



**YOL TEMEL VE ALTTEMEL TABAKALARINDA KULLANILAN
ÇELİKHANE CÜRUFUNUN DİNAMİK PERFORMANSININ SONLU
ELEMENLAR ANALİZİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ**

Hüseyin KARADAĞ

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2020

Hüseyin KARADAĞ tarafından hazırlanan “YOL TEMEL VE ALTTEMEL TABAKALARINDA KULLANILAN ÇELİKHANE CÜRUFUNUN DİNAMİK PERFORMANSININ SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Seyhan FIRAT

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Gülgün YILMAZ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Eskişehir Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Berna UNUTMAZ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 09/01/2020

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

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Hüseyin KARADAĞ

09/01/2020

YOL TEMEL VE ALTTEMEL TABAKALARINDA KULLANILAN ÇELİKHANE
CÜRUFUNUN DİNAMİK PERFORMANSININ SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE
DEĞERLENDİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Hüseyin KARADAĞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2020

ÖZET

Endüstriyel üretim sonucu oluşan atıkların geri kazanımı veya farklı sektörlerde kullanılmak suretiyle değerlendirilmesi doğal kaynakların korunması adına günümüz teknolojileri için önemli bir konu olmuştur. 2014 yılı verilerine göre Türkiye’de çelikhane cürufunun ancak %41’i geri dönüştürülmektedir. Geri kalan çelikhane cürufu düzensiz depolanmaktadır. Bu çalışmada çelikhane cürufunun yol üst yapısında temel ve alttemel malzemesi olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında kontrol kesiti olarak kırmataş temel ve kırmataş alttemelden oluşan yol kesiti analiz edilmiştir. Çelikhane cürufu ise temel ve alttemelde olmak üzere birlikte ve ayrı ayrı kullanılmıştır. Toplam dört farklı yol kesitinin 400 kPa yük altında, 20 111 tekrarlı yükleme yapılarak iki boyutlu sonlu elemanlar metodu ile eksenel simetrik analizleri gerçekleştirilmiştir. Cüruf malzemesine ait dinamik kayma modülünü elde etmek için rezonant kolon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda yol temel ve alttemel tabakalarında çelikhane cürufunun doğal agrega yerine kullanılabileceği belirlenmiştir. Kırmataş temel ve cüruf alttemelden oluşan yol kesiti (KC) ise düşey deformasyonlar açısından en iyi sonucu vermiştir. Çalışma kapsamında ayrıca esnek yol üst yapılarında; yükleme sayısı ile kalıcı deformasyon arasındaki ilişki de incelenmiştir. Her tabakanın ayrı ayrı deformasyonlarının belirlenerek toplanması sonucu oluşan toplam deformasyonların bulunması yerine, bu çalışmada sonlu elemanlar metodu ile tabakaların birbirleriyle etkileşimi de dikkate alınarak yol yüzeyinin toplam deformasyonu yaklaşımı ortaya konulmuştur. Düşey deformasyon ile yükleme sayısı yarı logaritmik grafiği çizildiğinde, kalıcı deformasyonların farklı eğimlere sahip iki parçalı bir doğru olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 91105

Anahtar Kelimeler : Çelikhane cürufu, Sonlu elemanlar, Esnek yol üst yapısı, Temel, Alttemel

Sayfa Adedi : 116

Danışman : Prof. Dr. Seyhan FIRAT

ASSESSMENT OF DYNAMIC PERFORMANCE OF STEEL SLAG USED IN ROAD
BASE AND SUBBASE BY USING FINITE ELEMENT ANALYSIS
(PhD Thesis)

Hüseyin KARADAĞ

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
December 2019

ABSTRACT

One of the important topic for the current technologies is to protect the natural resources by using industrial waste materials that are produced industrial manufacturing. According to 2014 statistics, only 41% of steel slag is recycled in Turkey. The remaining amount of steel slag produced in Turkey is stored in wild life. In this study, the utilization of steel slag in road base and subbase layers are evaluated by using finite element method. Deformation behaviour of steel slag is compared with crushed stone. Four different road cross-sections are analysed by using axisymmetric finite element method. Analyses are carried out under 400 kPa wheel pressure for 20 111 cyclic loads. Steel slag deformation parameter was obtained by carrying out resonant column tests. The results show that the steel slag can be used in road base and subbase layers instead of natural aggregate. The minimum vertical deformation was obtained in the KC cross-section where the steel slag is used in the subbase layer. In addition, relation of vertical deformation of flexible pavement-load cycle was evaluated. Instead of deformation characteristic of each layer used in road section, this study is focusing on total deformation/rutting of road section for consideration of layers' interaction behavior. The permanent deformation against load cycle for four multilayered road cross sections were drawn in semi logarithmic graphs. The result shows that the vertical deformation-load cycle graph is consisting of two linear part but have different slope and different breaking point of load cycles for each cross-section.

Science Code : 91105
Key Words : Steel slag, Finite element, Flexible pavement, Base, Subbase
Page Number : 116
Supervisor : Prof. Dr. Seyhan FIRAT

TEŞEKKÜR

Son derece uzun ve sıkıntılı geçen bu süreçte bana karşı sabrını ve inancını bir kez bile yitirmeyen, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan, değerli zamanlarından çaldığım eşim Zeynep KARADAĞ ile çocuklarım Melike Ahsen KARADAĞ ve Ömer Faruk KARADAĞ'a çok teşekkür ederim. Çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen gerek akademik gerekse de diğer konularda bilgi, birikim ve tecrübelerinden faydalandığım, bana bir hocanın da ötesinde bir aile yakını gibi davranan danışmanım Prof. Dr. Seyhan FIRAT'a ve tez çalışmam boyunca desteğini sürekli yanımda hissettiğim, engin bilgilerinden sürekli istifade ettiğim Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK'a müteşekkîr ve minnettarım. Rezonant kolon deneylerinin gerçekleştirilmesinde desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Gülgün YILMAZ'a ve akademik çalışmam boyunca bana maddî ve manevî destek veren çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KONU KAPSAM VE LİTERATÜR ÖZETİ	5
2.1. Tarih Boyunca Yollar ve Kullanılan Malzemeler	5
2.1. Yol Üst Yapısının Sonlu Elemanlarla Analizi.....	17
3. DEMİR-ÇELİK SEKTÖRÜ VE ÇELİK CÜRUFU	23
3.1. Çelikhane Cürufu.....	24
3.2. Çelikhane Cürufu Kimyasal Özellikleri.....	27
3.3. Çelikhane Cürufunun Toksidite Özellikleri	29
3.4. Çelikhane Cürufu Fiziksel Özellikleri	31
3.5. Çelikhane Cürufu Mekanik Özellikleri.....	33
3.6. Çelikhane Cürufu Kullanım Alanları.....	34
4. ESNEK YOL ÜST YAPISI	37
4.1. Yol Üst Yapısında Deformasyonlar	40
4.2. Malzeme Rezilient Davranışı	43
4.2.1. Rezilient modüle etki eden faktörler	43
4.2.2. Malzeme esneklik/rezilient modülleri.....	43
4.3. Malzeme Plastik Davranışı.....	45

	Sayfa
4.4. Malzeme Bünye Modeli	48
5. MALZEME VE YÖNTEM	51
5.1. Malzeme	51
5.1.1. Malzeme fiziksel özellikleri	52
5.1.2. Malzeme mekanik özellikler	64
5.2. Yöntem.....	77
5.2.1. 2D Fiziksel ve sayısal model	79
6. SAYISAL ANALİZ VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	85
6.1. Kesit Analizleri.....	86
6.1.1. Eksenel simetrik analizler.....	88
6.1.2. Düzlem deformasyon analizleri	91
6.2. Çelikhane Cürufunun Performansı	94
6.3. Kalıcı Deformasyonlar	95
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	101
KAYNAKLAR	105
ÖZGEÇMİŞ.....	115

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Çelikhane cürufu atık ve geri kazanım miktarları	25
Çizelge 3.2. BOF cürufu kimyasal kompozisyonu	28
Çizelge 3.3. EAO cürufu kimyasal kompozisyonu	28
Çizelge 3.4. Cürufların tipik kimyasal bileşenleri	28
Çizelge 3.5. Çelikhane cürufunun kimyasal kompozisyonu	29
Çizelge 3.6. Düzenli depolanabilme için ağır metallere ait toksidite sınır değerleri	30
Çizelge 3.7. Zararlı atıkların sınır değerleri	30
Çizelge 3.8. BOF toksidik konsantrasyonları	31
Çizelge 3.9. EAO toksidik konsantrasyonları.....	31
Çizelge 3.10. Çelikhane cürufunun genel özellikleri	32
Çizelge 3.11. Çelikhane cürufu fiziksel özellikleri.....	32
Çizelge 3.12. ASA'ya göre çelikhane cürufu fiziksel özellikleri	32
Çizelge 3.13. Çelikhane cürufunun mekanik özellikleri	33
Çizelge 3.14. CBR sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri	33
Çizelge 3.15. ABD'de çelikhane cürufunun kullanımı (2003-2009).....	34
Çizelge 3.16. Avustralya'da çelikhane cürufunun başlıca kullanım alanları	35
Çizelge 3.17. Çelikhane cüruflarının Avrupa'daki uygulamaları.....	36
Çizelge 5.1. Alttemel malzemesi gradasyon limitleri	53
Çizelge 5.2. Çelikhane cürufu elek analizi	53
Çizelge 5.3. Temel malzemesi gradasyon limitleri.....	54
Çizelge 5.4. Çelikhane cürufu kompaksiyon deneyi.....	56
Çizelge 5.5. Çelikhane cürufu özgül ağırlık deneyi.....	57
Çizelge 5.6. Alttemel şartname limitleri	57
Çizelge 5.7. Temel şartname limitleri	58
Çizelge 5.8. Çelikhane cürufu su emme oranı (%)	59

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.9. Çelikhane cürufu hava tesirlerine karşı dayanıklılık	60
Çizelge 5.10. Çelikhane cürufu los angeles aşınma değeri	61
Çizelge 5.11. Çelikhane cürufu yassılık indeksi.....	62
Çizelge 5.12. Çelikhane cürufu kil topağı ve dağılabilen tane oranı	63
Çizelge 5.13. Çelikhane cürufu CBR değerleri	64
Çizelge 5.14. Rezonant kolon frekans deney sonuçları	68
Çizelge 5.15. Çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen A_G ve n_G $F(e)$ değerleri	69
Çizelge 5.16. Temel-alttemel G_{max} (kPa) değerleri	73
Çizelge 5.17. Çelikhane cürufu $c-\phi$ (°) parametreleri	75
Çizelge 6.1. Analizlerde kullanılan malzemelere ait parametreler	87
Çizelge 6.2. Asfalt yüzeyinde, lastik orta noktasında oluşan düşey deformasyonlar (eksenel simetrik analiz).....	90
Çizelge 6.3. Statik eksenel simetrik analizde asfalt yüzeyinde oluşan düşey deformasyonlar	91
Çizelge 6.4. Asfalt yüzeyinde, lastik orta noktasında oluşan düşey deformasyonlar (düzlem deformasyon analizi)	93
Çizelge 6.5. Statik düzlem deformasyon analizde asfalt yüzeyinde oluşan düşey deformasyonlar	94
Çizelge 6.6. Kalıcı deformasyon grafik bilgilerinin özeti	99

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Roma yolları.....	8
Şekil 2.2. Roma yollarına ait tipik bir kesit	9
Şekil 2.3. XVIII. Yüzyıl Avrupa yollarına ait tipik kesitler	11
Şekil 2.4. 1900-1920 Arası tipik yol kesitleri. a) toprak yol b) çakıl kaplamalı yol c) bitümlü makadam kaplama	12
Şekil 2.5. 1920 ile 1930 Arası tipik yol kesitleri a) Beton yol b) Asfalt makadam yol.....	14
Şekil 2.6. Yol üst yapıları, a) Esnek yol üst yapısı, b) Rijit yol üst yapısı	16
Şekil 3.1. Türkiye çelik haritası	23
Şekil 3.2. Türkiye’de ham çelik kapasitesinin değişimi (milyon ton)	24
Şekil 3.3. Çelik üretim prosesi ve cüruf oluşumu	25
Şekil 3.4. Sanayi üretimde sürdürülebilirlik koşulları	27
Şekil 3.5. AB çelikhane cürufu kullanım alanları.....	35
Şekil 4.1. Esnek yol üstyapı kesiti	37
Şekil 4.2. Yol performansını etkileyen faktörler	38
Şekil 4.3. a) Yolda oluşan tekerlek izi ve b) Tekerlek izi modellemesi.....	39
Şekil 4.4. Granüler temel tabakasında oluşan gerilmeler	40
Şekil 4.5. Tekerlek yükü altında zamanla değişen gerilmeler	41
Şekil 4.6. Tekrarlı yükler altında oluşan şekil değiştirmeler	42
Şekil 4.7. a)Histerik malzeme modeli b)Kayma deformasyon modülü c)Sönüm oranı	49
Şekil 5.1. Alttemel şartname limitleri ve cüruf gradasyonu	54
Şekil 5.2. Temel şartname limitleri ve cüruf gradasyonu.....	55
Şekil 5.3. Plent-miks temel şartname limitleri ve cüruf gradasyonu	55
Şekil 5.4. Çelikhane cürufu kompaksiyon eğrisi	56
Şekil 5.5. Çelikhane cürufu su emme oranı	59

Şekil	Sayfa
Şekil 5.6. Çelikhane cürufu hava tesirlerine karşı dayanıklılık	60
Şekil 5.7. Çelikhane cürufu los angeles aşınma değeri	61
Şekil 5.8. Çelikhane cürufu yassılık indeksi.....	62
Şekil 5.9. Çelikhane cürufu kil topağı ve dağılabilen tane oranı	63
Şekil 5.10. dx uzunluğunda silindirik bir çubukta burulma kuvveti-dönme ilişkisi	66
Şekil 5.11. Rezonant kolon test cihazı	68
Şekil 5.12. Gmax-çevre basıncı ilişkisi	70
Şekil 5.13. Çelikhane cürufunun Gmax-çevre basıncı ilişkisi.....	71
Şekil 5.14. Yol kesiti	72
Şekil 5.15. Temel orta noktası σ'_{xx} (kPa)	72
Şekil 5.16. Alttemel orta noktası σ'_{xx} (kPa).....	72
Şekil 5.17. Kesme kutusu deneyi sonuçları	74
Şekil 5.18. Sönüm oranının (ζ) doğal titreşim frekansı ile değişimi.....	76
Şekil 5.19. Tekrarlı yükleme	77
Şekil 5.20. Tekrarlı trafik yükleri altında elde edilen yol kesiti açısai frekansları	77
Şekil 5.21. Tipik yol üst yapısı kesiti	79
Şekil 5.22. Dinamik yük dağılımı	80
Şekil 5.23. Tekrarlı yükleme grafiğı	80
Şekil 5.24. 400 kPa üçgen yük atımı.....	81
Şekil 6.1. Düzlem deformasyon modeli	85
Şekil 6.2. Eksenel simetrik model.....	86
Şekil 6.3. Analizlerde kullanılan kesitlerin gösterimi	87
Şekil 6.4. Kırmataş temel-kırmataş alttemel (KK) kesiti düşey deformasyonlar	88
Şekil 6.5. Cüruf temel-cüruf alttemel (CC) kesiti düşey deformasyonlar	88
Şekil 6.6. Cüruf temel-kırmataş alttemel (CK) kesiti düşey deformasyonlar	89
Şekil 6.7. Kırmataş temel- cüruf alttemel (KC) kesiti düşey deformasyonlar	89

Şekil	Sayfa
Şekil 6.8. Eksenel simetrik analizlerde deformasyon-yüklem sayısı (N) değişimi.....	90
Şekil 6.9. Kırmataş temel- kırmataş alttemel (KK) kesiti düşey deformasyonlar	91
Şekil 6.10. Cüruf temel-cüruf alttemel (CC) kesiti düşey deformasyonlar	92
Şekil 6.11. Cüruf temel-kırmataş alttemel (CK) kesiti düşey deformasyonlar.....	92
Şekil 6.12. Kırmataş temel- cüruf alttemel (KC) kesiti düşey deformasyonlar.....	93
Şekil 6.13. Düzlem deformasyon analizlerde deformasyon-yüklem sayısı (N) değişimi.....	94
Şekil 6.14. Yatay eksen boyunca asfalt yüzeyinde oluşan düşey deformasyonlar (eksenel simetrik analiz)	95
Şekil 6.15. KK kesiti yüklem-deformasyon grafiği	96
Şekil 6.16. CC kesiti yüklem-deformasyon grafiği.....	97
Şekil 6.17. CK kesiti yüklem-deformasyon grafiği.....	98
Şekil 6.18. KC kesiti yüklem-deformasyon grafiği.....	99

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

e	Boşluk oranı
ϵ_p	Kalıcı birim deformasyon
ϵ_r	Esnek birim deformasyon
G_0, G_{max}	Maksimum kayma birim deformasyon modülü
$\gamma_{0.7}$	Eşik birim deformasyon
m	Gerilmeye bağlı rijitlik parametresi
M_r	Esneklik modülü
RC	Rezonant kolon deneyi
σ_d	Deviatör gerilme
σ_b	Toplam gerilme
σ_d	Deviatör gerilme
τ_{oct}	Oktahedral kayma gerilmesi
θ	Toplam gerilme

Kısaltmalar

Açıklamalar

ASSHTO	American Association of State Highway and Transportation
BOF	Bazik oksijen fırını
CBR	Kaliforniya taşıma oranı
CC	Cüruf temel ve cüruf alttmelden oluşan yol kesiti
CK	Cüruf temel ve kırmataş alttmelden oluşan yol kesiti
CPT	Konik penetrasyon deneyi
DMT	Dilatometre deneyi
EA0	Elektrik ark ocağı
FHWA	Federal Highway Administration
GT	Granüler temel

Kısaltmalar**Açıklamalar**

IO	İndüksiyon ocağı
KC	Kırmataş temel ve cüruf alttmelden oluşan yol kesiti
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
KK	Kırmataş temel ve kırmataş alttmelden oluşan yol kesiti
KTŞ-2013	Karayolu teknik şartnamesi 2013
MEPDG	Mechanistic-empirical pavement design guide
NCHRP	National cooperative highway research program
PMT	Plent-miks temel
PMT	Pressiyometre deneyi
SPT	Standart penetrasyon deneyi
WSA	World Steel Association
YF	Yüksek fırın

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun doğa ile mücadele serüveni, sanayi devrimi ile birlikte çevre aleyhine ivmelenerek gelişim kaydetmiştir. İlk zamanlar ekonomik bir kavram temelinde, daha çok üretim ve daha çok tüketim şeklinde algılanan çarpık kalkınma anlayışı, ikinci dünya savaşı sonrasında teknolojik açıdan geri kalan dünyanın da sanayileşme ve kalkınma moduna girmesiyle adeta bir yarış haline giren doğal kaynakların hesapsız ve düzensiz tüketimi büyük çevre sorunlarını beraberinde getirmiştir. Doğal kaynakların kontrolsüzce tüketilmesi gelecek nesillerin yaşamlarını tehlikeye atmaktadır.

Sanayi gelişiminde katedilen büyük ilerleme ne yazık ki çevre felaketlerini de beraberinde getirmiştir. Teknolojik gelişmelere paralel olarak artan arz ihtiyacının sınırlı doğal kaynaklardan karşılanması zorunluluğu, ekonomik anlamda sürdürülebilir uluslararası rekabetçi bir ulusal sektör yaratmak ve gelecek nesillere yaşanabilir bir dünya bırakmak için çevresel faktörler dikkate alındığında, endüstriyel üretim sonucu atıkların geri kazanımı veya farklı sektörlerde kullanılmak suretiyle değerlendirilmesi (endüstriyel simbiyoz) günümüz teknolojileri için önemli bir konu olmuştur.

Çelik üretiminde, yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufu (bazik oksijen cürufu ve elektrik ark fırın cürufu) yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Entegre üretim yapan tesislerde bir ton çelik üretiminde yaklaşık 100–150 kg (% 10–15) çelikhane cürufu oluşmaktadır [1]. Çelikhane cürufunun dünyadaki başlıca kullanım alanları; asfalt agregası, dolgu malzemesi, çimento katkısı, zemin iyileştirme, demiryolu balastı, yol üstyapı temeli, riprap malzemesinin yanı sıra çevre ve tarım alanındaki uygulamalardır. Yüksek Fırın Cürufu dünyada olduğu gibi Türkiye’de de çimento sanayi, hazır beton gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Kara Yolları Genel Müdürlüğü (KGM) bünyesinde “Elektrik Ark Fırını İle Çelik Üretiminde Elde Edilen Cürufun Yol Yapımında Kullanımı, Performansı ve Mevzuat Altyapısının Oluşturulması” isimli proje tamamlanmıştır. İzmir Büyükşehir Belediyesi bünyesinde elektrik ark fırını (EAF) cürufunun karayolu alt temel tabakasında kullanılması ile ilgili uygulama çalışmaları yapılmaktadır. Ancak çelik üretiminde bazik oksijen fırınından (BOF) elde edilen çelikhane cürufu ile ilgili kullanım ve çalışmalar ülkemizde çok sınırlıdır.

Bu tez çalışmasında, Türkiye’de büyük miktarı atıl vaziyette bulunan ve depolama sorunu olan çelikhane cürufunun yol yapısında (temel, alttemel malzemesi) kullanılabilirliği; yapılan deneysel çalışmalar ve oluşturulan sayısal modelleme ile araştırılmıştır. Böylece hem yol temel-alttemel yapısının mekanistik yöntemler ile çözümüne katkıda bulunulmaya çalışılmış hem de Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2011 Yılı Çevre Durum Raporu’nda da belirtildiği üzere büyük miktarı atıl vaziyette olan çelikhane cürufunun milli ekonomimize kazandırılması, depolama sorunun çözülerek çevresel zararlarının bertaraf edilmesi ve doğal kaynakların israfının önüne geçilerek sürdürülebilir bir demir çelik sanayii hedeflerine katkıda bulunulması hedeflenmiştir [2].

Birçok bilimsel konuda olduğu gibi yol üst yapısının tasarımında da analitik çözümler bazen mümkün olmamakta veya fiziksel model için ideal analitik modelin kurulması her zaman kolay olmamaktadır. Bilgisayar teknolojisinin de gelişmesiyle problemlerin analitik çözümlerinin yüksek bir doğruluk derecesiyle hesaplanmasını mümkün kılan sayısal yöntemler diğer bilimsel konularda olduğu gibi yol üst yapısının tasarımında da kullanılagelmiştir.

Çalışmada performansa dayalı ampirik (deneysel) yöntemler yerine yol alt ve üst yapılarının malzeme bünye modellerini dikkate alan, malzemelerde oluşan gerilmelere ve bu gerilmelerin trafik yükleri altındaki değişimini de hesaba katan deformasyon odaklı nümerik analiz yapılmıştır. Bu analiz için gerekli olan malzeme dinamik parametreleri ise arazide tekrarlı yükler altındaki deformasyon davranışını laboratuvar ortamında daha iyi modelleyebilen rezonant kolon deneyleri ile elde edilmiştir.

Bu çalışma ile ulaşılmak istenen hedef; çelikhane cürufundan oluşturulmuş yol temel, alttemel tabakalarının tekrarlı trafik yüklerinden kaynaklı zamana bağlı deformasyonlarını sayısal yöntemler ile analiz etmek olduğu için öncelikle malzemenin karayolları esnek yol üst yapısı temel ve alttemel tabakaları için istenen fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiş ve ileri laboratuvar deneyleriyle çevrimsel dinamik yükler altında oluşan küçük gerinim seviyelerindeki davranışına ait geoteknik, mühendislik özellikleri tespit edilmiştir. Daha sonrada trafik yükleri altındaki granüler tabakaların elasto-plastik davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek analiz edilmiştir.

Dünya genelinde agrega üretimi % 58’lik pay ile tüm maden üretimi içinde birinci sıradadır. Avrupa’da ortalama agrega kullanımı 7 ton/kşi iken, bu rakam ülkemizde 4 ton civarındadır [3]. Karayolu inşaatı alt yapısında en çok kullanılan malzeme büyük çoğunluğu doğal kaynaklardan (taş ocakları veya dere yataklarından) elde edilen agregadır.

Bir alternatif olarak çelikhane cürufunun yol alt yapısında kullanılmasıyla aşağıdaki hedefler gerçekleştirilecektir:

1. Doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunulacak,
2. Demir çelik sektörünün çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliğini mümkün kılacak,
3. Demir çelik sektörü ve ülkemizin önemli bir sorunu haline gelen cürufun depolanması sorununa çözüm getirilecek,
4. Yol üst yapılarının performansı arttırılacak,
5. Yeni istihdam olanakları dolaylı olarak sağlanmış olacak,
6. Çevreye ve insana saygılı, kaynakların etkin kullanıldığı ve geri dönüşümün ekonominin vazgeçilmez parçalarından biri haline geldiği üretim ve tüketim kültürünün oluşumunu sağlamak amacıyla hazırlanmış olan 2014-2017 Ulusal Geri Dönüşüm Stratejisi ve Eylem Planının [4] amacına katkıda bulunulmuş olacak,
7. Çelikhane cürufunun Temel-Alttemel malzemesi olarak kullanılabilirliğinin deformasyon odaklı olarak sayısal yöntemlere ortaya konularak, KGM tarafından ortaya konulan mekanistik dizayn hedefine katkı sağlanmış olacaktır.

Bu tez çalışması kapsamında; ikinci bölümde tarih boyunca yolların gelişimi ve sonlu elemanlar yönteminin yol üstyapısının analizinde kullanılması ile ilgili literatür çalışması yapılmıştır. Üçüncü bölümde demir çelik sektörü ve çelikhane cürufu ele alınmıştır. Dördüncü bölümde esnek yol üst yapısı ve üst yapıda oluşan deformasyonlar incelenmiştir. Beşinci bölümde bu çalışma kapsamında yol temel ve alttmele tabakalarında kullanılması değerlendirilen çelikhane cürufunun mühendislik özellikleri değerlendirilmiştir. Yedinci bölümde çelikhane cürufundan oluşturulan yol temel ve alttmele tabakalarının sonlu elemanlar yöntemiyle analizinin sonuçları değerlendirilmiştir. Yedinci bölümde ise analiz sonuç ve çıktıları değerlendirilmiştir.

2. KONU KAPSAM VE LİTERATÜR ÖZETİ

Literatür taramaları; antik çağlardan günümüze kadar yapılan yollar ve kullanılan malzemeler ile yol üst yapısını sayısal analizi olmak üzere iki alt başlık altında toplanmıştır.

2.1. Tarih Boyunca Yollar ve Kullanılan Malzemeler

İlk yollar, yiyecek ve suyu elde etmek için ilk insanlar ve hayvanlar tarafından izlenen, içgüdüsel olarak en düşük eğim ve dağları aşmak için en kolay rotalardan oluşturulan patikalardır. Hayvanların evcilleştirilmesi ile birlikte insanlar uzak bölgelere ve mesafelere ulaşma imkânını sağlamış ve böylece uygarlığın ilk adımlarını beraberinde getirmiştir [5]. Daha sonraları insanların avcı toplumdan yerleşik topluma geçip köylere ve kasabalara yerleşmesi ile ilk yol ağları oluşmaya başlamıştır.

Mısır

Mısırlılar tarih boyunca yüksek standartlı yollar inşa etmiş ve bunları kullanmıştır. Aksi halde her biri 2,5 ton ağırlığında olan kaya bloklarının piramitleri inşa etmek için dağlardan çöle indirilmesi mümkün olmayacaktı. Otantik kayıtlara göre Mısır tarihinde ilk kaplanmış yol M.Ö 4000 yıllarında Mısır Firavunu Khufu tarafından, IV. Hanedanlık zamanında yapılmıştır. Yol, piramit inşa etmek amacıyla taşların Nil'in doğu tarafındaki taş ocağından diğer taraftaki piramit yapılacak alana taşınması amacıyla inşa edilmiştir [5].

Mezopotamya

Bütün insanlık tarihi boyunca, insanlar tarafından yapılan en önemli keşiflerden biri şüphesiz ki tekerlektir. MÖ 3500 yıllarına ait bir Sümer piktogramı tekerlekli bir kızıağı resmetmiştir [6]. Mezopotamya insanlık tarihinde medeniyetin beşiği sayılır. Burada tarihin bilinen en kapsamlı, yaratıcı ve eşsiz medeniyeti oluşturuldu. Tarihimizin ilk tıp, eczacılık, hukuk, ticaret ve hatta dini tohumları burada atıldı. Sümer, Babil, Akad medeniyetleri burada yeşerdi ve büyüdü. Sümerler ve Babiller öncelikle ticaret insanlarıydı. Ortaya çıkan birçok belge geniş bir ticaret alanı, yollar ve iki tekerlekli arabaların varlığını ortaya koymaktadır. Nippur'un kuzey doğusunda yapılan kazılarda doğudan şehre giren, araçların ve hayvanların kullanması için 400 cm genişliğinde araç yolu ve her iki yanı yayaların kullanması için yol

kotuna göre yükseltilmiş, 120 cm genişliğinde kaldırımlardan oluşan bir ana yol tespit edilmiştir. Yolda kullanılan tuğlaların presargonik çağa (M.Ö. 2700-2350) ait olduğu tespit edilmiştir. Yolun altında çanak-çömlek ve tuğla kırıklarının da kullanıldığı, 180 cm derinliğinde iyileştirilmiş zeminden oluşan yol temeli ve yol temelinin kenar bitimlerinin 60 cm yüksekliğinde kireç taşıdan oluştuğu tespit edilmiştir [5].

Fırat ve Dicle gibi iki büyük nehre ulaşım ile İran körfezi üzerinden birçok ülkeye ve kıtaya ulaşım imkânları, bu ülke ve bölgelerde üretilen malların çeşitli yollar üzerinden bu kavşak noktadaki şehirde buluşmasını sağlamıştır. Fırat'ın kraliçesi ve doğunun zeki tüccarı Babil bu sayede yaklaşık dört bin yıl ticari merkez ve yolların kesiştiği bir kavşak noktası olma özelliğini korumuştur. Bu yol ağları bir yandan doğuda Suriye ve Mısır'a, diğer yandan İran üzerinden Ermenistan ve kuzeye bir yandan da, Kapadokya, Ege denizi ve Karadeniz'deki ülke ve bölgelere ulaşım imkânı sağlamaktaydı. İnşaat açısından bu yolların en önemlisi kuzeyden gelip güneye giden ve Babil'i boydan boya geçen tören yoludur. Bu yol tuğla temelden ve temelin üstünde 34 cm kalınlığında kalker taşıdan teşkil edilmiş masif üst yapıdan oluşmaktadır. Bu taş blokların birleşim yerleri konik şekilde ve bitüm ile doldurulmuştur [5].

Çin, Hindistan, Ege

Çin medeniyeti Sarı Nehir vadisinde doğmuş, burada büyümüş ve neredeyse bütün gelişimini bu vadide tamamlamış bir medeniyettir. Sarı Nehir de Nil, Fırat, Dicle İndus gibi diğer antik nehir-vadi medeniyetlerinin her biri kendi özel koşullarında kendi özgün medeniyetlerini geliştirmişlerdir. Çin antik medeniyetin çoğu ise ağaç ve bambu üzerine kurulu, kayıtların çoğu da yine ağaçtan tabletler üzerine kaydedildiği için maalesef doğal süreçler sonucu bozulmuştur. Kayıtlara göre atın evcilleştirilmesi M.Ö. 2852, mal ve emtiaların değişimi için ilk pazarın kurulması M.Ö. 2737 ve tekerlekli araçların icadı ise M.Ö. 2704 yıllarına rastlamaktadır. Sarı İmparator Hwang-ti Çinli kabileleri bir çatı altında birleştirerek Büyük Çin İmparatorluğunu kurmuş ve imparatorluğun kontrol altına alınması için her tarafa uzanan yol ağlarının kurulmasını emretmiştir. Birçok yeniliğin yanı sıra tekerlekli araçlarda icat edildi. Tarihsel açıdan Çinlilerin en önemli yolu şüphesiz Uzun Yol olarak da bilinen İpek Yoludur [5].

Yapılan kazılar Hindistan'da İndus nehri vadisinde kurulan antik uygarlıkların M.Ö 3000 yılına kadar gittiğini, burada ateş tuğlasından evler olduğu, yol ve drenaj sistemin kurulduğu, bu insanların büyük ölçüde ticaretle meşgul oldukları ve iki tekerlekli araba kullandıkları belirlenmiştir. Mısır ve Sümer'de bulunan objeler Hindistan ile Mısır ve Sümer arasındaki trafiğin M.Ö 3000 yılına kadar gittiğini göstermektedir.

Pers imparatorluğu kurulmadan önce, Elamların başkenti muhteşem Sus yada Susa'da yapılan kazılarda 20000 yıl öncesine ait insan kalıntılarına rastlanmıştır. Otantik çağın başlangıcında, M.Ö. 4500 yıllarında var olan gelişmiş bir kültürün şehridir. Stratejik olarak İran platosu, aşağı Fırat ve Dicle vadileri ile Basra körfezinin birleştiği yolların kavşağında yer aldığı için ticaret, onun gelişmiş kültürünün temel bir bileşenydi. Bilinen en eski vagon tekerleğinin burada bulunması burada sadece gelişmiş bir kültürün değil, aynı zamanda çok erken çağlarda gelişmiş ve Hindistan'dan Mısır'a kadar uzanan geniş bir ticaret ağının dolayısıyla da ulaşım ağının da kanıtıdır [5].

Egede kurulan antik uygarlıklardan Girit Uygarlığında da iyi inşa edilmiş ve korunmuş yollara rastlanmıştır. Yapılan kazılarda 520 cm genişliğindeki yolların yaklaşık 150 cm uzunluğunda 90 cm 120 cm genişliğe kadar değişen blok taşlar ile kaplandığı tespit edilmiştir. Atların ve tekerlekli arabaların M.Ö 16. Yüzyılda kullanıldığı, öküz arabasının ise Orta Minos Devrinde (M.Ö. 2100-1580) kullanıldığı ortaya çıkarılmıştır [5].

Roma

Roma yolları genellikle masif yapıları ve malzeme olarak uygun yerel malzemeler tercih edilmiştir. Roma'da ana yollar, ulaşımı sağlayan 360 cm ile 500 cm genişliğinde ana şerit ve iki yanında 180 ile 240 cm genişliğinde yan yollardan oluşurdu. Yolun gövdesi üç veya dört tabaka halinde 90 cm veya 120 cm yüksekliğinde olurdu. Roma yollarının birinci tabakası alt zemin üzerinde yer alan büyük ve düz taşlardan oluşurdu. Bataklık zeminlerde alt zemin kazık, ahşap veya farklı malzemeler ile ıslah edilirdi. İkinci ve üçüncü tabaka yolun önemi ve uygun malzemenin bulunmasına bağlı olarak değişirdi. Bu tabakalar çoğu zaman kırmataş, tuğla ve seramik kırıkları, kil-çakıl karışımı veya değişik malzemelerden oluşurdu. Üst tabaka (aşınma tabakası) genellikle, taş, parke taşı, kil-kum veya kil-çakıl karışımından oluşurdu. Ancak önemli yollarda bu tabaka birbirine çok yakın şekilde döşenmiş farklı boyutlardaki poligonal taşlardan oluşurdu. Üst tabaka, yolun iki tarafına doğru eğimli

yapılarak yolların yağmur ve sel sularına karşı yüzeysel drenajı sağlanırdı. Yolun sağında ve solunda hendekler açılarak da yolun esas drenajı sağlanırdı (Şekil 2.1) [7].

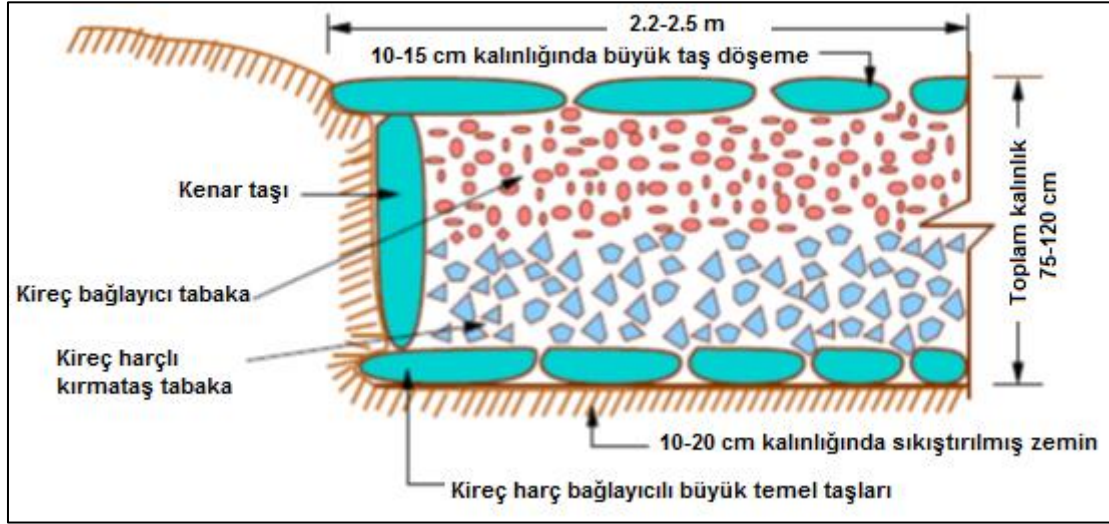


Şekil 2.1. Roma yolları [7]

Romalıların en ünlü yolu Romalı memur Appius Claudius Caecus'un yapımına önderlik ettiği ve M.Ö. 312 yılında yapılan Appian yoludur. Appian yolu askerlerin ulaşımı için Roma'dan Güney İtalya, Brindisi'ye uzanan ve yaklaşık 600 km uzunluğundadır. Amerika Birleşik Devletleri Yollar İdaresi Apian yolunu model almıştır [5].

Apian yolunda şayet zemin iyi değilse öncelikle zemin ıslah edilmiş, daha sonra 12 cm ile 15 cm kalınlığında kum yastık veya 5,5 cm kalınlığında kum kireç karışımı harçlı yataklama yapılmıştır. Yatak tabakasının üstüne birinci tabaka olarak; kalınlığı zemin taşıma gücüne göre belirlenen kireç veya kil harcı kullanılarak oluşturulan taşlı tabaka yer almıştır. Bu tabakanın üstünde ikinci tabaka olarak; alt tabakadan daha küçük boyutta kırılmış taş ve kireç karışımı, tokmak ile sıkıştırılmış tabaka yer almıştır. Üçüncü tabaka olarak ise, ince çakıl kaba kum ve kireçten oluşan bir harç kullanılmıştır. Kaplama (aşınma) tabakası olarak da aşınmaya dayanıklı sert taş tabakasından yapılmış ve alttaki harç tabakasının içine gömülerek oluşturulmuştur (Şekil 2.2) [8]. Bu tabaka yolun ortasında yer alan ana ulaşım şeridinde uygulanmıştır. Yolun yanlarında ise yol kotuna göre yükseltilmiş bordür taşları kullanılmıştır. Orta İtalyada, M.Ö. 300 yılında başlayıp M.Ö 200 yılında biten ve Pons

Mulvius'dan başlayıp Adriyatik kıyısında son bulan Flaminia yolu da en az Apian yolu kadar önemlidir [5].



Şekil 2.2. Roma yollarına ait tipik bir kesit [8]

Modern yollar

Modern karayollarının ilk öncüleri Tresaguet (1716–1796), Telford (1757-1834) ve MacAdam (1756-1836)'dır. Tresaguet, yol yapımını ekonomik ve bilimsel temele oturtturarak modern yol yapımının gerçek öncüsü olmuştur. Tresaguet metodundan önce Fransa'da 17. ve 18. Yüzyıl boyunca Roma yol yapım metodu modifiye edilerek kullanılmıştır. Bu yöntemde 45-50 cm yüksekliğinde oluşan yol kesiti genel anlamıyla şöyle oluşmaktaydı:

1. Tesviye edilmiş temel zemini,
2. Elle serilmiş, 45-50 cm yüksekliğinde iki veya daha fazla yassı taş tabakadan oluşan temel,
3. Tokmakla yerinde kırılmış küçük taşlardan oluşan tabaka,
4. Son tabaka, alttaki tabakadan daha küçük boyutlarda elle kırılmış taştan oluşan ve trafik yükü tarafından sıkıştırılan tabakadır.

Ancak bu yöntemdeki başlıca sorun drenajsız temel tabakası ve kırılmış taşlardan oluşan üst tabakanın yetersiz bağlanmasından kaynaklı olan tekerlek izi sorunudur. 1775 ile 1835 arasında Fransa'da uygulanan yeni yöntemde yol kesiti şöyle oluşmaktaydı:

1. Yol üst tabakasına (kaplama tabakası) paralel temel zemini,
2. Yaklaşık 13 cm yüksekliğinde dövülerek sıkıştırılmış yassı taşlardan oluşan temel tabakası,
3. Tokmakla dövülerek sıkıştırılmış ceviz büyüklüğünde kırılmış taşlardan oluşan tabaka,
4. Bitmiş yol kesiti 550 cm genişliğinde, 25 cm yüksekliğinde, kenar ile merkez arasında 15 cm kot farkı ve kenarları ise düz kaba bordür taşlarından oluşmaktaydı [5].

Tresaguet Metodunda yol üstyapısı 30 cm kalınlığa düşürülmüş ve ayrıca yol dizaynında zemin suyu koşulları ile yüzeysel suların drenajına önem verilmiştir (Şekil 2.3).

Telford, Avrupa’da sadece karayollarında değil aynı zamanda kanal, köprü ve bina dizayn ve inşaatında haklı bir üne sahipti. Amerikan karayolları idaresi yol kataloğuna göre Telford’un 1820’lerdeki ilk döneminde inşa edilen yollar:

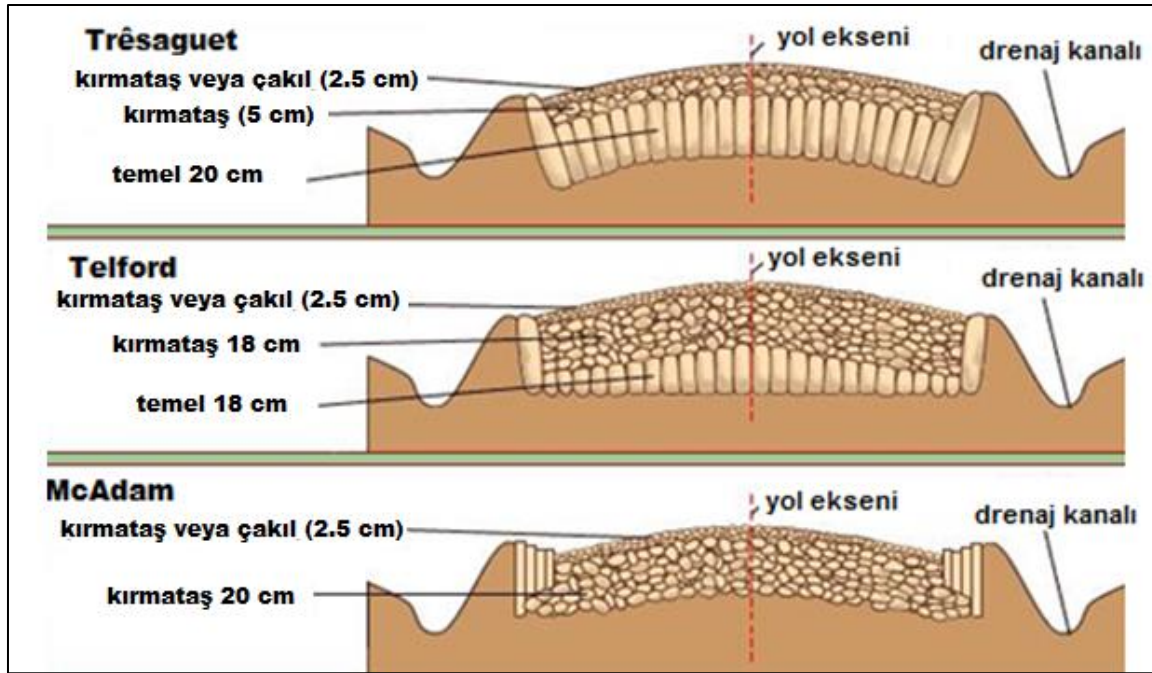
1. 500 cm ile 600 cm genişliğinde düz zemin yüzeyi,
2. 18 cm yüksekliğinde ve çapı 7-8 cm’den büyük olmayan taşların üst kısımda yer aldığı temel tabakası,
3. Elle kırılmış, 4 cm’den büyük çapta olmayan ve yol ekseninde 18 cm kalınlığa sahip üst tabaka,
4. Bitmiş yol üst tabakası 2,5 cm kalınlığında çakıl tabakası, enine kesitte 15 cm yüksekliğinde kot farkı ve 550 cm genişliğinde platforma sahipti [5].

Tresaguet ile karşılaştırıldığında Telford yönteminde taşıyıcı zemin yüzeyinin düz olması yüzey altına sızan yüzeysel suların drenajı açısından sorun gibi görünmektedir. Ayrıca yol üst yapı kalınlığının da daha fazla alındığı görülmektedir.

1783’ten 1798’ kadar İskoçya’daki yollar MacAdam’ın denetim ve gözetimi altında inşa edilmiştir. MacAdam, sadece yol inşaat tekniğinde değil, yol yapım ve bakım maliyetinde gerçekleştirdiği ekonomik yaklaşımla da devrim yaratacak işler yapmıştır. MacAdam tarafından dizayn edilen yollarda genellikle;

1. Suyun temelden uzaklaştırılması amacıyla, üst yapı zemin yüzeyi bitişik zeminden biraz daha yüksek kotta yer alacak şekilde ve eğimli olarak teşkil edilmiş,

2. En büyük çapı 4 cm büyüklüğünde kırılmış taşlardan oluşan, 25 cm yüksekliğinde ikinci bir tabaka,
3. Bitmiş yol kesitinin genişliği 500 ile 550 cm genişliğindeydi. Yüzeysel suların drenajı amacıyla yol eksenini 10 ile 15 cm kadar banket dış kenara göre yükselttilerek yanal eğim oluşturulmaktaydı [5].



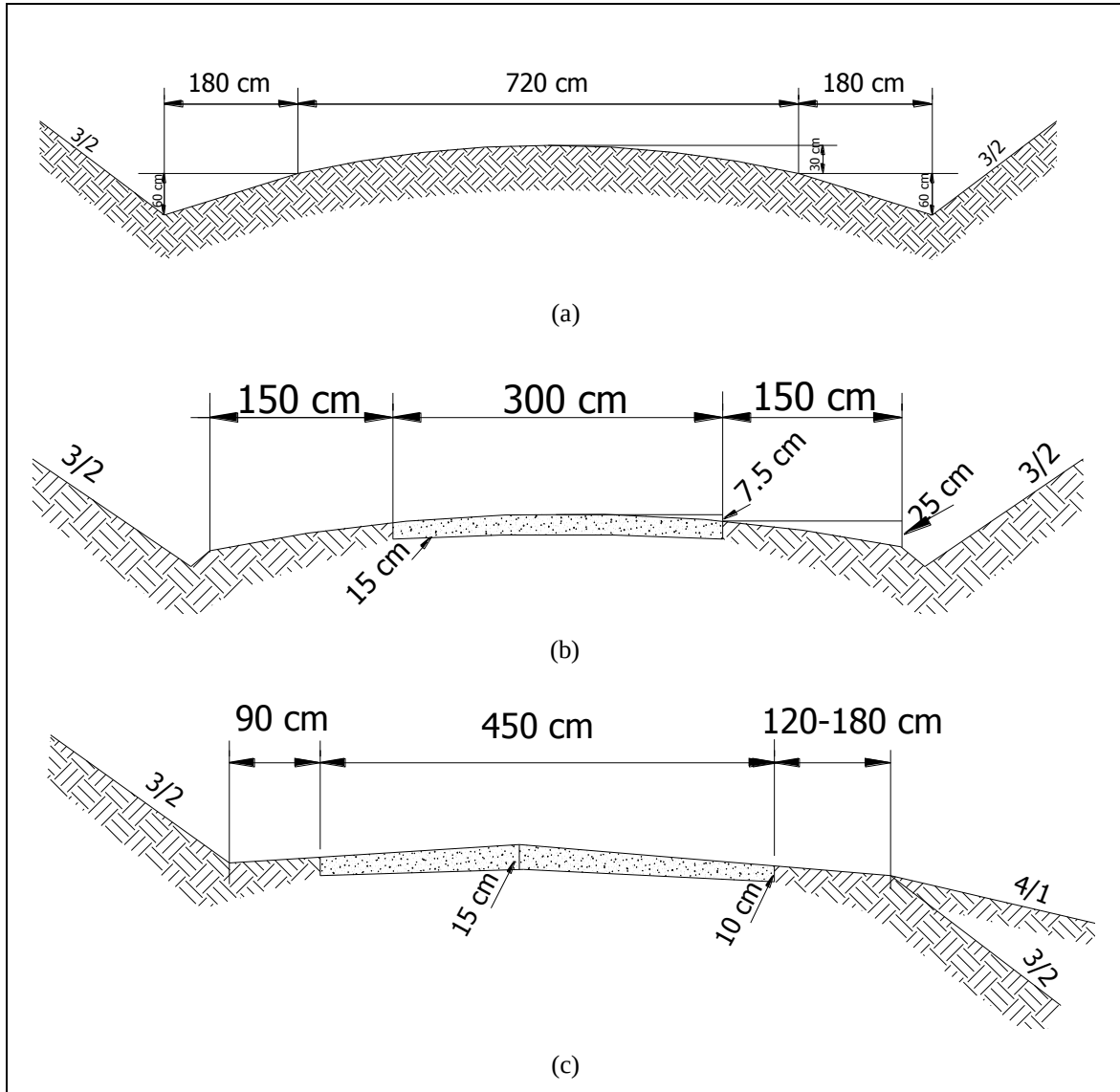
Şekil 2.3. XVIII. Yüzyıl Avrupa yollarına ait tipik kesitler [9]

Yukarıda da anlatıldığı üzere modern yolların tarihi, modern yolların ilk öncüleri sayılan Tresaguet (1716–1796), Telford (1757-1834) ve MacAdam (1756-1836) ile başlamıştır. Günümüz modern yollarında kullanılan alttemel, temel ve kaplama tabakası ile gerektiği durumda zemin iyileştirme yöntemlerinin modern yolların bu ilk öncüleri tarafından kullanıldığı görülmektedir. Ancak tabakaların kalınlıkları ve kullanılan malzemelerin özellikleri tamamen tecrübeye dayalı ve yolların tasarımı sanatsal bir yaklaşım ile ele alınmaktaydı.

Temmuz 1892'de, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki otoyolların durumu ile ilgili genel bir araştırma yapmak ve yolları iyileştirmek amacıyla bir Ulusal Otoyol komisyonu kanununu senatodan geçmiştir. 1893 yılında ABD Tarım bölümünün altında yol araştırma bürosu (ORI) kurulmuş ve 1989 da Kamu Yolları Ofisi (OPRI) olarak ad değiştirmiştir. Amerikan eyalet karayolu yetkilileri, karayollarıyla ilgili yasama, ekonomik ve teknik konularda

Federal Hükümetle karşılıklı işbirliği ve yardımın sağlaması için Amerikan Devlet Karayolu Yetkilileri Birliği'ni (AASHO) oluşturmak üzere 1914 yılında bir araya gelmiştir [10].

Aşağıdaki şekillerde 1900-1920 arasında ABD'de inşa edilen yollara ait tipik kesitler görülmektedir [10]. ABD'de ilk makadam yüzeyli yol 1823'te Maryland'da Hagerstown ile Boonsboro arasında inşa edilmiştir [10].



Şekil 2.4. 1900-1920 Arası tipik yol kesitleri. a) toprak yol b) çakıl kaplamalı yol c) bitümlü makadam kaplama

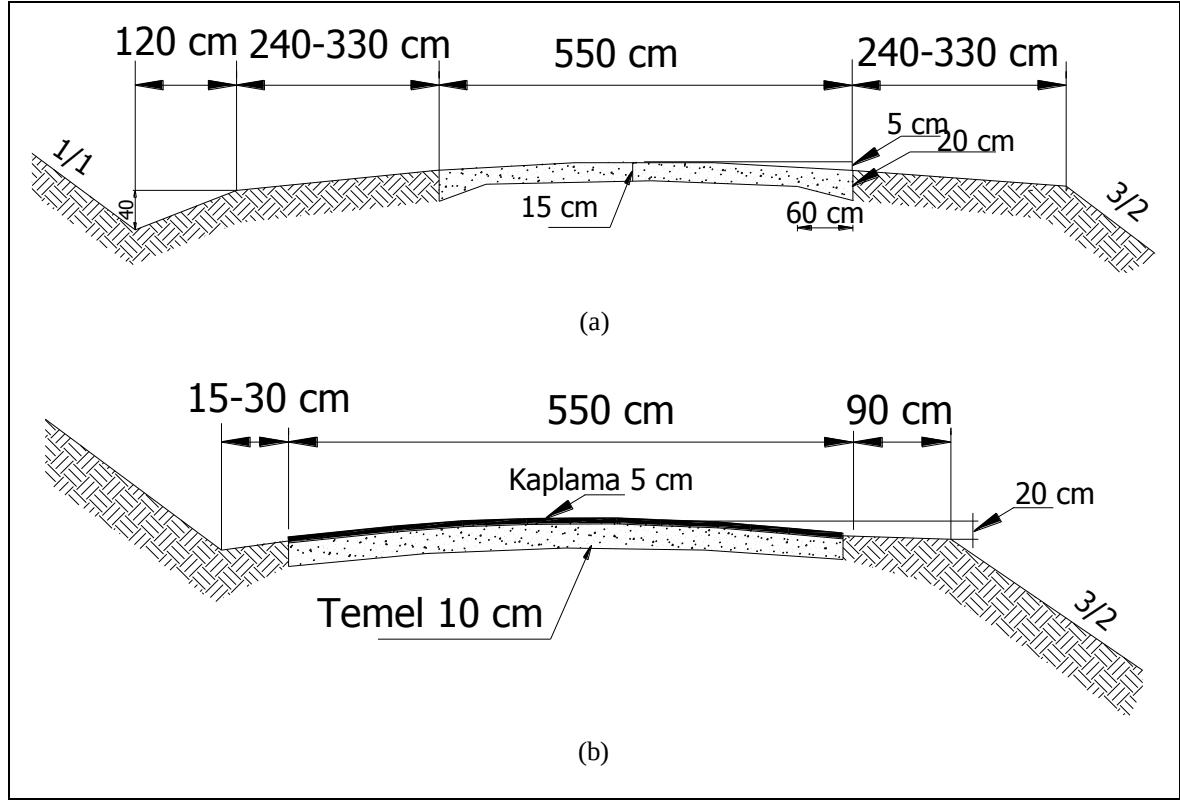
Otomobilin kullanılmaya başlanması ile ABD'de 1900-1920 arasında inşa edilen kil ve taş tozu bağlayıcılı makadam ve çakıl yollar toz problemi ve otomobil yüklerine karşı yeterli mukavemeti sağlayamamaktaydı [10]. Sanayileşme ile birlikte gelen ekonomik ve ticari

hayattaki büyüme, mamul malların dolaşımı, nüfus hareketleri yol ağlarının gelişmesini ve büyümesini gerekli kılmıştır. Motorlu araçların ve lastik tekerleklerin keşfi ise seyir hızı ve taşınan yüklerin miktarında artış getirmiştir. Klasik yöntemler ile yapılan yol tasarımları bu hız ve artan yükleri karşılamakta yetersiz kalmış, yeterli konforu sağlayamamıştır. Mevcut yolların artan yükler, yüksek hız ve konfor ihtiyacı karşılayamaması yolların yapım ve tasarımında değişikliklere gidilmesini zorunlu hale getirmiştir. Asfalt yüzey kaplamalı makadam ve çakıl yollar o güne kadar temel sorun olan toz ve çamur sorununu çözmüş ve hafif otomobil yüklerine karşı yeterli dirence sahip olsa da 1918 de ağır kamyon yükleri altındaki yollarda büyük çaplı göçmeler meydana gelmiştir. Bunların başlıca nedenleri; yüksek basınç altında makadam tabakasında yer alan granüler malzemedeki içsel yenilme ve don etkisindeki taban zemininin yumuşaması sonucu temel tabakasında meydana gelen yenilmelerdi. Yapılan araştırmalardaki ortak kanı; yeterli drenaj koşullarının sağlandığı kum zeminler üzerinde yer alan yolların kil zemin üzerinde yer alan yollara, özellikle de yetersiz hendek yapılması nedeniyle drenaj koşullarının zayıf olduğu kil zeminlere göre daha dayanıklı olduğuydu [10]. Kasım 1920 de Karayolu Araştırmaları Ulusal Danışma Kurulu oluşturulmuştur.

Yukardaki gelişmeler yol tasarımının sanatsal bir yöntemden daha bilimsel bir alana evrilmesini sağlamıştır. Karayolu üstyapı kalınlığı ve kullanılan malzemeler 1920'lerin başına kadar tamamen tecrübeyle belirlenmekteydi ve farklı zemin koşullarında bile bu durum pek değişmemekteydi. Deneyimlerin artmasıyla birlikte farklı kurumlar tarafından çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [11].

1921'e gelindiğinde ABD'de yol trafiği o kadar artmıştı ki o yıl kabul edilen Federal Karayolu Yasası ile federal yardımdan yararlanan yolların minimum genişliği 550 cm'ye çıkarılarak tek şeritli yollardan çift şeritli yollara geçilmiştir. 1920 ile 1930 yılları arasında portlant çimentolu beton kaplı yolların ve asfalt makadam yüzeyli esnek yol üst yapısının kullanılmaya başlandığı görülmektedir (Şekil 2.5). Bu yıllarda yolların geometrik tasarımında da değişimler gözlenmektedir. 1920-1930 dönemi, atlar ve vagonlar tarafından kullanılan çeşitli yolların otomobil ve kamyonlara uyarlanmasında deneme yanılma dönemi olarak nitelendirilebilir [10]. Katran ve asfalt başlangıçta yüzey koruyucu kaplamalar olarak, daha sonra bağlayıcı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Asfalt kaplamalı yollar ilk 1870'lerde Washington D.C ve New York'ta kullanılmaya başlanmıştır. Bitümlü makadam yol

denemeleri 1906'da Boston'da başlamış ve 1907'de 1 mil uzunluğunda bir yol inşa edilmiştir [10].



Şekil 2.5. 1920 ile 1930 Arası tipik yol kesitleri a) Beton yol b) Asfalt makadam yol

1930-1940 yılları arası stabilizasyon ve keşif yılları sayılır. Geçmiş on yılda yapılan yolların; aliymanların mevcut hız kapasiteleri için yetersiz olduğu, görüş mesafelerinin çok kısa olduğu, banket ve platform genişliklerinin dar olduğu, yol şeritlerinin mevcut trafik yükünü kaldıramadığı ve bu sebeplerle kullanım ömürlerinin kısa olduğu görülmüştür. Yollar ağır kamyon yüklerinin sıklığı altında bozulmuş ve trafik akışı kamyonlar nedeniyle ağır akmaktaydı [10].

Tasarım ve Dizayn Politikaları Belirleme Komitesi adında bir komite 1937 de kurulmuştur. Komite, karayollarının sınıflandırılması (trafik hacmi, dizayn hızı ve trafik karakterine göre), kavşak dizaynı, görüş mesafesi, trafik akışının düzenlenmesi, karayolu tipleri (şerit sayısı, bölünmüş yol vb.) gibi bir çok konuda tasarım politikalarını belirlemenin yanında yollardaki eğim ve kurlara ait birçok kıstas da bu dönemde oluşturulmuştur [10].

AASHO 1955 yılında, Karayolu Araştırma Kurulu (HRB) yönetiminde ülke çapında AASHO yol testlerini gerçekleştirmeye başlamıştır. Çeşitli ağırlıktaki kamyon yükleri göçmeye ulaşıncaya kadar esnek ve rijit yol üst yapılarına etkiltilerek geniş veriler elde edilmiş ve bu veriler analiz edilerek 1962 yılında tasarım denklemi ve grafiklerini içerecek şekilde hazırlanmıştır [10]. AASHO yol testinin önemi, yol servis edilebilirlik kavramını tasarımın içine katmış olmasıdır. Bu test ile servis edilebilirlik, üstyapı kalınlığı ve yük birbiriyle ilişkilendirilmiştir [11]. Yol testlerinden elde edilen veriler güncellenerek rijit yol üst yapılarını da kapsayacak şekilde 1972 yılındaki rehber yayınlanmıştır.

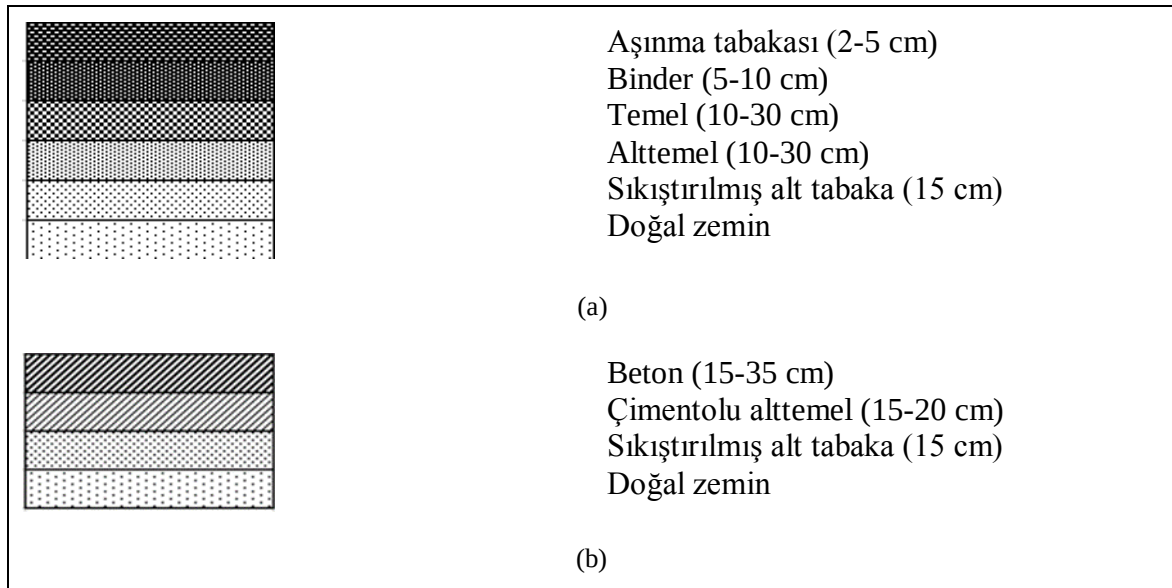
Yol testlerine dayalı olarak geliştirilen bu metotlar ampirik olup, metodun oluşturulmasında sınırlı sayı ve konfigürasyonda trafik ile tamamıyla yerel malzemelerden ve çevresel şartlardan elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu metotta malzemelerin dayanım özellikleri, bağlayıcısız granüler malzemeler için (temel, alttemel, seçme malzeme, taban zemini) Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakaları için ise Marshall Stabilitesi değerlerine dayandırılmış olup, bu deneyler statik yükleme altında yapılmaktadır [12].

AASHO 1973 yılında AASHTO olarak ad değiştirmiştir. AASHTO, 1986 yılında çıkardığı projelendirme rehberinde üstyapının performansını CBR yerine hem bağlayıcısız granüler malzemeler, hem de bitümlü sıcak karışımlar için esneklik modülü olarak adlandırılan değerle ilişkilendirmiştir. Esneklik modülü (resilient modulus) kısaca, bir malzemenin tekrar eden yük altındaki elastiklik modülüdür. Statik bir yükleme yerine tekrarlı bir yük uygulanmaktadır. Bu nedenle, esneklik modülü yol üstyapılarının trafik yükleri etkisindeki davranışını daha iyi temsil etmektedir. AASHTO 1993 ve daha sonra 1998 yıllarında yayınladığı rehberlerle özellikle üstyapıların bakım ve onarımı ile ilgili ilaveler yaparak, üstyapı takviye tabakalarının projelendirmesinde malzeme parametresi olarak esneklik modülünü kullanmıştır [12].

Daha sonraları yol dizaynı ampirik yöntemden mekanistik-ampirik tasarım yöntemine evrilmeye başlamıştır. Bu yöntemde; yolda trafik yükü ve çevresel faktörlerden dolayı oluşan gerilme-deformasyonları mekanik teorilere göre analiz eder. Bu yönüyle ampirik yöntemlerden bir adım öndedir. Çünkü bu yöntemde tahmin ve gözlemin yanında sayısal analiz de mevcuttur. Bu da daha gerçekçi sonuçlara ulaşmayı sağlamaktadır [13].

Birleşik devletlerde, mekanik-ampirik tasarım ile ilgili Ulusal Birleşik Yol Araştırmaları Programı (NCHRP) tarafından yapılan NCHRP 1-37A projesi hazırlanmıştır. Bu çalışmada; daha önce yapılan çalışmalarda bulunan trafik yükü ve iklim koşulları gibi kriterler tekrar güncellenmiştir. Trafik yükünün standart tek dingil eşdeğerliğine çevrilmesi yerine, trafikte bulunan araçlar ve yük dağılımları sınıflandırılarak kullanılmıştır. İklim olarak, yolun mevsimlere göre sıcaklık farklarına bağlı yol malzemesinin davranış ve performansı ayrıca hesaplanmıştır [14].

Günümüzde yaygın olarak kullanılan yol üstyapı tipleri; geleneksel olarak temel, alttemel ve beton sıcak karışımdan (BSK) oluşan esnek yol üst yapısı ile üst kaplama tabakası portlant çimentosundan oluşan rijit yol üst yapısıdır (Şekil 2.6). Bazen de bu iki yapının karışımı olan kompozit yol üstyapısı kullanılmaktadır. Bu durumda beton tabaka daha çok temel-alttemel yerine kullanılır. Üst yapı ise yine beton sıcak karışımından (BSK) oluşur.



Şekil 2.6. Yol üst yapıları, a) Esnek yol üst yapısı, b) Rijit yol üst yapısı

Tarih boyunca yol üst yapısının kaplama ve diğer alt tabakalarında boyutu zamanla azalan taşların ya da daha küçük boyutta granüler malzemelerin kullanıldığı görülmektedir. Ancak sanayi devrimi ile başlayan süreçte imalat süreçlerinin hızlanması ve daha çok üretim ile birlikte ortaya mamul malların yanında birçok atık madde de çıkmıştır. Diğer inşaat alanlarında olduğu gibi yol inşaatında da zaman zaman bu atık maddeler kullanılmıştır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan endüstriyel atık/ürün metalürjik üretimlerde ortaya

çıkan cüruflardır. Dünyada en çok üretilen ve yol yapımında en çok kullanılan cüruf çelikhane cürufu ve yüksek fırın cürufudur.

2.1. Yol Üst Yapısının Sonlu Elemanlarla Analizi

Yol üst yapısının ampirik yöntemler ile analiz ve dizaynı bugüne kadar yaygın olarak kullanılmasına karşın analitik yöntemler ve yaklaşık analitik yöntemler ile ilgili çabalar da süregelmiştir. Yol yapısına ve tasarımına etki eden faktörlerin çokluğu tam analitik tasarıma geçişteki en büyük engel olarak görülmektedir. Çevre, iklim, su, dingil yükü, dingil tekerrür sayısı, tekerlek ölçüleri, kullanılan malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri, karışım oranları, tane çapı gibi birçok faktör yol yapısına etki etmektedir. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile sayısal yöntemlerin kullanılmasında son 20-30 yılda çok büyük ilerlemeler kaydetmiştir.

Beskou ve Theodorakopoulos, yol üst yapısının hareketli yükler altındaki davranışının analizi ile ilgili yapmış oldukları geniş çaplı literatür taramasında, model bazlı yapılan çalışmaların; elastik sönümlü ortam üzerinde yer alan kiriş veya plaka, tabakalı veya homojen yarı sonsuz ortam üzerinde yer alan kiriş veya plaka ile tabakalı veya homojen yarı sonsuz ortam üzerinde yer alan zemin tabakası olmak üzere üç kategoride toplanabileceğini belirtmektedirler. Malzeme davranışı açısından ise; yol üst yapısı genel olarak lineer elastik davranışlı kiriş/plak veya elastik zemin olarak modellenirken, alt zemin elastik davranışlı poroz yarı sonsuz ortam, elasto plastik yarı sonsuz ortam veya vizko elastik yarı sonsuz ortam olarak modellenmiştir. Çözüm yöntemleri olarak; analitik (Fourier dönüşüm veya nadiren Laplace dönüşüm kullanarak), analitik-sayısal (Fourier ve Fast Fourier Transform kullanarak), veya tam sayısal yöntemler kullanılmıştır. Yüklerin simülasyonu için ise; sabit hızla hareket eden tekil veya yayılı yük, sabit hızla hareket eden tekil veya yayılı harmonik yük, zamanla değişken tekil veya yayılı hareketli değişken yük gibi farklı yöntemler kullanılmıştır [15].

Esnek yol üst yapılarının dizaynı birkaç metotta incelenebilir. Bunlar; malzeme testlerine dayalı ampirik dizayn, kayma dayanımının aşılması prensibine dayalı metod, deformasyonların sınırlandırılmasına dayalı analiz metodu, yol testleri veya yol performansına dayalı regresyon metodu ve mekanistik-ampirik tasarım metotlarıdır [11].

Bilgisayarların kapasitesinin gelişimi ile birlikte 1960’lardan sonra bütün bilimsel alanlarda olduğu gibi yol dizaynında da bilgisayarlar daha çok kullanılmaya başlanmıştır.

Ampirik yöntem belirli bir malzeme çeşidi ve çevre koşulları ile sınırlı bir yol tasarım yöntemidir. Şartların değişmesi durumunda analiz geçerliliğini yitirecektir. Mekanistik-ampirik yöntem, tekerlek yükü gibi bazı girdiler ile zeminde oluşan gerilme ve deformasyonlar gibi çıktılarına dayalı bir analiz yöntemidir. Ölçülen değerler esas alındığında mekanistik yöntem ampirik yöntemle nazaran daha güvenilir bir yöntemdir. Ancak, herhangi bir mekanistik yöntemin etkinliği tahmin edilen gerilme ve gerinimin doğruluk derecesine bağlıdır. Esnek kullanım sayesinde iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar metodunun yol üst yapılarında kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır [16].

Sonlu elemanların temel avantajları; her elemana farklı malzeme özellikleri atanabilmesine imkan vermesi, sınır şartlarının yükleme koşulları da dahil çok rahat belirlenebilmesi/değiştirilebilmesi ve dijital bilgisayarların sonlu eleman metodunu uygulanabilir hale getirmesi sayesinde bu konuda çok deneyim ve birikimin oluşmasıdır. Taylor [17], eksenel simetrik 3 noktalı üçgen, 4 noktalı dörtgen ve 8 noktalı prizmatik sonlu elemanlar kullanarak tabakalı yol üst yapısının lineer olmayan analizini yapmıştır [17].

Yukarıda da açıklandığı üzere yol yapıları, hareketli trafik yükleri altında değişik gerilmelere maruz, lineer olmayan elasto-plastik davranış sergilemektedirler. Sonlu elemanlar yöntemi; dinamik yükleme koşulları, lineer olmayan malzeme davranışı ve farklı sınır şartları gibi birçok değişken hesaba katılarak analiz yapılabilme imkânı sunmaktadır.

Sonlu elemanların yol analizinde kullanılması ile ilgili bugüne kadar birçok bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bunların çoğu Burmister’in tabakalı zeminlerde gerilme ve gerinim değişimi teorisine dayalı olarak geliştirilmiştir [18]. Bunlardan en basiti Chevron Araştırma Şirketi tarafından geliştirilen lineer elastik malzeme analizi yapabilen CHEVRON programıdır [19]. Program daha sonra doğrusal olmayan malzeme davranışını da hesaba katacak şekilde geliştirilerek DAMA adını almıştır [20]. Shell tarafından yatay ve düşey yükleri de hesaba katabilen BISAR programı geliştirildi [21]. ELSYM5 programı ise beş katmanlı elastik bir sistemin analizine imkan veren, Kaliforniya (Berkeley) Üniversitesi tarafından geliştirilen bir programdır [22].

KENLAYER bilgisayar programı ise Kentucky Üniversitesinde geliştirilen bir programdır. Program elastik çok katmanlı sistemlerin dairesel yük altındaki davranışını modeller. Dairesel dingil yükleri tekil, dual veya dual-tandem olarak etkitilebilmektedir. Granüler malzemeler lineer veya lineer olmayan elastik malzeme ya da visko-elastik olarak modellenen bilinmektedir [11].

ILLI-PAVE bilgisayar programı Illions Üniversitesinde geliştirilmiştir [23]. Programa gerilme seviyesine bağlı malzeme rezilient modül tanımlama imkanı vermektedir ve AASHTO 1985 rehberine göre yol üstyapısı analizi yapmaktadır. Aynı zamanda Mohr-Cloumb yenilme kriteri malzemeye tanımlanarak malzeme yenilme dayanımının aşılıp aşılmadığı kontrol edilebilmektedir. Lineer olmayan sonlu elemanlar metodu aynı şekilde Michigan Üniversitesinde geliştirilen MICH-PAVE programında da kullanılmaktadır [24]. ARKPave akademik bir sonlu eleman programıdır ve bağlayıcısız malzemelerde oluşan tekerlek izi/oturmaları hesaplayabilmektedir [25].

VESYS sonlu elemanlar programı bir probobalistik ve mekanistik esnek yol üstyapı dizayn programı olup AutoCAD ile bağlantı imkanı tanımaktadır. VESYS'in ticari serisi homojen elastik yarı sonsuz uzay malzeme modeline dayanmakla beraber bazı viskoelastik-plastik teori uygulamalarına da imkân vermektedir. VESYS de kullanılan yol modeli AASHO yol testi, FHWA yol testleri, Louisiana APT test ve Ohio SHRP yol testi gibi birçok teste göre kalibre edilmiştir [26].

Bugüne kadar Avrupa'da yol üst yapısı analizi için geliştirilmiş bir sonlu eleman programı yoktur. CESAR-LCPC programına adapte edilen bazı prototipler geliştirilmiştir [27]. CESAR, hafif trafik yükleri altında esnek üstyapılarda meydana gelen tekerlek izini hesaplayabilen bir programdır. Programda asfalt tabakası vizkoelastik, bağlayıcısız granüler tabakalar ise lineer olmayan elastik malzeme olarak modellenmektedir [26]. Werkmeister, lineer olmayan elastik malzeme modeli DRESDEN'i, FENLAP sonlu elemanlar programına entegre etmiştir [28].

VEROAD (Visco-Elastic Road Analysis Delft) Delft Teknoloji Üniversitesi tarafından geliştirilen bir programdır. Çok katmanlı viskoelastik veya lineer elastik hesap imkanı vermektedir [29]. NOAH ise Belçika'da geliştirilen ve elastik çok katmanlı teoriye dayanan bir programdır. VagFEM Nordik Ülkeler tarafından ortaklaşa geliştirilmeye çalışılan bir

programdır. Lineer veya lineer olmayan elastik rezilient malzeme modülü tanımlama imkânı sunmaktadır [30]. En çok kullanılan yol üstyapı programı CIRCLY ise Avusturalya'da geliştirilen bir program olup, Avustralya Yol Rehberini baz almaktadır [26].

Katmanlı teorinin en önemli dezavantajı, her bir katmanın katman boyunca aynı özelliklere sahip homojen olduğu varsayımıdır. Bu varsayım, temel ve alt tabanlar gibi doğrusal olmayan bağlayıcısız granüler malzemelerden oluşan sistemleri analiz etmeyi zorlaştırır. Kritik noktalar her zaman yükün uygulandığı noktaya en yakın noktalar olmayabilir [11]. Yükleme durumu, sınır koşulları ve tabakalarda kullanılan malzeme özelliklerine bağlı olarak kritik noktalar değişebilir. Tasarımcının farklı noktalardaki gerilmeler, ya da deformasyonları incelenmesine imkân vermez. Yol üst yapısındaki katmanlarda kullanılan malzemelerin hem lineer olmayan hemde kalıcı plastik deformasyonlar biriktiren davranışı düşünüldüğünde çok katmanlı lineer veya nonlineer sistemlerin yetersiz kalacağı açıktır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bu zorluğun üstesinden gelinebilir.

ABAQUS, ANSYS, LS-DYNA gibi genel amaçlı iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizi yapabilen programlar da yol üstyapısının analizinde kullanılagelmiştir. Yukarıda bahsedilen yol analiz programlarının aksine, sunmuş oldukları daha sofistike malzeme modelleri ile yol katmanlarında kullanılan malzemelerin sahada beklenen gerilme seviyesine bağlı lineer olmayan ve birikimli plastik deformasyonların hesaplanmasına olanak vermektedirler.

Plaxis, dinamik yükleme, sınır şartlarında değişiklik ve birden fazla malzeme bünye modeli kullanımına imkân sunan, iki ve üç boyutlu zemin yapılarının analizi için geliştirilmiş bir sonlu eleman programıdır. Plaxis'te, elastik malzeme modellerinin yanında Mohr-Coulomb, Hardening Soil, Hardening Soil with Samall Strain vb. çok sayıda elasto plastik malzeme modeli tanımlıdır.

Amorosi ve Boldini ise kil tabaka içinde yer alan dairesel kesitli bir tünelin sismik yüklere karşı vermiş olduğu viskoelastik, visko-elastoplastik tepkilerini Plaxis ile analiz etmiş ve quasi-statik yöntemdeki tepkilere yakın tepkiler elde etmiştir [31].

Gaetano, temel tabakasında oluşan bozunma veya zayıflıkların esnek yol üstyapısında oluşturduğu hasarı ve geogirid kullanmak suretiyle lokal bozulmaların üstyapıda ve kaplamada oluşturduğu hasarı önleme problemini Plaxiste üç boyutlu olarak başarılı bir

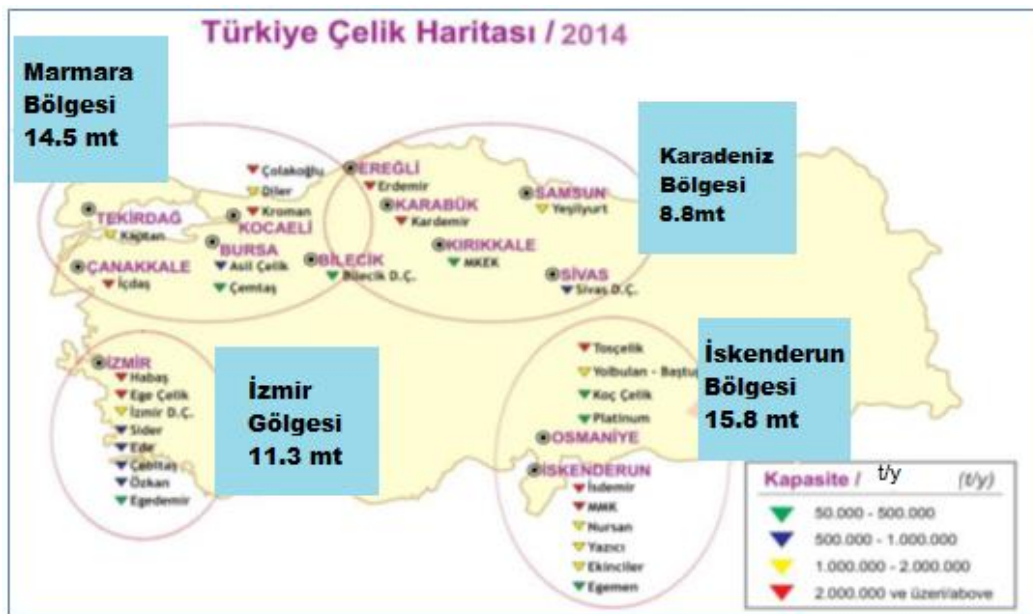
şekilde modellemiştir [32]. Literatürde de yol üst yapısının analizi ve geotekstil ya da başka yöntemlerle yol üst yapısının iyileştirilmesini analiz etmek için Plaxis yazılımını kullanmış pek çok araştırmacı vardır [33-39]. Camacho-Tauta vd., Mohr-Coulomb (MC), pekleşen zemin modeli (HS) ve küçük gerinimler altında pekleşen zemin (HSsmall) malzeme modellerini kullanarak 2D sonlu elemanlar modeli ile 14 yükleme yaparak trafik yüklerini Plaxis programında modellemişler [40].

M.Ö. 4000’li yıllarda başlayan kaplamalı yol yapım teknikleri Mezopotamya’da tekerleğin icadı ile birlikte gelişerek evrilmeye başlamıştır. Mezopotamya, Çin, Hindistan, Mısır ve Egede farklı ancak birbirine yakın yol yapım tekniklerinin geliştiğini görmekteyiz. Roma yolları ise ilk modern yollara örnek olmuştur. Eski uygarlıklar tarafından Tören Yolu, İpek Yolu ve Appian Yolu gibi gelişmiş uzun yol ağlarının oluştuğunu görmekteyiz. Bilgisayar ve sonlu elemanlar analizi gibi tekniklerin yol üst yapısının analizinde Taylor ile başlayan kullanımı ise gittikçe yaygınlaşarak günümüze kadar gelmiştir. Yolların çok katmanlı elastik bir yapı olarak modellenerek analiz edildiği ilk nesil bilgisayar programlarından sonra son zamanlarda elasto-plastik analiz ve daha sofistike malzeme bünye modellerinin kullanıldığı programlar ile de yol analizleri yapılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada iki boyutlu aksimetrik ve düzlem deformasyon analizleri ile elasto-plastik malzeme bünye modelleri kullanılarak yol üst yapısının tekrarlı trafik yükleri altında analizi gerçekleştirilmiştir.

3. DEMİR-ÇELİK SEKTÖRÜ VE ÇELİK CÜRUFU

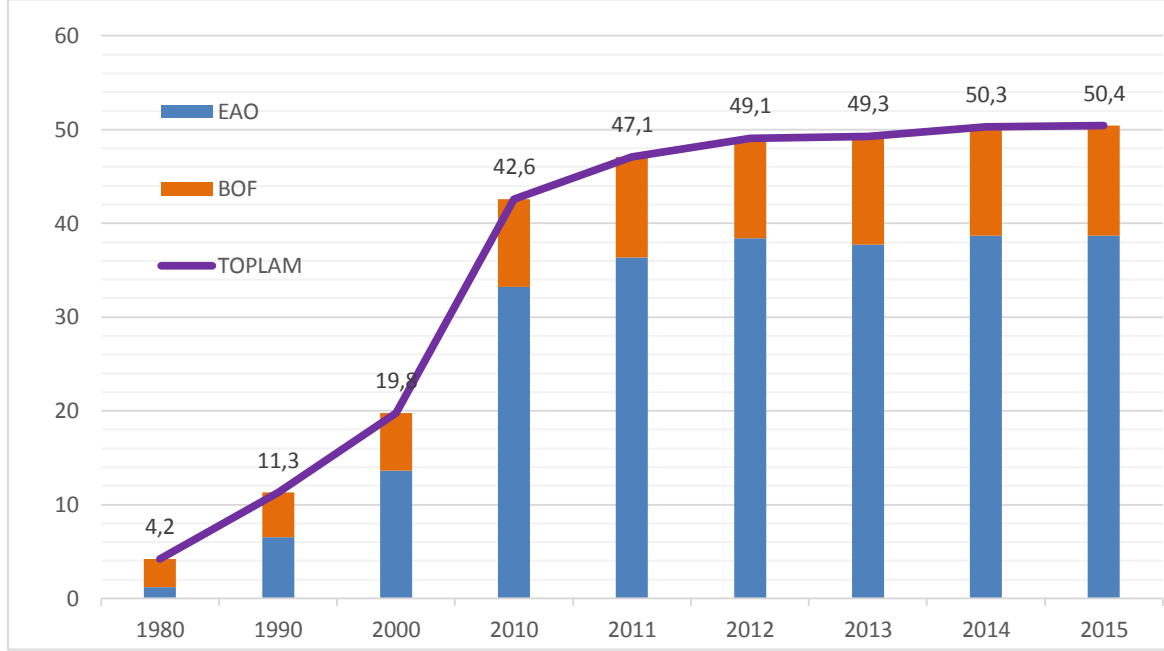
Türk demir-çelik sektöründe 2014 yılı itibarıyla 3'ü Entegre, 24 tanesi Elektrik Ark Ocaklı (EAO) ve 4 tanesi de İndüksiyon Ocaklı (IO) olmak üzere 31 tesis bulunmaktadır. Gerçekleştirilen yatırımlar sonucunda üretilen çelik ürünleri, diğer sanayi kollarının ihtiyaç duyacağı her türlü demir-çelik ürününü üretebilecek seviyeye ulaşmıştır. Bu yatırımlar ve kapasite artışları sonucunda Türkiye, 2013 ve 2014 yılı verilerine göre yaklaşık 35 milyon ton çelik üretimi ile dünyada 8'inci, Avrupa'da ise Almanya'dan sonra ikinci en büyük ham çelik üreticisi ülke konumuna gelmiştir. 2018 yılı verilerine göre ise Türkiye'de çelik üretim kapasitesi 52 milyon ton iken, üretim 37 milyon tondan biraz fazladır. Dünya Çelik Derneği (WSA) 2013 yılı verilerine göre Türkiye demir çelik ihracatında dünyada yedinci sırada yer almaktadır [41, 42]. 2017 ve 2018 yıllarında ise ham çelik üretiminde Türkiye dünyada sekizinci sırada yer almıştır. 2014 yılı verilerine göre tüm dünyada üretilen ham çeliğin yaklaşık %2.08'i, 2018 yılında ise %2.05'i ülkemizde üretilmektedir [43] .

Türkiye genelinde demir çelik tesisleri Marmara, Ege, Karadeniz ve Akdeniz olmak üzere, 4 ana bölgede toplanmıştır. 2014 yılında, çelik sektörünün 50.2 milyon ton olan ham çelik kapasitesinin dağılımı incelendiğinde, 15.8 milyon ton ham çelik kapasitesi ile Akdeniz bölgesi, 14.5 milyon ton ile Marmara bölgesi, 11.3 milyon ton kapasite ile Ege Bölgesi, 8.6 milyon ton ile Karadeniz bölgesinin izlediği görülmektedir (Şekil 3.1) [42].



Şekil 3.1. Türkiye çelik haritası [42]

Türkiye’de yıllar itibarıyla ham çelik üretim kapasitesinin değişimi Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2. Türkiye’de ham çelik kapasitesinin değişimi (milyon ton) [44]

3.1. Çelikhane Cürufu

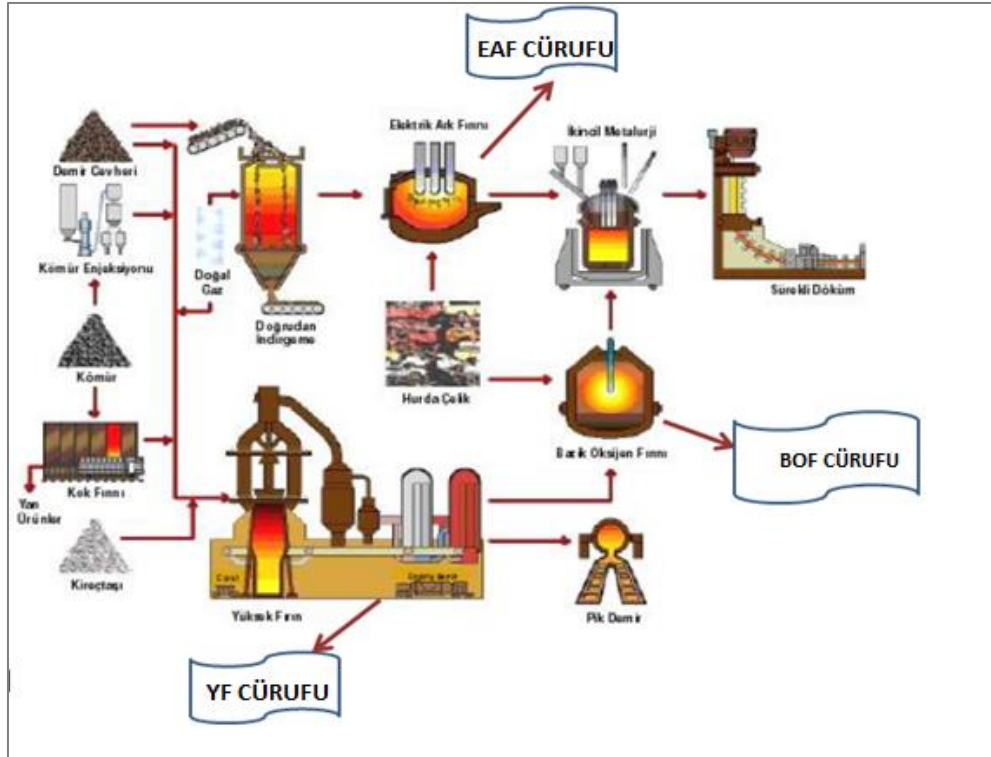
Çelik üretim sürecinde; yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufu olmak üzere iki tür cüruf yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Yüksek fırın cürufu, yüksek fırında (YF) demir cevherinin indirgenerek sıvı ham demir elde edilmesi esnasında, cüruf yapıcı elementlerin oksitlenerek, sıcak maden üzerinde toplanmasıyla oluşur. Çelikhane cürufu ise, çelik üretiminde, elektrik ark ocağı (EAO), İndüksiyon ocağı (İO) veya Bazik Oksijen Fırınında (BOF) metal eriğin rafinasyon ve oksitlenmesi sırasında oluşur.

Çelikhane cürufunun parke, bordür, yağmur oluğu, hazır beton ürünleri, granüler ürünler, raspa kumu, asansör ve beyaz eşya denge ağırlığı, asfalt agregası, alt ve üst temel malzemeleri ve muhtelif ebatlarda dolgu malzemesi olarak geri kazanımı yapılmaktadır. Geri kazanıma gönderilemeyen çelikhane cürufu, yeterli alanı bulunan kuruluşlar tarafından, tesis içerisinde geçici depolanmakta, alanı uygun olmayan tesisler tarafından ise, düzenli depolama alanında bertaraf edilmektedir. Çizelge 3.1’de Türkiye Çelik Üreticileri Derneği Üyelerine ait tesislerde 2014 yılında üretilen çelikhane cürufunun üretim-geri kazanım miktarları yer almaktadır.

Çizelge 3.1. Çelikhane cürufu atık ve geri kazanım miktarları (ton) [42]

İl	Çelikhane Cürufu Üretimi	Atık Miktarı	Geri Kazanım Miktarı
Kocaeli	874 327	494 117	380 210
Bursa	35 500	7 500	28 000
Tekirdağ	132 000	47 000	85 000
Çanakkale	459 343	50 529	408 814
Bilecik	8 400	4 000	4 400
İzmir	490 580	182 907	307 673
Zonguldak	449 848	261 327	188 521
Karabük	266 760	0	243 540
Samsun	150 206	150 206	0
Osmaniye	619 819	608 745	11 074
Hatay	1 131 695	901 155	230 540

Entegre üretim yapan tesislerde akım şeması ve ortaya çıkan cüruf atıklar Şekil 3.3'te görülmektedir. Yüksek fırından ergimiş halde elde edilen sıvı pik demir çelik üretim prosesine katılmak üzere bazık oksijen fırınına aktarılır. Burada safsızlıkları giderilerek çelik halini alırken, atık malzeme olarak Çelikhane Cürufu (BOF) oluşur. Çelik üretiminde bazık oksijen fırınından (BOF) elde edilen çelikhane cürufu ile ilgili kullanım ve çalışmalar ülkemizde çok sınırlıdır.



Şekil 3.3. Çelik üretim süreci ve cüruf oluşumu [1]

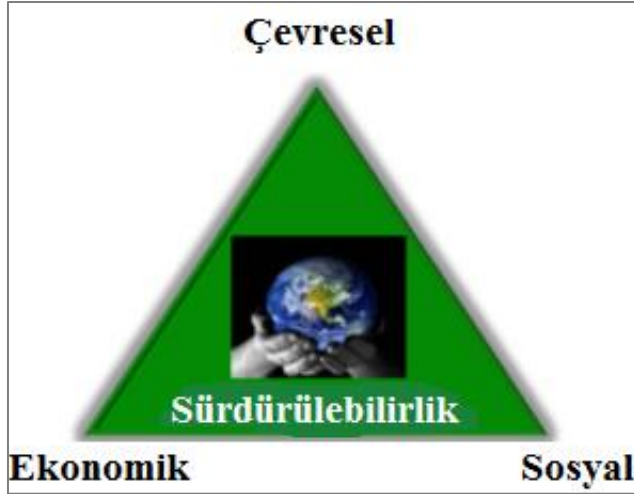
Onuncu Kalkınma planı kapsamında hazırlanan Demir-Çelik Çalışma Gurubu Raporuna göre; Türkiye’de 2012 yılı itibarıyla, 49 milyon ton seviyesinde bulunan çelik sektörünün kapasitesinin, 2015 yılında 55; 2023 yılında 85 milyon tona, üretiminin ise sırasıyla 44 ve 70 milyon tona ulaşması hedeflenmektedir [45]. Türkiye’de 2012 yılı itibarıyla, 49 milyon tonluk ham çelik kapasitesinin % 78.3 oranındaki, 38.4 milyon tonu elektrik ocaklı (EO) tesislere, %21.7 oranındaki, 10.6 milyon tonu ise entegre tesislere (BOF) aittir [41]. Entegre tesislerde oluşan çelikhane cürufunun ton başına 100 ile 150 kg arasında olduğu düşünüldüğünde, 2023 yılında yan ürün olarak üretilecek çelikhane cürufu, entegre tesislerin üretim kapasitesinin toplam kapasite içindeki payının da aynı olması durumunda beklenen çelikhane cürufu üretim miktarı yıllık 2 milyon ton civarında olacaktır.

Endüstriyel atıkların yeniden kullanılması, başka üretim süreçlerinde hammadde olarak değerlendirilerek tekrar ekonomiye kazandırılması, bunların atık olarak imha edilmesi veya depolanması seçeneğine göre ekonomik ve çevresel açıdan günümüz teknolojileri için önemli bir konu olmuştur. Endüstriyel atıkların bu şekilde ekonomiye kazandırılması ile depolanması için gerekli olan sahalardan ve imhası için katlanılacak maliyetlerden tasarruf edilmektedir. Diğer yandan; başka endüstriyel alanlarda kullanılmasıyla da girdi maliyetlerinde ekonomiklik sağlanmakta ve giderek daralan doğal kaynak rezervlerinden de tasarruf sağlanmaktadır. Endüstriyel üretim süreçlerinde ortaya çıkan atık veya yan ürünlerin bu şekilde değerlendirilmesi ile ulusal ve küresel düzeyde sürdürülebilir ekonomik hedeflere katkı sağlanmakta, gelecek nesiller için kullanılabilir doğal kaynaklar bırakılmakta ve daha da önemlisi yaşanılabilir temiz bir çevrenin geleceği sağlanmış olmaktadır.

Doğal agrega kaynaklarının giderek azalması ve çevresel hassasiyetler nedeniyle doğal agrega ocaklarının işletilmesi ile ilgili ruhsatlandırma işlemlerinin daha titiz değerlendirilmesi nedeniyle yol inşaatlarında yüklenici ve idareleri alternatif malzeme olarak endüstriyel atıkların kullanılmasını gündeme getirmiştir.

Yol inşaatlarında kullanılan agregaların maliyetindeki en önemli unsur nakliye maliyetleridir. Ancak endüstriyel atıkların kullanılmasının ekonomik açıdan doğal agregaya göre avantaj ve dezavantajı değerlendirildiğinde tek başına edinim ve nakliye bedellerinin hesaplanması yetersiz bir değerlendirme olacaktır. Çünkü bu atıkların bertarafı veya depolanması için katlanılacak maliyetlerin de değerlendirilmesi gerekmektedir. Yukarıda da değinildiği üzere doğal kaynaklardan tasarruf sağlanarak gelecek nesillere de

kullanabilecekleri doğal kaynaklar bırakılması suretiyle sürdürülebilir bir endüstri ve sürdürülebilir bir çevre politikası sağlanması da büyük resimde görülmesi gereken diğer faktörlerdir. Sürdürülebilirlik; çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik olmak üzere üçlü sacayağı olan bir yapıdır [46]. Bir üretim sürecinin sürdürülebilir olması için bu üç şartı da sağlaması gerekmektedir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Sanayi üretimde sürdürülebilirlik koşulları [46]

3.2. Çelikhane Cürufu Kimyasal Özellikleri

Çelikhane sıvı pik demir içindeki istenmeyen elementlerin oksitlenme yoluyla giderilmesi için sıcak metal ve hurdaya yardımcı hammadde olarak yanmış kireç (CaO), kireçtaşı (CaCO_3), dolomit [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] gibi cüruf yapıcı malzemeleri ilave edilir [47]. Çelikhane cürufunda bulunan başlıca bileşikler; CaO , MgO , MnO , SiO_2 , Al_2O_3 , FeO ve Fe 'dir.

Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te çelik üretim sürecinde kullanılan yönteme bağlı olarak ortaya çıkan bazik oksijen fırın (BOF) cürufu ve elektrik ark fırın (EAF) cürufunun literatürdeki verilere göre kimyasal kompozisyonu görülmektedir [48].

Çizelge 3.2. BOF cürufu kimyasal kompozisyonu [48]

Referans	% Oksit kompozisyonu									
	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	Serbest CaO
Yi vd.	45-60	1-5	10-15	3-13	3-9	7-20	2-6	1-4	-	-
Belhadj vd.	40-45	1-2	8-13	4-8	28-32	-	2-4	1-2	0,5-1	-
Ameri vd.	50-57	0,7-1,4	9-11	1-2	10-13	-	4-5	2,3-3,2	-	-
Zhu vd.	40-58	2,3-4,9	12-16	6-9	17-28	-	-	1,4-1,8	-	-
Li vd.	41-43	2,7-2,9	19-20	5-6	7-8	11-13	-	-	-	-
Wang	35-41	2,4-3	12-18	8-11	-	-	4-5	0,5-0,8	-	-
Wang vd.	30-55	1-6	8-20	5-15	-	10-35	2-15	0,2-3	0,4-2	-
Mahieux vd.	47-50	2,00	11,80	6,30	22,60	-	1,90	2,70	0,50	-
Shen vd.	39,3	0,98	7,75	8,56	38,06	-	4,24	-	0,94	-
Shen vd.	30-55	1-6	8-20	5-15	-	10-35	2-8	0,2-2	0,4-2	-
NSA 2008	41,30	2,20	15,60	6,90	-	-	8,90	-	0,50	3,3
Nicolae	40,10	2,04	17,80	6,32	6,58	12,92	6,52	1,33	-	3,9
Das vd.	47,88	1,22	12,16	0,82	-	26,30	0,28	3,33	-	-
Chaurand vd.	41,30	2,40	12,50	4,30	31,20	-	6,10	1,10	0,80	-
Xue vd.	45,41	3,80	13,71	6,25	3,24	21,85	3,27	1,42	-	-
Reddy vd.	53,30	1,30	15,30	1,10	-	-	0,39	3,10	-	-
Tossavainen vd.	45,00	1,90	11,10	9,60	10,90	10,70	3,10	-	-	-
Poh vd	40-52	1-4	10-15	5-8	9-10	13-17	2-5	0,9-1,3	0,5-0,7	3-10

Çizelge 3.3. EAO cürufu kimyasal kompozisyonu [48]

Referans	% Oksit kompozisyonu									
	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	Serbest CaO
Yi vd.	30-50	10-18	11-20	8-13	5-6	8-22	5-10	2-5	-	-
Pasetto ve Baldo	29,60	9,30	13,02	3,65	-	32,84	5,09	-	0,35	-
Wang vd.	35-60	2-9	9-20	5-15	-	15-30	3-10	0,1-2,0	-	-
Lekakh vd.	32,1	8,6	19,4	9,4	-	-	6,8	-	0,4	-
Tsakiridis vd.	35,7	6,25	17,53	6,45	26-36	-	2,5	-	0,76	-
Nicolae	40,78	4,23	17,81	8,53	3,97	9,25	9,79	0,74	-	-
Tossavainen vd.	45,5	3,7	32,2	5,2	1,0	3,3	2,0	-	-	-
Tossavainen vd.	38,8	6,7	14,1	3,9	20,3	5,6	5,0	-	-	-
Manso vd.	23,9	7,4	15,3	5,1	-	-	4,5	-	-	-
Manso vd.	23-32	3,5-7,0	8,15	4,8-6,6	11-40	7-35	2,5-4,5	-	-	0,45
Shi	35-60	2-9	9-20	5-15	-	15-30	3,0-8,0	0,01-0,25	-	0-4,0

Avustralya cüruf birliği verilerine göre ise çelikhane cürufunun kimyasal içeriği Çizelge 3.4'te verilmiştir [49].

Çizelge 3.4. Cürufların tipik kimyasal bileşenleri

Oksit Bileşenleri	YF Cürufu (%)	BOF Cürufu (%)	EAO Cürufu (%)
CaO	41	40	35
Serbest kireç	0	0-2	0-1
SiO ₂	35	12	14
Fe ₂ O	0,7	20	29
MgO	6,5	9	7,7
MnO	0,45	5	5,7
Al ₂ O ₃	14	3	5,5
TiO ₂	1	1	0,5
K ₂ O	0,3	0,02	0,1
Cr ₂ O ₃	<0,005	0,1	1
V ₂ O ₅	<0,05	1,4	0,3
S	0,6	0,07	0,1

Çizelgelerden de görüldüğü gibi kimyasal içerik benzer olmakla birlikte yüzde ağırlık oranları araştırmacıya ve üretim biçimine (BOF, EAF) göre kısmen değişmektedir. Kimyasal içeriği belirleyen başlıca faktörler; üretim biçimi, saflaştırma amacıyla üretime giren cüruf yapıcı malzeme, kullanılan hurda çelik olarak sayılabilir. FHWA'nın FHWA-RD-97-148 numaralı yayınına göre çelikhane cürufunun tipik kimyasal bileşimi Çizelge 3.5'teki gibidir [50].

Çizelge 3.5. Çelikhane cürufunun kimyasal kompozisyonu [50]

Bileşik	(%)
CaO	40-52
SiO ₂	10-19
FeO	10-40 (70-80% FeO, 20-30% Fe ₂ O ₃)
MnO	5-8
MgO	5-10
Al ₂ O ₃	1-3
P ₂ O ₅	0,5-1
S	< 0,1
Fe	0,5-10

3.3. Çelikhane Cürufunun Toksidite Özellikleri

Demir çelik endüstrisinden kaynaklanan cüruflar, “Atık Yönetimi Yönetmeliği” ile tanımlanan; Ek IV'te 10 02 kodlu, Demir ve Çelik Endüstrisinden Kaynaklanan Atıkların alt başlığında yer alan, 10 02 01 Cüruf işleme atıkları ve 10 02 02 İşlenmemiş cüruf kodları ile tehlikesiz atık kategorisine girmektedir [51].

Atıkların depolanmasına ilişkin çıkarılan 2010 tarihli Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelikte ise İnert Atıkları “Fiziksel, kimyasal veya biyolojik olarak önemli derecede herhangi bir değişime uğramayan, çözünmeyen, yanmayan, fiziksel veya kimyasal olarak reaksiyona girmeyen, biyolojik bozunmaya uğramayan veya temas ettiği maddeleri çevreye veya insan hayatına zarar verecek şekilde etkilemeyen ve toplam sızıntı kabiliyeti ve ekotoksitesitesi önemsiz miktarda olan, özellikle yüzeysel su ve yeraltı suyu kirliliği tehlikesi yaratmayan atıklar” şeklinde tanımlamıştır [52].

Atıkların inert atık grubunda yer alarak düzenli depolanabilmesi için Eluat testi değerlerine göre toksidik elementlere ilişkin sınır değerler yönetmelik kapsamında Çizelge 3.6'da yer aldığı şekilde belirlenmiştir.

Çizelge 3.6. Düzenli depolanabilme için ağır metallere ait toksidite sınır değerleri [52]

Parametre	Birim	Sınır değer
As (Arsenik)	mg/L	0,05
Ba (Baryum)	mg/L	2,00
Cd (Kadmiyum)	mg/L	0,004
Cr toplam (Toplam krom)	mg/L	0,05
Cu (Bakır)	mg/L	0,2
Hg (Cıva)	mg/L	0,001
Mo (Molibden)	mg/L	0,05
Ni (Nikel)	mg/L	0,04
Pb(Kurşun)	mg/L	0,05
Sb (Antimon)	mg/L	0,006
Se(Selenyum)	mg/L	0,01
Zn (Çinko)	mg/L	0,4
Klorür	mg/L	80,00
Florür	mg/L	1,00
Sülfat	mg/L	100
Fenol indeksi	mg/L	0,10
ÇOK(Çözülmüş organik karbon)	mg/L	50,00
TÇK (Toplam çözünen katı)	mg/L	400

Çelikhane cürufunun kimyasal bileşiminde arsenik, baryum, kadmiyum, kurşun, cıva, selenyum ve gümüş gibi kirleticiler yer almaktadır. Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından belirlenen atıkların zararlı madde sınırları ise Çizelge 3.7’de yer almaktadır [53].

Çizelge 3.7. Zararlı atıkların sınır değerleri (EPA, 2005)

Parametre	Sınır değer (mg/L)
Arsenik	5,0
Baryum	100,0
Benzen	0,5
Kadmiyum	1,0
Kloroform	6,0
Krom	5,0
Endrin	0,02
Kurşun	5,0
Lindane	0,4
Cıva	0,2
Methoxyklor	10,0
Selenyum	1,0
Toxaphen	0,5
Trikloretilen	0,5
Vinyl chloride	0,2
Gümüş	5,0

Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelikte depolama için belli yalıtım şartları öngörüldüğünden kirleticiler için belirlenen sınır değerler ABD çevre koruma ajansı (EPA) tarafından belirlenen değerlerden yüksek görünmektedir.

Aşağıdaki Çizelgelerde ise yapılan toksidite testleri sonucu sırasıyla BOF ve EAO bünyesinde yer alan toksidik elementlerin konsantrasyonları yer almaktadır (Çizelge 3.8, Çizelge 3.9).

Çizelge 3.8. BOF toksidik konsantrasyonları

Referans	Elementler (mg/L)							
	Arsenik	Baryum	Kadmiyum	Krom	Kurşun	Civa	Selenyum	Gümüş
Yıldırım İ. ve Prezzi M. [54].	<0,200	0,100	<0,050	<0,100	<0,500	<0,001	<0,200	<0,100

Çizelge 3.9. EAO toksidik konsantrasyonları

Referans	Elementler (mg/L)							
	Arsenik	Baryum	Kadmiyum	Krom	Kurşun	Civa	Selenyum	Gümüş
Yıldırım ve Prezzi, 2009 [54].	<0,200	0,580	<0,050	<0,100	<0,500	<0,001	<0,200	<0,100
Yonar F., 2017 [55].	0,001	1,00	<0,0005	<0,05	<0,01	<0,0002	0,002	

EPA (2005) sınır değerleri ile karşılaştırıldığında BOF ve EAO çelikhane cürufalarının her ikisinin de tehlike sınırlarının altında olduğu yukarıdaki Çizelgelerden görülmektedir.

3.4. Çelikhane Cürufu Fiziksel Özellikleri

Yol üst yapısında kullanılan granüler malzemeler tekrarlı trafik yükleri ve belli iklim koşullarına maruz kalırlar. Hem trafik yüklerinden kaynaklı dış yüklere hem de iklim koşullarından kaynaklı ısınma-soğuma, donma-çözülme gibi etkilere karşı yeterli mukavemeti göstermek zorundadır. Bunun için yol üst yapısında kullanılan granüler malzemelerin hacim stabilitesi, aşınma dayanımı, hava tesirlerine dayanıklılık, su emme vb. özellikler açısından belirli değerlere sahip olması gerekmektedir.

Çizelge 3.10'da FHWA tarafından aynı raporda yer alan çelikhane cürufunun temel fiziksel özellikleri yer almaktadır [50]

Çizelge 3.10. Çelikhane cürufunun genel özellikleri [50]

Çelikhane Cürufunun Fiziksel Özellikleri		Değer
Los Angeles Aşınma (ASTM C131), %		20-25
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi (ASTM C88), %		<12
İçsel sürtünme açısı		40°-50°
Kalifornia taşıma Oranı (CBR), % en büyük boyut 19mm)**		300'e kadar
Sertlik (Moh skalası)*		6-7
*Dolomit sertliği 3-4 ** Öğütülmüş kireç taşı CBR'ı 100%.		

Yapılan literatür taramalarında çelikhane cürufunun fiziksel özellikleri açısından doğal agrega ile benzer mukavemet ve özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Çelikhane cürufunun fiziksel özellikleri için belirlenen bazı değerler Karayolları Teknik Şartnamesindeki değerlerle karşılaştırmalı olarak Çizelge 3.11'de yer almaktadır.

Çizelge 3.11. Çelikhane cürufu fiziksel özellikleri

Test	Granit	Çelikhane Cürufu [48]	KTŞ [56]		BSK [57]
			Alttemel	Temel	Aşınma
Los Angeles aşınma	%9,80	%9,80	≤45	≤35	≤30
Yassılık indeksi	%19,00	%4,00	≤30	≤25	≤30
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık	%5,20	ND	≤25	≤20	≤16
Parlaklık/cilalama değeri	%52,70	%56,60	-		≤50
Su absorpsiyonu	%0,51	%1,20	≤3,50	≤3,00	≤2,00
Soyulma deneyi	-	>%95	-		≤50

Avusturalya Cüruf Birliği (ASA) tarafından çelikhane cürufunun fiziksel özellikleri için belirlenen bazı değerler Karayolları Teknik Şartnamesindeki değerlerle karşılaştırmalı olarak aşağıdaki Çizelgede yer almaktadır (Çizelge 3.12).

Çizelge 3.12. ASA'ya göre çelikhane cürufu fiziksel özellikleri

Test	ASA [49]	KTŞ [56]		BSK [57]
		Alttemel	Temel	Aşınma
Los Angeles aşınma	%12-18	≤45	≤35	≤30
Yassılık indeksi		≤30	≤25	≤30
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık	<4	≤25	≤20	≤16
Parlaklık/cilalama değeri	58-63	-		≤50
Su absorpsiyonu	%1-4	≤3,50	≤3,00	≤2,00
Soyulma deneyi	-	-	-	≤50

3.5. Çelikhane Cürufu Mekanik Özellikleri

FHWA tarafından desteklenen Joint Transportation Research Programı çerçevesinde çelikhane cürufunun zemin uygulamalarında kullanılması amacıyla hazırlanan 2009/32 sayılı raporda çelikhane cürufunun; özgül ağırlığının 3,29-3,34 aralığında, optimum su içeriğinin %4-%8, kuru birim hacim ağırlığının 19,5-21,8 kN/m³, %90 rölatif kompaksiyon numunesi üzerinde 100 kPa hücre basıncında yapılan konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli deney verilerine göre kritik içsel sürtünme açısının da 45° olduğu görülmüştür [54].

Aşağıdaki Çizelge 3.13’de çeşitli araştırmacılar tarafından belirlenmiş çelikhane cürufunun içsel sürtünme açısı değerleri yer almaktadır.

Çizelge 3.13. Çelikhane cürufunun mekanik özellikleri

Çelikhane Cürufunun Mekanik Özellikleri	FHWA [50]	Prezzi ve Yıldırım [54]	Moghaddam [58]	Noureldin ve McDaniel [59]
İçsel sürtünme açısı	40° - 50°	40° - 50°	46°-57°	40° – 50°
Kalifornia Taşıma Oranı (CBR), % (en büyük boyut 19mm)	300 kadar		26	300’ e kadar

Çelikhane cürufu doğal agregaya göre oldukça yüksek kesme dayanımına sahiptir. Bunun başlıca nedeni pürüzlü doku, köşeli dane yüzeyi ve çok farklı çapa sahip danelerin varlığı sayılabilir [54]. CBR değerleri ise %300’e kadar çıkmaktadır. Çizelgede 3.14’te Yonar tarafından yapılan çalışmada çelikhane cürufu değerleri ve KTŞ 2013 limitleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir [55].

Çizelge 3.14. CBR sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri [55].

Tabaka	KTŞ 2013 Limit	Doğal Agreg	Çelikhane cürufu
Alttemel Tip A	≥30	93	126
Alttemel Tip A	≥50	93	142
Temel Tip A	≥100	130	147
Temel Tip B	≥100	89	117
Temel Tip C	≥100	107	140
PMT Tip I	≥120	121	135
PMT Tip II	≥120	90	127

Veriler çelikhane cürufunun KTŞ 2013 limit değerlerini sağladığını ve doğal agregadan daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.

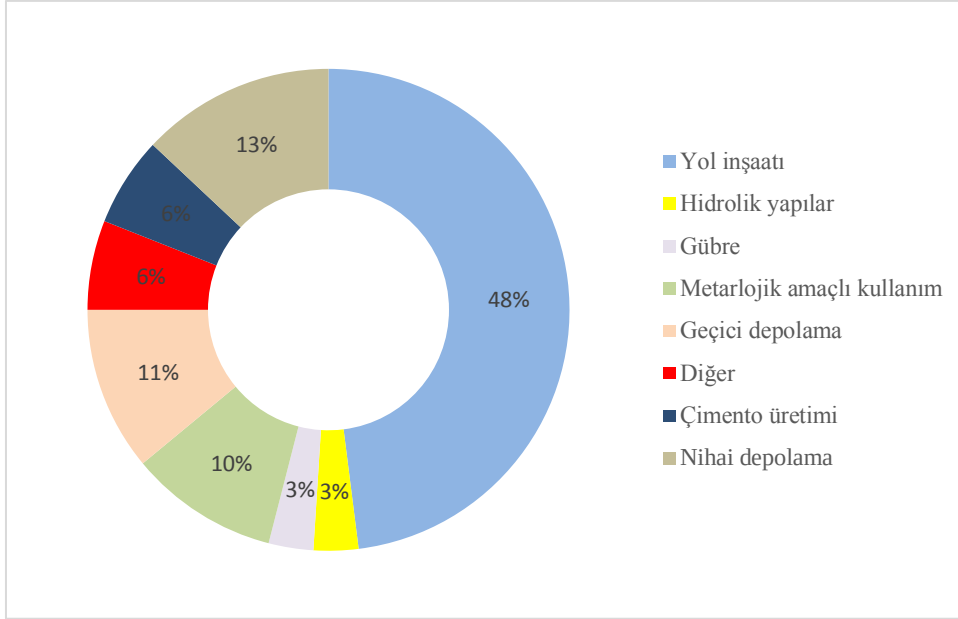
3.6. Çelikhane Cürufu Kullanım Alanları

ABD'deki Ulusal Cüruf Derneğine göre çelikhane cürufunun başlıca kullanım alanları; asfalt agregası, dolgu malzemesi, çimento katkısı, zemin iyileştirme, demiryolu balastı, yol üstyapı temeli, riprap malzemesinin yanı sıra çevre ve tarım alanındaki uygulamalardır [60]. Yüksek Fırın Cürufu dünyada olduğu gibi Türkiye'de de çimento sanayi, hazır beton gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Ancak entegre tesislerden elde edilen çelikhane cürufu ile ilgili kullanım ve çalışmalar ülkemizde sınırlıdır [61, 62]. ABD'de 2003-2009 yılları arasında çelik cürufunun kullanıldığı alanlar Çizelge 3.15'te görülmektedir [63]. Çizelge 3.15'te de görüldüğü gibi ABD'de çelikhane cürufunun tamamı kullanılmaktadır.

Çizelge 3.15. ABD'de çelikhane cürufunun kullanımı (2003-2009)

Kullanıldığı Alanlar	Çelikhane cürufu kullanımı, %						
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Beton Asfalt	17	12,9	15,6	12,1	14,4	10,9	8,2
Yol üstyapı temeli	46,4	63,5	53	51	51,5	60,3	59,9
Dolgu	11	9,6	10,5	17,9	13,3	10,8	12,7
Klinker Hammaddesi	5,4	5,5	6,9	6,9	6,7	5	2,2
Balast, çatı malzemesi, mineral yünü v.b.	2,5	2,9	2,3	0,8	2,3	0,5	0,5
Diğer belirtilmeyen alanlar	17,6	5,6	11,7	11,3	12	12,5	16,5

Dünyadaki uygulamalar açısından çelikhane cürufu birçok inşaat mühendisliği uygulamasında kullanılan bir malzemedir. Başlıca uygulama alanları olarak asfalt agregası, dolgu malzemesi, çimento katkısı, zemin iyileştirme gabion duvarlar, demiryolu balast malzemesi, yol temel ve alttemel malzemesi, riprap ile bazı çevre ve tarım uygulamaları sayılabilir. Aşağıdaki grafikde çelikhane cürufunun Avrupa'da kullanım alanları ve miktarları yer almaktadır (Şekil 3.5). Avrupa'da üretilen çelikhane cürufunun yalnızca %13'ü nihai depolamaya gitmektedir. [64].



Şekil 3.5. AB çelikhane cürufu kullanım alanları (Euroslag, 2010)

Yüksek fırın cürufu ile karşılaştırıldığında bazik oksijen fırın (BOF) cürufunun kullanımı Türkiye’de henüz yetersiz seviyededir. Bu durum Erdemir gibi bazı büyük çelik üreticilerinin cüruf depolama sorunuyla karşı karşıya kalmalarına neden olmaktadır. Türkiye Demir Çelik Üreticileri Derneği verilerine göre, Türkiyede üretilen çelikhane cürufunun sadece %40’ı geri dönüşüm malzemesi olarak kullanılmaktadır [42].

Çizelge 3.16 ve Çizelge 3.17’de ise çelikhane cürufunun Avusturalya’da ve Avrupa’daki başlıca kullanım alanları yer almaktadır .

Çizelge 3.16. Avustralya’da çelikhane cürufunun başlıca kullanım alanları [49]

Bazik Oksijen Fırın Cürufu (BOF)	Elektrik Ark Fırın Cürufu (EAF)
○ Yüzey kaplama/kaymazlık ○ Asfalt agregası ○ Temel/alttemel mazlemesi ○ Dolgu malzmesi ○ Drenaj ○ Kuşlama	○ Yüzey kaplama/kaymazlık ○ Asfalt agregası ○ Temel/alttemel mazlemesi ○ Dolgu malzmesi ○ Drenaj ○ Kuşlama

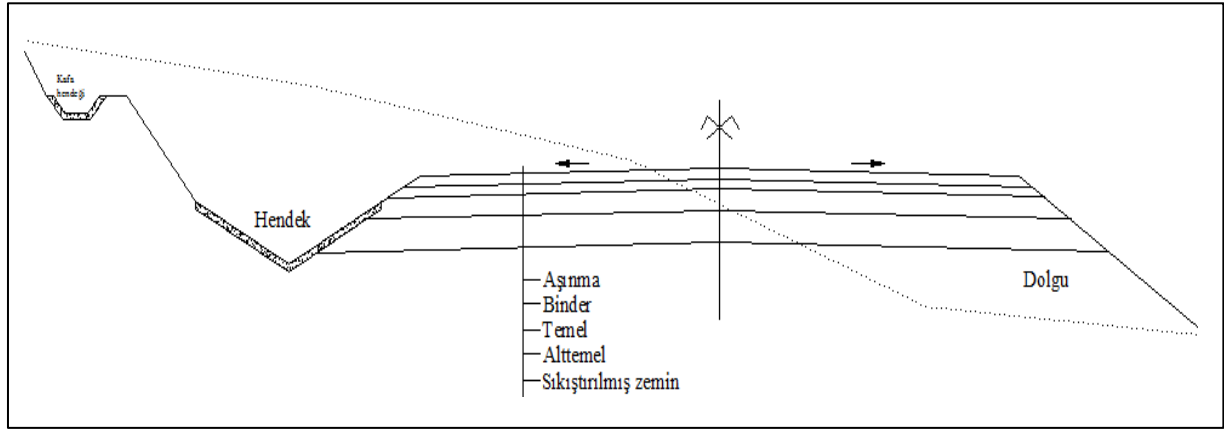
Çizelge 3.17. Çelikhane cüruflarının Avrupa'daki uygulamaları [64]

Bazık Oksijen Fırın Cürufu (BOF)	<u>Agrega olarak;</u> ○ Bütümlü ve hidrolik bağlayıcı karışımlarda (asfalt, beton, yol bağlayıcı vb.) ○ Yüksek kayma dirençli üst tabakalarda ○ Bağlayıcısız karışımlarda (bağlayıcısız yüzey tabakaları ve aşınma tabakaları vb.) ○ Barajlarda (yol inşaatı ve gürültü koruma) ○ Atıksu arıtmada ○ Demiryolu balastında ○ Dolguda ○ Koruyucu anroşman taşı ○ İstihkâm duvarı ve gürültü emici duvarlarda ○ Zemin stabilizasyonunda <u>İmalat olarak</u> ○ Çimento ve diğer hidrolik bağlayıcılar ○ Taşyünü ○ Cam (diğer bileşenlerle karıştırılarak) ○ Gübre
Elektrik Ark Fırın Cürufu (EAF)	<u>Agrega olarak;</u> ○ Bütümlü ve hidrolik bağlayıcı karışımlarda (asfalt, beton, yol bağlayıcı vb.) ○ Yüksek kayma dirençli üst tabakalarda ○ Bağlayıcısız karışımlarda (bağlayıcısız yüzey tabakaları ve aşınma tabakaları vb.) ○ Barajlarda (yol inşaatı ve gürültü koruma) ○ Atıksu arıtmada ○ Demiryolu balastında ○ Dolguda ○ Yüzey katmanları sızdırmazlıkta ○ Koruyucu anroşman taşı ○ İstihkâm duvarı ve gürültü emici duvarlarda ○ Zemin stabilizasyonunda <u>İmalat olarak;</u> ○ Çimento ve diğer hidrolik bağlayıcılar ○ Taşyünü ○ Cam (diğer bileşenlerle karıştırılarak)

Türkiye gerek üretim gerekse de ihracat açısından dünyada çelik üretimi yapan ilk on ülke içerisinde yer almaktadır. Ancak Avrupa ve Amerika ile karşılaştırdığımızda çelik üretim prosesinde yan ürün olarak ortaya çıkan çelikhane cürufunun yeterince değerlendirilmediği görülmüştür. Dünyadaki başlıca kullanım alanları; yolda bağlayıcılı veya bağlayıcısız malzeme, demiryolu balast malzemesi, dolgu, baraj inşaatı, tarım uygulamaları, çimento sanayi gibi alanlar olarak ön plana çıkmaktadır. Esnek yol üstyapısı açısından bakıldığında çelikhane cürufunun fiziksel ve mekanik özellikler açısından doğal agrega ile benzer özelliklerde olduğu, yol temel ve alttmele tabakalarında kullanılabileceği yukarıda yapılan literatür araştırmaları ortaya koymaktadır. Toksidite açısından ise tehlikeli atıklar kategorisinde yer almamaktadır.

4. ESNEK YOL ÜST YAPISI

Yol gövdesi altyapı ve üstyapı olmak üzere iki kısımdan oluşur. Altyapı yarma ve dolgulardan oluşmaktadır. Üstyapı ise, trafik yüklerini altyapıya (taban zeminine) dağıtan tabakalı (kaplama, temel ve alttemel tabakaları) bir sistemdir (Şekil 4.1). Bir üstyapı yapılmadan önce altyapı, üstyapıya istenen destek sağlayacak şekilde, şartnamelere uygun olarak hazırlanır. Üstyapının performansı taban zemininin fiziksel özellikleri ve durumu ile doğrudan ilintilidir. Yol üstyapısı, trafik yüklerinin ve doğal şartların etkisi altındadır. Trafik yükleri, taşıtların hareketleri sırasında radyal çekme ve basınç gerilmeleri ile düşey basınç gerilmeleri oluşturur. Deformasyonların şiddeti ve mertebesi, dingil yüklerinin büyüklüğü ve tekrar sayısı ile doğrudan orantılıdır [65, 66].



Şekil 4.1. Esnek yol üstyapı kesiti

Karayolu üst yapılarını üç temel kategoride toplamak mümkündür. Kullanılan üst yapı kaplama malzemesine bağlı olarak;

1. Esnek üst yapılar (asfalt kaplamalı),
2. Rijit üst yapılar (beton kaplamalı),
3. Kompozit üst yapılar (kaplama tabakası olarak asfalt ve beton tabakasının birlikte kullanıldığı üst yapılardır).

Bir esnek yol üst yapısı tipik olarak: 2,5-25 cm kalınlığında asfalt karışım veya beton asfalt kaplama tabakası, 10-30 cm temel tabakası ve 10-50 cm kalınlığında alttemelden oluşur.

Alt temel ise fiziksel/mechanik özellikleri iyileştirilmiş doğal zemin üzerinde yer alır. Her



Şekil 4.3. a) Yolda oluşan tekerlek izi ve b) Tekerlek izi modellemesi [68]

Yol üstyapı şartnamelerinde, elastik teoriyi esas alan esneklik modülü değeri dikkate alınarak üstyapılar projelendirilmektedir. Bu yöntemde malzemelerin doğrudan mukavemeti yerine tekrar eden yükler altında elastik modülü/resilient modül tayin edilmektedir. 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 tekrarından sonra malzeme elastik davranış göstermeye başlar [65].

Doğrusal elastik davranan malzemelerde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Hooke Yasası gereği doğrusal kabul edilmektedir. Gerilme-şekil değiştirme oranı doğrusal elastik aralıkta sabit olup malzemenin Young modülü (Elastik modül) olarak tanımlanır. Ancak doğadaki birçok malzemede olduğu gibi yolda kullanılan bağlayıcısız granüler malzemelerde oluşan deformasyonlar elastik ve plastik olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Elastik deformasyonlar yük etkisi kalktıktan sonra geri döndürülebilen (tersinir) deformasyonlardır. Plastik deformasyonlar ise yük etkisi kalksa bile malzemede oluşan kalıcı deformasyonlardır.

Esneklik modülü granüler malzemelerde zemin yapısı, su içeriği ve gerilme koşullarına bağlı olduğundan, her üstyapı tabakasında farklılık göstermektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü Üstyapı Şubesi Müdürlüğü'nde Türkiye'nin farklı bölgelerinden her cins malzemeyi temsil edecek şekilde alınan temel, alttemel ve taban zemini numunelerine esneklik modülü deneyi yapılmış olup, elde edilen deney sonuçları istatistiksel yöntemlerle analiz edilerek granüler malzemelerin esneklik modülü için Eşitlik 4.1'de verilen genel formül elde edilmiştir [65].

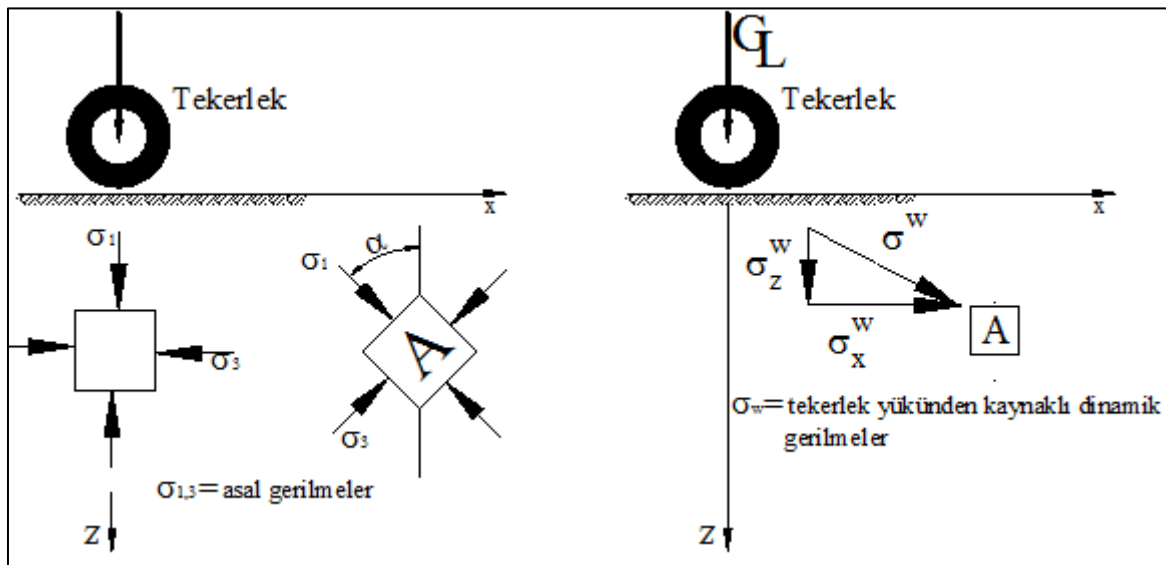
$$M_r = 1750(D_{BSK} + k)^{0.436} \cdot CBR^{0.4} \cdot \left(\frac{1}{1 + \log(\text{No}200)} \right)^{0.35(LL.PI+1)^{0.06}} \left(\frac{\gamma_{maks}^2}{\text{No}4} \right)^{0.09 \log(w_{opt})} \quad (4.1)$$

Bu formülden elde edilen sonuçlar çok geniş aralıkta değerler vermektedir. Formülde ince ve kaba malzeme yüzdesi su içeriği, CBR değeri ve sıcak karışımın etikisinin dikkate alındığı görülmektedir. Ancak mineroloji, köşeli yüzey, boşluk oranı, gerilme verimlerinin düzeyi, çevre basıncı gibi faktörler de malzeme modülünü ekileyen diğer faktörlerdir. Bu nedenle yapılacak arazi ve labaratuvar deney sonuçlarından elde edilmesi daha doğru olacaktır.

4.1. Yol Üst Yapısında Deformasyonlar

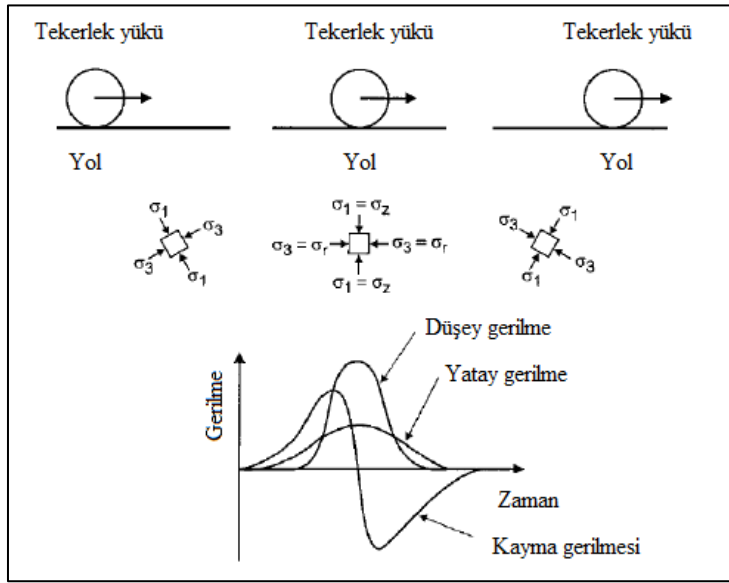
Yol yüzeyinde oluşan deformasyonlar; asfalt tabakası, granüler temel ve alttemel tabakaları ile doğal veya iyileştirilmiş zemin tabakalarında oluşan deformasyonların toplamıdır. Bu tabakalarda oluşan plastik deformasyonların toplamı asfalt tabakasının yüzeyine tekerlek izi olarak yansır.

Dinamik ve değişken tekerlek yükleri altında yol üst yapılarında oluşan yatay ve düşey gerilmeler ile kayma gerilmelerinin yönü ve büyüklüğü Şekil 4.4'de görüldüğü gibi sürekli değişir [69, 70].



Şekil 4.4. Granüler temel tabakasında oluşan gerilmeler [69, 70]

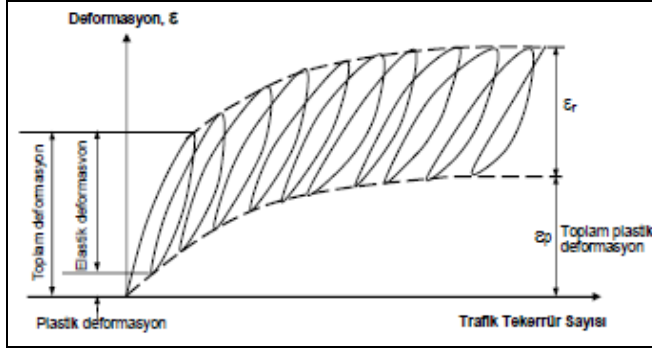
Şekil 4.5'te granüler tabakada; düşey gerilmenin yatay gerilmelerden daha düşük olduğu bölgede tekerlek geçişi sırasında yanal genişleme oluşmakta, düşey gerilmenin yatay gerilmelerden büyük olduğu bölgede ise basınç oluşmaktadır. Farklı dingil yükleri sırasında zeminde oluşan gerilme izleri sürekli değişkenlik göstermekte ve bu yolda en sık rastlanan iki durum olan tekerlek izi ve malzeme yorulmasından kaynaklı çatlakları tetiklemektedir [71]. Yolda oluşan hasarların doğru tahmini, ancak arazide oluşan yükleme durumu ve gerçeğe en yakın malzeme bünye modeli ile mümkün olacaktır.



Şekil 4.5. Tekerlek yükü altında zamanla değişen gerilmeler [71]

Granüler malzemelerde tekrarlı basınç gerilmelerinden oluşan deformasyonlar Şekil 4.6'da görüldüğü üzere elastik ve plastik olmak üzere iki bileşenden oluşur [65]. Elastik veya başka bir ifade ile rezilient deformasyonlar geri döndürülebilir deformasyonlar olup yük etkisi kalktığında deformasyonlar da ortadan kalkar. Plastik deformasyonlar ise yük etkisi kalksa bile deformasyonlar kalıcıdır ve geri döndürülemezdir. Bu şekilde deformasyonlar aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir (Eşitlik 4.2).

$$\varepsilon_{\text{toplamlam}} = \varepsilon_r + \varepsilon_p \quad (4.2)$$



Şekil 4.6. Tekrarlı yükler altında oluşan şekil değiştirmeler [65]

Yüklemeye oluşan elastik deformasyon yük etkisi kalktıktan sonra tekrar sıfırlanır. Bu şekilde her bir yük tekrarı zamanla asfalt tabakasında yorulmaya neden olur ve sonuçta asfalt tabakasında çatlama ve kırılmalara neden olur. Tekrarlı trafik yükleri altında oluşan plastik deformasyonlar ise zamanla asfalt yüzeyinde tekerlek izi olarak adlandırılan çökmelere neden olur [68].

Literatürde tekrarlı üç eksenli gerilmeler altındaki granüler malzemede oluşan gerilme izlerinin, malzeme resilient davranışı üzerindeki etkisinin test edildiği sınırlı sayıda çalışma vardır. Hareketli trafik yükleri altında kalan bağlayıcısız granüler malzemelerdeki davranış Şekil 4.6’da olduğu gibi non-lineer, zamana bağlı elasto-plastik davranıştır. Dinamik tekrarlı yükler altında oluşan deformasyonların bir kısmı kalıcı iken (ϵ_p), diğer bir kısmı ise yükün etkisi kalktıktan sonra geri döndürülebilen resilient (ϵ_r) deformasyonlardır. Üç eksenli ve tekrarlı yük şartları altında test edilen malzemenin esneklik modülü aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (4.3)$$

Burada; σ_d deviatör gerilme

ϵ_r : Esnek birim şekil değiştirme (Eksenel yönde)

Esneklik modülü (M_r), bağlayıcısız granüler malzeme için tanımlanan, gerilme seviyesine bağlı malzeme modülüdür [72].

4.2. Malzeme Rezilient Davranışı

4.2.1. Rezilient modüle etki eden faktörler

Malzeme rezilient davranışına etki eden birçok faktör vardır. Bunların başlıcaları; mazlemenin kendi özellikleri, çevresel şartlar ve yükleme koşulları olarak sıralanabilir.

Malzeme özellikleri

Nem içeriği, yoğunluk, doygunluk derecesi, gradasyon, en büyük dana çapı, ince malzeme oranı, malzeme şekli (yassı, yuvarlak vb.).

Yükleme koşulları

Prensip gerilmeler, deviatör gerilme, gerilme geçmişi, yükleme süresi, yükleme büyüklüğü, yükleme frekansı ve gerilme izleri olarak sıralanabilir.

Çevresel şartlar olarak

Sıcaklık, donma-çözülme, yeraltı suyunun varlığı malzeme rezilient davranışını etkileyen faktörlerdir. Granüler malzemelerin gerilme seviyesine bağlı elastik deformasyon davranışını (resilient davranış) belirlemek için geliştirilen en temel ve yaygın modül K-θ modülüdür[73]. K-θ modülü ilk defa Brown ve Pell tarafından geliştirilmiştir [74].

4.2.2. Malzeme esneklik/rezilient modülleri

Toplam gerilme (K-θ) modeli

$$M_r = k_1 \theta^{k_2} \quad (4.4)$$

Burada k_1 ve k_2 malzeme sabitleri olup θ malzemeye etkiyen toplam gerilmedir ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$). Daha sonra çeşitli araştırmacılar tarafından Eşitlik 4.4 temelinde model kalibre edilmiş ve değişik korelasyonlar geliştirilmiştir [69].

Deviatör gerilme modeli

Esneklik modülü deviatör gerilmenin ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$) bir fonksiyonudur ve aşağıdaki eşitlikte yer aldığı şekilde tanımlanmıştır:

$$M_r = k_3 \sigma_d^{k_4} \quad (4.5)$$

Burada;

σ_d : Deviatör gerilme, k_3 ve k_4 ise malzeme sabitleridir.

Uzan modeli

K- θ modelini değiştirerek deviatör gerilmenin malzeme modeline etkisini de değerlendirmeye almıştır [75]:

$$M_r = k_1 \theta^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (4.6)$$

k_1 , k_2 ve k_3 malzeme sabitleridir. θ ve σ_d ise sırasıyla toplam gerilme ve deviatör gerilmedir. Atmosferik basınca göre normalize edildiğinde modül değeri aşağıdaki eşitlikte yer aldığı şekilde olacaktır.

$$M_r = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_3} \quad (4.7)$$

P_a , atmosferik basınçtır.

Oktahedral kayma gerilmesi modeli

Uzan modelinin modifiye edilmiş halidir. Witczak and Uzan tarafından geliştirilen bu modelde Eşitlik 4.7’de yer alan deviatör gerilme yerine oktahedral gerilme yer almıştır [76]:

$$M_r = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} \right)^{k_3} \quad (4.8)$$

AASHTO MEPDG modeli

NCHRP 1-28A projesi kapsamında geliştirilen malzeme bünye modelidir [77]:

$$M_r = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_b}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (4.9)$$

Burada M_r esneklik modülü, P_a atmosferik basınç, σ_b toplam gerilme ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$), τ_{oct} oktahedral kayma gerilmesi, k_1 , k_2 , k_3 ise malzeme sabitleridir.

4.3. Malzeme Plastik Davranışı

Yol yapıları analitik, sayısal ve deneysel tekniklerle modellenen oldukça karmaşık yapılardır. Bu karmaşık davranış, üst yapı ve alt taşıyıcı zeminin uzun vadeli performansını değerlendirmek için ayrıntılı öngörme yöntemleri gerektirdiğinden iyi anlaşılmalıdır. En önemli konu, tekrarlanan trafik yüklerine maruz kalan yol yapısının dinamik gerilmeleri ve deformasyonlarının belirlenmesidir [78].

Esnek yol üstyapıları için en önemli konu yol yüzeyinden meydana gelen tekerlek izi çökmelerinin sınırlandırılmasıdır. Tekerlek izinin ölçülmesi kolay olsa da tekerlek izi çökmesinin tahmini oldukça güçtür. Üstyapıda kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerini anlamamanın yanı sıra aynı zamanda çevresel koşulların etkisinin değerlendirilmesi ve servis ömrü boyunca gerilme dağılımının iyi hesaplanması gerekmektedir [79].

Yük altında meydana gelen çökmeler, yükün seviyesi, yük çevrim sayısı ve malzeme parametrelerinin bir fonksiyonudur. Malzeme açısından değerlendirildiğinde, kalıcı deformasyonlara sıkıştırma, ezilme ve malzeme yerdeğiştirmesi neden olur [80]. Malzemede meydana gelen bu değişiklikler, malzeme tipi, tane büyüklüğü dağılımı, yoğunluk ve nem içeriğinin bir fonksiyonudur [81].

Bağlayıcısız granüler malzemelerin döngüsel yükleme altındaki tepkileri, son zamanlarda yaygın olarak kullanılan shakedown teorisine göre üç aralıkta tanımlanabilir. Bu aralıklar; plastik shakedown aralığı, sünme ve artımlı göçme aralığı olarak tanımlanabilir. Plastik

shakedown evresinde, malzeme nispeten düşük gerilme seviyesindedir. Sünme aralığında ise malzeme orta gerilim seviyesindedir. Bu aralıkta, döngü başına kalıcı deformasyon hızı, belirli yük çevrimlerinden sonra neredeyse sabittir. Sabit gerilme oranı seviyesine erişim için gerekli olan yük çevrimi sayısı, malzemeye ve yük seviyesine bağlıdır. Yük döngüsü sayısı, sıkıştırma sonrasının sonunu gösterir [28]. Artımlı göçme aralığında gerilme seviyesi, plastik shakedown aralığından ve sünme aralığından daha yüksektir. Bu aralık sonunda malzeme göçmeye ulaşır [82, 83].

Kalıcı gerilme çizgisi üç bölüme ayrılabilir. İlk aşamada (sıkıştırma sonrası) kalıcı deformasyon esas olarak tanelerin yeniden oryantasyonu ve kırılmadan kaynaklıdır. Sıkışma hacimsel değişime neden olur. İkinci aşamada, yük döngüsü başına kalıcı gerilme neredeyse değişmez ve çoğunlukla parçacık kırılmasından ziyade parçacık temas yüzeylerindeki aşınmadan kaynaklanır. İkinci aşamadaki yük birçok yük döngüsünden sonra gerilme hızı artmaya başlar ve göçme ile sonuçlanır. Son aşamada tanelerin yüzeyindeki sürtünmeden kaynaklı yıpranma göçmeye katkıda bulunur [28].

Barksdale (1972), kalıcı eksenel deformasyonların, sabit deviatör gerilme altındaki yük çevrimlerinin logaritmasıyla doğrusal olarak arttığını tespit etmiştir. Yaptığı deney sonuçlarına göre çok sayıda yük döngüsünden sonra kalıcı deformasyonlarda ani artış olduğunu gözlemlemiştir [84].

Literatüre göre, kalıcı deformasyon modellerinin çoğunda, yük döngüsü ve deformasyon arasında üstel bir ilişki vardır. En yaygın ve basit denklem aşağıdaki Eşitlik 4.10'da yer almaktadır [26].

$$\varepsilon_p = aN^b \quad (4.10)$$

Burada ε_p eksenel birim deformasyon, a ve b regresyon parametresi, N ise yük döngü sayısıdır.

Korkiala-Tanttu, yeni nonlinear elasto-plastik bir model geliştirdi [26]. Deformasyon modellenli geliştirirken, sayısal modelde statik yükleme altındaki gerilmeler esas alınmıştır. Plastik deformasyonlar Eşitlik 4.11 ile hesaplanır:

$$\varepsilon_p = CN^b \frac{R}{1-R} \quad (4.11)$$

Burada ε_p aksel birim deformasyon, R yenilme oranı, N yükleme sayısı, b kayma gerilmesi yenilme oranına bağlı parametre ve C ise kompaksiyon ile doygunluk derecesine bağlı malzeme parametresidir.

Huurman, farklı tipte kumların aksel birim deformasyon davranışını tespit etmek için tekrarlı üç aksel deneyler gerçekleştirmiştir. Deneyler sonucunda bağlayıcısız granüler malzemeler için gerilmeye bağlı logaritmik bazlı, iki kısımdan oluşan kalıcı deformasyon modeli geliştirmiştir. Birinci terim stabil koşullardaki deformasyonları temsil ederken, ikinci terim ise stabil olmayan şartlardaki deformasyonları temsil etmektedir [85].

Sabine Werkmeister tarafından Dresden Teknik Üniversitesinde geliştirilen Dresden Modeli ise Huurman Model'i üzerine bina edilmiştir. Birinci terim logaritmik ölçekte kalıcı birim deformasyonun (ε_p)- yükleme sayısı (N) arasındaki doğrusal ilişkiyi temsil eder. A, B, C ve D ise σ_1/σ_{1f} oranı ile ilişkili gerilmeye bağlı katsayılarıdır. Werkmeister, σ_1/σ_{1f} oranı yerine A ve B parametrelerini σ_1 and σ_3 'e bağlı parametreler olarak tanımlamıştır. Dresden Modeli Eşitlik 4.12 ile ifade edilmektedir [28]:

$$\varepsilon_p = A\left(\frac{N}{1000}\right)^B + C(e^{\frac{D \cdot N}{1000}} - 1) \quad (4.12)$$

Burada ε_p aksel birim deformasyon, N yükleme sayısı ve A, B, C, D ise gerilmeye bağlı malzeme parametreleridir.

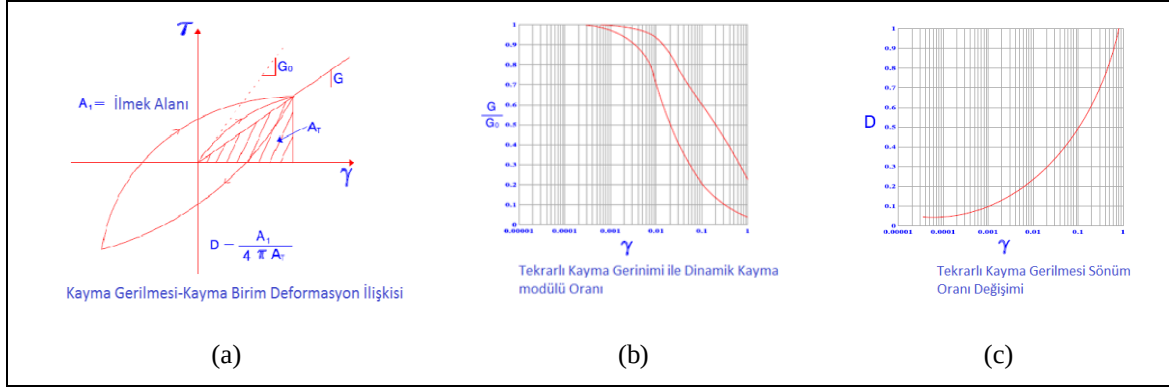
Werkmeister tarafından ifade edildiği üzere, ilk terim yukarıda shakedown teorisinde ifade edilen ilk iki gerilme fazındaki gerilmelere ait kalıcı deformasyonları ifade eder. A ve B her bir deformasyon fazı için farklı değerler alan parametrelerdir. İkinci terim shakedown teorisinde üçüncü fazdaki daha yüksek gerilme seviyelerine karşılık gelen deformasyonları ifade eder. Dresden Modelinde malzeme göçme seviyelerindeki gerilme seviyeleri ile ilgili olan C ve D parametreleri ise araştırmada yeterli veriler elde edilemediğinden tanımlanamamıştır.

Bu çalışmada her bir katmanın deformasyon karakteristiklerinin ayrı ayrı belirlenip her katman için ayrı ayrı deformasyon hesaplamak yerine katmanlar arası etkileşimide göz önüne almak için iki boyutlu sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilerek kesitin yükleme sayısına bağlı toplam deformasyonu değerlendirilmiştir.

4.4. Malzeme Bünye Modeli

Zemin davranışını tanımlayan malzeme karakteristikleri içerisinde maksimum elastik kayma modül değeri (G_{maks}), özellikle dinamik yükler altındaki analizlerde, zemin davranışını tanımlamada kullanılan parametre olup, laboratuvar ortamında genellikle Rezonant Kolon Deneyi yada Bender Elemanı Deneyi yöntemi ile hesaplanır [86-89]. Rezonant kolon deney yöntemi, prizmatik çubuklardaki dalga yayılımı teorisine dayanmakta olup, elastik ve vizkoelastik teorilerden yararlanarak zemine ait kayma modülü ve sönüm oranı değerleri elde edilebilmektedir [88]. Zemin elemanının dinamik davranışını belirleyen rijitlik ve sönüm oranı değerlerini etkileyen faktörler; deformasyon genliği, ortalama efektif gerilme, boşluk oranı, çevrim sayısıdır. Bunun yanı sıra deformasyon genliği ve çevrim sayısının sabit tutulduğu numunelerde de yükleme frekansının herhangi bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir [90, 91].

Trafik yükleri çevrimsel dinamik yüklerdir. Çevrimsel dinamik yüklerde gerilme seviyesi düşük olup, tekrarlı yükleme altındaki tipik bir zemin, Şekil 8a'daki gibi histerezis (Masing Model) bir davranış sergiler [92-94]. Bu durumda malzemenin öne çıkan gerilme-şekil değiştirme özellikleri; kayma deformasyon oranına bağlı dinamik kayma modülü, G/G_0 (Şekil 4.7b) ve sönüm oranı, D (Şekil 4.7c) dir. Eğrinin (Şekil 4.7a) iki uç noktasını birleştiren doğrunun eğimi malzemenin sekant modülü, herhangi bir noktadaki teğet tanjant modülünü verir.



Şekil 4.7. a)Histerik malzeme modeli b)Kayma deformasyon modülü c)Sönüm oranı [93]

Trafik yükleri altındaki granüler malzemelerin resilient davranışı deformasyon seviyesine bağlı Pekleşen Zemin (HS) modeli ile benzerlik göstermektedir. Zemin yükleme altında belli bir deformasyon seviyesine ulaştıktan sonra yükün boşaltılması sırasında deformasyonların bir kısmı kalıcı (plastik) olmaktadır. Ancak yük boşalımı sırasındaki malzeme esneklik modülü yükleme sırasındaki modülden daha yüksek bir değer almaktadır [94]. Bu model doğada yer alan birçok doğal malzeme (killer ve diğer granüler malzemeler) davranışı ile uyumludur.

Doğadaki birçok malzemenin deformasyon modüllerinin gerilme seviyesinin yanında gerinim seviyesine de bağlı olduğu açıktır. Malzemeler, histerik malzeme modelinde olduğu gibi düşük gerinim seviyelerinde elastik davranış sergilerken gerinim seviyesinin artışıyla ilgili olarak malzeme davranışı da elastik davranıştan elasto-plastik davranışa doğru evrilmektedir.

Ticari bir sonlu elemanlar analiz programı olan Plaxis'te tanımlı Hardening Soil Model with Small Strain Stiffness (HSsmall) malzeme bünye modeli [94], gerilme seviyesine bağlı, gerinim derecesi ile değişen rijitlik modülü kullanımına imkan verdiğinden, yol üst yapısını oluşturan granüler tabakaların çevrimsel trafik yükleri altındaki davranışını yeterli doğrulukta yansıtacağı düşünülmektedir. Bu bünye modelinde gerinim seviyesine bağlı olarak malzeme rijitlik modülü güncellenmektedir.

Benz, HS (Pekleşen Zemin Modeli) ile birlikte HSsmall malzeme modelini kullanarak yapmış olduğu sayısal analiz sonuçları ile söz konusu analizlerde kullanılan malzemelere ait üç eksenli ve konsolidasyon deneylerine ait gerçek sonuçları karşılaştırmıştır. Kinematik pekleşme ve boşluk oranının modelde temsil edilmemesine rağmen HSsmall malzeme

modeline ait sayısal analiz sonuçları açısından son derece pozitif sonuçlar elde etmiştir. HS zemin modelinin uygulandığı bütün zemin problemlerine HSsmall malzeme modelinin de çok rahat uygulanabileceğini ortaya koymuştur [95].

Modelin kullanılabilirliğini ortaya koymaya yönelik yapmış olduğu çalışmalarda; tünel, derin kazı ve sürekli temellere ait birçok örnekte gerçek arazi verileri ile HSsmall malzeme bünye modeline dayalı sayısal analiz sonuçlarını karşılaştırmış ve laboratuvar deneylerinde olduğu gibi gerçek problemlerde de HS modelinin uygulanabildiği bütün problemlere Mohr Coulomb yenilme kriterini baz alan HSsmall malzeme modelinin uygulanabileceğini göstermiştir.

5. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada, performansa dayalı ampirik (deneysel) yöntemler yerine yol alt ve üst yapılarının malzeme bünye modellerini dikkate alan, malzemelerde oluşan gerilmelere ve bu gerilmelerin trafik yükleri altındaki değişimini de hesaba katan deformasyon odaklı nümerik analiz yapılmıştır. Bu analiz için gerekli olan malzeme-mühendislik parametreleri ise arazide tekrarlı yükler altındaki deformasyon davranışını laboratuvar ortamda daha iyi modelleyebilen rezonant kolon deneyleri ile elde edilmiştir. Ayrıca malzemenin diğer fiziksel ve mühendislik parametreleri ise kısmen yapılan laboratuvar deneyleri ve literatürdeki değerlerden alınmıştır.

Bu çalışmada yol temeli ve alttemeli çelikhane cürufundan (BOF) oluşturulan esnek yol üst yapısının sayısal analiz yöntemleri marifetiyle dinamik trafik yükleri altında analizi gerçekleştirilmiş ve deformasyon karakteristikleri belirlenmiştir.

Malzeme sayısal analizinde kullanılan parametrelerin yanı sıra malzemenin karayolları esnek yol üstyapısının temel ve alttemel tabakaları için istenen diğer fiziksel ve mekanik özellikleri de değerlendirilmiştir.

5.1. Malzeme

Esnek karayolu üstyapıları bitüm bağlayıcılı tabakalar ve bağlayıcısız tabakalardan oluşur. Bitüm bağlayıcılı tabakalar beton asfalt dizaynında kullanılan aşınma ve binder tabakaları ile bitümlü sathi kaplamalarda kullanılan üst koruyucu yüzey veya bitümlü temel tabakaları olabilmektedir. Bağlayıcısız tabakalar ise bitüm bağlayıcı kullanmadan oluşturulan granüler temel ve alttemel tabakalarıdır.

Bitüm bağlayıcılı ve bağlayıcısız tabakalarda kullanılan granüler malzemelerin hava ve iklim şartları ile üstündeki trafik yüklerine yeterince direnç göstermesi, yükleri güvenli bir şekilde alttaki zemin tabakalarına aktarması için bazı fiziksel ve mekanik özellikler ile belli gradasyon limitlerine sahip olması gerekmektedir.

Ülkemizde de Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan Karayolu Teknik Şartnamesi mevcut olup en son 2013 yılında güncellenmiş ve “Karayolu Teknik Şartnamesi

(Yol Alt Yapısı, Sanat Yapıları, köprü ve Tüneller, Üst Yapı ve Çeşitli İşler)” adı altında yayınlanmıştır [56]. Bu şartnamede hangi tabakada kullanılacak malzemenin hangi fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olacağı, hangi deney ve standartların kullanılacağı yer almaktadır.

Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı tarafından bitümlü karışımlar için “Bitümlü Karışımlar Laboratuvar Çalışmaları” adı ile ayrı bir kitapçık hazırlanmıştır [57].

5.1.1. Malzeme fiziksel özellikleri

Karayolu Teknik Şartnamesi 2013 (KTŞ-2013)’e göre yol üst yapısı bitümlü tabaka veya bitümsüz granüler tabakalarda kullanılan malzemelerin sahip olması gereken başlıca fiziksel özellikler aşağıdaki özellikleri taşımalıdır:

- Uygun gradasyon limitleri,
- Çevresel ve trafik yüklerine karşı yeterli direncin gösterilmesi için uygun aşınma değerleri,
- Soyulma mukavemeti,
- Ezilme dayanımı,
- Donma çözölmeye karşı dayanım,
- Belli bir limitin altında su absorpsiyonu,
- Taneler arası kenetlenmenin sağlanması için köşeli ve kırılmış yüzeyler vb. olarak belirlenmiştir [56].

Gradasyon

Bir agrega yığının içindeki tanelerin çaplarına göre ağırlık oranlarının belirlenmesine agrega gradasyonu denir. Her bir çapın ağırlık oranının grafiğe aktarılması ile gradasyon eğrisi elde edilir. Karayolu Teknik Şartnamesi 2013 (KTŞ-2013)’te Tip A ve Tip B olmak üzere iki tip temel gradasyonu belirlenmiştir. Tip A kum-çakıl malzeme, Tip B ise kırmataş malzeme için belirlenmiş alttemel gradasyonlarıdır [56]. Çizelge 5.1’de gradasyon limitleri verilmiştir.

Çizelge 5.1. Alttemel malzemesi gradasyon limitleri

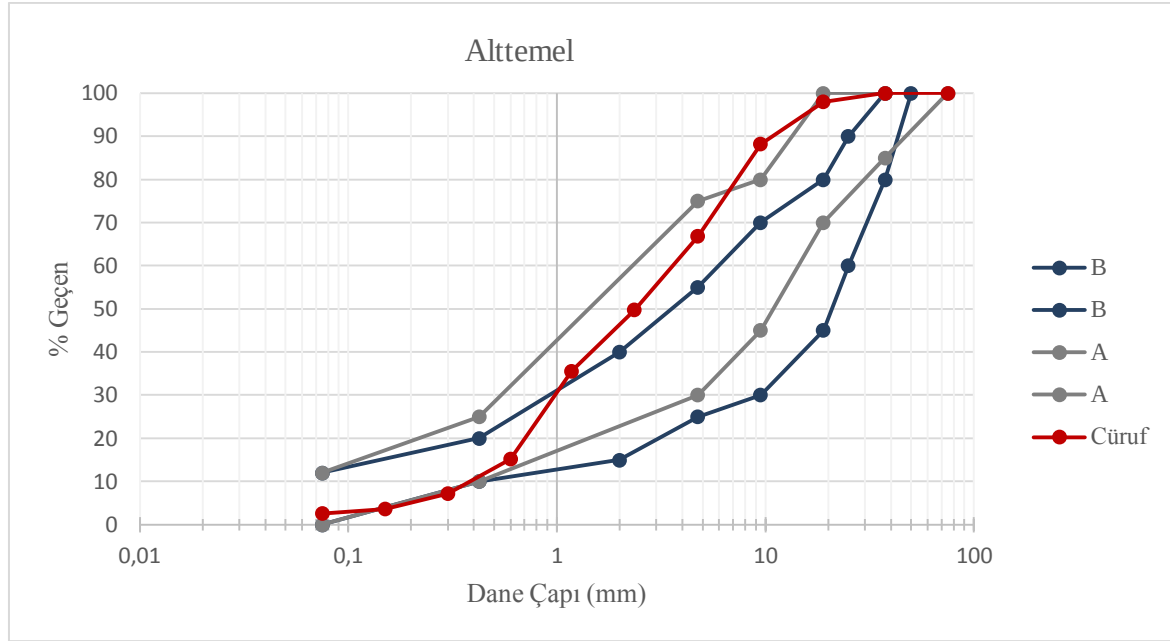
Elek Açıklığı		% Geçen			
mm	inç	A		B	
75	3	100			
50	2			100	
37,5	1 1/2	85	100	80	100
25	1			60	90
19	3/4	70	100	45	80
9,5	3/8	45	80	30	70
4,75	No.4	30	75	25	55
2	No.10			15	40
0,425	No.40	10	25	10	20
0,075	No.200	0	12	0	12

Erdemir A.Ş.'den alınan çelikhane cürufu üzerinde yapılan deneylerde elek analiz değerleri aşağıdaki Çizelge 5.2'de yer aldığı gibidir.

Çizelge 5.2. Çelikhane cürufu elek analizi

Elek no	D(mm)	Elek üstü (g)	Elekten geçen (g)	Geçen yüzdesi (%)	D(mm)	Çakıl: % 33,2 Kum: %64,2 Silt-kil: 2,6 D ₆₀ : 3,7 D ₃₀ : 1 D ₁₀ : 0,39 Cu: 9,49 Cc: 0,69
3"	75	0	1000	100,0	75	
1 1/2"	37,5	0	1000	100,0	37,5	
3/4"	19	20	980	98,0	19	
3/8"	9,51	98	882	88,2	9,51	
4	4,75	214	668	66,8	4,75	
8	2,36	170	498	49,8	2,36	
16	1,18	142	356	35,6	1,18	
30	0,6	204	152	15,2	0,6	
50	0,3	80	72	7,2	0,3	
100	0,15	36	36	3,6	0,15	
200	0,075	10	26	2,6	0,075	

Alttemel şartname limitleri ve cüruf gradasyonuna ait değerler Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



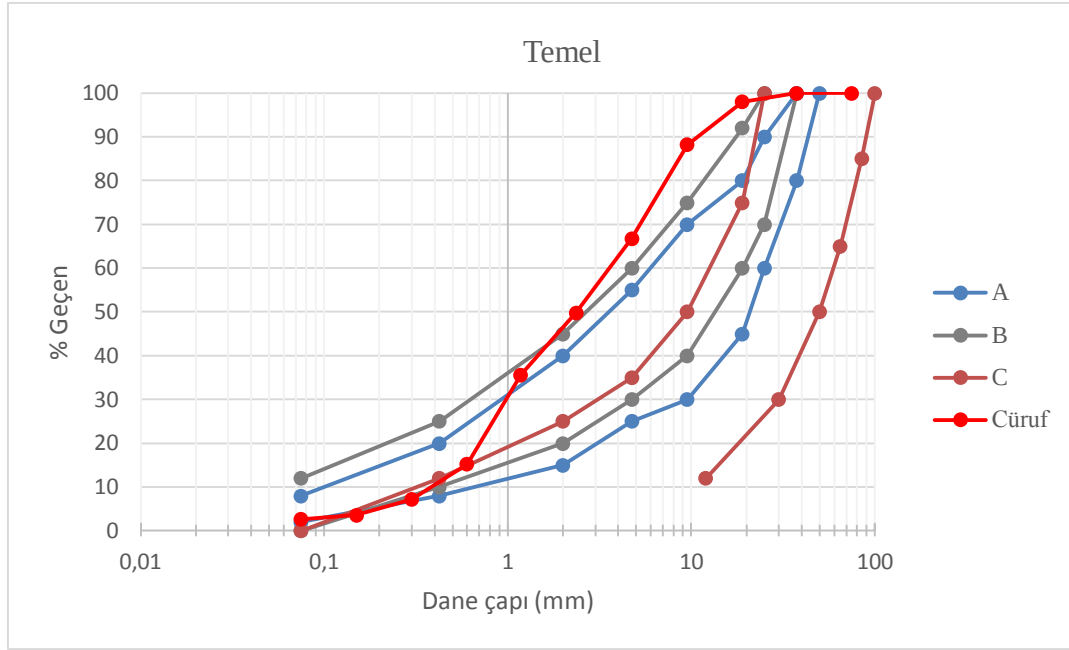
Şekil 5.1. Alttemel şartname limitleri ve cüruf gradasyonu

Temel ile ilgili olarak KTŞ-2013'te üst kaplama tabakasına bağlı olarak üç farklı gradasyon tipi belirlenmiş ve her tip için alt ve üst limitler verilmiştir (Çizelge 5.3). Plent-miks temel (PMT) için ise Tip I ve Tip II olmak üzere iki farklı gradasyon ve her gradasyona ait alt ve üst limitler belirlenmiştir.

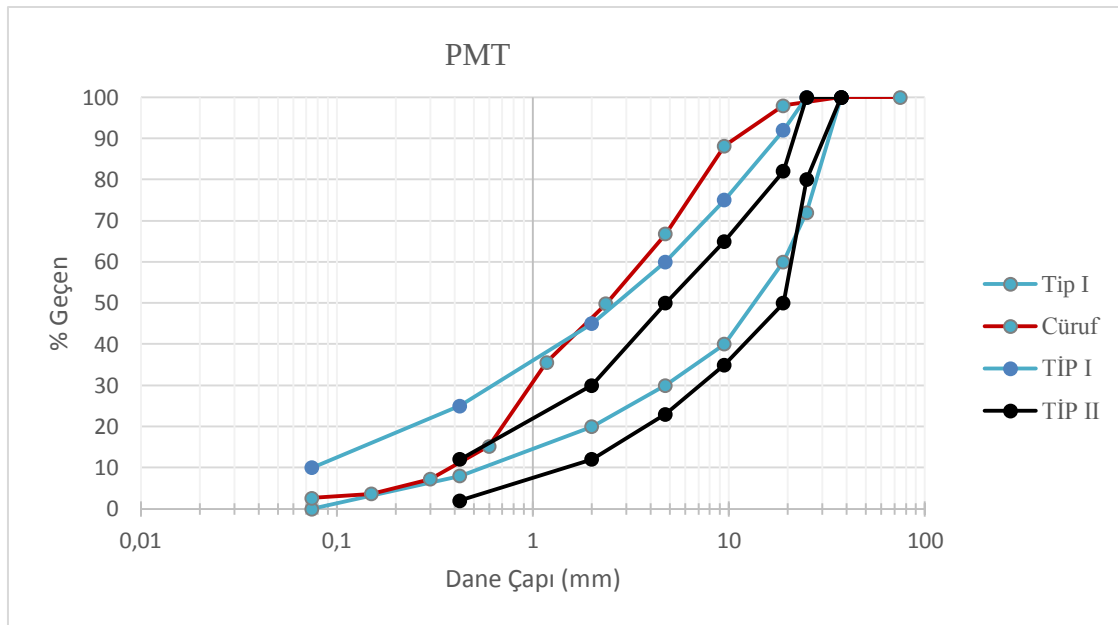
Çizelge 5.3. Temel malzemesi gradasyon limitleri

Elek Açıklığı		% Geçen					
mm	in	A		B		C	
50	2	100					
37,5	1 1/2	80	100	100			
25	1	60	90	70	100	100	
19	3/4	45	80	60	92	75	100
9,5	3/8	30	70	40	75	50	85
4,75	No.4	25	55	30	60	35	65
2	No.10	15	40	20	45	25	50
0,425	No.40	8	20	10	25	12	30
0,075	No.200	2	8	0	12	0	12

Temel ve Plent-miks temel şartname limitleri ve cüruf gradasyonuna ait değerler aşağıdaki Şekiller 5.2 ve 5.3'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Temel şartname limitleri ve cüruf gradasyonu



Şekil 5.3. Plent-miks temel şartname limitleri ve cüruf gradasyonu

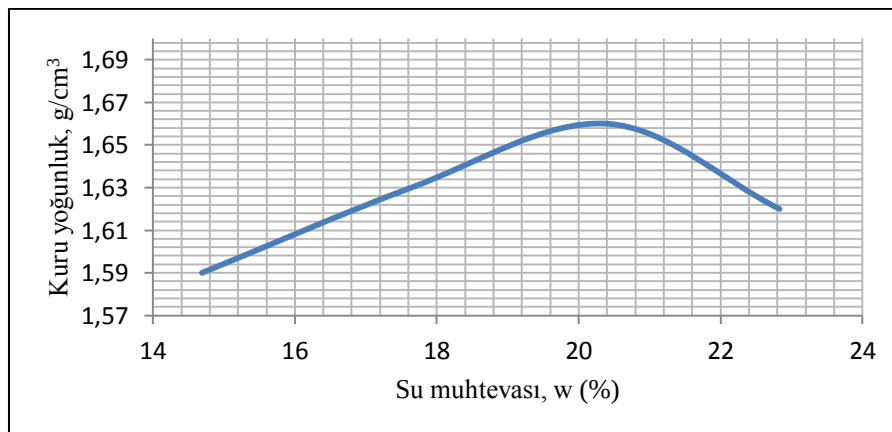
Kuru birim hacim ağırlık ve özgül ağırlık

Labaratuvarda Standart proktor deneyi ile yapılan testler sonucu çelikhane cürufunun kuru birim hacim ağırlığı ve su muhtevaları Çizelge 5.4'te yer aldığı gibi belirlenmiştir.

Çizelge 5.4. Çelikhane cürufu kompaksiyon deneyi

LABORATUVAR KOMPAKSİYON TESTİ								
Tabaka Sayısı: 3				Düşme Yüksekliği: 305 mm				
Vuruş Sayısı: 25 Tokmak Ağırlığı: 2,5 kg				Mold Hacmi: 944 cm ³				
Deney No	1		2		3		4	
Islak yoğunluk hesaplamaları								
Mold + ıslak numune (g)	6885		6975		7050		7040	
Mold (g)	5166		5166		5166		5166	
Islak numune (g)	1719		1809		1884		1874	
Islak yoğunluk (g/cm ³)	1,82		1,92		2		1,99	
Su muhtevası hesaplamaları								
Kap No.	a	b	c	d	e	f	g	h
Kap + ıslak numune (g)	100,00	70,7	115,87	122,99	73,05	84,21	53,06	44,98
Kap + kuru numune (g)	88,52	62,8	100,02	105,86	61,73	71,13	44,42	37,85
Kap (g)	10	9,29	9,63	9,32	6,67	6,4	6,7	6,51
Su (g)	11,48	7,90	15,85	17,13	11,32	13,08	8,64	7,13
Kuru numune (g)	78,52	53,51	90,39	96,54	55,06	64,73	37,72	31,34
Su muhtevası (%)	14,62	14,76	17,54	17,74	20,56	20,21	22,91	22,75
Ortalama su muhtevası (%)	14,69		17,64		20,39		22,83	
Kuru yoğunluk hesaplamaları								
Kuru yoğunluk	(g/cm ³)	1,59		1,63		1,66		1,62
Su muhtevası	(%)	14,69		17,64		20,39		22,83

Çizelge 5.4'deki verilerden hareketle cürufun kuru birim ağırlık-su muhtevası grafiği aşağıdaki gibi oluşmuştur. Grafikten de görüldüğü üzere maksimum kuru yoğunluk 1,66 g/cm³ ve optimum su muhtevası %20,39'dur. Özgül ağırlık değeri Çizelge 5.5'te yer almaktadır. Çelikhane cürufunun su emme oranı ise %3 hesaplanmıştır.



Şekil 5.4. Çelikhane cürufu kompaksiyon eğrisi

Çizelge 5.5. Çelikhane cürufu özgül ağırlık deneyi

Kap	142,2
Kap + numne	171,1
Kap+Numune+ su	658,1
Kap + Su	638,9
Gs (Özgül ağırlık)	2,98

Diğer fiziksel özellikler

Karayolu Teknik Şartnamesi 2013 (KTŞ-2013)'e göre temel ve alttemel tabakalarında kullanılacak malzemelerin trafik yükleri ve çevresel koşullara (iklim, yeraltı suyu, donma çözülme, drenaj vb.) direnç göstererek konforlu ve güvenli bir servis hizmeti sunması için sahip olması gereken bazı fiziksel ve dayanım özellikler vardır. Bunlar Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından aşağıdaki Çizelge 5.6 ve 5.7'de belirlenmiştir.

Çizelge 5.6. Alttemel şartname limitleri

Deney Adı	Şartname Limitleri	Deney Standardı
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık, Mg ₂ SO ₄ ile kayıp (%)	≤25	TS EN 1367-2
Parçalanma direnci (Los Angles), (%)	≤45	TS EN 1097-2 ASHTO T 96
Yassılık indeksi (%)	35 ≤30	BS 812 TS EN 933-3
Su emme	≤3,50	TS EN 1097-6
Likit limit (%)	≤25	TS 1900-1 ASHTO T 90
Plastik limit (%)	≤6	TS 1900-1 ASHTO T 90
Kil Topağı ve Dağılabilen Tane Oranı, %	İri malzeme (4.75mm elek üstü) ≤2	ASTM C 142
Organik Madde (%3NaOH ile)	Negatif	TE EN 1744-1
CBR (yaş)	Tip A %30 Tip B %50	ASHTO T 193 TS 1900-2

Çizelge 5.7. Temel şartname limitleri

Deney Adı	Şartname Limitleri	Deney Standardı
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık, Mg ₂ SO ₄ ile kayıp (%)	≤20	TS EN 1367-2
Parçalanma direnci (Los Angles), (%)	≤35	TS EN 1097-2 ASHTO T 96
Yassılık indeksi (%)	30 ≤25	BS 812 TS EN 933-3
Su emme (%)	≤3,00	TS EN 1097-6
Likit limit (%)	NP	TS 1900-1 ASHTO T 89
Plastik limit (%)	NP	TS 1900-1 ASHTO T 90
Kil Topağı ve Dağılabilen Tane Oranı, %	≤1,00	ASTM C 142
Organik Madde (%3NaOH ile)	Negatif	TE EN 1744-1
CBR (yaş)	Granüler Temel %100 PMT %120	ASHTO T 193 TS 1900-2

Su emme (ASTM C127, TS EN 1097-6)

Su emme oranı; suya doymun ancak yüzeyi kurutulmuş agrega ağırlığı “B” aynı agreganın 24 saat 110°C de etüvde kurtulduktan sonra oda sıcaklığında soğutulmasına müteakip tartılan ağırlığı “A” olmak üzere (B-A)/A şeklinde hesaplanır. Deney ASTM C127 standardı esas alınarak gerçekleştirilir.

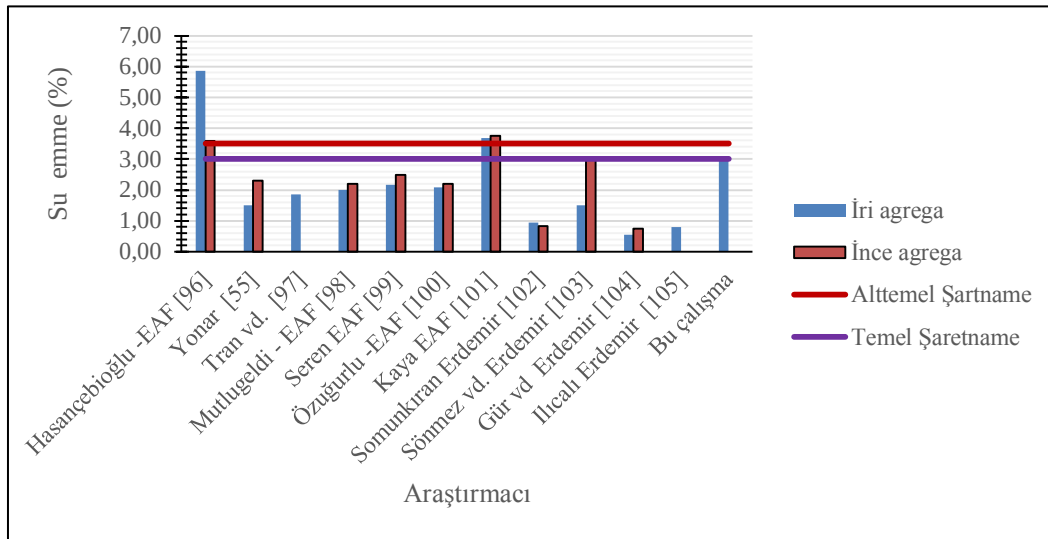
Aynı numunenin sudaki ağırlığı “C” olmak üzere zahiri özgül ağırlığı ise A/(A-C) şeklinde hesaplanır.

Yol bitümlü tabakaları ve granüler alt tabakalarda kullanılan agregaların yeraltı suyunun varlığı durumunda iklim şartlarına dayanıklılık açısından ve bitümlü tabakalarda kullanılırken asfalt betonunda kullanılacak bitüm oranı açısından önemli bir değerdir. Bu nedenle gerek beton asfalt tabakalarında gerekse de bağlayıcısız granüler alt tabakalarda kullanılacak agregaların su absorpsiyon değerlerinin belli limitler içerisinde olması gerekmektedir.

Erdemir çelikhane cüruflarının su emme oranı açısından KTŞ 2013 açısından temel ve alttemel gerekliliklerini karşıladığı görülmektedir (Çizelge 5.8, Şekil 5.5).

Çizelge 5.8. Çelikhane cürufu su emme oranı (%)

Araştırmacı	İri agrega %	İnce agrega %
Hasançebioglu-EAF [96]	5,86	3,59
Yonar [55]	1,85	
Tran vd. [97]	1,51	2,31
Mutlugeldi - EAF [98]	2	2,19
Seren EAF [99]	2,16	2,48
Özüğurlu -EAF [100]	2,08	2,19
Kaya EAF [101]	3,69	3,75
Somunkıran -Erdemir [102]	0,95	0,83
Sönmez vd. Erdemir [103]	1,5	3
Gür vd Erdemir [104]	0,54	0,75
İlcalı Erdemir [105]	0,80	
Bu çalışma	3,00	



Şekil 5.5. Çelikhane cürufu su emme oranı (%)

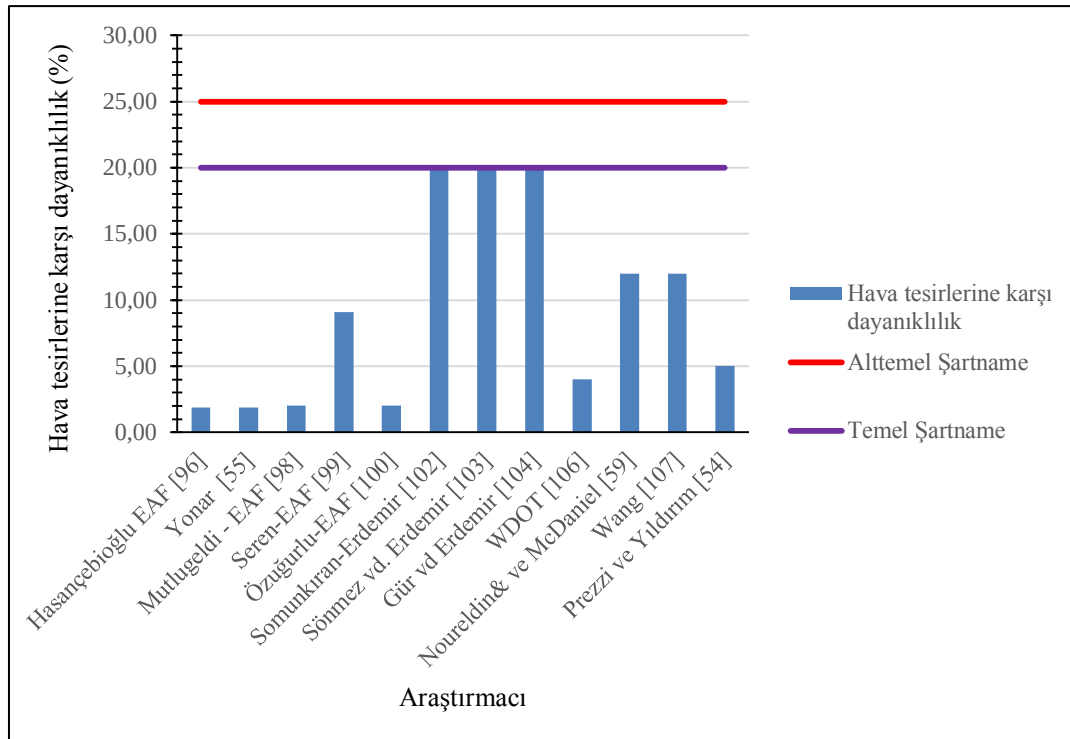
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık/donma deneyi (AASHTO T104, TS EN 1367-1)

Dışarda uzun zaman donma çözülme etkisinde kalan agregaların bu etkilere karşı dayanımlarını test etmek için belirlenmiş, Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltileri kullanılarak yapılan hızlandırılmış bir yöntemdir. Beş çevrim sonunda oluşan agrega kayıp oranının KTŞ 2013'te verilen limitlerin altında olması gerekmektedir.

Yapılan tüm araştırmalar gerek Erdemir elikhane cürufları açısından gerekse de diğerkruflar açısından yeterli nitelikte olduğu tespit edilmiştir (izelge 5.9, şekil 5.6).

Çizelge 5.9. elikhane cürufu hava tesirlerine karşı dayanıklılık (%)

Araştırmacı	Hava tesirlerine karşı dayanıklılık (%)
Hasaıbiođlu EAF [96]	1,87
Yonar [55]	1,88
Mutlugeldi - EAF [98]	2,04
Seren -EAF [99]	9,10
Özuđurlu -EAF [100]	2,04
Somunkıran -Erdemir [102]	20,00
Sönmez vd. Erdemir [103]	20,00
Gür vd Erdemir [104]	20,00
WDOT [106]	3,99
Noureldin ve McDaniel [59]	11,99
Wang [107]	11,99
Prezzi ve Yıldırım [54]	5,00



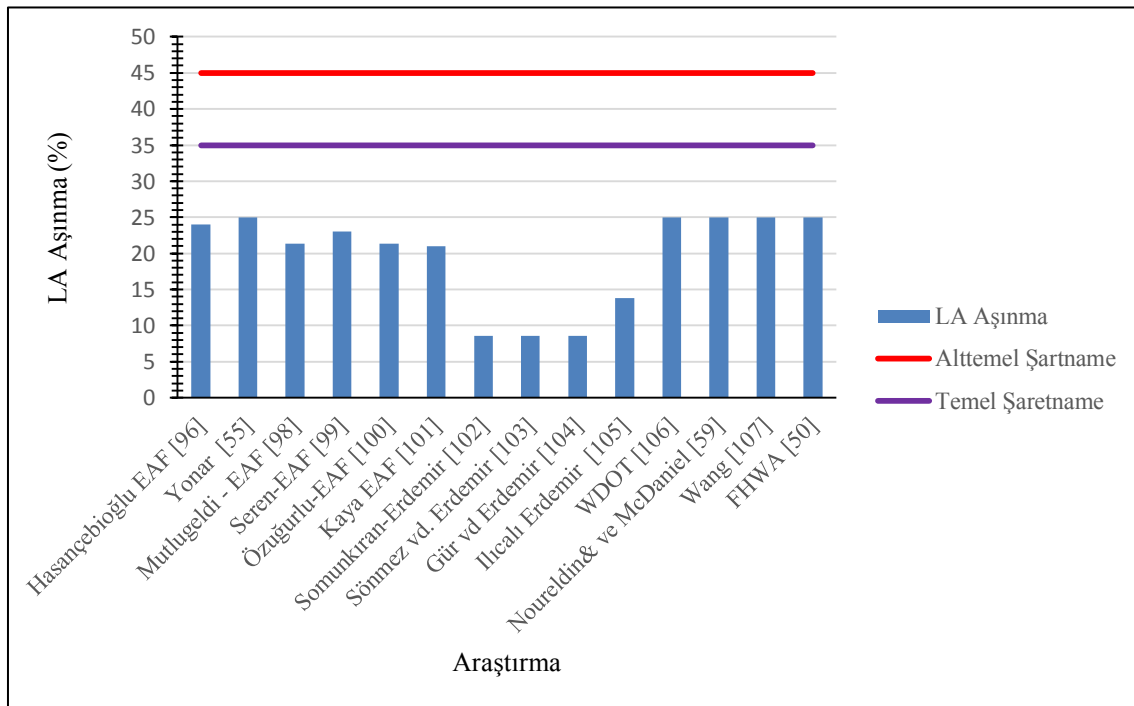
şekil 5.6. elikhane cürufu hava tesirlerine karşı dayanıklılık (%)

Los Angeles Aşınma Deneyi (ASTM C131, AASHTO T96, TS EN 1097-2)

Bu deneyde agregaların darbe ve aşınma yüklerine karşı direnci ölçülmektedir. Deneyde içi boş, silindirik şeklindeki kapalı bir makineye agrega ile birlikte metal küreler konularak makine belli bir devir ve hızda çalıştırılarak deney sonunda aşınmış malzemenin deney başındaki toplam malzemeye oranı % cinsinden bulunur. Aşınmış agregaların şartname limitleri içinde kalması gerekmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda çelikhane cürufunun KTŞ 2013 şartname değerlerini sağladığı görülmüştür (Çizelge 5.10, Şekil 5.7)

Çizelge 5.10. Çelikhane cürufu los angeles aşınma değeri (%)

Araştırmacı	LA Aşınma(%)
Hasançebioglu)-EAF [96]	24
Yonar [55]	24,95
Mutlugeldi - EAF [98]	21,3
Seren -EAF [99]	23
Özüğurlu -EAF [100]	21,3
Kaya -EAF [101]	21
Somunkıran -Erdemir [102]	8,56
Sönmez vd. Erdemir [103]	8,56
Gür vd Erdemir [104]	8,56
Ilıcalı Erdemir [105]	13,83



Şekil 5.7. Çelikhane cürufu los angeles aşınma değeri (%)

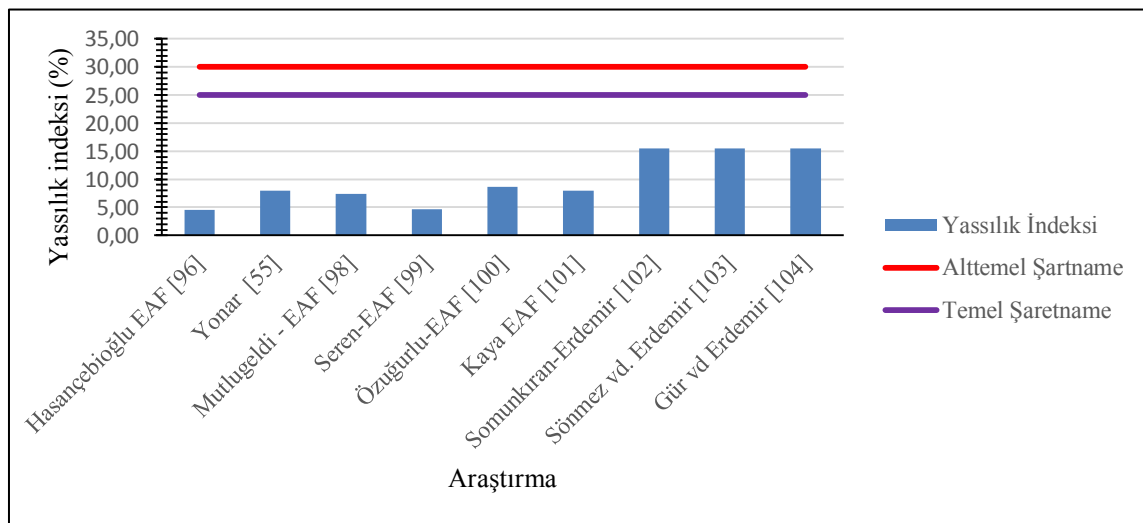
Yassılık indeksi (BS 812)

Yassılık indeksi tayini BS 812 standardına göre silindir çubuklu elekler ile gerçekleştirilen bir deneydir. Bu deneyde yassı agregaların toplam agrega içindeki oranı tayin edilir. Yassı agregalar kompaksiyonu olumsuz etkileyeceği gibi eksenlerine dik yükler altında kırılacaktır. Sıcak karışımlar açısından ise özgül yüzeyi arttıracaklarından daha fazla bitüm kullanılmasına neden olacaktır. Bu nedenle esnek yol üst yapısı kullanılan agregaların yassılık indeksinin belli limitlerin altında olması gerekmektedir.

Çelikhane cürufunun yassılık indeksi açısından KTŞ 2013'te istenilen limitleri sağladığı görülmektedir (Çizelge 5.11 ve Şekil 5.8).

Çizelge 5.11. Çelikhane cürufu yassılık indeksi

Araştırmacı	Yassılık İndeksi
Hasançebioglu EAF [96]	4,59
Yonar [55]	8,0
Mutlugeldi - EAF [98]	7,4
Seren -EAF [99]	4,63
Özüğurlu -EAF [100]	8,63
Kaya -EAF [101]	8
Somunkıran -Erdemir [102]	15,5
Sönmez vd. Erdemir [103]	15,5
Gür vd. Erdemir [104]	15,5
Ilıcalı Erdemir [105]	0



Şekil 5.8. Çelikhane cürufu yassılık indeksi

Likit limit (%) ve Plastik limit (%)

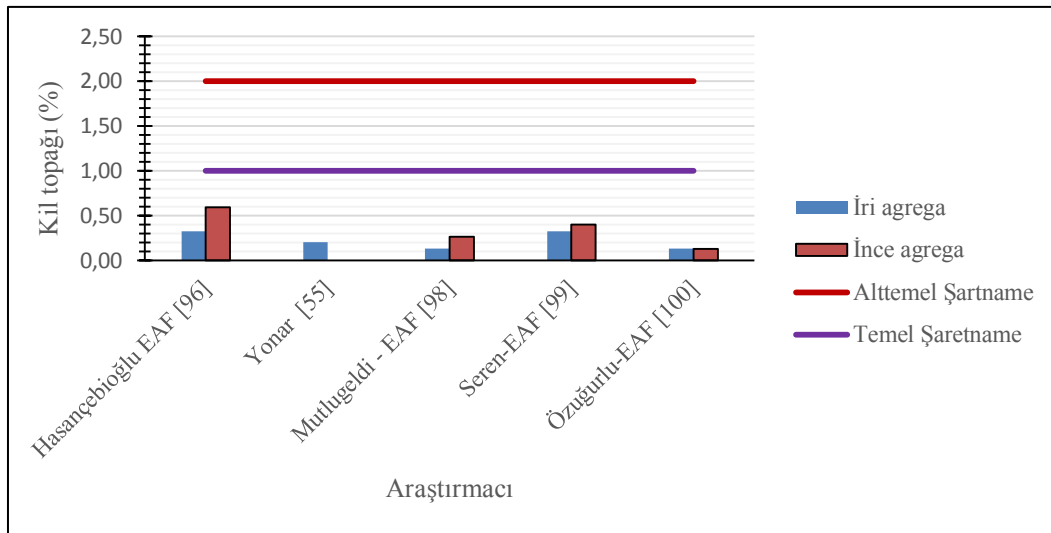
Çelikhane cürufu yapılan araştırmalarda plastik olmayan (NP) malzeme olarak tespit edilmiştir.

Kil Topağı ve Dağılabilen Tane Oranı (%)

Yapılan literatür taramalarında kil topağı ve dağılabilen tane oranı açısından çelikhane cürufunun istenilen KTŞ 2013 kriterleri sağladığı görülmüştür (Çizelge 5.12, Şekil 5.9).

Çizelge 5.12. Çelikhane cürufu kil topağı ve dağılabilen tane oranı

Araştırmacı	Kil topağı	
	İri agrega	İnce agrega
Hasançebiöğlu EAF [96]	0,32	0,59
Yonar [55]	0,20	-
Mutlugeldi - EAF [98]	0,13	0,26
Seren -EAF [99]	0,32	0,40
Özügürlü -EAF [100]	0,13	0,13



Şekil 5.9. Çelikhane cürufu kil topağı ve dağılabilen tane oranı

Organik madde (%3 NaOH ile)

Hasançebiöğlu'nun elektirik ark fırın ocağı cürufu ile ilgili çalışmasında %0.14 oranında organik maddeye rastlanılmıştır. Bunun dışındaki araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda genelde organik malzemeye rastlanılmamıştır.

5.1.2. Malzeme mekanik özellikler

Çelikhane cürufu CBR değerleri

KTŞ 2013'e göre alttımnel tabakalarından Tip A için CBR değeri %30 ve Tip B için ise CBR değerinin %50'den fazla olması gerekmektedir. Temel tabakaları için ise granüler temel (GT) ve plent-miks temel (PMT) için CBR değerlerinin sırasıyla en az %100 ve %120 olması gerekmektedir.

Çeşitli araştırmacılar tarafından farklı dizaynlar için alttemel ve temel dizaynları için elde edilen minimum CBR değerleri Çizelge 5.13'de yer almaktadır.

Çizelge 5.13. Çelikhane cürufu CBR değerleri

Araştırmacı	Alttemel		Temel	
	CBR 5.0	Notlar	CBR 5.0	Notlar
Hasançebiöğlu)-EAF [96]	132	Tip B <Tip A	118	Tip A(<Tip B, Tip C) bulunmuştur.
Yonar[55]	126	Tip A <Tip B	117	Tip B (< Tip A, Tip C) bulunmuştur.
Seren -EAF [99]			108	Çimento bağlayıcılı GT
Ilıcalı Erdemir 1988 [105]				
WDOT [106]			300' e kadar	tasarım belirtilmemiş
Noureldin&McDaniel [59]			>200	tasarım belirtilmemiş
Wang [107]			300' e kadar	tasarım belirtilmemiş
FHWA [50]			300' e kadar	tasarım belirtilmemiş

Kayma deformasyon modülü (G_{max})

Önceki bölümlerde de değinildiği gibi trafik yükleri tekrarlı dinamik yüklerdir. Malzemelerin deprem vb. dinamik yükler altındaki deformasyon karakteristikleri konvansiyonel deneyler ile elde edilen deformasyon karakteristiklerinden farklıdır. Literatürde zeminlerin dinamik yükler altındaki kayma deformasyon modülünün belirlenmesi için çeşitli laboratuvar arazi deneyleri mevcuttur.

Arazi deneyleri malzemelerde dalga yayılma teorisine dayalı, birim deformasyon seviyesi 10^{-5} mertebesinde olan, düşük deformasyonlu jeofizik yöntemeye dayalı deneyler ve yüksek deformasyon deneyleri olmak üzere iki gruba ayrılabilir.

Yüksek deformasyonlu deneylerde gerçekte zeminlerin yüksek birim deformasyonlardaki dayanım parametrelerini ölçmeye yönelik deneylerdir. Standart Penetrasyon Deneti (SPT), Konik Penetrasyon Deneyi (CPT), Dilatometre Deneyi (DMT) ve Pressiyometre Deneyi (PMT)'dir. Bu deneylerin çoğu istinat yapıları, tüneller, temeller vb. gibi deformasyon seviyesinin yüksek olduğu koşullarda, zeminlerin yüksek birim deformasyonlardaki mühendislik parametrelerini belirlemeye yönelik deneyler olsa da, literatürde araştırmacılar tarafından bu deneylere dayalı olarak zeminlerin düşük birim deformasyon parametrelerini belirlemeye yönelik geliştirilen ampirik yöntemler de mevcuttur.

Zemin malzemelerinin dinamik yükleme koşullarındaki dayanım ve deformasyon parametrelerini belirlemeye yönelik çeşitli laboratuvar deneyleri de mevcuttur. Labaratuvar deneyleri de kendi içinde düşük deformasyonlu deneyler ve yüksek deformasyonlu deneyler olarak ayrılır.

Düşük deformasyonlu deneyler;

- Rezonant kolon deneyi (free-free RC, fixed free RC)
- Piezoelektrik Bender elemanı,

Yüksek deformasyonlu deneyler ise;

- Dinamik üç eksenli deney,
- Dinamik kesme deneyi,
- Burulmalı kesme deneyleridir.

Model deneyler olarak da sarsma tablası ve santrifüj deneyler kullanılabilmektedir [92].

Düşük deformasyonlu deneyler olarak; sismik yansıma testi, sismik kırılma, sismik kuyu, karşıt kuyu vb. sayılabilir. Sismik jeofizik yöntemeye dayalı düşük deformasyon deneylerinde zeminlerin maksimum kayma birim deformasyon modülü (G_{max}), sismik ölçüm sırasında elde edilen kayma dalgası hızından hesaplanır.

Şekil 5.10’da yer alan sonsuz uzunluktaki bir çubukta T burulma torkuna maruz kalan bir çubukta birim boyda (dx) meydana gelen birim dönme $d\theta$ ise hareket denge denklemi, iç ve dış kuvvetlerin dengesinden Eşitlik 5.1’deki gibi elde edilir:

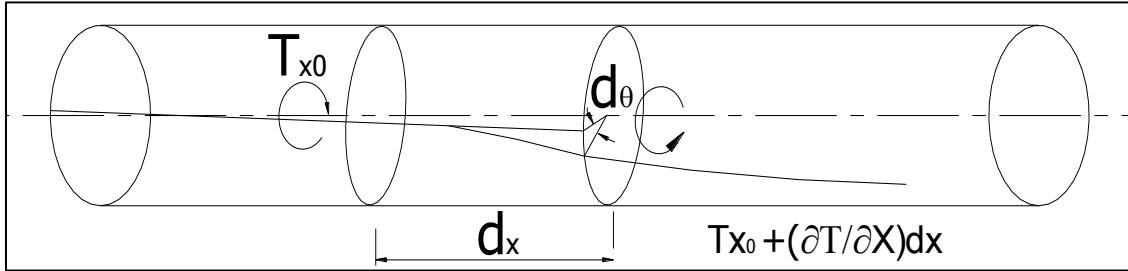
$$(T_{x0} + \frac{\partial T}{\partial x} dx) - T_{x0} = \rho J dx \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (5.1)$$

Burada J çubuğun burulma atalet momentidir. Eşitliğin sol tarafındaki işlem yapılır ve her iki taraf dx’e bölünürse aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \rho J \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (5.2)$$

Cisimdeki burulma-dönme ilişkisi temel mukavemet denklemlerinden aşağıdaki gibi olacaktır:

$$T = GJ \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (5.3)$$



Şekil 5.10. dx uzunluğunda silindirik bir çubukta burulma kuvveti-dönme ilişkisi [79]

Eşitlik 5.2 ile Eşitlik 5.3 birleştirilirse kayma dalgası denklemi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = v_s^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (5.4)$$

Burada G çubuğun kayma modülüdür. Eşitlik 5.4’den çubuğun kayma dalgası hızı ile kayma modülü arasındaki ilişki Eşitlik 5.5’teki gibi olur:

$$G = \rho v_s^2 \quad (5.5)$$

Literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan deneylerde $G_{\max}$, boşluk oranı ve ortalama çevre basıncının bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Hardin ve Richart kayma dalgası hızı için aşağıdaki eşitliği önermişler [108].

$$v_s = C(B-e)(p')^{n/2} \quad (5.6)$$

Burada C, B ve n zemine bağlı parametrelerdir. p' ise ortalama efektif gerilmedir. Zemin faz ilişkilerinden:

$$\rho = \rho_s / (1+e) \quad (5.7)$$

Olduğundan, Eşitlik 5.5, Eşitlik 5.6 ve Eşitlik 5.7 birleştirildiğinde maksimum kayma dalgası modülü Eşitlik 5.8'deki gibi elde edilecektir [109]:

$$G_{\max} = \rho_s C^2 (B-e)^2 (p')^n / (1+e) \quad (5.8)$$

Bu eşitlik ise aşağıdaki genel formda yazılabilir [108]:

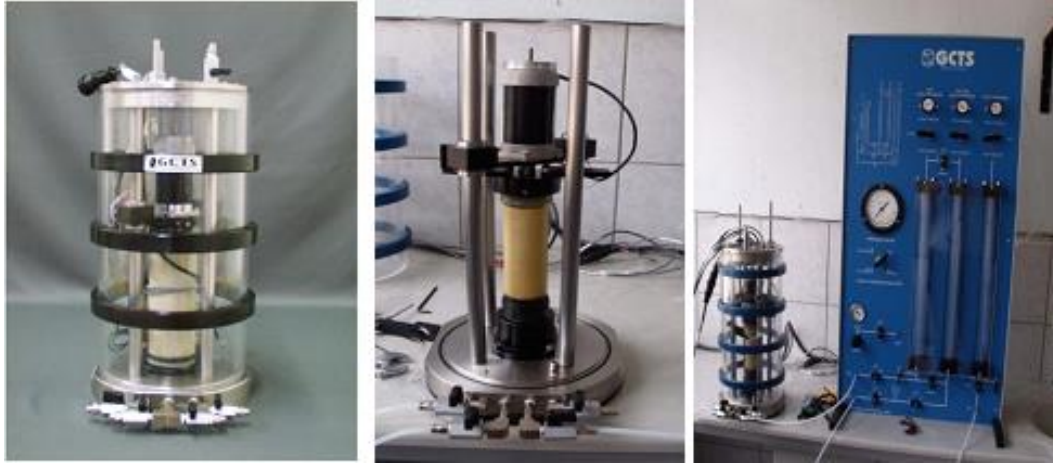
$$G = A_G F(e) (\sigma_c')^{n_G} \quad (5.9)$$

Burada A_G ve n_G gerilme geçmişi, mineraloji, tabakalanma, parçacık pürüzlülüğü ve köşeli yüzey gibi faktörlere bağlı malzeme sabitleridir [110]. $G_{\max}$ ve σ_c' ise KPa birimindedir. $F(e)$ boşluk oranının bir fonksiyonu olup Eşitlik 5.8'den hareketle aşağıdaki denklemde yer aldığı şekilde ifade edilebilir:

$$F(e) = (B-e)^2 / (1+e) \quad (5.10)$$

ERDEMİR'den elde edilen çelikhane cürufunun dinamik kayma deformasyon modülünün (G_0) belirlenmesi için 50, 100, 150 ve 200 kPa hücre basınçları altında fixed-free rezonant kolon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında test edilerek sonuçlar bulunmuştur.

Rezonant kolon deneyi (Şekil 5.11), zeminlerin deformasyon bağımlı modül ve sönüm özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan başlıca yöntemlerden biridir. Bu deneyde, üç eksenli bir hücre içinde zemin numuneleri kullanılır. Bu numuneler burulmalı veya eksenel titreşim moduna maruz bırakılırlar. Bir frekans alanı ya da motor vasıtasıyla uygulanan bu yük zemin numunesinin rezonansa girdiği frekans değerine kadar devam eder. Bu aşamadan sonra, zemin numunesinin rezonans frekans değeri elde edilmiş olur. Zemin numunesinin boyutları ile rezonans frekansı kullanılarak kayma dalgası yayılım hızı hesaplanabilir. Bu aşamadan sonra, motor sisteminin veya elektromanyetik sistemin enerjisi kesilerek numunenin serbest titreşime geçmesi sağlanır. Serbest titreşen numunenin titreşiminin bitişi gözlenir ve buradan zeminin sönümlenme özellikleri hesaplanır [111].



Şekil 5.11. Rezonant kolon test cihazı

50, 100, 150, 200 ve 250 kPa hücre basınçlarında gerçekleştirilen deneye ilişkin veriler aşağıda Çizelge 5.14’de verilmiştir.

Çizelge 5.14. Rezonant kolon frekans deney sonuçları

γ (%)	(e)	Dr	Sr (%)	σ' (kPa)	f_r (Hz)	V_s (m/sn)	G_{maks} (MPa)
0,001	0,68	0,92	0	50	113	220,12	79,73
0,001	0,68	0,92	0	100	137	266,87	117,19
0,001	0,68	0,92	0	150	147	286,35	134,92
0,001	0,68	0,92	0	200	159	309,73	157,85
0,001	0,68	0,92	0	250	169	329,21	178,33

σ_3-G_{max} Bağıntısı (RC sonuçları)

Granüler zeminlerde dinamik kayma modülü çevre basıncı, boşluk oranı ve dane çapı ile ilişkilidir. Bu ilişki Hardin ve Richart tarafından Eşitlik 5.9'daki genel formda önerilmiştir.

Eşitlik 5.9'da A_G ve n_G malzeme sabitleri, $F(e)$ ise boşluk oranının bir fonksiyonudur ve çeşitli araştırmacılar için önerilen $F(e)$ fonksiyonunun genel formu daha önce Eşitlik 5.10 da $F(e) = (B - e)^2 / (1 + e)$ şeklinde verilmişti. Eşitlikte e boşluk oranı olup B ise malzemeye bağlı bir parametredir. Çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen $F(e)$ fonksiyonu değeri Menq tarafından Çizelge 5.15'de özetlenmiştir [112].

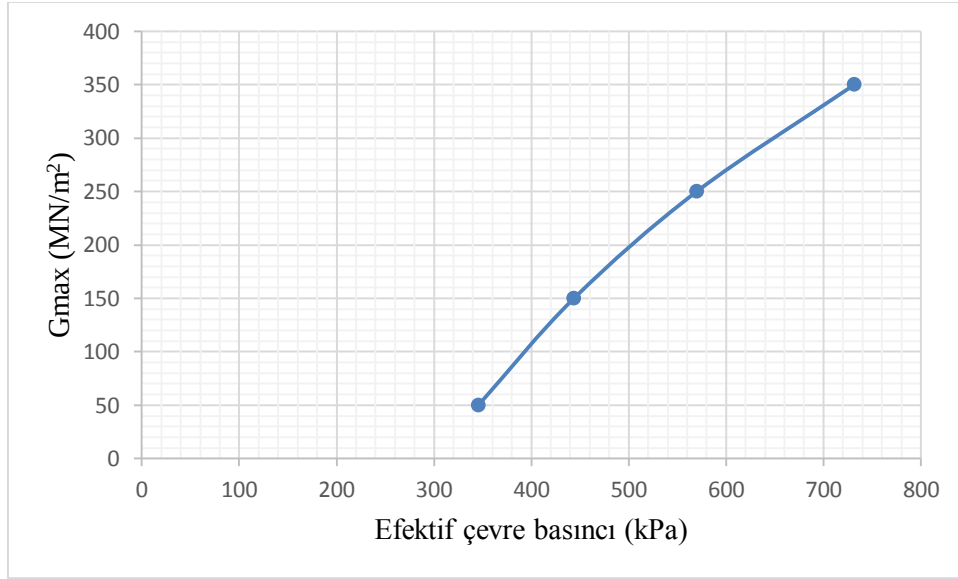
Çizelge 5.15. Çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen A_G ve n_G $F(e)$ değerleri

Zemin Tipi	Referans	$F(e)$	A_G	n_G	Zemin
Kumlu zeminler	Hardin ve Richart	$(2,17-e)^2/(1+e)$	7 000	0,50	Yuvarlak yüzeyli Ottawa kumu
		$(2,97-e)^2/(1+e)$	3 300	0,50	Köşeli yüzeyli kırılmış kuartz
	Iwasaki vd.	$(2,17-e)^2/(1+e)$	9 000	0,38	Onbir çeşit temiz kum
	Kokusho	$(2,17-e)^2/(1+e)$	8 400	0,50	Toyoura kumu
	Yu ve Richart	$(2,17-e)^2/(1+e)$	7 000	0,50	Üç çeşit temiz kum
Çakıllar	Prange	$(2,97-e)^2/(1+e)$	7 230	0,38	Balast (D50 = 40 mm, Cu = 3.0)
	Kokusho ve Esashi	$(2,17-e)^2/(1+e)$	13 000	0,55	Kırmataş (D50 = 30 mm, Cu = 10)
		$(2,17-e)^2/(1+e)$	8 400	0,60	Yuvarlak çakıl (D50 = 10 mm, Cu = 20)
	Tanaka vd.	$(2,17-e)^2/(1+e)$	3 080	0,60	Çakıl (D50 = 10 mm, Cu = 20)
	Goto vd.	$(2,17-e)^2/(1+e)$	1 200	0,85	Yuvarlak çakıl (D50 = 2 mm, Cu = 10)

Seed ve diğ. zeminlerin sönüm ve kayma modülü için yapmış oldukları drenajsız dinamik üç eksenli test sonuçlarından hareketle Eşitlik 5.11'de yer alan korelasyonu geliştirmişlerdir. Eşitlikteki $(K_2)_{max}$ ve n_G malzeme sabitleridir. $(K_2)_{max}$ çakıllar için 80-180 ve kumlar için ise 55-80 aralığında değerler almaktadır. Burada G ve σ_c psf birimidir [113].

$$G_0 = 1000(K_2)_{max} \left(\sigma_c \right)^{n_G} \quad (5.11)$$

Lin ve diğ. ise çakıl depozitleri üzerine yaptıkları rezonant kolon (RC) ve dinamik üç eksenli testler sonuçlarında, kayma rijitlik modülünün (G) çevre basıncı ve maksimum dane çapının artmasıyla büyüdüğünü tespit etmişlerdir [114]. Yapılan literatür araştırmalarında kayma rijitlik modülü ile boşluk oranı (e) arasında da ters orantı olduğu gözlenmiştir (Eşitlik 5.8).



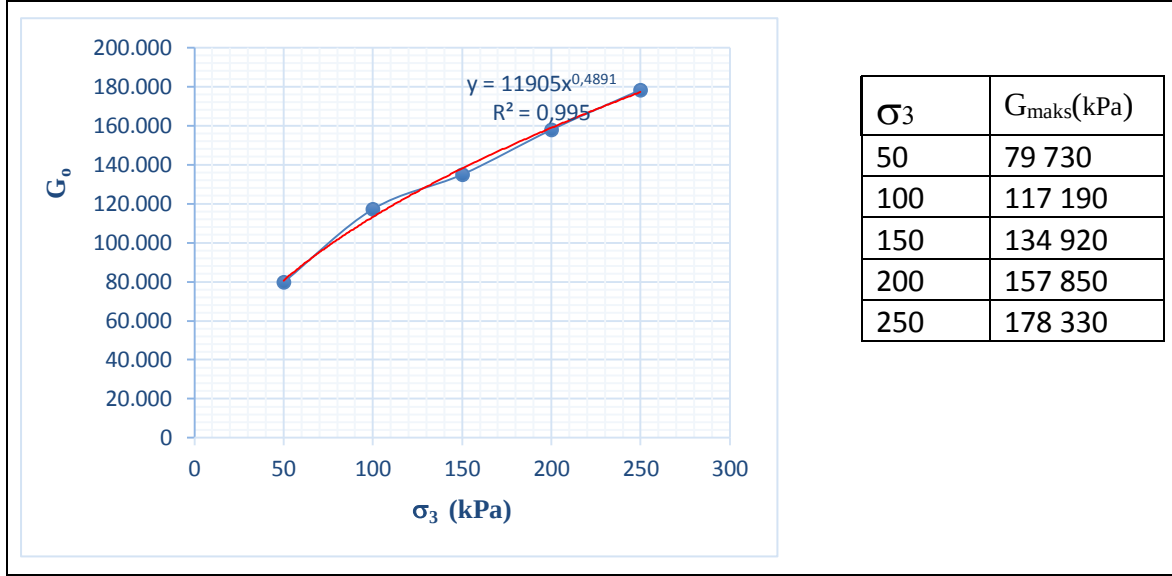
Şekil 5.12. G_{max} -çevre basıncı ilişkisi [114]

Hiltunen vd., mekanistik-ampirik yol tasarımının temel tabakası için rezilient modül tayini araştırma programı kapsamında, Florida Newberry kireç taşı üzerinde yapmış oldukları rezonant kolon deneylerinde G_{max} değerini Eşitlik 5.12'deki gibi tespit etmişlerdir [115]:

$$G_0 = 2575F(e)x(\sigma_3)^{0,702} \quad (5.12)$$

Laboratuvarda çelikhane cürufu için elde edilen rezonant kolon (RC) sonuçlarından hareketle MS Excel'de regrasyon analizi sonucu dinamik kayma modülü ile çevre basıncı arasındaki ilişki için Eşitlik 5.13 elde dirmiştir.

$$G_0 = 11905F(e)x(\sigma_3)^{0,4891} \quad (5.13)$$



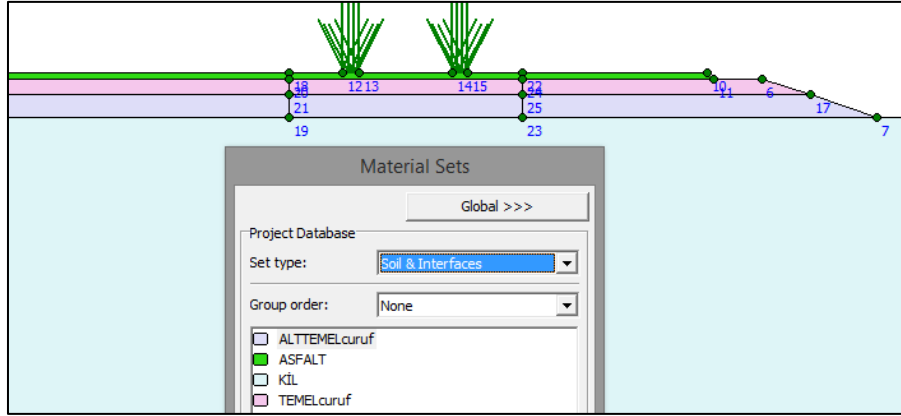
Şekil 5.13. Çelikhane cürufunun G_{max} -çevre basıncı ilişkisi

Cüruf malzemesi köşeli yapısından ve granülometrik özelliklerinden dolayı kırmataş grubundan malzeme sayılabilir. Bu nedenle Çizelge 5.15'te kırmataş için önerilen $(2.17-e)^2/(1+e)$ eşitliği kullanılır ve RC deneyindeki $e=0.68$ değeri yerine konulursa $F(e)=1.322$ değeri elde edilir. Eşitlik 5.13'de yerine konulursa Eşitlik 5.13 aşağıdaki şekilde yeniden yazılabilir:

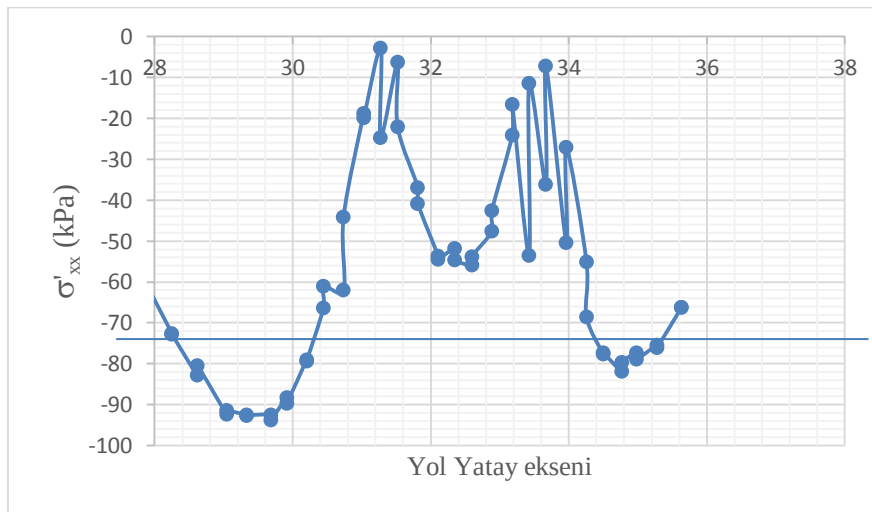
$$G_0 = 9009F(e)(\sigma_3)^{0,4891} \quad (6.14)$$

Temel-alttemel rijitlik modülleri

Temel ve alttemel tabakalarının çevre basıncına bağlı kayma rijitlik modülünün Eşitlik 5.14 ile tespit edilmesi için bu tabakaların orta noktalarında 400 kPa lastik basıncı altında oluşan gerilme seviyelerinin tespiti gereklidir. Bunun için Şekil 5.14'te yer alan düzlem deformasyon modeli 400 kPa lastik basıncı altında dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Temel ve alttemel tabakaları orta noktalarında oluşan ortalama çevre basıncı aşağıdaki grafiklerde görüldüğü üzere sırasıyla 200 kPa ve 75 kPa olarak elde edilmiştir (Şekil 5.15, Şekil 5.16).



Şekil 5.14. Yol kesiti

Şekil 5.15. Temel orta noktası σ'_{xx} (kPa)Şekil 5.16. Alttemel orta noktası σ'_{xx} (kPa)

KTŞ 2013'te temel ve alttemel için farklı sıkışma enerjileri öngörüldüğünden temel için maximum boşluk oranı 0.475'e göre G_{max} hesaplanırken, alttemelde 0.55 boşluk oranı için G_{max} değeri hesaplanmıştır. Buna göre; çelikhane cürufu G_{max} değeri için elde edilen Eşitlik 5.14 yardımıyla 200 kPa çevre basıncına karşılık gelen 0.475 boşluk oranı için G_{max} değeri 234.238 kPa dır. Alttemel için 75 kPa çevre basıncı ve 0.55 boşluk oranına karşılık gelen G_{max} değeri ise 126.028 kPa bulunmuştur (Çizelge 5.16).

Çizelge 5.16. Temel-alttemel $G_{max}(kPa)$ değerleri

Yeri	σ_3	e	F(e)	$G_{maks}=9009 \cdot F(e) \cdot \sigma_c^{0.4891}$
Temel	200	0,475	1,94781356	234.238
Alttemel	75	0,55	1,69316129	126.028

Bu değerlerin, 100 kPa referans çevre basıncına karşılık gelen güncellenmiş değerleri Çizelge 5.17'de yer almaktadır.

Çizelge 0.1 Pref da temel-alttemel $G_{max}(kPa)$ değerleri

Test Sonuçları		C	ϕ (°)	m=0,5
σ (Mpa)	$G_{maks}(kPa)$	47	47	$G_0(ref)$
200	234 238			179 902
75	126 028			138 653

Eşik birim deformasyon ($\gamma_{0.7}$)

Eşik birim deformasyon ($\gamma_{0.7}$), kayma modülü değişim eğrisinde kayma modülünün maksimum kayma modülü eğrisinin yaklaşık %70 değerine karşılık gelen kayma birim deformasyonudur.

Mohr-Cloumb yenilme kriterine göre eşik birim deformasyon değeri aşağıdaki eşitlikteki gibidir. Eşitlikteki k_0 değeri sükünetteki zemin yanal basıncı katsayısıdır. c ve ϕ ise sırasıyla kohezyon ve içsel sürtünme açısıdır.

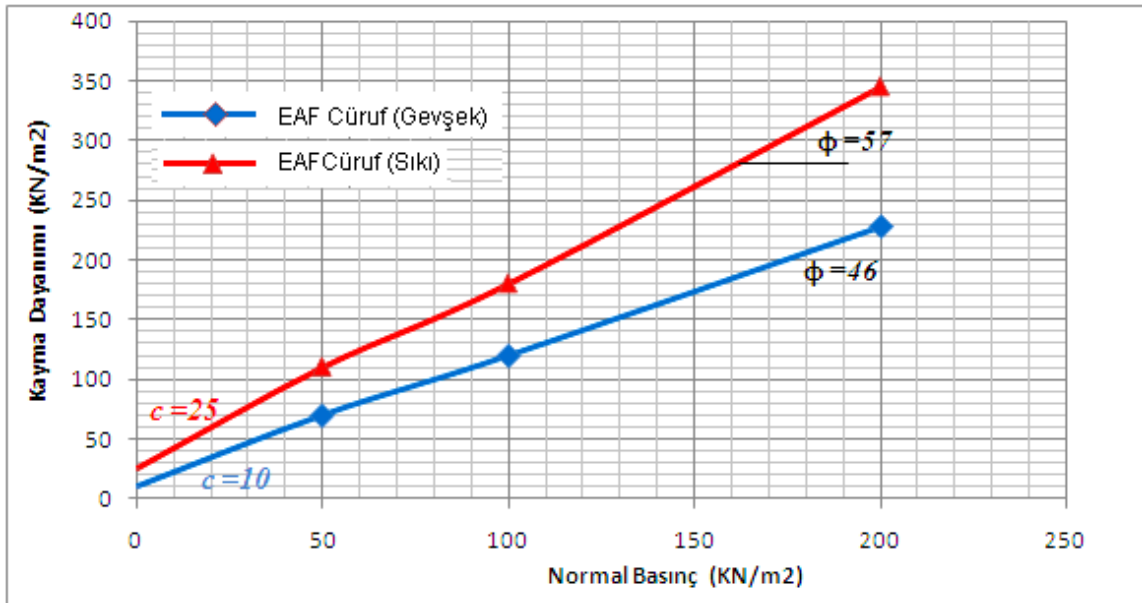
$$\gamma_{0.7} = \frac{1}{9G_0} \left[2c' (1 + 2\cos\phi') + \sigma_1' (1 + k_0) \sin 2\phi' \right] \quad (5.15)$$

Kayma dayanımı parametreleri (C , ϕ)

Cürufların kayma birim deformasyonları literatürdeki veriler incelendiğinde çakıllar ile benzerlik gösterdiği söylenebilir. Gözenekli ve köşeli yapısı kenetleme sağladığından içsel sürtünme açısı ve kohezyon değeri açısından oldukça çakıllara benzer değerler elde edilmesini sağlamaktadır.

FHWA tarafından desteklenmiş araştırma programı çerçevesinde, Purdue Üniversitesinden Yıldırım ve Prezzi tarafından yapılan araştırma kapsamında gerçekleştirilen büyük ölçekli kesme kutusu deneyinde BOF cürufu kritik içsel sürtünme açısı 45.3° - 48.1° ve üç eksenli izotropik konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli (CIDT) test sonuçlarına göre ise pik içsel sürtünme açısı 50, 100 ve 200 kPa hücre basınçlarında sırasıyla 47.3° , 45.2° ve 43.5° ölçülmüştür [54].

Moghaddam, elektrik ark fırını (EAF) cürufu katkısının zeminlerin mühendislik özelliklerine etkisi adlı çalışmada kesme kutusu deneyinde malzemeye ait kayma dayanım parametrelerini Şekil 5.17'deki gibi tespit etmiştir [58].



Şekil 5.17. Kesme kutusu deneyi sonuçları [58]

Çizelge 518'de çeşitli araştırmacılar tarafından belirlenen çelikhane cürufu dayanım parametreleri yer almaktadır.

Çizelge 5.17. Çelikhane cürufu $c-\phi$ ($^{\circ}$) parametreleri

Referans	Test	ϕ ($^{\circ}$)	C (kPa)
Yıldırım ve Prezzi–BOF [54]	Kesme Kutusu	49,8-52,3° ($\phi_c \approx 46^{\circ}$)	29-27 kPa
Yıldırım ve Prezzi–BOF [54]	Üç eksenli	43,5°-47,3°	
Yıldırım ve Prezzi–EAF	Kesme Kutusu	43,6°-45,20° ($\phi_c \approx 41$)	26-93 kPa
Wang vd) [107]		40°-45°	
FHWA [50]		40°-50°	
Noureldin&McDaniel [59]		40°-50°	
Kuruoğlu [116]		49° ($\phi_c = 44^{\circ}$)	25 (Cr=13) kPa
Moghaddam [58]	Kesme Kutusu	57°	25 kPa

Rijitlik değişim parametresi (m)

Gerilmeye bağlı rijitlik parametresi (m) sıkı kumlar için 0,5 ve yumuşak killi zeminler için 1,0 olmak üzere 0.5-1.0 aralığında değerler almaktadır [117].

Rijitlik değişim parametresi için ise dört farklı hücre basıncında elde edilen kayma deformasyon modülü değerleri sonucu Eşitli 5.14'te de görüldüğü üzere yaklaşık 0.5 değerini almıştır.

Viskoz sönüm parametreleri

Enerjinin zemin ve yapılardaki sönümlenmesi genel olarak sürtünme sonucu ısı oluşması ve plastik deformasyonlar nedeniyle enerji depolanması sonucu oluşur. Elastik enerjinin sönümlenmesi matematik modelde viskoz sönümleme ile ifade edilmektedir.

Tek serbestlik dereceli, zorlanmış sönümlemeli bir titreşim sisteminin genel hareket denklemi aşağıdaki diferansiyel denklem ile verilir:

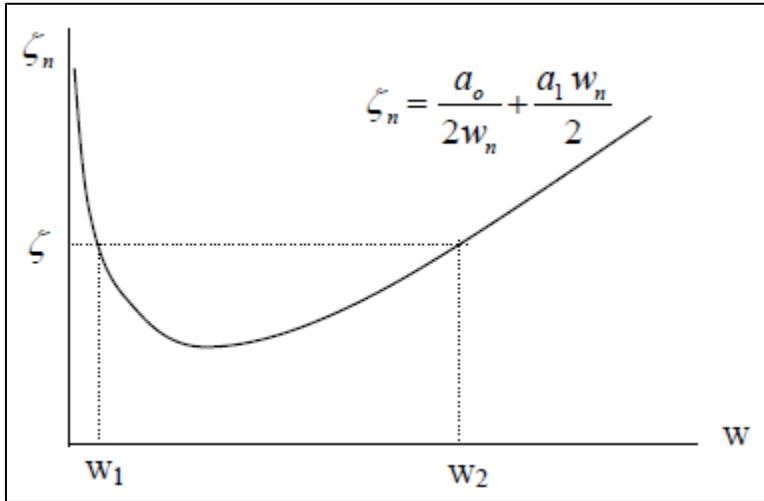
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = f(t) \quad (5.16)$$

Diferansiyel denklemdeki “c” sönüm katsayısıdır. Plaxis'teki iki boyutlu dinamik analizlerde Rayleigh sönüm yaklaşımı kullanılmaktadır. Uygulamada sıkça kullanılan Rayleigh sönüm yaklaşımı, gerçekte fiziksel anlamı olmayan bir yaklaşımdır. Fakat özellikle

titreşim sistemlerini ifade eden doğrusal diferansiyel denklemlere yine doğrusal bir terim olarak katılmasından ve sayısal olarak kolay hesaplanmasından dolayı tercih edilmektedir [118]. Rayleigh sönüm yaklaşımında yukarıdaki eşitlikteki “C” katsayısı aşağıdaki eşitlik ile tanımlanmaktadır:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (5.17)$$

M sistemin kütlesi ve K rijitliğidir. Çok serbestlik dereceli sistemlerde bunlar matris formundadır. α ve β ise titreşim frekansı ve sönüm oranına bağlı sabitlerdir ve Rayleigh katsayıları olarak tanımlanırlar. α ve β sırasıyla sistemin kütle ve rijitlik değerleri ile ilgili sönüm uygular. Eşitlik 5.17 ile verilen sönümün doğal frekans ile değişimi şekil 5.18’de verilmiştir.



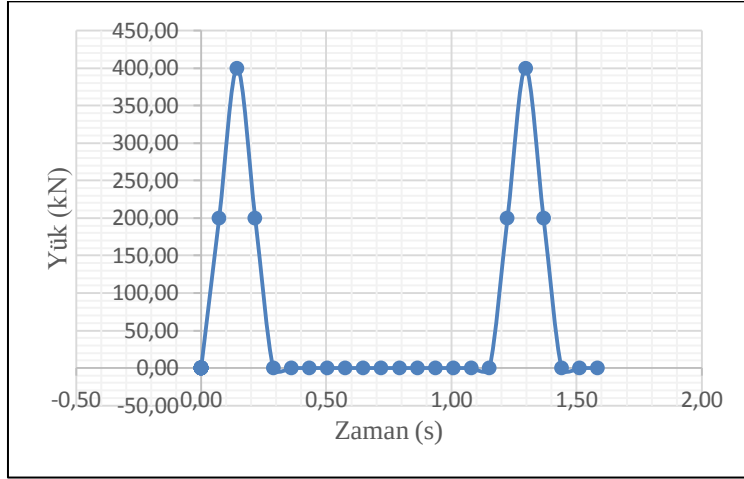
Şekil 5.18. Sönüm oranının (ζ) doğal titreşim frekansı ile değişimi

Şekil 18’de de görüldüğü üzere her iki modda da aynı sönüm değerine sahip olduğu düşünülürse sönüm katsayıları α ve β aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

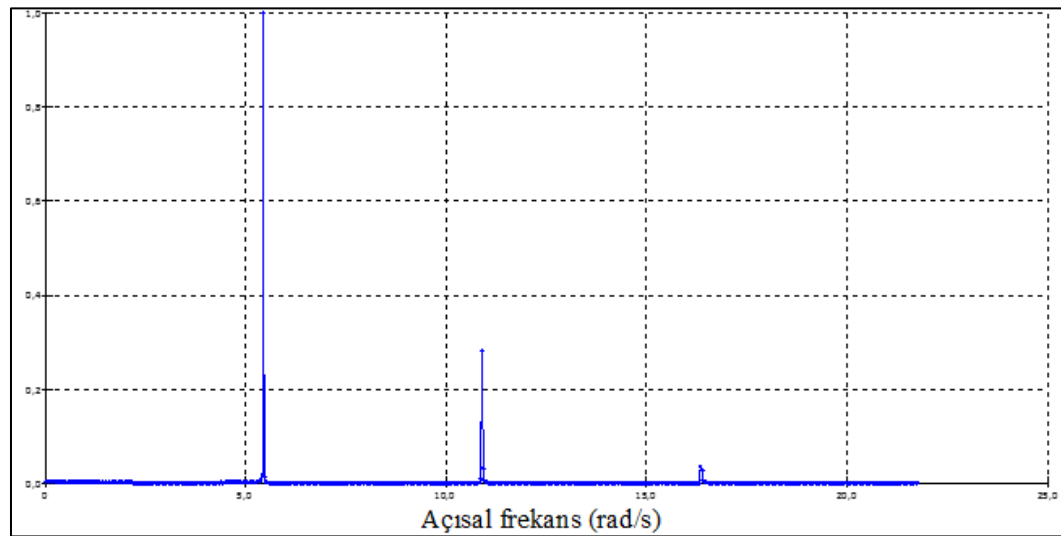
$$\alpha = 2\zeta \frac{\omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad \beta = 2\zeta \frac{1}{\omega_i + \omega_j} \quad (5.18)$$

Temel ve alttemel tabakaları çelikhane cürufundan teşkil edilen Şekil 6.14’deki yol kesitine Şekil 5.19’da görülen tekrarlı trafik yükleri etkitilmiş ve yapılan analiz sonucunda sistemin

ilk dört moduna ait frekanslar sırasıyla 5.45, 10.90, 16.35, 21.80 rad/s olarak elde edilmiştir (Şekil 5.20).



Şekil 5.19. Tekrarlı yükleme



Şekil 5.20. Tekrarlı trafik yükleri altında elde edilen yol kesiti açısal frekansları

%5 sönüm oranı ve elde edilen frekans değerleri kullanılarak MS Excel programındaki çözücü yardımıyla α ve β değerleri sırasıyla 0,654 ve 0,00367 bulunmuştur.

5.2. Yöntem

Günümüzde kullanılan yol üstyapılarının en yaygın olanı esnek yol üst yapılarıdır. Esnek yol üst yapılarının yanı sıra portlant çimento esaslı rijit beton yol üst yapısı ve bu ikisinin karışımı olan kompozit yol üst yapıları kullanılmaktadır.

Esnek yol üstyapısının analiz ve dizaynı önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere; yol testlerine dayalı ampirik dizayn, limit kayma dayanımına dayalı analiz, belli bir deformasyon seviyesi ile sınırlandırılmış limit deformasyon metodu, yol testleri veya performansına dayalı regresyon metodu, mekanistik-ampirik metot olarak sıralanabilir [11].

Günümüzde kullanılan yol analiz metotlarının çoğu ampirik veya yarı ampirik yöntemlerdir. Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Ofisi (AASHTO) tarafından 1960'lı yıllardan itibaren geliştirilen ampirik yöntemler günümüze kadar dünyadaki pek çok ülkede küçük değişiklikler ile kullanılmaktaydı. Federal Karayolu İdaresi'nin (FHWA) sponsorluğunda 2004 yılında tamamlanan 1-37A proje numaralı Ulusal İşbirliği Otoyol Araştırması Programı, Mekanik-Ampirik Karayolu Tasarımının (MEPDG) ilkelerini belirleyerek ampirik dizayndan mekanistik-ampirik dizaynına geçişin başlangıcını oluşturmuştur [14].

Yol üst yapıları trafik yükleri ve doğal şartlardan kaynaklı yüklere maruz kalmaktadır. Trafik yükleri, aracın hareketi nedeniyle yol üstyapısı tabakalarında radyal çekme ve basınç gerilemelerine sebep olur. Trafik yüklerinden kaynaklı yol üst yapısındaki gerilme seviyesi ve dağılımı, dingil yüklerinin şiddeti ve tekrar sayısı ile doğrudan ilişkilidir. Trafik yüklerine ilave olarak, yol üstyapısının davranışı kullanılan malzemenin mukavemet ve deformasyon karakteristikleri, sıcaklık, nem, yeraltı suyundaki değişim, don vb. çevresel koşullar ile ilgilidir.

Çok iyi bilindiği üzere granüler malzemeler ve diğer zeminler sınırlı bir birim deformasyon limitinden sonra lineer olmayan davranış sergilerler. Zeminlerin deformasyon modelleri zemindeki gerilme seviyesine bağlı olarak değişir. Ayrıca birçok araştırmacı deprem ve benzeri tekrarlı dinamik yükler altındaki zeminlerin küçük gerilim seviyelerindeki deformasyon modelleri geleneksel test yöntemlerinden elde edilen deformasyon modellerine göre daha yüksektir.

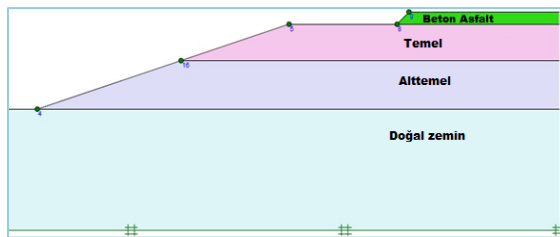
Günümüzde mevcut birçok bilgisayar programı esnek yol üstyapısının maruz kaldığı yükleri ve bu yükler altındaki deformasyon karakteristiklerini hesaplayabilecek kapasite ve özelliktedir. Dinamik yüklerin bilgisayar ortamında simülasyonu, yol yapısının farklı gerilme seviyelerindeki deformasyon karakteristikleri, farklı nem koşulları modellenenmektedir.

Birçok araştırmacı tarafından ortaya konulduğu üzere zeminlerin tekrarlı dinamik yükler altındaki gerilme-gerinim davranışı statik yükleme koşullarından çok farklıdır. Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki temel davranış karakteristikleri; gerilme seviyesine bağlı deformasyon modülü, yeniden yükleme durumundaki davranış farklılığı, histerik sönümlemeden kaynaklı enerji kaybı vb. özelliklerdir.

Yol üstyapısındaki ana problemlerden biri, farklı dingil yükleri ve frekanslardaki tekrarlı yüklemeden kaynaklı yoldan oluşan tekerlek izidir. Diğer taraftan tekrarlı tekerlek yükleri altındaki yol üstyapılarının tepkisini analiz etmede sonlu elemanlar analizi son zamanlarda çokça kullanılan bir yöntem olmuştur. Bu çalışmada da esnek yol üstyapısının deformasyon davranışını analiz etmede bu yöntem kullanılmıştır.

5.2.1. 2D Fiziksel ve sayısal model

Geleneksel esnek yol üstyapıları sıcak asfalt karışımından oluşan koruyucu üst tabaka (HMA) ve bu üst tabakayı destekleyen granüler temel ve alttemelden oluşan çok tabakalı sistemlerdir (Şekil 5.21). Bu üst yapı yeterli taşıma gücüne sahip bir zemin tabakası üzerine inşa edilir. Zemin mukavemetinin yeterli olması veya trafik yüklerinin düşük olması durumunda temel ve alttemel tabakası birleştirilerek tek tabaka halinde de olabilmektedir. HMA tabakasının temel amacı yol üstyapısını olumsuz dış faktörlerden korumak; yeterli drenaj, gürültü kontrolü, yeterli sürtünme sağlayarak gerekli sürüş konforu sağlamak; esnek tepki sayesinde yolun uzun ömürlü olmasını sağlamaktır.



Şekil 5.21. Tipik yol üst yapısı kesiti

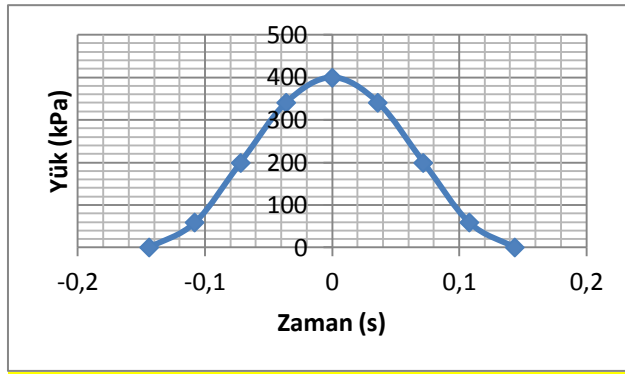
Yol üstyapısının herhangi bir noktasındaki gerilmenin aracın hızına ve elastik teoriden de bilindiği üzere noktanın derinliğine bağlı olacaktır. Basınç dağılımı ise Şekil 5.22'deki sinüs dağılımı veya 5.24'deki üçgen yük dağılımı olacaktır [11, 119]. Basitleştirilmiş yöntemle

göre gerilme yoğunluğunun zamana göre dağılımının sinüs fonksiyonu Eşitlik 5.19'da verilmiştir [11]:

$$L(t) = q \sin^2\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi t}{d}\right) \quad (5.19)$$

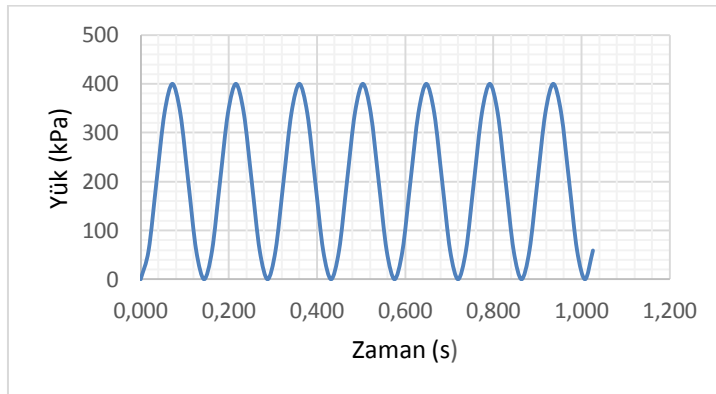
Yukarıdaki eşitlikte yer alan d basınç darbesinin süresi olup aracın hızına (s) ve lastik temas yarıçapına (a) bağlı olup Eşitlik 6.20'deki gibi ifade edilebilir. Eşitlikteki q ise $t=0$ anındaki maksimum yük yoğunluğudur ve sinüs dağılıma göre Şekil 5.22'deki gibi $t=0$ anında önce ve sonra zamana bağlı olarak azalacaktır:

$$d = \frac{12a}{s} \quad (5.20)$$



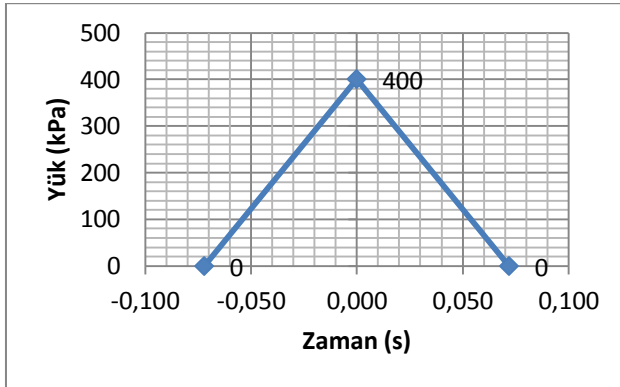
Şekil 5.22. Dinamik yük dağılımı

Şekil 5.23, 300 mm temas çapına, $d=0.144$ saniyelik darbe süresine sahip 400 kPa lastik basıncının, sinüs dağılıma uygun olarak tekrarını göstermektedir.



Şekil 5.23. Tekrarlı yükleme grafiği

Sayısal modelde haversin yükün temsil edilmesi için her yükleme adımı için en az altı alt adım gereklidir. Ancak üçgen yük darbesi için sadece iki alt adım yeterlidir. Daha az alt adım gerektirmesi nedeniyle daha düşük depolama kapasitesine ihtiyaç duyulduğundan hesaplama süresinin düşürülmesine fırsat verdiği için sinüs dağılımı yerine Barksdale [119] tarafından belirlenen üçgen yük tercih edilmiştir. Şekil 5.24'te 400 kPa büyüklüğünde ve 0.144 saniyelik yükleme süresine sahip üçgen yük atımı görülmektedir.



Şekil 5.24. 400 kPa üçgen yük atımı

Literatürdeki birçok çalışmada beton asfalt (AC) doğrusal elastik malzeme olarak modellenmiştir. Ancak Wang and Al-Qadi; asfalt betonunun agrega, hava ve su içermesi nedeniyle zemin malzemesine benzer bir kompozisyona sahip olduğunu, ortalama sıcaklıklarda hem granüler hem de kohezif özellikleri olan Mohr-Coulomb malzeme modeli olarak modellenebileceğini belirtmişlerdir [120]. Analizlerde asfalt betonu (AC) Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir. Asfalt betonunun içsel sürtünme açısı sıcaklıktan bağımsız olarak kullanılan agregalar arasındaki kenetlenme ve taneler arası sürtünmenin bir fonksiyonu iken kohezyon değeri kullanılan bitümün özelliklerine bağlı olup sıcaklık ile değişen değerlere sahiptir [121]. J.R.Mattos vd., asfalt betonu üzerinde yaptıkları üç eksenli deneylerde geleneksel bitüm ile hazırlanmış AC numunelerinde 25 C° sıcaklıkta yapılan deneylerde içsel sürtünme açısı 46° ve yaklaşık 500 kPa kohezyon değerlerini elde etmişlerdir [122].

Bu çalışma kapsamında analiz edilen yol üst yapısı; 10 cm kalınlığındaki asfalt kaplama tabakasının altında yer alan 30 cm kalınlığında granüler temel ve 40 cm kalınlığında alttemel tabakalarından oluşmaktadır. Taşıyıcı doğal zemin olarak kil alınmıştır.

Kesit, iki boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak analiz edilmiştir. Analizde düzlem deformasyon ve eksenel simetrik olmak üzere iki farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Model boyutları, “R” yükleme yarıçapı olmak üzere 200Rx200R alınmıştır.

Tekrarlı yük altındaki zeminlerin temel davranışı; gerilme seviyesine bağlı rijitlik, boşaltma-yeniden yükleme durumuna duyarlılık ve döngüsel yüklemedeki enerji kayıpları nedeniyle histerik sönümlenme tepkisidir. Bunlara ek olarak, çok küçük gerilme seviyelerinde tamamen elastik davranış sergilenirken, gerinim seviyesinin artmasıyla birlikte zeminlerde kalıcı plastik deformasyonların olduğu gözlenmektedir. Gerilme seviyesinin artmasıyla zeminlerin kayma deformasyon modülü azalır.

Granüler temel ve alttemel tabakaları ile doğal zemin için küçük gerinim seviyelerine bağlı pekleşen zemin modeli (Hardening soil with small strain-HSsmall) kullanılmıştır. Kayma dayanımı parametrelerine (c , ϕ , ψ) ilave olarak sonlu elemanlar yazılımı Plaxis’te yer alan HSsmall zemin modeli temel deformasyon parametreleri devam eden eşitliklerde yer almaktadır.

Sekant elastisite modülü (E_{50}) Eşitlik 5.21’de yer almaktadır. Eşitlikteki E_{50}^{ref} , 100 kPa referans basınçtaki (p^{ref}) referans elastisite modülüdür.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c' \cos \phi' - \sigma_3' \sin \phi'}{c' \cos \phi' + p^{ref} \sin \phi'} \right)^m \quad (5.21)$$

Odometrik Modül (E_{oed}):

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{\sigma'}{p^{ref}} \right)^m \quad (5.22)$$

Kayma modülü ve eşik kayma birim deformasyonu sırasıyla Eşitlik 23 ve Eşitlik 24’te verilmiştir.

$$G_0 = G_0^{ref} \left(\frac{c' \cos \phi' - \sigma_3' \sin \phi'}{c' \cos \phi' + p^{ref} \sin \phi'} \right)^m \quad (5.23)$$

$$\gamma_{0.7} = \frac{1}{9G_0} \left[2c'(1 + 2\cos\phi') + \sigma'_1(1 + k_0)\sin 2\phi' \right] \quad (5.24)$$

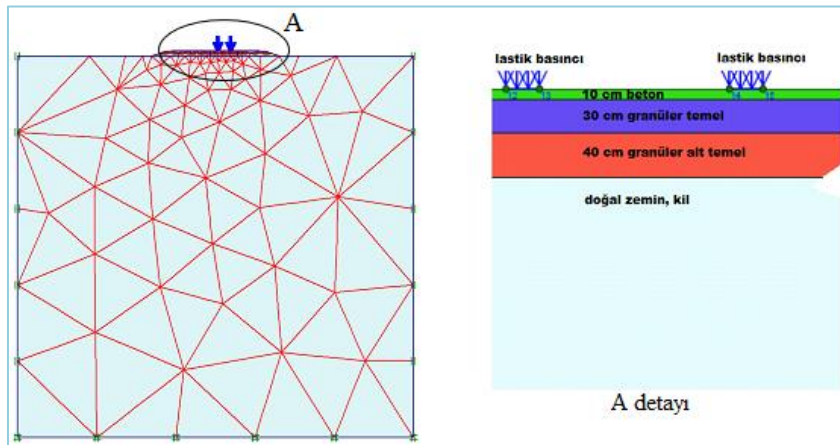
Esnek yol üst yapıları dinamik trafik yükleri altında olan çok katmanlı sistemlerdir. Malzemelerin dinamik yükler altındaki davranışı ve deformasyon seviyeleri literatürdeki çalışmalardan da görülmüştür ki statik yükler altındaki davranıştan ve deformasyon seviyelerinden farklıdır. Tekrarlı ve hızlı yüklemelerden oluşan dinamik yüklere akrşı malzemeler statik yüklere kıyasen daha mukavim davranırlar. Bu çalışmada yol üst yapısında temel ve alttemel tabakasında kullanılan çelikhane cürufunun tekrarlı trafik yükleri altındaki davranışı incelenmiş olup, cürufun maksimum kayma modülü rezonant kolon deneyleri ile elde edilmiştir. Malzeme bünye modeli olarak da küçük gerinim seviyelerine bağıli pekleşen zemin modeli (Hardening soil with small strain-HSsmall) kullanılmıştır. Çelikhane cürufunun gradasyon değerleri, hava şartlarına karşı donma çözölme ve aşınma gibi değerlerinin de Karayolları Teknik Şartnamesinde yol üst yapısı temel ve alttemel için belirlenen limitlere uygun olduğunu göstermektedir.

6. SAYISAL ANALİZ VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

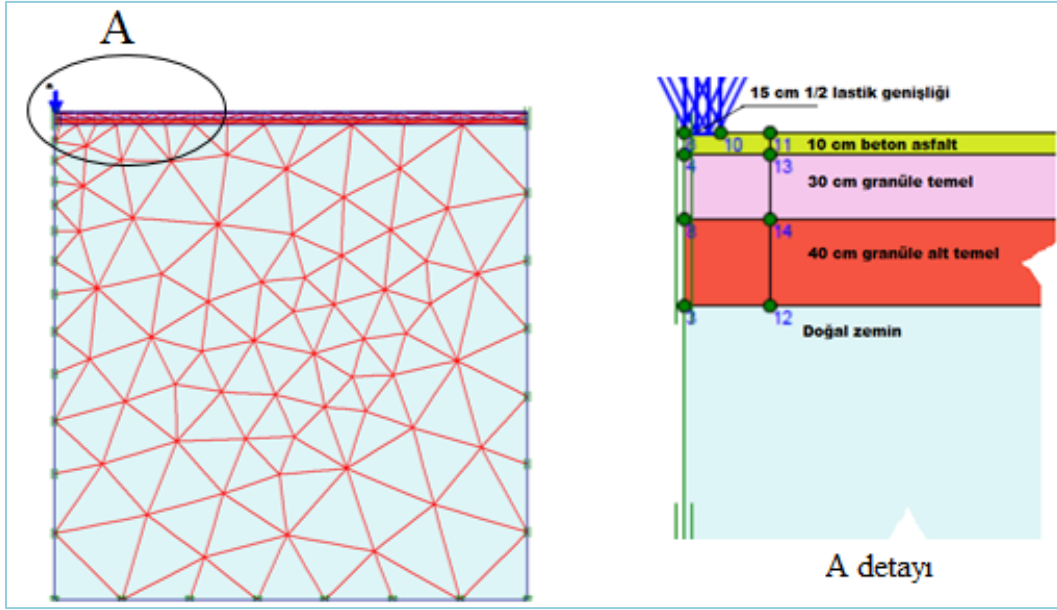
Çalışma kapsamında asfalt kaplama tabakasının kalınlığı 10 cm, granüler temel ve alttemel tabakalarının kalınlığı sırasıyla 30 cm ve 40 cm alınmıştır. Analizlerde yer alan doğal zemin ise katı kildir.

Kesit, iki boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak, Plaxis programı ile analiz edilmiştir. Analizde düzlem deformasyon ve eksenel simetrik olmak üzere iki farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Model tabanında ve kenarlarında, dinamik yüklerden kaynaklı olası yansımalar nedeniyle oluşacak ilave yük ve deformasyonları engellemek için sayısal modelin sınırları teker basıncı noktasından yeterince uzak olacak şekilde seçilmiştir. Model boyutları, “R” yükleme yarıçapı olmak üzere 200Rx200R alınmıştır. Düzlem deformasyon analizinde her iki teker yükü bir kuvvet çifti olarak simüle edildiği için model boyutları biraz daha büyütülmüştür. Bu boyutlar literatürde tavsiye edilen ölçüler ile uyumludur. Duncan, makul sonuçlar için eksenel simetrik modelin genişliğinin 12R ve derinliğinin 50R alınmasını önermiştir [123]. Kim, yapmış olduğu parametrik çalışmada 20RX140R boyutlarının seçilmesi durumunda model sınırlarının analiz sonuçlarına etkisinin ihmal edilebileceğini göstermiştir [124].

Düzlem deformasyon analizi için dingil yükü; her bir teker için temas çapı 300 mm olan, 2 metre iz genişliğine sahip kuvvet çifti olarak simule edilmiştir (Şekil 6.1). Eksenelsimetrik analizde tek lastik basıncı modellenmiştir (Şekil 6.2). Temas basıncı 400 kPa olarak ve üçgen yük dağılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.1. Düzlem deformasyon modeli



Şekil 6.2. Eksenel simetrik model

Sınır koşulları olarak Plaxis programındaki standart fixity seçeneği kullanılmıştır. Böylece model kenarlarında yatay deformasyonlar (x) sınırlanmış, düşey deformasyonlar (y) ise serbest olacak şekilde kayar mesnet kullanılmıştır. Model tabanında ise sabit mesnet koşulları kullanılarak x ve y yönlerindeki deformasyonlar sınırlandırılmıştır.

6.1. Kesit Analizleri

Plaxis programında zemin 6 ve 15 düğümlü üçgen sonlu elemanlar ağı şeklinde modellenenmektedir. Modelde 15 düğümlü üçgen elemanlar seçilmiştir. Sonlu eleman modeli her biri 15 düğüm noktalı 287 elemandan oluşmaktadır. Modelde toplam nokta sayısı 2407'dir. Analizde daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için asfalt, temel ve alttemel tabakalarında daha sıkı ve küçük elemanlar kullanılmış, lastik basıncı etrafındaki sonlu elemanlar ağı da ayrıca sıkılaştırılmıştır. Ancak hesaplama zamanının kısaltılması ve bilgisayarda daha az yer kaplaması için eleman boyutları büyütülmek suretiyle sonlu elemanlar ağı kenarlarına doğru seyrekleştirilmiştir.

Analizlerde eksenel simetrik ve düzlem deformasyon analizlerinin her birinde ayrı ayrı olmak üzere, cüruf malzemesinin temel ya da alttemel tabakalarının hangisinde kullanılmasının en iyi sonucu vereceğini bulmak amacıyla dört farklı kesit analiz edilmiştir. Çelikhane Cürufu sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla bir kesitte kırmataş temel ve kırmataş alttemelden oluşan kesit analiz edilmiştir. Analiz edilen kesitler aşağıdaki gibidir

(Şekil 6.3). Kaplama tabakası ve doğal zemin aynı olmak şartıyla Şekil 6.3 te yer alan kesitlerde KK, kırmataş temel ve alttmeleden oluşan kesiti; KC, kırmataş temel ve cüruf alttmeleden oluşan kesiti; CK, cüruf temel ve kırmataş alttmeleden oluşan kesiti; CC ise cüruf temel ve cüruf alttmelden oluşan kesiti göstermektedir.

a) KK	b) KC	c) CK	d) CC

Şekil 6.3. Analizlerde kullanılan kesitlerin gösterimi

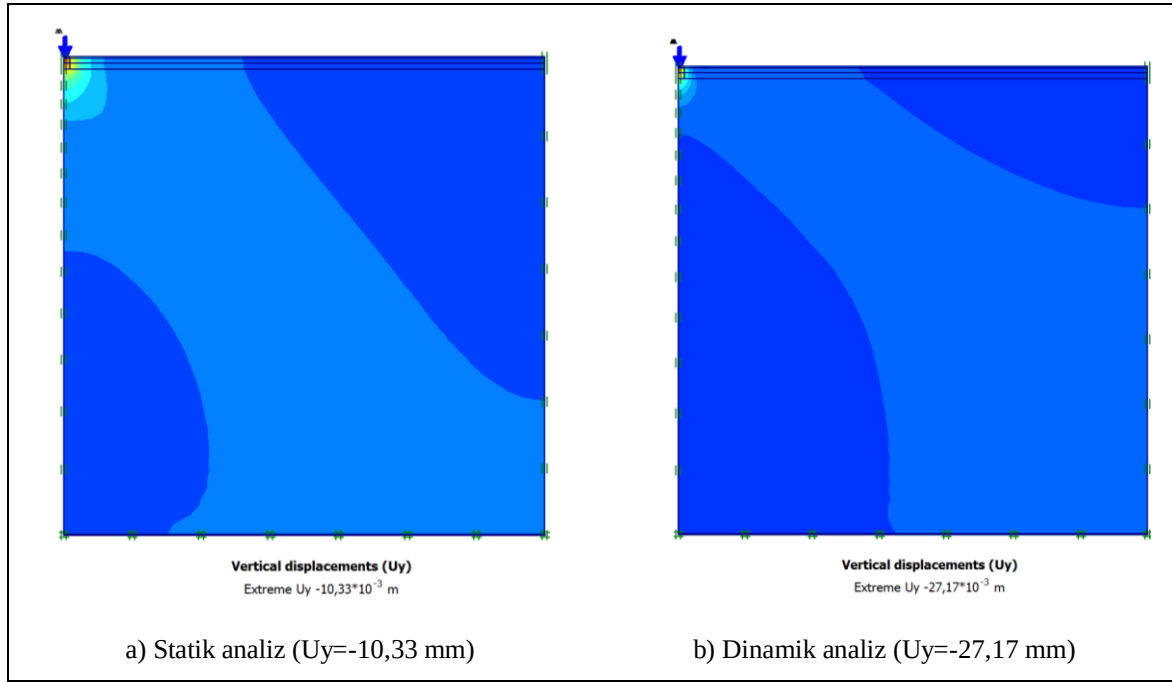
Şekil 6.3'te yer alan kesitlerin analizinde kullanılan malzeme parametreleri Çizelge 6.1'de yer almaktadır. Asfalt betonu Mohr-Coloumb (MC), temel, alttemel ve doğal zemin ise HSsmall malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir. Kırmataş temel ve kırmataş alttmel için Florida Newberry kireç taşı kullanılmıştır. Cüruf temel ve cüruf alttmel için ise Erdemir çelikhane cürufu kullanılmıştır.

Çizelge 6.1. Analizlerde kullanılan malzemelere ait parametreler

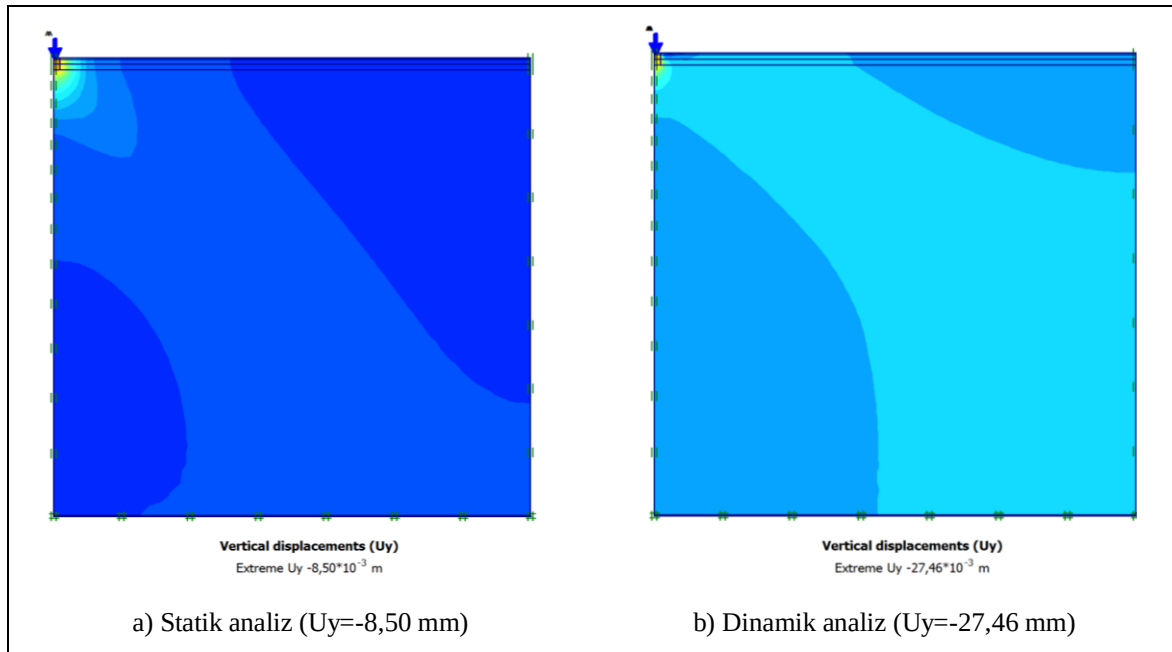
Malzeme Parametreleri	Asfalt	Florida Newberry Kireç taşı Temel	Florida Newberry Kireç taşı Alttemel	Katı kil	Erdemir çelikhaneçür uf Temel	Erdemir çelikhaneçür uf Alttemel
Model	MC	HSsmall	HSsmall	HSsmall	HSsmall	HSsmall
E(MPa)	4500					
E_{50}^{ref} (MPa)		165	115	24	160	124
E_{oed}^{ref} (MPa)		165	115	24	160	124
E_{ur}^{ref} (MPa)		495	345	72	485	372
G_0^{ref} (MPa)		185	128	55	180	138
γ_0		5×10^{-6}	5×10^{-6}	4.07×10^{-4}	2.18×10^{-4}	2.18×10^{-4}
m		0.700	0.700	0.1	0.50	0.50
v	0.30	0.35	0.35	0.20	0.35	0.35
Kalınlık (m)	0.1	0.30	0.40	10.0	0.30	0.40
γ (kN/m ³)	24.00	21.33	20.77	18.00	23.11	22.47
c (kN/m ²)	500	40	40	100	47	45
ϕ (°)	46	40	35	10	47	45

6.1.1. Eksenel simetrik analizler

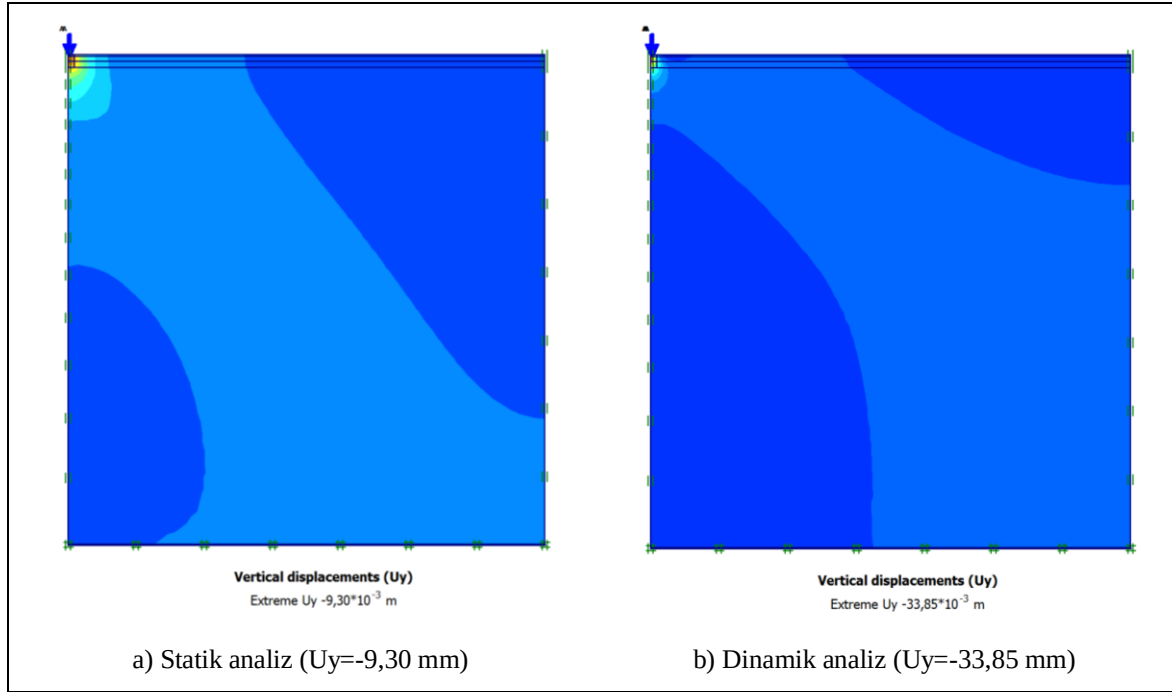
Dört adet eksenel simetrik kesitin hem statik hem de dinamik analizi yapılmıştır. Analiz edilen KK, CC, CK, KC ve kesitlerine ilişkin düşey deformasyon sonuçları aşağıdaki şekillerde sırayla yer almaktadır (Şekil 6.4 - Şekil 6.7).



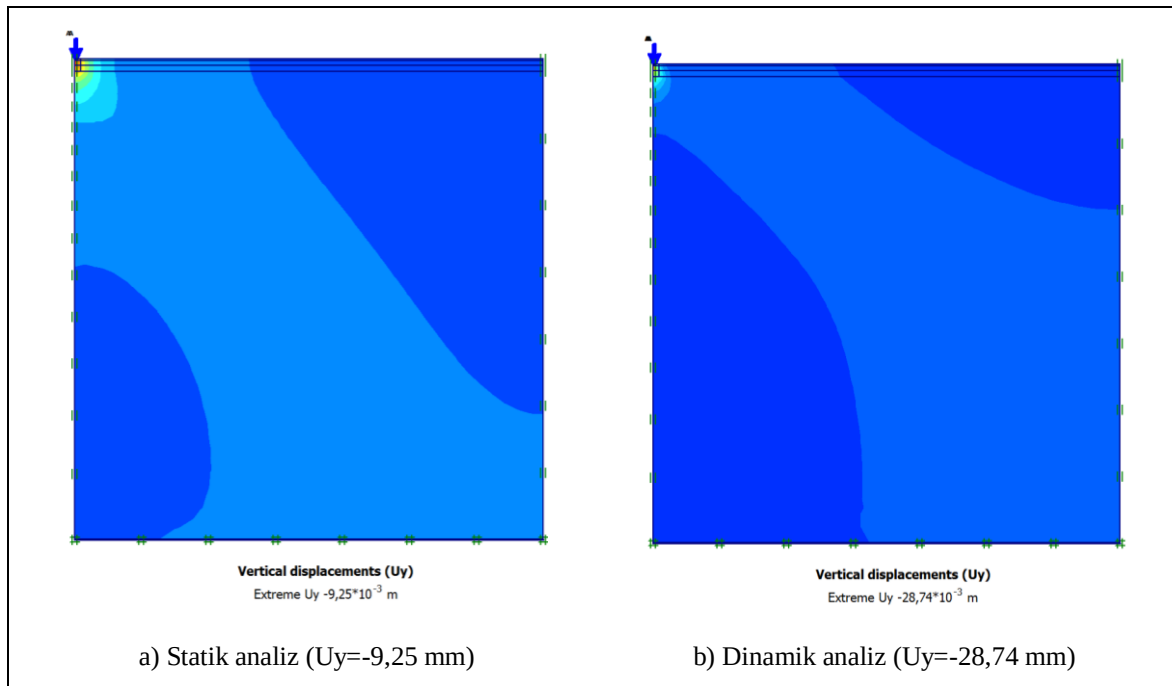
Şekil 6.4. Kırmataş temel-kırmataş alttemel (KK) kesiti düşey deformasyonlar



Şekil 6.5. Cüruf temel-cüruf alttemel (CC) kesiti düşey deformasyonlar



Şekil 6.6. Cüruf temel-kırmataş alttemel (CK) kesiti düşey deformasyonlar



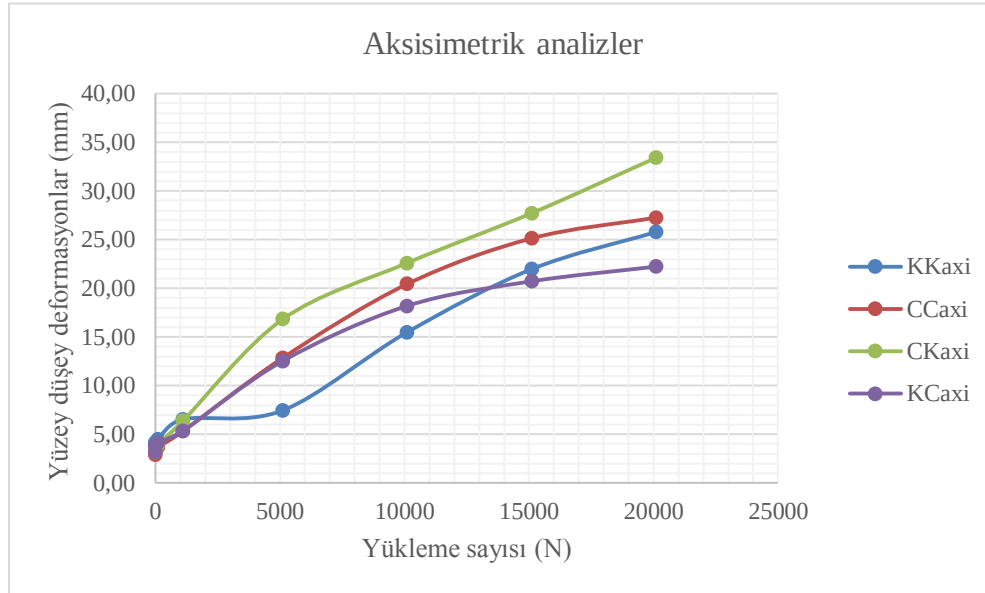
Şekil 6.7. Kırmataş temel- cüruf alttemel (KC) kesiti düşey deformasyonlar

Dört kesite ait eksenel simetrik analizler karşılaştırıldığında; 21 111 yükleme için en iyi sonuçlar KC kesitinde elde edilirken, CK kesitinde aynı yükleme sayısı için maksimum deformasyonlar oluşmaktadır (Çizelge 6.2).

Yükleme sayısı artışına bağlı olarak maksimum deformasyonların oluştuğu kesitin değişkenlik gösterdiği görülmektedir. 13000 yüklemeye kadar minimum deformasyonlar KK kesitinde elde edilirken 13000’den fazla yükleme sayıları için minimum deformasyonlar KC kesitinde oluşmaktadır (Şekil 6.8). Bu sonuçlar en iyi performansı veren kesit için belli bir yüklemeye sayısının üzerinde yüklemenin gerçekleştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 6.2. Asfalt yüzeyinde, lastik orta noktasında oluşan düşey deformasyonlar (eksenel simetrik analiz)

Yükleme sayısı (N)	KK _{axi} (mm)	CC _{axi} (mm)	CK _{axi} (mm)	KC _{axi} (mm)
1	3,62	2,88	3,16	3,18
10	4,18	3,41	3,70	3,81
100	4,49	3,66	3,96	4,15
1111	6,54	5,32	6,40	5,36
5111	7,45	12,85	16,82	12,53
10111	15,49	20,44	22,61	18,19
15111	21,97	25,14	27,72	20,72
20111	25,80	27,27	33,43	22,23



Şekil 6.8. Eksenel simetrik analizlerde deformasyon-yüklemeye sayısı (N) değişimi

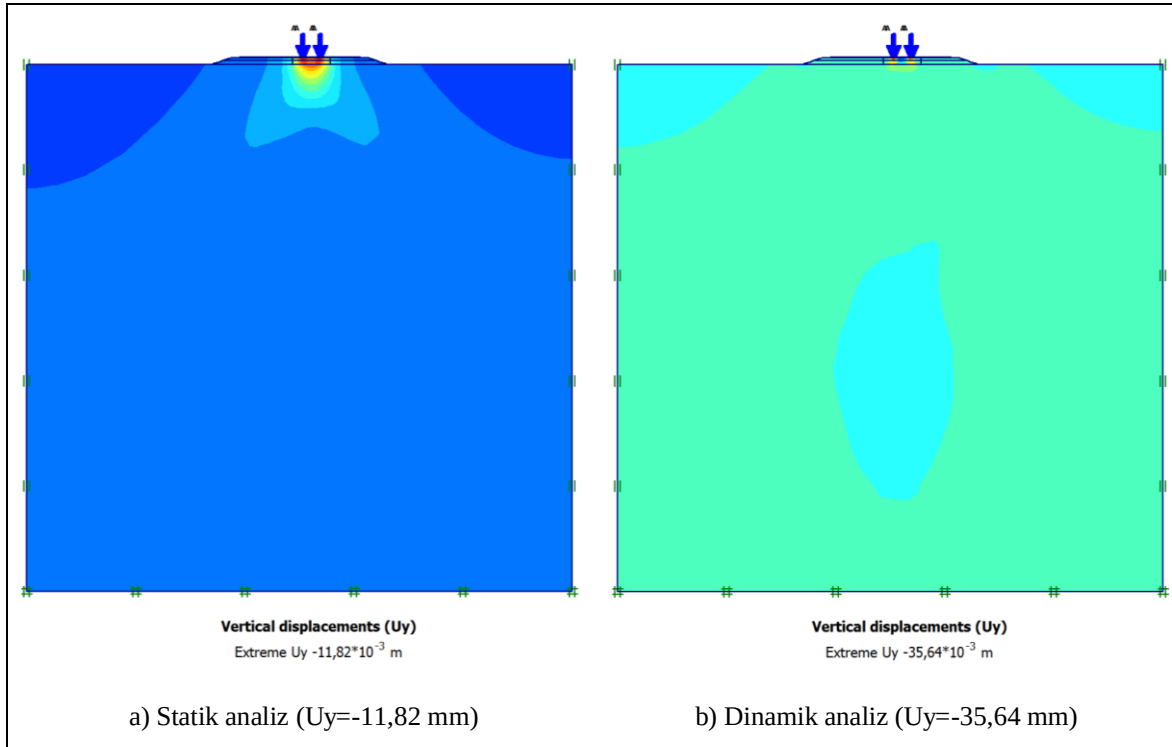
Eksenel simetrik statik analiz sonuçları Çizelge 6.3’te yer almaktadır. Statik analizlerde maksimum ve minimum deformasyonlar sırasıyla KK ve KC kesitlerinde oluşmuştur.

Çizelge 6.3. Statik eksenel simetrik analizde asfalt yüzeyinde oluşan düşey deformasyonlar

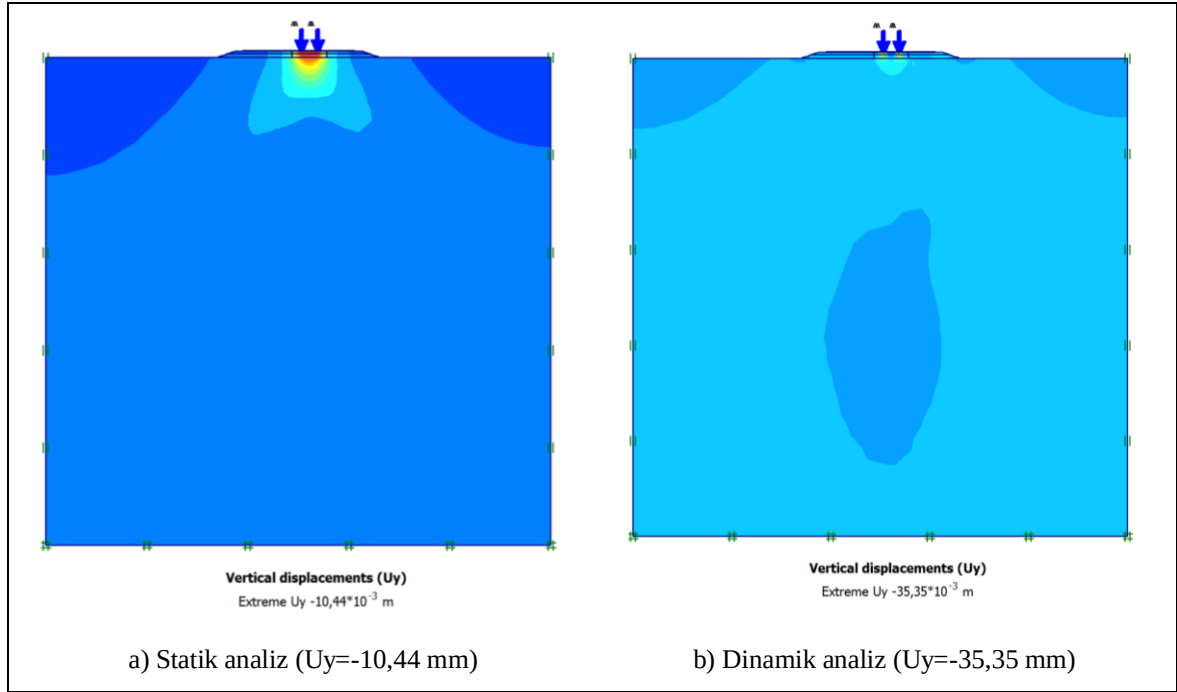
KK _{axi} (mm)	CC _{axi} (mm)	CK _{axi} (mm)	KC _{axi} (mm)
10,33	8,50	9,30	9,25

6.1.2. Düzlem deformasyon analizleri

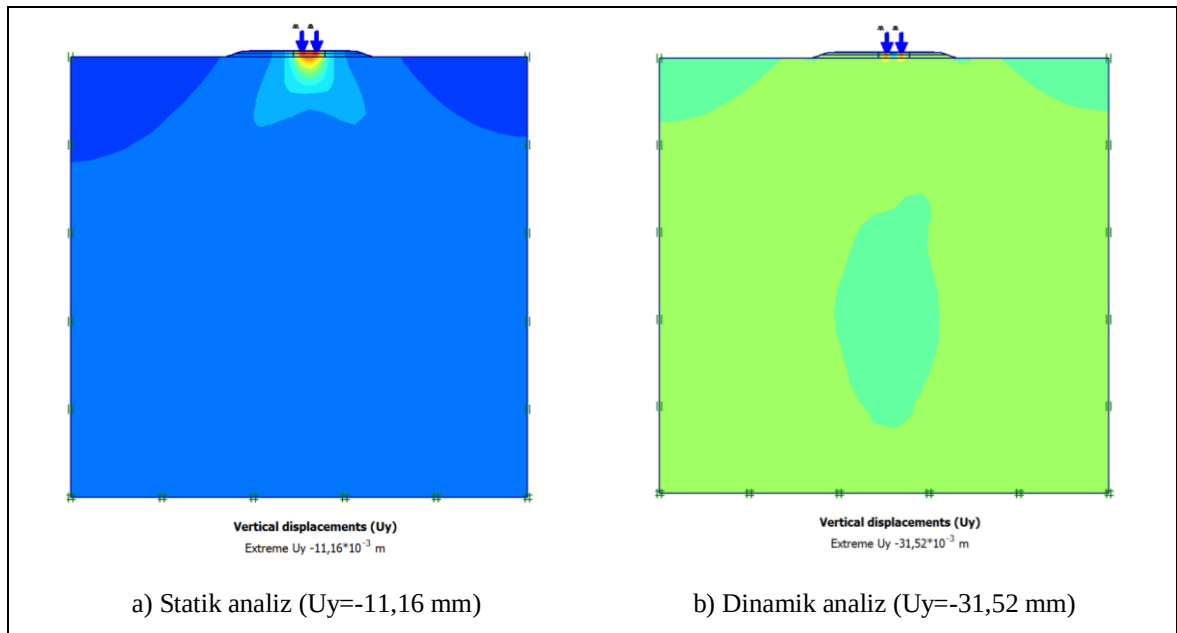
Dört adet kesitin (KK, CC, CK, KC) hem statik hem de dinamik düzlem deformasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz edilen kesitlere ait düşey deformasyonlar aşağıdaki şekillerde yer almaktadır (Şekil 6.9 - Şekil 6.12). KK, CC, CK ve KC kesitleri için 20 111 adet tekrarlı yükleme altında maksimum düşey deformasyonlar sırasıyla 36 mm, 35 mm, 32 mm ve 27 mm olarak gerçekleşmiştir.



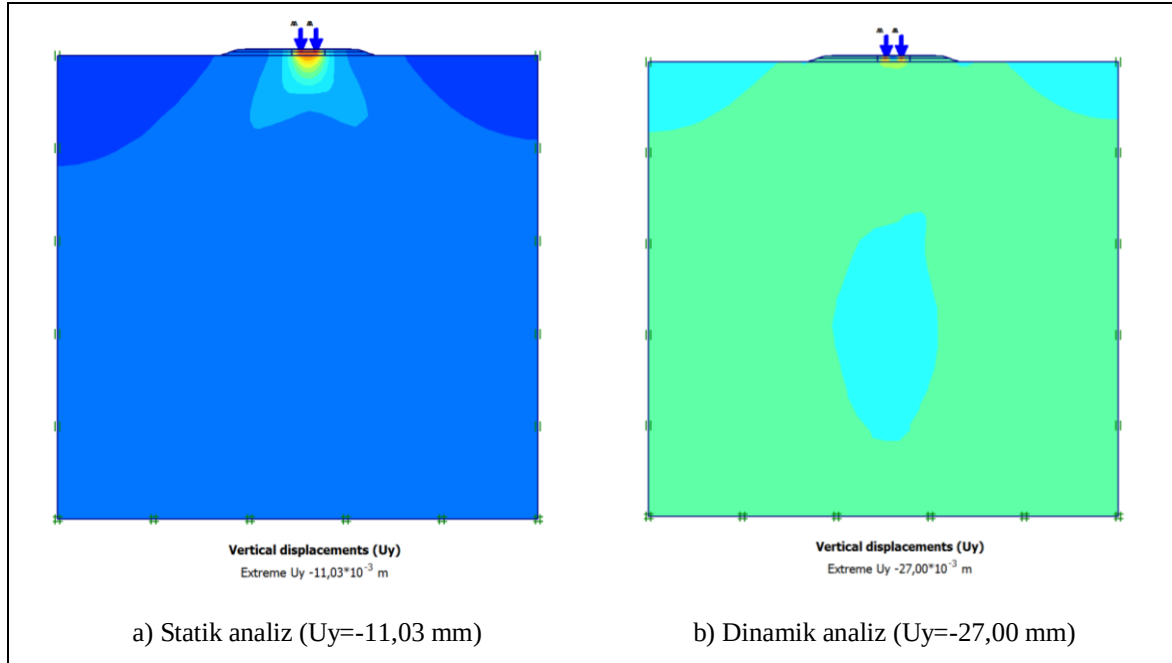
Şekil 6.9. Kırmataş temel- kırmataş alttemel (KK) kesiti düşey deformasyonlar



Şekil 6.10. Cüruf temel-cüruf alttemel (CC) kesiti düşey deformasyonlar



Şekil 6.11. Cüruf temel-kırmataş alttemel (CK) kesiti düşey deformasyonlar



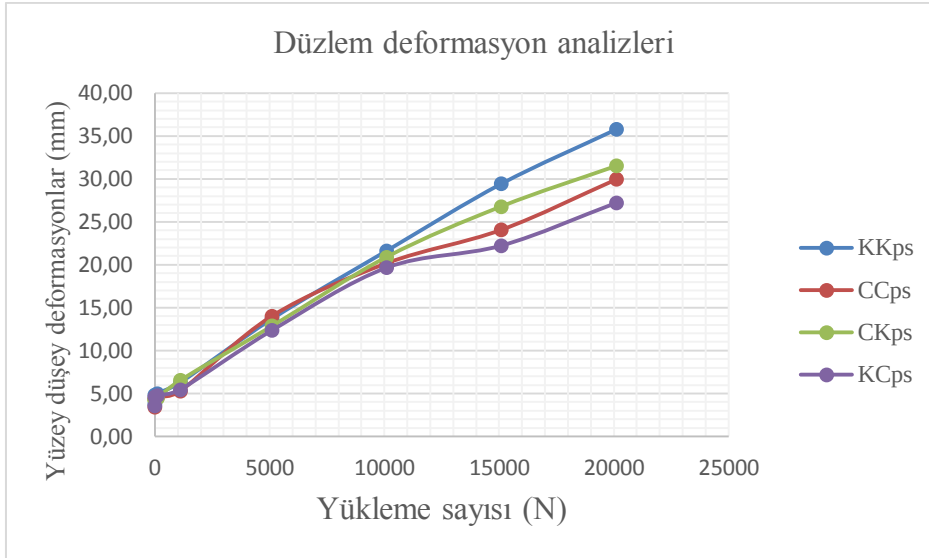
Şekil 6.12. Kırmetaş temel- cüruf alttemel (KC) kesiti düşey deformasyonlar

Dört kesite ait düzlem deformasyon analizler karşılaştırıldığında; 21 111 yükleme için en düşük deformasyonlar aksel simetrik analizlerde olduğu gibi 27 mm ile KC kesitinde elde edilmiştir. Maksimum deformasyonlar ise 36 mm ile KK kesitinde gerçekleşmiştir (Çizelge 6.4).

Yükleme sayısı artışına bağlı olarak maksimum deformasyonlarının olduğu kesitin düzlem deformasyonda da değişkenlik gösterdiği görülmektedir (Şekil 6.13). Sonuçlar en iyi performansı veren kesit için belli bir yükleme sayısının üzerinde yüklemenin gerçekleştirilmesi gerekliliğini aynı şekilde ortaya koymaktadır.

Çizelge 6.4. Asfalt yüzeyinde, lastik orta noktasında oluşan düşey deformasyonlar (düzlem deformasyon analizi)

Yükleme sayısı (N)	KK _{ps} (mm)	CC _{ps} (mm)	CK _{ps} (mm)	KC _{ps} (mm)
1	3,79	3,42	4,23	3,59
10	4,87	4,41	4,35	4,63
100	5,02	4,56	4,45	4,78
1111	6,29	5,29	6,55	5,47
5111	13,71	14,04	12,87	12,37
10111	21,64	20,19	20,92	19,67
15111	29,45	24,08	26,81	22,24
20111	35,78	29,95	31,52	27,21



Şekil 6.13. Düzlem deformasyon analizlerde deformasyon-yüklemesi sayısı (N) değişimi

Düzleme deformasyon statik analiz sonuçları Çizelge 6.5'te yer almaktadır. Statik analizlerde maksimum ve minimum deformasyonlar sırasıyla KK ve KC kesitlerinde oluşmuştur.

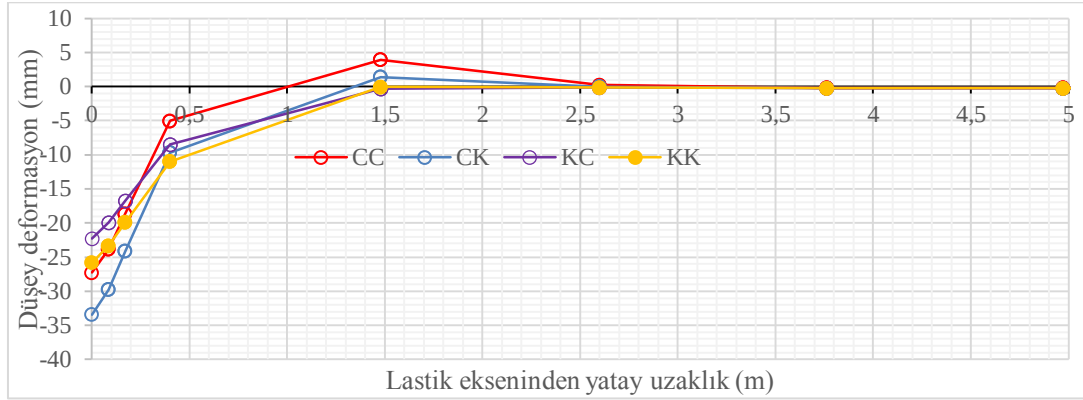
Çizelge 6.5. Statik düzlem deformasyon analizde asfalt yüzeyinde oluşan düşey deformasyonlar

KK _{ps} (mm)	CC _{ps} (mm)	CK _{ps} (mm)	KC _{ps} (mm)
11,82	10,44	11,16	11,03

6.2. Çelikhane Cürufunun Performansı

Eksenel simetrik analizlerin arazi yüklemesi koşullarını daha iyi temsil ettiği düşünüldüğünden çelikhane cürufunun performans değerlendirmesinde eksenel simetrik analizler değerlendirilmiştir. 400 kPa lastik basıncı altında ve 20 111 yüklemeden sonra analiz edilen dört kesitte asfalt yüzeyinde oluşan deformasyonlar Şekil 6.14'te yer almaktadır. Yatay eksen boyunca asfalt yüzeyinde oluşan deformasyonların grafikleri aynı eğilimdedir. Bütün kesitlerde maksimum oturma lastik orta noktasında oluşurken maksimum kabarmalar lastik orta noktasından itibaren yaklaşık 1,5 metre mesafede oluşmaktadır. Kabarmalar 1,5 metreden sonra azalmakta ve lastik orta noktasından itibaren yaklaşık 2,5 metrede sıfırlanmaktadır. Maksimum kabarma miktarı cüruf temel ve cüruf alttemelden (CC) oluşan kesitte meydana gelmekte ve kabarma miktarı 4 mm seviyesindedir. Maksimum

oturma miktarı ise cüruf temel ve kırmataş alttemelden (CK) oluşan kesitte meydana gelmekte ve oturmalar 33 mm mertebesinde. Tekrarlı yükleme altında en iyi performansı ise kırmataş temel ve cüruf alttemelden (KC) oluşan kesiti göstermektedir. Bu kesitte kabarma hemen hemen hiç oluşmazken, oturmalar 22 mm seviyesindedir. Çizelge 7.1'deki verilere göre temel tabakası için kireçtaşı ve alttemel tabakası için ise cüruf malzemesinin maksimum kayma deformasyon modülü değerinin daha yüksek olduğu görülecektir. Bu da diğer faktörler aynı olduğunda granüler temel ve alttemel tabakalarında kayma modülü yüksek malzeme kullanılması durumunda tekrarlı trafik yükleri altında daha iyi bir performans elde edildiğini göstermektedir. CC ve KK kesitleri karşılaştırıldığında ise oturmalar aynı seviyede oluşurken CC kesitindeki kabarmalar KK kesitine göre daha fazladır.



Şekil 6.14. Yatay eksen boyunca asfalt yüzeyinde oluşan düşey deformasyonlar (eksenel simetrik analiz)

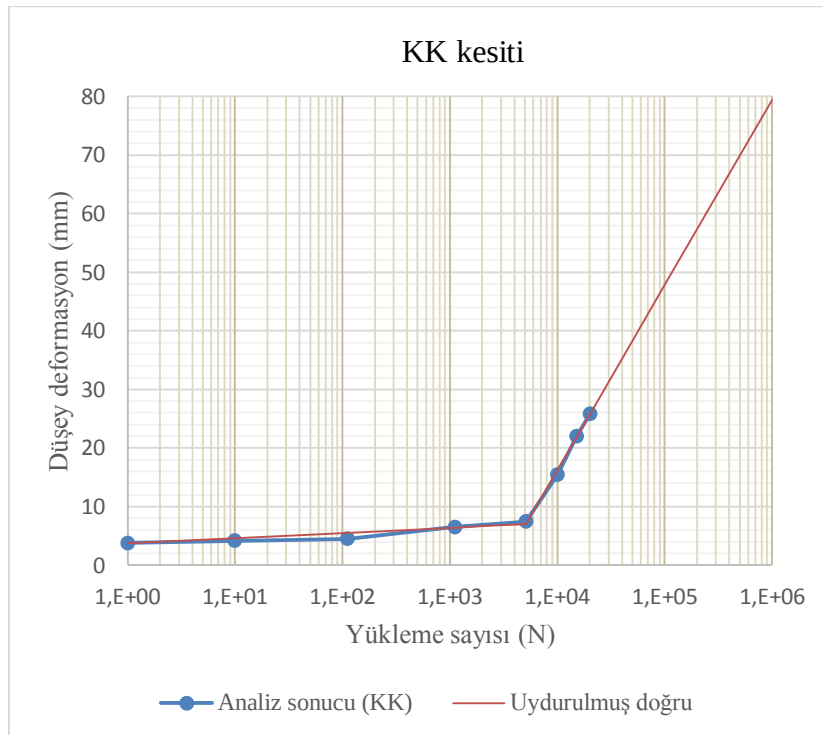
6.3. Kalıcı Deformasyonlar

Dört adet eksenel simetrik kesitin 20111 yük döngüsü altında lastik orta noktasında oluşan deformasyonlarının yükleme sayısı-deformasyon grafikleri aşağıda yer alan dört adet yarı logaritmik grafikte yer almaktadır (Şekil 6.15 - Şekil 6.18).

Şekil 6.15'ten Şekil 6.18'e kadar yer alan dört şekilde de görüleceği üzere deformasyonların yükleme sayısının logaritması ile değişim grafikleri iki parçadan oluşmaktadır. Değişim grafiğinin ilk bölümünde deformasyonlar lineer olarak artmaktadır. Belli bir eşik yüklemenden sonra deformasyonlar üstel olarak artmaktadır. Bu deformasyon davranışı Dresden Modeli ve Barksdale'nin bağılayıcı granüler malzemeler için yapmış oldukları

çalışmaları ile uyumlu görünmektedir. Fakat aşağıda sırayla yer alan dört grafikten de anlaşılacağı üzere eşik yükleme sayısı her bir kesit için farklı değerler almaktadır.

Şekillerde analizlerden elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlar için farklı eğime sahip iki doğru parçasından oluşan yaklaşık uydurulmuş deformasyon-yükleme sayısı grafikleri yer almaktadır. Uydurulmuş grafikler için elde edilen yükleme sayısı ile değişen deformasyon denklemleri de her bir grafiğin altında yer almaktadır.



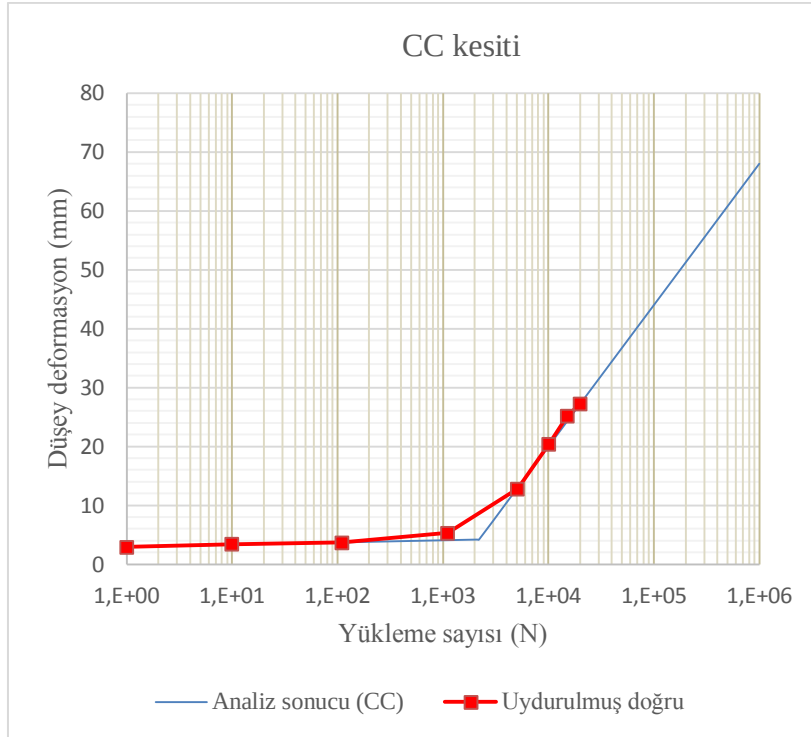
Şekil 6.15. KK kesiti yükleme-deformasyon grafiği

$$sN_1 = 3,77 \text{ mm}$$

$$\Delta S_1 = sN_1 + C_1 \log(N/1) \quad N \leq 5100 \quad (C_1 = 0,871) \quad (7.1)$$

$$\Delta S_2 = sN_{5100} + C_2 \log(N/5100) \quad N \geq 5100 \quad (C_2 = 31,545)$$

Burada; ilk yükleme sırasında oluşan deformasyon grafiği sN_1 , birikimli deformasyonların değişim grafiğindeki ilk doğrunun eğimi C_1 , yük sayısının 5100 eşik yük sayısından fazla olduğu durumda birikimli deformasyon grafiği ikinci parçasının eğimi C_2 'dir. Eşik yük sayısı ise 400 kPa altında bu kesitte 5100 yüklemedir (Şekil 6.15).



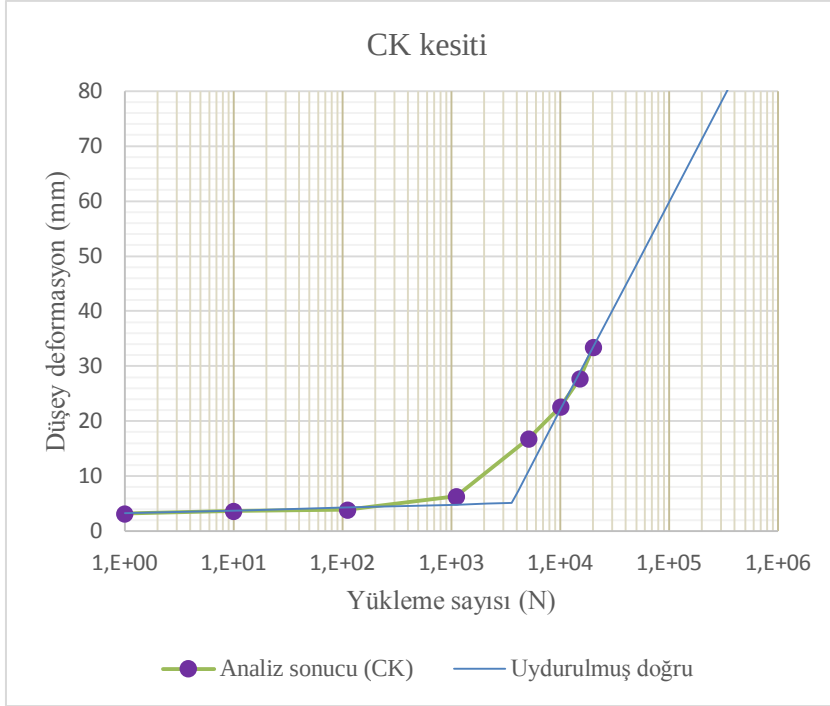
Şekil 6.16. CC kesiti yükleme-deformasyon grafiği

$$sN_1 = 2,95 \text{ mm}$$

$$\Delta S_1 = sN_1 + C_1 \text{Log}(N/1) \quad N \leq 2200 \quad (C_1 = 0,374) \quad (7.2)$$

$$\Delta S_2 = sN_{2200} + C_2 \text{Log}(N/2200) \quad N \geq 2200 \quad (C_2 = 24,006)$$

Eşitlikte; ilk yükleme sırasında oluşan deformasyon grafiği SN_1 , birikimli deformasyonların değişim grafiğindeki ilk doğrunun eğimi C_1 , yük sayısının 2200 eşik yük sayısından fazla olduğu durumda birikimli deformasyon grafiği ikinci parçasının eğimi C_2 'dir. Eşik yük sayısı ise 400 kPa altında bu kesitte 2200 yüklemedir (Şekil 6.16).



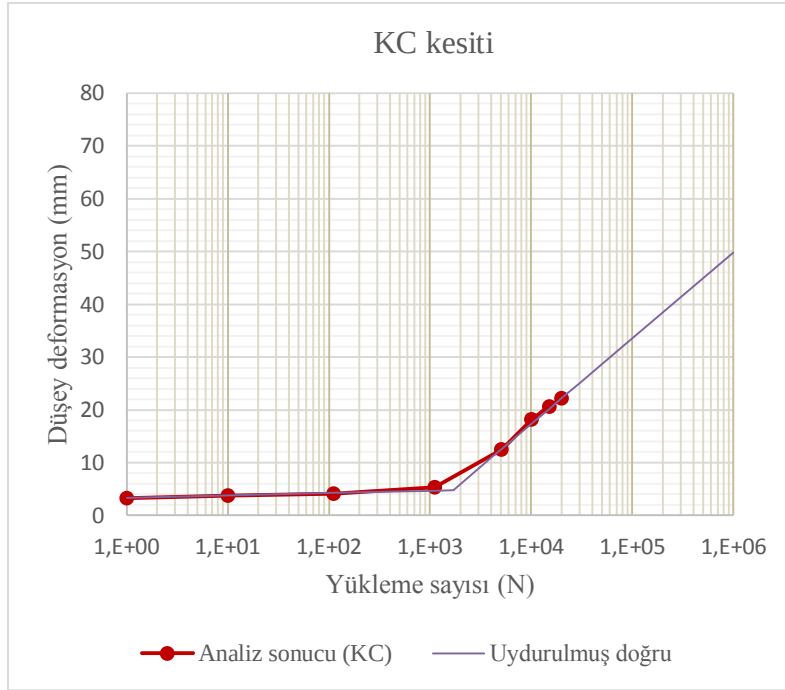
Şekil 6.17. CK kesiti yükleme-deformasyon grafiği

$$sN_1 = 3,219 \text{ mm}$$

$$\Delta S_1 = sN_1 + C_1 \log(N/1) \quad N \leq 3600 \quad (C_1 = 0,529) \quad (7.3)$$

$$\Delta S_2 = sN_{3600} + C_2 \log(N/3600) \quad N \geq 3600 \quad (C_2 = 37,913)$$

Eşitlikte; ilk yükleme sırasında oluşan deformasyon grafiği sN_1 , birikimli deformasyonların değişim grafiğindeki ilk doğrunun eğimi C_1 , yük sayısının 3600 eşik yük sayısından fazla olduğu durumda birikimli deformasyon grafiği ikinci parçasının eğimi C_2 'dir. Eşik yük sayısı ise 400 kPa altında bu kesitte 3600 yüklemedir (Şekil 6.17).



Şekil 6.18. KC kesiti yüklem-deformasyon grafiği

$$sN_1 = 3,320 \text{ mm}$$

$$\Delta S_1 = sN_1 + C_1 \log(N/1) \quad N \leq 1700 \quad (C_1 = 0,458) \quad (7.4)$$

$$\Delta S_2 = sN_{1700} + C_2 \log(N/1700) \quad N \geq 1700 \quad (C_2 = 16,248)$$

Eşitlikte; ilk yüklem sırasında oluşan deformasyon grafiği sN_1 , birikimli deformasyonların değişim grafiğindeki ilk doğrunun eğimi C_1 , yük sayısının 1700 eşik yük sayısından fazla olduğu durumda birikimli deformasyon grafiği ikinci parçasının eğimi C_2 'dir. Eşik yük sayısı ise 400 kPa altında bu kesitte 1700 yüklemidir (Şekil 6.18).

Kesitlerdeki tek değişken olan granüler tabakalar için her kesitin ortalama deformasyon modülü ve ortalama boşluk oranı ile grafiklere ait veriler Çizelge 6.6'da özetlenmiştir.

Çizelge 6.6. Kalıcı deformasyon grafik bilgilerinin özeti

Kesit	Granüler tabakaların ortalama rijitliği (MPa)	Granüler tabakaların ortalama boşluk oranı (e)	$N_{\text{eşik}}$	C_1	C_2
KK	152	0,586	5100	0,871	31,545
CC	156	0,596	2200	0,374	24,06
CK	150	0,590	3600	0,529	37,913
KC	158	0,591	1700	0,458	16,248

Çizelge 6.6'daki bilgilere göre ortalama rijitlik ile grafiğin ikinci parçasının eğimi (C_2) arasında ters orantı mevcuttur. Bu nedenle yol yapılarında uzun dönemli yüklemeler altında oluşan birikimli deformasyonların temel ve alttemel tabakalarında kullanılan granüler malzemelerin ortalama rijitliği tarafından domine edildiği söylenebilir. Tabakaların rijitliği arttıkça deformasyon grafiğinin ikinci parçasının eğimi düşeceğinden deformasyonlarda azalacaktır. Ancak birikimli deformasyon-yükleme sayısı doğrusunun eğim değiştirdiği eşik deformasyon sayısı ile rijitlik arasında doğrudan bir ilişki yoktur.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında esnek yol üst yapılarında yükleme sayısı ile kalıcı deformasyonların ilişkisi iki boyutlu sonlu elemanlar programı kullanılarak irdelenmiştir. Zemin ve granüler tabakalar Hardening soil with small strain-HSsmall malzeme bünye modeli ile modellenmiştir. Granüler tabakaların maksimum kayma deformasyon modülü farklı hücre basınçları altında gerçekleştirilen rezonant kolon deneyleri ile elde edilmiş ve yüklemeler altında oluşan hücre basıncına göre değişen kayma birim deformasyon modülü kullanılmıştır.

Her tabakanın tek tek labaratuvar yüklemeleri altındaki deformasyonlarının integre edilerek toplam deformasyonların bulunması yerine, bu çalışmada sonlu elemanlar metodu ile tabakaların birbirleriyle etkileşimi de dikkate alınarak yol yüzeyinin toplam deformasyonu yaklaşımı ortaya konulmuştur. Çalışmada analiz edilen yol doğal kil zemin üzerine oturan, asfalt betonu (AC), temel ve alttemel tabakalarından oluşan, farklı rijitlik ve yoğunluktaki katmanlardan ibaret çok katmanlı bir sistemdir.

Analizlerde dört farklı kesit kullanılmıştır. Kırtmataş ve çelikhane cürufu olmak üzere kesitlerde iki farklı granüler malzeme kullanılmıştır. Analizler sonucunda düşey deformasyon-yükleme sayısı grafiği çizildiğinde kalıcı deformasyonların farklı eğimlere sahip iki parçalı bir doğru olduğu görülmüştür. Belli bir eşik yükleme sayısının aşılmasından sonra başlangıçtaki düşük eğimli birikimli deformasyon grafiğinde kırılma oluşmakta ve deformasyon doğrusunun eğimi artmaktadır. Bu eşik yükleme sayısı aşıldıktan sonra deformasyonlar katlanarak artmaktadır. Bu kalıcı deformasyon davranışı Dresden Modeli ile uyumludur. Ancak deformasyon grafiklerinde sabit bir kırılma noktası yoktur. Her kesit için sadece yarı logaritmik deformasyon grafiğinin dönme noktası değil, aynı zamanda her grafik için birinci ve ikinci birikimli deformasyon doğrularının eğimleri de değişmektedir.

Birikimli düşey deformasyon doğrularının ikinci kısmının eğimi (C_2), granüler tabakaların ortalama deformasyon modülü ile ters orantılıdır. Ayrıca, ilk doğrunun eğimi (C_1), granüler tabakanın rijitliği ile ters orantılıdır. Dayanım ve rijitlik ile eşik yükleme sayısı arasında anlamlı bir ilişki bulunamamıştır.

Analizler sonucu oluşan düşey deformasyonların yatay eksenindeki şekli her dört kesitte de benzer çıkmıştır. Ancak deformasyon miktarları farklı olmuştur. Asfalt yüzeyinde maksimum oturmalar lastik orta noktasında oluşurken, yatay eksende oturmalar kesite göre değişerek, yaklaşık 1,0 ile 1,5 metre civarında sıfırlanmıştır. 1,5 metre ile 2,5 metre arasında ise kabarmalar oluşmuştur. Kabarmalar 1,5 metreden sonra azalmakta ve lastik orta noktasından itibaren yaklaşık 2,5 metrede sıfırlanmaktadır.

Analiz edilen kesitler karşılaştırıldığında 400 kPa yükleme altında ve 20111 yükleme sayısı için en iyi performansı kırmataş temel ve cüruf alttemelden (KC) oluşan kesit vermiştir. Bu kesitte kabarma hemen hemen hiç oluşmazken oturmalar 22 mm seviyesindedir. Bu da çelikhane cürufu için en faydalı kullanımın alttemel tabakasında olduğunu göstermektedir. Kırmataş temel ve alttemelden oluşan yol kesiti (KK) için maksimum oturma 27 mm olarak gerçekleşmiştir. KK kesiti ile karşılaştırıldığında, KC kesitinde oturmalar %18 mertebesinde daha az elde edilmiştir.

Sadece alttemel tabakasında çelikhane cürufu kullanıldığında tekrarlı trafik yükleri altında hem yol performansı artmakta hem de doğal kaynaklardan tasarruf sağlanarak doğal kaynaklar korunmuş olacaktır. Ayrıca doğal kaynaklardan elde edilecek agrega için harcanacak olan enerjiden tasarruf sağlanarak küresel ısınmanın oluşması da belli miktarda engellenmiş olacaktır.

Çalışmada çelikhane cürufunun dayanım ve rijitlik parametreleri kullanılarak ve dinamik analiz gerçekleştirilmek suretiyle analiz yapılmış ve sonuçlar doğal agrega ile karşılaştırılmıştır. Malzeme rijitlik ve dayanım parametrelerinin yanında yol performansını etkileyen diğer faktörler nem, yeraltı suyu, donma çözülme ve diğer iklim koşullarıdır. İlerideki çalışmalarda iklim faktörlerini de göz önüne alan malzeme bünye modelleri geliştirilerek analizler gerçekleştirilmelidir.

Yol yapısı, doğal ya da iyileştirilmiş zeminler üzerinde yer alan, bir veya daha fazla granüler tabaka ve asfalt tabakasından oluşan çok katmanlı bir sistem birleşimidir. Analiz edilen dört kesit içinde deformasyon-yükleme sayısı grafiği benzer eğilimde olmakla birlikte eğimler ve eşik yükleme sayıları farklı olmuştur. Bu da yol kesitinde kullanılan her tabakanın deformasyon karakteristiğinin değerlendirilmesinin yanı sıra, tabakalar arası etkileşim davranışının da dikkate alındığı sayısal yöntemler kullanılarak yol kesitlerinin toplam

deformasyonlarının kontrol edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Sayısal analizler kullanılırken trafik yükü altında esnek yolun uzun vadeli davranışının belirlenmesi için, deformasyon grafiğinin ikinci kısmını elde edecek sayıda yeterli yük adımı seçilmelidir.

Permanat deformasyonlar için elde edilen deformasyon grafikleri 400 kPa lastik basıncında yükleme sayısı dikkate alınmıştır. Dingil yükü, hız ve kenar şerit etkisi için değişik hızlarda, farklı dingil yükleri altında ve kenar şerit yüklemeleri için analizler gerçekleştirilmelidir. Ayrıca üçüncü boyutun etkisinin dikkate alınması, çoklu lastik, dual ve tandem dingil yüklemelerin etkisinin değerlendirilebilmesi için üç boyutlu (3D) analizlerin de gerçekleştirilmesi gerekir. Sonraki çalışmalarda yeraltı suyunun varlığı, donma çözülme gibi iklimsel verilerin de analizlerin içine dahil edilmesi gerekir.

Analizlerde kullanılan yöntem gerinim seviyesine bağlı deformasyon modelindeki azalımı (G/G_0) dikkate alsa da saha koşullarında geanüle tabakalarda aşınma kaybindan kaynaklı dayanım parametrelerindeki (C , ϕ) azalım dikkate alınmamıştır. Ancak kullanılan yöntemin çelikhane cürufu ile kırmataş mazlemelerinin performansının kıyaslanması açısından yeterli olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Bilen, M. (2010). *Çelikhane curuflarından liç-karbonatlaştırma prosesi ile kalsiyum karbonat kazanılması*. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 4-34.
2. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2011). *Türkiye çevre durum raporu*. Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevresel Etki Değerlendirmesi İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü, 108-111.
3. Özgür Öztürk, Ö., Çelikkol, M. ve Erkan, M. (2007). Türkiye agrega sektör raporu. *Hazır Beton*, 52-56.
4. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2014). *Ulusal geri dönüşüm stratejisi ve eylem planı: 2014-2017*. Ankara: Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Sanayi Genel Müdürlüğü, 55-113.
5. Jacobson, H.R. (1940). *A history of roads from ancient times to the motor age*. Master Thesis, Georgia University Georgia School of Technology, Atlanta, 1-142.
6. İnternet: Britannica. (2016a). Wheel. URL: <https://www.britannica.com/technology/wheel>, Son Erişim Tarihi: 01.11.2016.
7. Korkmaz, N. (2009). Antik roma çağında (MÖ 30 - MS 395) yollar ve mühendislik - mimarlıkta etik. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 457(2009/5), 60-62.
8. Mathev T. V. and Rao, K. V. K. (2007). *Introduction to highway engineering*. India: NPTEL, 2.1-2.2.
9. İnternet: Britannica. (2016b). Roads and highways. URL: <https://www.britannica.com/technology/road/images-videos>, Son Erişim Tarihi: 01.11.2016.
10. Federal Highway Administration. (1976). *Americas highways 1776-1976 a history of the federal aid program*. Washington. D.C.: U.S Department of Transportation, 67, 117-118, 382-385, 392-395, 410.
11. Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (2th ed.). NJ, USA.: Pearson Prentice Hall, 1-10, 279-283.
12. Sağlık, A. ve Güngör, A. G. (2009). *Mekanistik ampirik üstyapı tasarımında esneklik modülünün şartnamelere uyarlanması*. 5. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi, Ankara.
13. Carvalho, R. L. (2006). *Mechanistic-empirical design of flexible pavements: a sensitivity study*. Master Thesis, University of Maryland, Department of Civil and Environmental Engineering, Maryland, 2-10.
14. National Cooperative Highway Research Program. (2004). *Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures: calibration of*

- permanent deformation models for flexible pavements*. Washington, DC.:National Research Council, 1.1-1.88
15. Beskou, N. D. and Theodorakopoulos, D. D. (2011). Dynamic effects of moving loads on road pavements: a review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(4), 547-567.
 16. Wang, J. (2001). *Three-dimensional finite element analysis of flexible pavements*. Master Thesis, The University of Maine, Maine, 1-3.
 17. Taylor, K.L. (1971). *Finite element analysis of layered road pavements*. Ph.D. Thesis, University of Nottingham, Nottingham, 102-119.
 18. Burmister, D. M. (1945). The general theory of stresses and displacements in layered soil systems. III. *Journal of applied Physics*, 16(5), 296-302.
 19. Warren, H. and Dieckmann, W. (1963). Numerical computation of stresses and strains in a multiple-layer asphalt pavement system. International Report, Chevron Research Corporation, Richmond, CA,.
 20. Hwang, D. and Witczak, M. (1979). *Program DAMA (Chevron), User's Manual*. Maryland: University of Maryland.
 21. De, J., Di-Peutz, M. and Korswagen, A. (1973). Computer program BISAR: Layered system under normal and tangential surface loads. External Report AMSR 0006.73, Amsterdam.
 22. Kopperman, S., Tiller, G. and Tseng, M. (1986). *ELSYM5, Interactive microcomputer version, User's manual*. Rep. No. FHWA-TS-87, 206.
 23. Raad, L. and Figueroa, J. L. (1980). Load response of transportation support systems. *Journal of Transportation Engineering*, 106(1), 111-128.
 24. Harichandran, R., Baladi, G. and Yeh, M. (1989). *Development of a computer program for design of pavement systems consisting of bound and unbound materials*. Michigan: Michigan State University.
 25. Qiu, Y., Dennis, N. D. and Elliott, R. P. (1999). Stress distribution in subgrade soils and applications in the design of flexible pavements. *Journal of the Southeast Asian Geotechnical Society, Geotechnical Engineering*, 30(3), 221-233.
 26. Korkiala-Tanttu, L. (2008). *Calculation method for permanent deformation of unbound pavement materials*. Ph.D. Thesis, Helsinki University Helsinki University of Technology, 37-49.
 27. Elabd, A., Hornyh, P., Breyse, D., Denis, A. and Chazallon, C. (2004). *An elastoplastic model for prediction of permanent deformations of unbound granular pavement layers*. XXI International Congress Of Theoretical And Applied Mechanics, Warsaw, Poland.

28. Werkmeister, S. (2003). *Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions*. Ph.D. Thesis, Dresden University of Technology, Dresden, 2.20-2.26.
29. Eckmann, B. (1998). *The NOAH software*. Proc. of The Fifth International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Roads and Airfields, Trondheim, (Vol. 1), 589–598.
30. Huvstig, A., Erlingsson, S., Hoff, I., Garba, R.S. (2008). *NordFoU – Pavement performance models*. Proc. of Transport Research Arena Europe Ljubljana, Slovenia.
31. Amorosi, A. and Boldini, D. (2009). Numerical modelling of the transverse dynamic behaviour of circular tunnels in clayey soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(6), 1059-1072.
32. Gaetano, E.A. (2010). *The response of flexible pavement systems to local deterioration of the base layer*. Master Thesis, McGill University, Montreal, 46-64.
33. Saevarsdottir, T. and Erlingsson, S. (2016). *Deformation modelling of instrumented flexible pavement structure*. Proceedings of the 17th Nordic Geotechnical Meeting Challenges in Nordic Geotechnic, Reykjavik, (Vol. 143), 937-944.
34. Al-Jumaili, M. (2016). Finite element modelling of asphalt concrete pavement reinforced with geogrid by using 3-D plaxis software. *International Journal of Materials Chemistry and Physics*, 2(2), 62-70.
35. Hashem, M. D., Abu-Baker, A. M., Hashem, M. D. (2013). Numerical modeling of flexible pavement constructed on expansive soils. *European International Journal of Science and Technology*, 2(10), 19-34.
36. Kazemian, S., Barghchi, M., Prasad A., Maydi H., Huat, B. B. K. (2010). Reinforced pavement above trench under urban traffic load: case study and finite element (fe) analysis. *Scientific Research and Essays*, 5(21), 3313-3329.
37. Ouf, M. S., Abdelzaher, E. A., Mostafa A. E. A., Elgendy, M. F. (2016). Evaluation of stabilized pavement sections using finite element modeling. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(4), 1749-1756.
38. Karatag, H., Firat, S. and Işık, N. S. (2018). *Assessment of performance of steel slag used in road base by finite element analysis*. 13th International Congress on Advances in Civil Engineering. Çeşme, İzmir.
39. Karatağ, H., S. Firat, and N.S. Işık. (2017). *Evaluation of flexible highway embankment under repetitive wheel loading using finite element analysis*. International Sustainable Buildings Symposium, Ankara, 705-716.
40. Camacho-Tauta, J., Molina, F. and Reyes-Ortiza, O. (2015). Simulation of traffic loading on an embankment by the finite element method with different soil models. *6th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*, Buenos Aires, 737-744.

41. Öcal, Y. (2014). *Demir-çelik sektöründe atık yönetimi*. Ankara: Kalkınma Bakanlığı, 27-46.
42. Türkiye Çelik Üreticileri Derneği. (2015). *Demir çelik cüruf raporu*. Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 3-9.
43. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2019). *Demir çelik sektör raporu (2019)*. Ankara: Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Sanayi ve Verimlilik Genel Müdürlüğü, 15-16.
44. Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği. (2015). *Türkiye Demirdışı Metaller Meclisi Sektör Raporu 2015*. Ankara: Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği, 6-8.
45. Kalkınma Bakanlığı. (2014). *Onuncu kalkınma planı demir-çelik çalışma gurubu raporu*. Ankara: Kalkınma Bakanlığı, 91-94.
46. İnternet: SLAG-A Green Product. URL: <http://www.nationalslag.org/sites/nationalslag/files/documents/SLAG-A%20Green%20Product.pdf>, Son Erişim Tarihi: 29.12.2018.
47. Altan, E. (2001). *Çelikhane curufu içerisindeki hurdaların değerlendirilmesi*. I. Ulusal Demir-Çelik Sempozyumu ve Sergisi, Zonguldak.
48. Oluwasolaa, E. A., Hainina, M. R. and Aziza, M. M. A. (2014). Characteristics and utilization of steel slag in road construction. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 70(7), 117-123.
49. Australasian Slag Association. (2002). *A Guide to the use of iron and steel slag in roads*. Wollongong NSW: Australasian Slag Association Inc, 1-26.
50. İnternet: Federal Highway Administration. (2012). User guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction, *Steel Slug*. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/97148/059.cfm>, Son Erişim Tarihi: 09.12.2016.
51. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2015). *Atık yönetimi yönetmeliği*. Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
52. ÇOB. (2010). *Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik*. Ankara: Çevre ve Orman Bakanlığı, 2-25.
53. United States Environmental Protection Agency. (2005). *Hazardous waste identification*. Solid Waste and Emergency Response, *United States*, 15-16.
54. Yildirim, I. Z. and M. Prezzi. (2009). Use of steel slag in subgrade applications. FHWA/IN/JTRP-2009/32 Final Report. *West Lafayette*, 149-229.
55. Yonar, F. (2017). *Elektrik ark ocağı çelikhane cürufunun karayolu esnek üstyapı tabakalarında kullanımının ve karışım performansının araştırılması*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 67-155.

56. Karayolları Genel Müdürlüğü. (2013). *Karayolu teknik şartnamesi (yol alt yapısı, sanat yapıları, köprü ve tüneller, üst yapı ve çeşitli işler)*. Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü, 401-419.
57. Karayolları Genel Müdürlüğü. (2012). *Bitümlü karışımlar laboratuvar çalışmaları*. Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı, 34-35.
58. Moghaddam, M.K.M. (2011). *Elektrik ark fırını (eaf) cürufu katkısının zeminlerin mühendislik özellikleri üzerine etkisi*. Yüksek lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 35-47.
59. Noureldin, A.S. and McDaniel, R.S. (1990). Evaluation of surface mixtures of steel slag and asphalt. *Transportation Research Record*, 1269, 133-149.
60. İnternet: *Common Uses for Slag*. URL: <http://www.nationalslag.org/common-uses-slag>, Son Erişim Tarihi: 29.12.2018.
61. Yılmaz, A. and Karaşahin, M. (2010). Mechanical properties of ferrochromium slag in granular layers of flexible pavements. *Materials and Structures*, 43(3), 309-317.
62. Yılmaz, A. and Süttaş, İ. (2008). Ferrokrom cürufunun yol temel malzemesi olarak kullanımı. *İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi*, 2008, 4455-4470.
63. İnternet: *Iron and Steel Slag Statistics and Information*. URL: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_&_steel_slag/index.html#contacts, Son Erişim Tarihi: 01.02.2015.
64. Euroslag. (2012). *Position paper on the status of ferrous slag*. Duisburg: The European Slag Association, 9-13.
65. Güngör, A.G., Sağlık, A. (2008). *Karayolları esnek üstyapılar projelendirme rehberi*, Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü, 3-4, 17-18.
66. Olsson, J., Zeng, L. and Wiberg, N.-E. (2000). *Finite element analysis of road rutting*. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS 2000, Barcelona, Spain.
67. Haas, R., McLeod, N.W. (2001). Reinventing the (pavement management) wheel. *Fifth International Conference on Managing Pavements*, Seattle, Washington.
68. Rahman, M.S. (2015). *Characterising the deformation behaviour of unbound granular materials in pavement structures*. Ph.D. Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Division of Highway and Railway Engineering, Stockholm, 1-18.
69. Seyhan, Ü. and Tutumluer, E. (2002). *Characterization of unisotropic granular layer behavior in flexible pavements*. FAA Center of Excellence for Airport Technology, Report No.18, Federal Aviation Administration Washington, DC., USA.
70. Seyhan, U. (2002). *Characterization of unisotropic granular layer behavior in flexible pavements*. Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, Illinois, USA, 22-28.

71. Lekarp, F., Isacsson, U. and Dawson, A. (2000). State of the art I: resilient response of unbound aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, 126(1), 66-75.
72. American Association of State Highway and Transportation Officials. (1999). *Standard Method of Test for Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials*. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T 307.
73. Brown, S. and Pell, P. (1967). *An experimental investigation of the stresses, strains and deflections in a layered pavement structure subjected to dynamic loads*. 2nd International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, , Michigan, USA, 487-504.
74. Saevarsdottir, T. (2014). *Performance modelling of flexible pavements tested in a heavy vehicle simulator*. Ph.D. Thesis, University of Iceland, Faculty of Civil Environmental Engineering, Reykjavik, 32-38.
75. Uzan, J. (1985). Characterization of granular material. *Transportation Research Record*, 1022(1), 52-59.
76. Witczak, M. and Uzan, J. (1988). *The universal airport pavement design system. Report I of V: granular material characterization*. University of Maryland, Department of Civil Engineering, College Park.
77. Ara. (2004). *Guide for the mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures, final report, NCHRP 1-37A*. Washington: USA. Transportation Research Board of the National Academies, 124-125.
78. Zheng, L., Hai-lin, Y., Wan-ping, W. and Ping, C. (2012). Dynamic stress and deformation of a layered road structure under vehicle traffic loads: experimental measurements and numerical calculations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 39, 100-112.
79. Lekarp, F., Isacsson U. and Dawson A. (2000). state of the art. II: permanent strain response of unbound aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, 126(1), 76-83.
80. Tholen, O. (1980.). *Falling weight deflectometer, a device for bearing capacity measurements: properties and performance*. Degree project, Department of Highway Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, 1.
81. Lekarp, F. (1999,). *Resilient and permanent deformation behavior of unbound aggregates under repeated loading*. Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, 2.7-2.15.
82. Dawson, A.R. and Wellner, F. (1999). *Plastic behaviour of granular materials*. The University of Nottingham, Final Report, ARC Project 933, Reference PRG99014, Nottingham.
83. Werkmeister, S., Dawson, A.R. and Wellner, F. (2001). Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept. *Transportation Research Record*, 1757(1), 75-81.

84. Barksdale, R.D. (1972). *Laboratory evaluation of rutting in base course materials*. Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Grosvenor House, Park Lane, London, England.
85. Huurman, M. (1997). *Permanent deformation in concrete block pavements*. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
86. Youn, J.-U., Choo, Y.-W. and Kim, D.-S. (2008). Measurement of small-strain shear modulus G_{max} of dry and saturated sands by bender element, resonant column, and torsional shear tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(10), 426-438.
87. De Alba, P., Baldwin, K.C. (1991). *Use of bender elements in soil dynamics experiments*. United States: American Society of Civil Engineers, 86-101.
88. Richart, F.E., Hall, J.R. and Woods, R.D. (1970). *Vibrations of soils and foundations*. New Jersey: Prentice Hall, 263-307.
89. Viggiani, G. (1992). *Dynamic measurement of small strain stiffness of fine grained soils in the triaxial apparatus*. Workshop on Experimental characterization and Modeling of Soils and Soft Rocks, Napoli, 75-97.
90. Hardin, B.O. and Drnevich, V.P. (1972a). Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98, 603-624.
91. Hardin, B.O. and Drnevich, V.P. (1972b). Shear modulus and damping in soils: design equations and curves. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98, 667-692.
92. Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. New Jersey: Prentice-Hall, 184-248.
93. Naval Facilities Engineering Command. (1983). *Soil Dynamics and Special Design Aspects*. DM-7.3, United States: MIL-HDBK, 9-18.
94. İnternet: Plaxis. (2013). *Material Models Manual*. URL: https://www.plaxis.com/?plaxis_download=2D-3-Material-Models.pdf, Son Erişim Tarihi: 29.12.2018.
95. Benz, T. (2007). *Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences*. Ph.D. Thesis, University of Stuttgart Institutes, Geotechnik Stuttgart, 105-137.
96. Hasançebioğlu, Ö. (2014). *Elektrik Ark ocağı cürufunun yapay agrega olarak karayolu inşaatı dolgu ve granüler tabakalarında kullanılabilirliğinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 89-126.
97. Tran M.V., Nguyen C.V., Nawa, T., Stitmannaitum B. (2013). *Properties of high strength concrete using steel slag coarse aggregate*. Proceedings of the 6th ACEC and the 6th AEEC 21-22 November, Bangkok.

98. Mutlugeldi, C. (2015). *Elektrik ark fırını cürufunun karayolu esnek üstyapı bitümlü temel tabakasında agrega olarak değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 67-70.
99. Seren, I.S. (2015). *Elektrik ark fırını cürufunun yapay agrega olarak esnek üstyapılarda çimento bağlayıcılı granüler temel tabakasında kullanılabilirliğinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 47-64.
100. Özügürlü, B. (2015). *Karayolu esnek üstyapı binder tabakasında elektrik ark oocağı cürufunun yapay agrega olarak kullanımının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 90-98.
101. Kaya, A.O. (2014). *Esnek üstyapıların aşınma tabakasında elektrik ark fırını cürufunun agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 85-89.
102. Somunkıran, E.T. (2005). *Ereğli demir çelik fabrikası cürufunun asfalt betonunda agrega olarak kullanılması*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 39-41.
103. Sönmez, B., Baş, E., Günay, E. and Kara, M. (2003). *Erdemir çelikhane cüruflarının asfalt betonu agregası ve demiryolu balast malzemesi olarak kullanılması imkanları*. II. International Iron and Steel Symposium, Zonguldak.
104. Gür, S., Parlak, F., Şişman, E., Tombuloğlu, T., Sadık, A. S., Özdoğan, M. S. and Erbay, Ş. (2013). *Çelikhane cürufunun beton yollarda temel malzemesi olarak kullanılması*. Geoteknik Sempozyumu 2013, Çukurova Üniversitesi, Adana.
105. Ilıcalı, M. (1988). *Karayolu üstyapısında Erdemir cürufunun kullanılabilirliğinin araştırılması*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 212.
106. Washington State Department of Transportation. (2015). *Use of steel slag aggregate in pavements*. Washington: WDOT Construction Division Pavements Office, Washington, 5-8.
107. Wang, G.W. (1992). *Properties and utilization of steel slag in engineering applications*. Ph.D. Thesis, University of Wollongong, New South Wales, Australia.
108. Hardin, B.O., Richart, F.E. (1963). Elastic wave velocities in granular soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 89, 33-65.
109. Jia, J. (2018). *Soil dynamics and foundation modeling*. Cham: Springer International Publishing, 82.87
110. Clayton, C. (2011.). Stiffness at small strain: research and practice. *Géotechnique*, 61(1), 5-37.
111. American Society for Testing and Materials. (2007). *Standard test methods for modulus and damping of soils by resonant-column method*. D4015-07.

112. Menq, F.-Y. (2003). *Dynamic properties of sandy and gravelly soils*. Ph.D. Thesis, University of Texas at Austin, 106-122.
113. Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M. and Tokimatsu, K. (1986). Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(11), 1016-1032.
114. Lin, S.Y., Lin, P.S., Hong-Su Luo, H.S., Juang, C.H. (2011). Shear modulus and damping ratio characteristics of gravelly deposits. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(3), 638-651.
115. Hiltunen, D.R., Roque, R., Ayithi, A. (2011). *Base Course Resilient Modulus for the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*. University of Florida, Department of Civil and Coastal Engineering, Final report, Florida, 43-86.
116. Kuruoğlu, M. (1997). *An investigation on steel plant solid wastes geotechnical properties in foça region*. Master Thesis, Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir, 62.
117. Von Soos, P., Bohac, J. (2002). *Properties of soils and rocks and their laboratory determination* (Vol. 1). Böblingen: Ernst ve Sohn A Wily Company, 19-206.
118. Dikmen, Ü. (2004). *Zeminlerde sismik dalga sönümünün kesirsel türev yaklaşımı ile modellenmesi*. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 74-75.
119. Barksdale, R.D. (1971). Compressive stress pulse times in flexible pavements for use in dynamic testing. *Highway Research Record*, 345(4), 32-44.
120. Wang, H., Al-Qadi, I.L. (2010). Near-surface pavement failure under multiaxial stress state in thick asphalt pavement. *Transportation Research Record*, 2154(1), 91-99.
121. Tan, S., Low, B., Fwa, T. (1994). Behavior of asphalt concrete mixtures in triaxial compression. *Journal of Testing and Evaluation*, 22(3), 195-203.
122. Mattos J., R., Nunez W., P., Ceratti J., A., Zingano, A., Fedrigo W. (2016). *Shear strength of hot-mix asphalt and its relation to near-surface pavement failure—A case study in Southern Brazil*. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, , Czech Republic, Prague.
123. Duncan, J.M., Monismith, C.L., Wilson, E.L. (1968). Finite element analysis of pavements. *Highway Research Record*, 228, 18-33.
124. Kim, M. (2007). *Three-dimensional finite element analysis of flexible pavements considering nonlinear pavement foundation behavior*. Ph.D. Thesis, University of Illinois Urbana, Illinois, 57-70.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KARADAĞ, Hüseyin
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.05.1972, Adıyaman
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 705 71 04
 e-mail : karatagh@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birim	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2013
Lisans	İstanbul Teknik Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	1996

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016-Halen	Aile ve Sosyal Politikalar Bakanlığı EYHGM Erişilebilirlik Dairesi Başkanlığı	İnşaat Mühendisi
2015-2016	Aile ve Sosyal Politikalar Bakanlığı Destek Hizmetleri Dairesi Başkanlığı	Başkan Yard.
2014-2015	Aile ve Sosyal Politikalar Bakanlığı Destek Hizmetleri Dairesi Başkanlığı	İnş.Em.Şb. Müd.
2011-2014	Aile ve Sosyal Politikalar Bakanlığı	İnşaat Mühendisi
2004-2011	SHÇEK Genel Müdürlüğü	İnşaat Mühendisi
2003-2004	Adıyaman Belediyesi	Fen İşleri Müdürü
1997-2003	Adıyaman Belediyesi	İnşaat Mühendisi
1996	Kalyon İnşaat	İnşaat Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Karadağ, H.,Fırat, S., Işık, N.S. (2019). Çelikhane cürufunun yol temel ve alttemel malzemesi olarak kullanılması. *Politeknik Dergisi*, (<https://doi.org/10.2339/politeknik.612190>).
2. Karadağ, H., Akyıldız N.A. (2019). Avrupa'nın Demografik Dönüşümünde Uzun Dönem Yaşlı Bakımının Sürdürülebilirliğinin Değerlendirilmesi. *Sosyal politika Çalışmaları Dergisi*, 19(44), 571 – 596.
3. Karadağ, H.,Fırat, S., Işık, N.S., Yılmaz. G. (2020). Permanent Deformation of Flexible Pavements by Using Finite Element Model. *Gradevinar (Under Review)*.
4. Karadağ, H.,Fırat, S., Işık, N.S. (2018). *Assessment of performance of steel slag used in road base by finite element analysis*. International Congress on Advances in Civil Engineering, 12-14 September 2018, Izmir/Turkey.
5. Karadağ, H., Gümüş D.Ç., Sayan T., Feyzioğlu G., Ayanoğlu, S., Ateş, M. (2018). *Planlı Alanlar İmar Yönetmeliğinin Engelliler ile İlgili Uluslararası Sözleşmeler ve Erişilebilirlik Mevzuatı Bağlamında Değerlendirilmesi*. Engellilik Araştırmaları Konferansı, 15-16 Kasım 2018, İstanbul/Türkiye.
6. Karadağ, H., Gümüş D.Ç., Sayan T., Feyzioğlu G., Ayanoğlu, S., Ateş, M. (2018). *Accessibility guidelines for children in built environment*. International Green Capital Congress (IGCC) 8-12 May 2018, Konya/Turkey.
7. Karadağ, H. (2018) *İşyerlerinde Erişilebilirlik Açısından İş Sağlığı ve Güvenliği Uygulamaları*. 9. Uluslararası İş Sağlığı ve Güvenliği Kongresi, 6-9 Mayıs 2018 İstanbul/Türkiye.
8. Karadağ, H.,Fırat, S., Işık, N.S. (2017). *Finite element analysis of highway embankment under repetitive wheel load*. 3rd International Sustainable Buildings symposium (ISBS 2017), March 2017, Dubai/ UAE.
9. Karadağ, H. Akbaş, S.O. (2015). *The importance of monitoring and local correlations for sustainability of excavation support systems*. International Sustainable Buildings Symposium, ISBS 2015 Ankara/Turkey.
10. Karadağ, H. Akbaş, S.O. (2013). *Comparison of the computed and observed behavior of an anchored contiguous pile wall under limited geotechnical characterization*. 3th International Symposium on Computational Geomechanics (ComGeo III), August 2013, Krakow/Poland.

Hobiler

Yüzme, Kitap, Gezi



GAZİ GELECEKTİR..