaleler

1. Elvan, T. ve Tosun B., H., 2024. Taşıma Yolu Güzergahı Esnek Üstyapısı
Örneğinde Sonlu Elemanlar Yöntemini Kullanarak İnceleme ve Uygulamaları,
UBCAK 13.Uluslararası Bilimsel Çalışmalar Kongresi.