



**ÇELİK CÜRUFU İLE YAPILAN YOL ALTYAPISI KATMANLARININ
STATİK VE TEKRARLI YÜKLER ALTINDA SAYISAL ANALİZLERİ**

Mürüvet ÖZSOY

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KASIM 2023

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.

Mürüvet ÖZSOY

21/11/2023

ÇELİK CÜRUFU İLE YAPILAN YOL ALTYAPISI KATMANLARININ STATİK VE TEKRARLI YÜKLER ALTINDA SAYISAL ANALİZLERİ

(Doktora Tezi)

Mürüvet ÖZSOY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2023

ÖZET

Ulaşım yolları tüm Dünya’da ekonomik ve sosyal alanda gelişmenin devamlılığı açısından oldukça önemlidir. Bu yüzden yük ve yolcu taşımacılığında en çok tercih edilen ulaşım türlerinden olan karayollarının servis ömrünün artırılması, servis ömrü boyunca yoldan beklenen performansı garanti etmesi, bakım-onarım faaliyetlerinin en düşük seviyede olması arzu edilmektedir. Ancak son yıllarda araç trafiğinin yoğun artışı nedeniyle çok sayıda taşıt yüküne maruz kalan yollar yapısal ve işlevsel olarak bozulmaktadır. Trafik yüklerinden kaynaklanan deformasyonu azaltmak amacıyla çelik üretim süreci sonrasında yan ürün olarak ortaya çıkan çelik cürufalarının doğal agregaların yerine kullanılması oldukça önemlidir. Bu çalışmada yol temel ve alttemel tabakalarında çelik cüruf kullanılarak yolun toplam düşey deformasyon değişimi doğal agrega kullanılan kesitle kıyas edilerek ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. 10 cm kalınlığındaki asfalt kaplama tabakasının altında yer alan 30 cm kalınlığında granüler temel, 40 cm kalınlığında alttemel tabakalarından ve taşıyıcı doğal zemin ise kilden oluşan yol üst yapısı 3D sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal analizleri yapılmıştır. Seçilen taşıt türünün lastik yerleşim planı dikkate alınarak gerçekleştirilen 3D modelin dinamik ve statik analizleri sonuçlarına göre uygun model tasarımı ve doğru malzeme seçimi ile yolun performansının artırılmasının mümkün olduğu görülmektedir. Elde edilen bulgulara göre yol temel ve alttemel tabakalarında çelik cürufunun kullanılması durumunda tekrarlı trafik yükleri altında yapılan dinamik analizlerde düşey deformasyon değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Aynı zamanda geogrid donatı tabaka sayısına ve yerleşim konumuna bağlı olarak değişim gösteren, çelik cürufu kullanılan kesitlerin emniyetli taşıma yükü değerlerinde %10-70 aralığında artışların meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu sayede yol katmanları arasında geogrid takviyelerin kullanılması ile trafik yüklerinin daha geniş bir alana dağıtılarak yolun çekme dayanımının artırılması yoluyla performansının iyileştiği ve emniyetli taşıma yükünün de artırıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca çelik cürufalarının yol inşaatlarında agrega olarak kullanılması ile çelik cürufalarının düzenli depolama alanlarındaki atıkların bertarafına yönelik çalışmalara olan ihtiyaç azalmakta, doğal kaynakların verimli kullanılması ve atık malzemelerin geri dönüştürülmesi ile sürdürülebilir bir sistem sağlanmaktadır.

Bilim Kodu : 91105

Anahtar Kelimeler : Çelik cürufu, geogrid donatı, dinamik ve statik analiz, düşey deformasyon, taşıma yükü, sonlu elemanlar yöntemi

Sayfa Adedi : 189

Danışman : Prof. Dr. Seyhan FIRAT

NUMERICAL ANALYSIS OF ROAD INFRASTRUCTURE WITH STEEL SLAG
UNDER STATICAL AND REPEATED LOADS

(Ph. D. Thesis)

Mürüvet ÖZSOY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2023

ABSTRACT

Transportation routes are very important for the continuity of economic and social development all over the world. Highways are one of the most preferred modes of transportation in freight and passenger transportation. Therefore, it is desired to increase their service life, to guarantee the expected performance of the road throughout its service life, and to keep maintenance and repair activities at the lowest level. However, due to the intense increase in vehicle traffic in recent years, roads exposed to many vehicle loads are deteriorating structurally and functionally. To reduce deformation caused by traffic loads, it is vital to use steel slag, which emerges as a by-product after the steel production process, instead of natural aggregates. In this study, the total vertical deformation changes of the road by using steel slag in the road base and subbase layers were examined in detail by comparing it with the section using natural aggregate. The road superstructure, which consists of a 30 cm thick granular foundation located under a 10 cm thick asphalt pavement layer, 40 cm thick subbase layers, and the carrier natural soil is clay, was numerically analyzed using the 3D finite element method. According to the results of the dynamic and static analysis of the 3D model, which was carried out by considering the tire layout plan of the selected vehicle type, it is seen that it is possible to increase the performance of the road with appropriate model design and proper material selection. According to the findings, it was determined that the vertical deformation values were reduced in the dynamic analyzes carried out under repeated traffic loads when steel slag was used in the road base and subbase layers. At the same time, it has been determined that there is an increase of 10-70% in the safe bearing load values of the sections using steel slag, which varies depending on the number of geogrid reinforcement layers and settlement location. In this way, it has been observed that by using geogrid reinforcements between road layers, traffic loads are distributed over a larger area, and the tensile strength of the road is increased, thus improving its performance, and safe bearing load. In addition, the need for waste disposal in regular storage areas of steel slag decreases by using steel slag as aggregate in road construction. Furthermore, a sustainable system is provided by efficient use of natural resources and recycling of waste materials.

Science Code : 91105

Key Words : Steel slag, geogrid reinforcement, dynamic and static analysis, vertical deformation, bearing load, finite element method

Page Number : 189

Supervisor : Prof. Dr. Seyhan FIRAT

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimi sürecine başladığım andan itibaren her zaman çalışmanın önemini vurgulayan, bilgi ve birikimlerinden faydalandığım, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Seyhan FIRAT'a, çalışmanın şekillenmesinde gün ve saat fark etmeksizin yaptığımız toplantılarda engin bilgisi ile yol gösteren, kendilerinden çok şey öğrendiğim ve daima örnek alacağım değerli hocam Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK'a, destekleri ve katkılarından dolayı kıymetli hocam Prof. Dr. Berna UNUTMAZ'a şükranlarımı ve saygılarımı sunarım. Değerli yönlendirmeleri ile çalışmanın tamamlanmasına sağladıkları katkı ve çalışmaya kazandırdığı yeni bir soluk için saygıdeğer hocam Prof. Dr. Ayhan GÜRBÜZ'e ve değerli katkılarından dolayı Doç. Dr. İsa VURAL hocalarıma teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde en büyük payı olan babama ve anneme her zaman varlıklarını hissettirdikleri için tüm aileme çok teşekkür ediyorum. Bu süreçte büyük bir sabır ve fedakarlıkla desteğini esirgemeyen, motive eden, yolumu aydınlatan sevgili eşime, en değerli varlığım biricik kızıma teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BAKIŞ VE LİTERATÜR TARAMASI	9
2.1. Karayolu Tasarımı.....	9
2.1.1. Kaplama tabakası.....	11
2.1.2. Temel ve alttemel tabakası	16
2.1.3. Taban zemini	17
2.2. Karayolunda Meydana Gelen Deformasyonlar.....	18
2.2.1. Yorulma hasarı	20
2.2.2. Enine çatlama	21
2.2.3. Tekerlek izi oluşumu	21
2.3. Karayoluna Etki Eden Dinamik Araç Yükleri	22
2.3.1. Ağır taşıt trafiğinin belirlenmesi.....	23
2.3.2. Tekerlek yükü ve temas alanının belirlenmesi	26
2.3.3. Lastik şişirme basıncı ile düz lastiğin temas gerilmesi arasındaki temel ilişkiler	32
2.4. Çelik Cürufu Hakkında Genel bilgiler	36
2.4.1. Çelik cürufu kullanıma yönelik çalışmalar.....	44
2.5. Geosentetiklerin Kullanımına Genel Bakış.....	47

	Sayfa
2.5.1. Geosentetikler ve geogridler ile ilgili çalışmalar.....	53
2.5.2. Yol yapımında geogrid kullanımı.....	56
2.6. Sonlu Elemanlar Metodu	61
3. MATERYAL VE METOT	65
3.1. Malzemelerin Modellenmesine Genel Bakış	65
3.1.1. Doğrusal elastik malzeme bünye modeli.....	66
3.1.2. Hiperbolik (Duncan-Chang) malzeme bünye modeli.....	67
3.1.3. Mohr-Coulomb malzeme bünye modeli.....	68
3.1.4. Küçük birim şekil değiştirme değerlerinde pekleşen zemin ve pikleşen zemin bünye modeli.....	70
3.1.5. Ortotropik malzeme bünye modeli	73
3.2. Asfalt Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi	74
3.3. Çelik Cürufu Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi.....	75
3.3.1. Çelik cürufunun mekanik ve fiziksel özellikleri.....	76
3.3.2. Çelik cürufunun dinamik kayma modülünün belirlenmesi	81
3.4. Yumuşak Kil Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi	82
3.5. Geogrid Malzeme Parametresi Çalışması	84
3.5.1. Sayısal analizlerde kullanılan secugrid malzeme parametrelerinin belirlenmesi	88
3.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi Model Çalışması.....	92
3.7. Tekerleklerin Modellenmesi	95
3.8. Modelin Sonlu Elemanlar Ağının Oluşturulması.....	99
3.9. Model Sınırları Koşulları	103
3.10. Statik ve Dinamik Yüklerin Uygulanması	104
3.10.1. Dinamik yükleme	104
3.10.2. Statik yükleme.....	108
3.11. Analizlerin Tanımlanması.....	108

	Sayfa
3.11.1. Dinamik analiz	109
3.11.2. Geogrid donatılı kesitlerde statik analiz.....	110
4. SAYISAL ANALİZ BULGULARI	111
4.1. Sayısal Analizlerde Kullanılan Zemin ve Geogrid Malzeme Parametreleri.....	111
4.2. Çelik Cürufu Kullanımı Etkisinin 2D Dinamik Analizlerle Belirlenmesi	113
4.3. Çelik Cürufu Kullanımı Etkisinin 3D Dinamik Analizlerle Belirlenmesi	116
4.3.1. Deformasyon sonuçlarının tanımlayıcı istatistikleri.....	124
4.3.2. Sonraki yükleme adımlarının regresyon analizi ile tahmin edilmesi	126
4.3.3. 2D ve 3D dinamik analiz sonuçlarının kıyaslanması	133
4.4. Doğal Zemin Mukavemet Parametrelerinin Yolun Performansına Etkisi	134
4.5. Zayıf Zeminlerde Temel ve Alttemel Tabaka Kalınlıklarının Etkisi	138
4.6. Yol Tabakalarında Tek Sıra Geogrid Kullanarak Yapılan Farklı Yükleme Değerlerine Ait Statik Analizler	142
4.7. Yol Tabakalarında İki Sıra Geogrid Kullanarak Yapılan Farklı Yükleme Değerlerine Ait Statik Analizler	149
4.8. Yol Tabakalarında Üç Sıra Geogrid Kullanarak Yapılan Farklı Yükleme Değerlerine Ait Statik Analizler	155
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	165
KAYNAKLAR	171
ÖZGEÇMİŞ	189

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Esnek kaplamalardaki ana tehlikeler üzerindeki geoteknik etkiler	13
Çizelge 2.2. Rijit kaplamalardaki ana tehlikeler üzerindeki geoteknik etkiler.....	15
Çizelge 2.3. Kompozit kaplamalardaki ana tehlikeler üzerindeki geoteknik etkiler	16
Çizelge 2.4. Yılları göre karayolu yük taşımacılığının taşıt sınıflarına göre dağılımı...	24
Çizelge 2.5. Aks konum görseli ve yük değerleri	31
Çizelge 2.6. Farklı tasarım yüzdelik değerlerinde lastik şişirme basıncı ile dikey lastik temas gerilmeleri arasında önerilen ara tasarım ilişkileri	33
Çizelge 2.7. Fırın türüne göre üretilen cüruf miktarı yıllara göre değişimi	39
Çizelge 2.8. Çelik cürufu türüne göre kimyasal bileşimi.....	43
Çizelge 2.9. Geosentetiklerin işlevleri	49
Çizelge 2.10. Geosentetik üretimi için kullanılan polimerler	50
Çizelge 3.1. Asfalt betonun mekanik özellikleri.....	75
Çizelge 3.2. BOF cürufu teknik özellikleri	77
Çizelge 3.3. Karayolları Teknik Şartnamesi Temel ve Alttemel tabakaları teknik özellikleri limit değerleri	77
Çizelge 3.4. Çelik cürufu mekanik özellikleri	78
Çizelge 3.5. Granit ve çelik cürufu mekanik özelliklerinin Karayolları Teknik Şartnamesi ile kıyaslanması.....	78
Çizelge 3.6. Çelik Cürufu elek analizi sonuçları	79
Çizelge 3.7. Çelik cürufunun geoteknik özellikleri	80
Çizelge 3.8. Çelik cürufu dinamik kayma modülü değerleri	82
Çizelge 3.9. Yumuşak kil malzeme parametreleri	84
Çizelge 3.10. Sünme faktörü polimer tipine bağlı katsayılar.....	85
Çizelge 3.11. Yükleme hasarı azaltma faktörleri.....	86
Çizelge 3.12. Önerilen kurulum hasar faktörleri	86
Çizelge 3.13. Çevresel azaltma faktörleri, PET	87

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.14. Geogrid ürün türleri ve çekme dayanımları	87
Çizelge 3.15. Secugrid teknik veriler	88
Çizelge 3.16. Yol sınıfına bağlı analiz süreleri	89
Çizelge 3.17. Secugrid pH değerine bağlı çevresel azaltma faktörleri	90
Çizelge 3.18. Hasar azaltma faktörü F_s değerleri	91
Çizelge 3.19. KGM, Tavsiye Edilen Güvenirlik Değerleri	93
Çizelge 4.1. Secugrid teknik özellikleri	112
Çizelge 4.2. Sayısal analizlerde kullanılan malzemelerin parametreleri	112
Çizelge 4.3. Asfalt yüzeyinde lastik orta noktasında oluşan düşey deformasyon değerleri	114
Çizelge 4.4. $N=100$ yükleme adımına kadar hesaplanan maksimum düşey deformasyon değerleri	123
Çizelge 4.5. Deformasyon miktarlarına ait tanımlayıcı istatistikler	125
Çizelge 4.6. Kruskal Wallis test sonucu	126
Çizelge 4.7. Her kesit için tahmin edilen parametre değerleri	130
Çizelge 4.8. Power 1 fonksiyonuna göre her kesit için deformasyon tahmin değerleri	131
Çizelge 4.9. Doğal kil zemin malzeme parametreleri	135
Çizelge 4.10. Doğal zemin özelliklerine bağlı ε_p^{max} , σ_{zz} ve T_z değerleri	136
Çizelge 4.11. Sayısal analizi yapılan tabaka kalınlıkları	139
Çizelge 4.12. Tek sıra geogrid yerleşim konumuna bağlı emniyetli taşıma yükü değerleri	148
Çizelge 4.13. İki sıra geogrid yerleşim konumuna bağlı emniyetli taşıma yükü değerleri	154
Çizelge 4.14. Üç sıra geogrid yerleşim konumuna bağlı emniyetli taşıma yükü değerleri	159

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Ulaşım sektörlerine göre yurt içi yük taşıma oranlarının dağılımı	1
Şekil 1.2. 2002-2020 yılları arasındaki belediyelerce toplanan atık miktarı ile geri kazanım ve depolama değişimi	5
Şekil 2.1. Üst yapı sisteminin temel bileşenleri	11
Şekil 2.2. Karayollarında yaygın olarak kullanılan kaplama türleri	12
Şekil 2.3. Tekrarlı yük sonucu birim şekil değiştirme eğrisi	18
Şekil 2.4. 2023 yılı trafiğe kayıtlı taşıt dağılımı	22
Şekil 2.5. Etütlerde Karşılaşılan Dingil Grupları	24
Şekil 2.6. Dingil Tipleri	25
Şekil 2.7. Yavaş hareket eden bir aracın düşey temas gerilmesi dağılımları üzerindeki lastik yükü/şişirme basıncı ilişkisinin grafik çizimleri	27
Şekil 2.8. Lastik baskı örnekleri	28
Şekil 2.9. Dairesel yüklü tekerlek alanları	32
Şekil 2.10. TCA VE ECA görselleri	34
Şekil 2.11. Basitleştirilmiş lastik temas alanı hesabı	35
Şekil 2.12. Lastik temas alanı	36
Şekil 2.13. 1950-2022 yılları arası Dünya'daki ham çelik üretim miktarı değişimi	37
Şekil 2.14. Fırın tipine bağlı çelik cürufu üretimi	38
Şekil 2.15. Çelik cürufu türleri	39
Şekil 2.16. Fırın tipine bağlı üretilen ham çelik yüzdesi	40
Şekil 2.17. Çelik cürufu kullanım alanı dönüşüm zinciri	41
Şekil 2.18. Çelik cürufu kullanım alanları	42
Şekil 2.19. Geosentetiğin yumuşak ve granüler zemin ile ayırma mekanizması	48
Şekil 2.20. Bazı geosentetiklerin yaygın dayanım değerleri	51
Şekil 2.21. Üst yapıda oluşan hasarlar	56
Şekil 2.22. Tekerlek yükünün kaplama tabakasındaki dağılımı	57

Şekil	Sayfa
Şekil 2.23. Secugrid® ile güçlendirilmiş çakıl sütun üzerinde duran bir araba ile kilitleme etkisinin gösterilmesi	58
Şekil 2.24. Karayollarında kullanılan geosentetiklerin olası güçlendirme mekanizmaları.....	60
Şekil 3.1. Doğrusal-elastik şekil değiştirme davranışı.....	67
Şekil 3.2. Duncan-Chang deviator gerilme- şekil değiştirme eğrisi	68
Şekil 3.3. Mohr- Coulomb malzeme modeli varsayılan ve gerçek malzeme davranışı gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	69
Şekil 3.4. Geoteknik projelerde tipik deformasyon aralıkları.....	70
Şekil 3.5. Zeminler için tipik gerilme-şekil değiştirme eğrisindeki farklı modüllerin gösterimi	71
Şekil 3.6. Kil ve siltlerin rijitlik değişimi için yeni tasarım şemaları dinamik uygulamalar	73
Şekil 3.7. Çelik Cürufu granülometre eğrisi	79
Şekil 3.8. Çelik cürufu Su muhtevası $w(\%)$ -kuru birim hacim ağırlık (γ_k) değişim kompaksiyon eğrisi.....	80
Şekil 3.9. Dinamik ve statik esneklik modülü arasındaki ilişki.....	83
Şekil 3.10. $G/G_{max} - \gamma$ değişim eğrisi	84
Şekil 3.11. Securid geogrid ürün görseli.....	88
Şekil 3.12. Polyester (PET) geosentetik için zamana bağlı yük değişimi	90
Şekil 3.13. Geogrid tabaka levhaları.....	92
Şekil 3.14. $R=85$ güvenilirlik değeri için önerilen üstyapı tabaka kalınlıkları.....	94
Şekil 3.15. Sonlu elemanlar analizi için enine kesit ve 3D geometri modeli	95
Şekil 3.16. Ön lastik temas alanı görseli.....	96
Şekil 3.17. Tridem lastik temas alanları.....	97
Şekil 3.18. Ağır taşıt akslar arası mesafeler lastik ölçüleri gösterimi.....	98
Şekil 3.19. 3D Tekerlek yükleme alanları	99
Şekil 3.20. Ağ sıklığı etkisi deneme modelleri.....	100
Şekil 3.21. Analiz süresi- düşey deformasyon değişimi.....	101

Şekil	Sayfa
Şekil 3.22. 3D dört yüzlü (tetrahedron) eleman şekil fonksiyonu ve doğal koordinat sistemi	102
Şekil 3.23. Sayısal analizlerde kullanılan sonlu elemanlar modeli.....	103
Şekil 3.24. Üstyapı modelinde kullanılan koşulları	103
Şekil 3.25. Haversine hareketli yükün zaman fonksiyonu eğrisi.....	104
Şekil 3.26. Üçgen yük-zaman değişimi	105
Şekil 3.27. Hareketli yük dağılımı varsayımının varsayımı	106
Şekil 3.28. Eşdeğer üçgen yük dağılımı.....	107
Şekil 3.29. N=1 yükleme adımı yük-zaman grafiği.....	107
Şekil 3.30. N=100 yükleme adımı yük-zaman grafiği.....	108
Şekil 3.31. Sayısal analizleri yapılan yol üst yapısı kesitleri.....	109
Şekil 3.32. Özdeğer Analizi yazılım sonuç penceresi.....	110
Şekil 4.1. Sayısal analizi yapılan 2D eksenel simetrik model	114
Şekil 4.2. KK kesiti N=100 yükleme adımı deformasyon görüntüsü.....	114
Şekil 4.3. 2D eksenel simetrik model için N=100 yükleme adımına kadar hesaplanan maksimum düşey deformasyon değerleri	115
Şekil 4.4. KK kesiti N=100 yükleme adımı deformasyon görüntüsü.....	117
Şekil 4.5. KK boy kesit deformasyon görüntüsü	117
Şekil 4.6. Tridem bölgesi deformasyon değerleri referans noktaları.....	118
Şekil 4.7. KK kesiti N=100 yükleme adımı zamana bağlı deformasyon grafiği	119
Şekil 4.8. KC kesiti N=100 yükleme adımı zamana bağlı deformasyon grafiği	120
Şekil 4.9. CK kesiti N=100 yükleme adımı zamana bağlı deformasyon grafiği	121
Şekil 4.10. CK kesiti N=100 yükleme adımı zamana bağlı deformasyon grafiği	122
Şekil 4.11. N=100 yükleme adımına kadar hesaplanan maksimum düşey deformasyon değerleri.....	123
Şekil 4.12. Her kesit için deformasyon değerlerinin kutu grafiği.....	125
Şekil 4.13. Her kesit için zaman–deformasyon grafiği.....	130

Şekil	Sayfa
Şekil 4.14. Yükleme sayısı-deformasyon değişim eğrisi.....	132
Şekil 4.15. KK kesiti statik analiz düşey deformasyon görüntüsü	135
Şekil 4.16. Kesitlerdeki doğal zemin türüne bağlı düşey deformasyon değişimi.....	136
Şekil 4.17. Kesitlerdeki doğal zemin türüne bağlı toplam gerilme değişimi.....	137
Şekil 4.18. Kesitlerdeki doğal zemin türüne bağlı plastik şekil değiştirme değişimi...	138
Şekil 4.19. Tabaka kalınlığına bağlı düşey deformasyon değişimi	139
Şekil 4.20. Tabaka kalınlığına bağlı toplam gerilme değişimi	140
Şekil 4.21. Tabaka kalınlığına bağlı birim şekil değiştirme değişimi.....	141
Şekil 4.22. Kaplama tabakası altı geogrid yerleşim konumu kesit gösterimi.....	142
Şekil 4.23. Temel tabakası altı geogrid yerleşim konumu kesit gösterimi	142
Şekil 4.24. Alttemel tabakası altı geogrid yerleşim konumu kesit gösterimi	143
Şekil 4.25. KC kesiti kaplama tabakası altı geogrid yerleşimi deformasyon görüntüsü.....	143
Şekil 4.26. Kaplama altı geogrid tabakası birim deformasyon görüntüsü.....	144
Şekil 4.27. KK kesiti tek sıra donatı konumuna bağlı yük-düşey deformasyon değişim grafiği	145
Şekil 4.28. CC kesiti tek sıra donatı konumuna bağlı yük-düşey deformasyon değişim grafiği	145
Şekil 4.29. CK kesiti tek sıra donatı konumuna bağlı yük-düşey deformasyon değişim grafiği	146
Şekil 4.30. KC kesiti tek sıra donatı konumuna bağlı yük-düşey deformasyon değişim grafiği	147
Şekil 4.31. Tek sıra geogrid yerleşim konumuna bağlı emniyetli taşıma yükü değişim eğrisi	148
Şekil 4.32. Kaplama ve temel tabakası altı geogrid yerleşim konumu kesit gösterimi.....	149
Şekil 4.33. Temel ve alttemel tabakası altı geogrid yerleşim konumu kesit gösterimi.....	150
Şekil 4.34. KK kesiti iki sıra donatı konumuna bağlı yük-düşey deformasyon değişim grafiği	150

Şekil	Sayfa
Şekil 4.35. CC kesiti iki sıra donatı konumuna bağlı yük- düşey deformasyon değişim grafiği	151
Şekil 4.36. CK kesiti iki sıra donatı konumuna bağlı yük- düşey deformasyon değişim grafiği	152
Şekil 4.37. KC kesiti iki sıra donatı konumuna bağlı yük- düşey deformasyon değişim grafiği	153
Şekil 4.38. İki sıra geogrid yerleşim konumuna bağlı emniyetli taşıma yükü değişim eğrisi	154
Şekil 4.39. Kaplama, temel ve alttemel tabakası altı geogrid yerleşim konumu kesit gösterimi	155
Şekil 4.40. KK kesiti üç sıra donatı konumuna bağlı yük-düşey deformasyon değişim grafiği	156
Şekil 4.41. CC kesiti üç sıra donatı konumuna bağlı yük-düşey deformasyon değişim grafiği	157
Şekil 4.42. CK kesiti üç sıra donatı konumuna bağlı yük-düşey deformasyon değişim grafiği	158
Şekil 4.43. KC kesiti üç sıra donatı konumuna bağlı yük-düşey deformasyon değişim grafiği	159
Şekil 4.44. Üç sıra geogrid yerleşim konumuna emniyetli taşıma yükü değişim eğrisi	160
Şekil 4.45. Kesitlerin donatı konumuna bağlı emniyetli taşıma yükü değişimi	161
Şekil 4.46. Doğal zemine aktarılan düşey gerilme	162
Şekil 4.47. Doğal zemin tabakasında düşey gerilme yayılımı	163

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
Al_2O_3	Alüminyum Oksit
c	Kohezyon
Ca	Kalsiyum
CaO	Kalsiyum oksit
CO_2	Karbon dioksit
E	Elastisite modülü
E_{50}^{ref}	Standart drenajlı üç eksenli testte sekant rijitliği
ϵ_p	Plastik deformasyon
ϵ_r	Elastik deformasyon
ϵ_{toplam}	Toplam deformasyon
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	Boşaltma/yeniden yükleme rijitliği
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$	Demir oksit
G_0^{ref}	Kayma modülü
m	Gerilmeye bağlı rijitlik seviyesi
MgO	Magnezyum oksit
M_R	Esneklik (Rezilient) modülü
P	Fosfor
P_2O_5	Fosfor pentaoksit
P_{ref}	Referans gerilme
Si	Silisyum
SiO_2	Silisyum oksit
TiO_2	Titanyum dioksit
γ	Birim hacim ağırlık
ν	Poisson oranı
ϕ	İçsel sürtünme açısı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

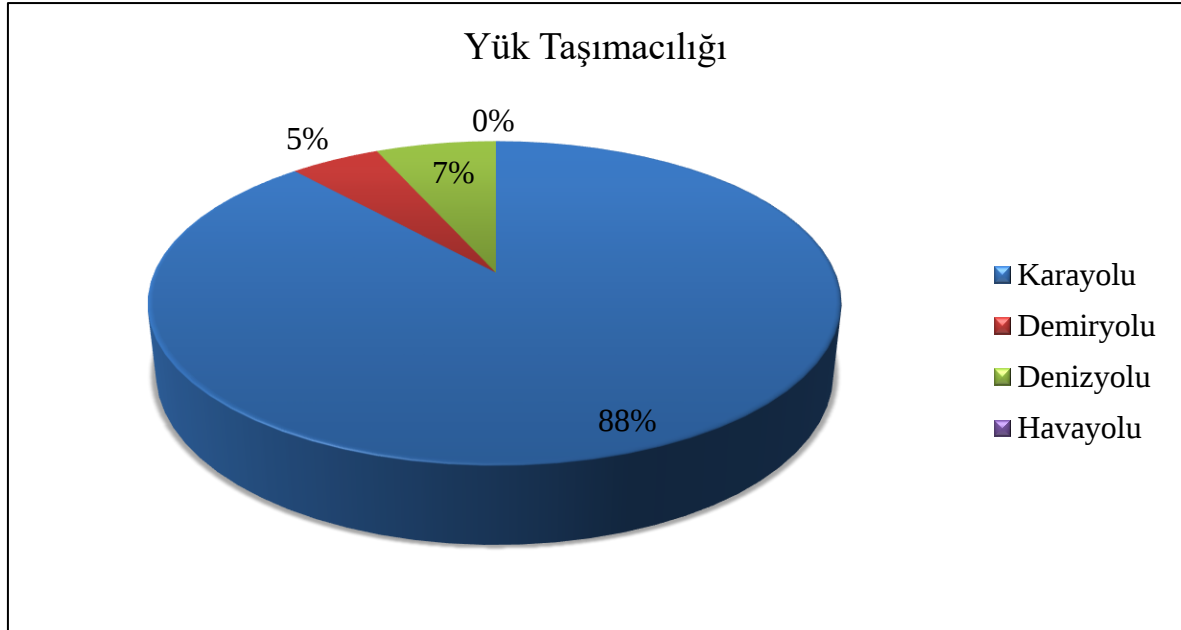
3D	Üç boyutlu
AASHTO	Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği
BOF	Bazik oksijen fırını
EAf	Elektrik ark fırını
ECA	Etkin (gerçek) temas alanı
FCA	Tam Temas Alan
FE	Sonlu elemanlar
FEM	Sonlu elemanlar metodu
FWD	Düşen ağırlıklı deflektometre
HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
HMA	Sıcak karışım asfalt
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
LF	Pota fırını
MCCM	Modifiye Cam Kil Modeli
MD	Makina Yönü
MSEW	Mekanik olarak stabilize edilmiş toprak duvar
Mt	Milyon ton
N	Yükleme adım sayısı
PCC	Portland çimento betonu
PET	Polyester
PP	Polipropilen
PVC	Polivinilklorür
TCA	Geleneksel temas alanı
TIP	Lastik Şişirme Basıncı
TL	Lastik yükü
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
XD	Çapraz makine yönü

1. GİRİŞ

Yollar, medeniyetlerin sosyal ve ekonomik anlamda gelişmesinde oldukça önemlidir. Bir ülkenin ekonomik kalkınmasında sürdürülebilir bir karayolu ağının varlığı ve farklı bölgeler arasındaki ulaşımın işlevselliği gelişmişliğin başlıca göstergelerinden biridir. Bununla birlikte ulaşım ağı sayesinde mesafeler azalmakta, ulusal ve kültürel bütünleşme kolaylıkla sağlanabilmektedir.

Şehirleri, ülkeleri ve hatta kıtaları birbirine bağlayan karayolları tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de ulaşım sektörünün büyük bir payını oluşturmaktadır. Ülkemiz 2023 yılı itibarı ile 3 633 km otoyol, 30 954 km devlet yolları ve 34 113 km il yolları ile toplam 68 700 km karayoluna sahiptir. Karayolları Genel Müdürlüğü verilerine göre yük taşımacılığının %92,5, yolcu taşımacılığının ise %92,8'i karayolları ile sağlanmaktadır (KGM, 2022a).

Şekil 1.1'de farklı ulaşım türlerinin yurt içi yük ve yolcu taşımacılığında kullanım oranları verilmiştir. Buradan hareketle karayollarının, ulaşım alt yapısının en önemli bileşeni olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 1.1. Ulaşım sektörlerine göre yurt içi yük taşıma oranlarının dağılımı (KGM, 2022b)

Ülkemizde yoğun olarak kullanılan karayollarında yüksek performanslı, ekonomik, en az bakım-onarım gerektirecek malzemenin seçilmesi servis ömrü boyunca yoldan beklenen

performansı göstermesi açısından önemlidir. Bu nedenle yol alt tabakalarının tasarımında kullanılan malzemelerin kalitesine dikkat edilmelidir. Kullanılan malzemenin kalitesi ne kadar düşükse, gerilmeleri tolere etmek ve iletme için gereken kalınlık o kadar büyük olacaktır. Kaliteli, yüksek dayanımlı deformasyonlara karşı dirençli malzeme seçimi sayesinde alt zemine aktarılan gerilmelerin azalması yoluyla yüzeyde oluşabilecek çeşitli deformasyonların önüne geçmek mümkün olmaktadır.

Özellikle temel tabakasında kullanılacak malzemenin tekrarlı yükleme döngüleri, nem ve çeşitli dış etkenler aracılığıyla oluşan yapısal zayıflamalara, diğer bozulmalara karşı yeterince sert ve dayanıklı olması gereklidir. Deformasyonlara karşı koyabilen yüksek içsel sürtünme açısına sahip granüler malzemelerin tercihi ile bu performansın sağlanması mümkün olmaktadır.

Otoyol inşasının neredeyse tüm aşamalarında büyük yatırımlar ve harcamalar gerekmektedir. Bu nedenle yapılacak olan mühendislik tasarımlarında, yatırım tasarrufu ile servis ömrü boyunca güvenilir bir performans göstermesi, yolların tipi ne olursa olsun hem dayanıklılık açısından hem de yoldan beklenen hizmet kalitesi açısından değerlendirilip yapımı tamamlanmalıdır.

Sanayileşme, nüfus artışı ve çeşitli insani faaliyetlerden kaynaklanan atık maddelerin oluşumu sürekli olarak devam etmektedir. Bunun bir sonucu olarak son yıllarda tüm dünyayı etkisi altına alan, gezegenimizin doğal ortamını etkileyen küresel ısınma ve zehirli gazlar tüm insanlık için gün geçtikçe daha tehlikeli olmaktadır.

Nüfus artışıyla birlikte endüstrileşme hareketleri neticesinde, dünya çapında sıkça karşılaşılan problemlerden bir diğeri olan kaynak yetersizliği, depolama alanlarında biriken devasa atık stokları, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin bir sorunu haline gelmiştir.

Çevreye duyarlı sürdürülebilir bir geri dönüşüm sistemi ile endüstriyel yan ürünlerin doğru ve efektif kullanımı mümkün olmaktadır. Kibert (2018)'e göre sürdürülebilir bir inşaat sürecinin temel prensipleri;

1. Kaynak tüketiminin azaltılması
2. Kaynakların mümkün olduğunca yeniden kullanılması

3. Ömrünü tamamlamış kaynakları geri dönüştürmek ya da geri dönüştürülebilir kaynakların tercih edilmesi
4. Tüm eylemlerde doğal sistemlerin ve işlevlerinin korunması
5. İnşa edilmiş çevrenin tüm aşamalarında toksik malzemelerin ortadan kaldırılması olmalıdır.

Doğal agregaların kullanımının etkisiyle hem sınırlı kaynakların tüketilmesi açısından hem de çıkarılması ve işlenmesi sırasında oluşacak çeşitli gazların birikimi neticesinde kirlilik meydana gelebilmektedir. Örneğin, yolun granüler tabakaları için gerekli malzemenin temini ülkemiz ve dünyanın birçok bölgesinde bir sorun haline dönüştüğü için atık malzemelerin dolgu malzemesi olarak kullanılabildiği gibi bunun yanında mevcut dolgu içerisine çeşitli oranlarda ilave edilerek iyileştirme sağlamak amacıyla da kullanılmaktadır. Bu nedenle çevresel ve sürdürülebilir bir yaşamsal döngünün sağlanması açısından agrega niteliğinde oluşan çeşitli atık ürünlerin dönüşümünü sağlamak önemlidir.

Nüfus artışının doğal kaynakların kullanımına yönelik olan etkilerinin yanında, şehir içi ve şehirlerarası yollarda trafik artışı meydana gelmekte ve böylece mevcut yolların bozulma sürecini hızlandırmakta, periyodik iyileştirme gerekli olmaktadır. Ayrıca ulaşım sektörü çevre sorunlarının oluşmasında da büyük bir etkiye sahiptir. Bir yolun sahip olduğu yüzey alanının yaklaşık 15 katı kadar büyüklükte bir alanda çevresel etki ve gürültü gibi rahatsızlık meydana getirdiği ifade edilmektedir (Edil, 2009).

Birçok ülke ekonomisinin önemli bir parçası olan demir-çelik endüstrisi üretimi sonucunda yan ürün olarak ortaya çıkan çelik cürufları, etkin bir şekilde kullanılması ve ekonomiye yeniden kazandırılması önem arz etmektedir. Dünya Çelik Birliği Raporu'na (2023) göre yıllık 1 885 milyon ton ham çelik üretilmekte olup 1 781 milyon tonu kullanılmaktadır. Başlangıçta çelik cürufları atık bir malzeme olarak işlenmiş ve katı atık sahası olarak bertaraf edilmiştir (Birat, 2012). Ancak atık olarak biriken cüruf dağları yer işgal etmekte ve çevresel problemlere neden olmaktadır. Çelik cürufunun bünyesinde barındırdığı çok sayıda ağır metal bileşeni nedeniyle toprağa ve su yollarına nüfuz ederek ekolojik çevreyi ve insan sağlığını tehdit etmektedir.

Çelik cürufunu depolama ve atık gömme (landfilling) faaliyetleri sürdürülebilir olmadığından meydana gelebilecek çevresel problemleri azaltmak ve kısıtlı doğal

kaynakların korunmasına yardımcı olmak amacıyla yeni bertaraf yolları geliştirmek gereklidir. Bu olumsuz etkiler nedeniyle özellikle inşaat mühendisliği uygulamalarında daha evre dostu endüstriyel anlayışa dayalı yeni çözümlerin sunulması önemlidir.

Son yıllarda elik cürufu çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bölüm 2.4.1’de elik cürufunun kullanım alanlarına ait bilgiler verilmiştir.

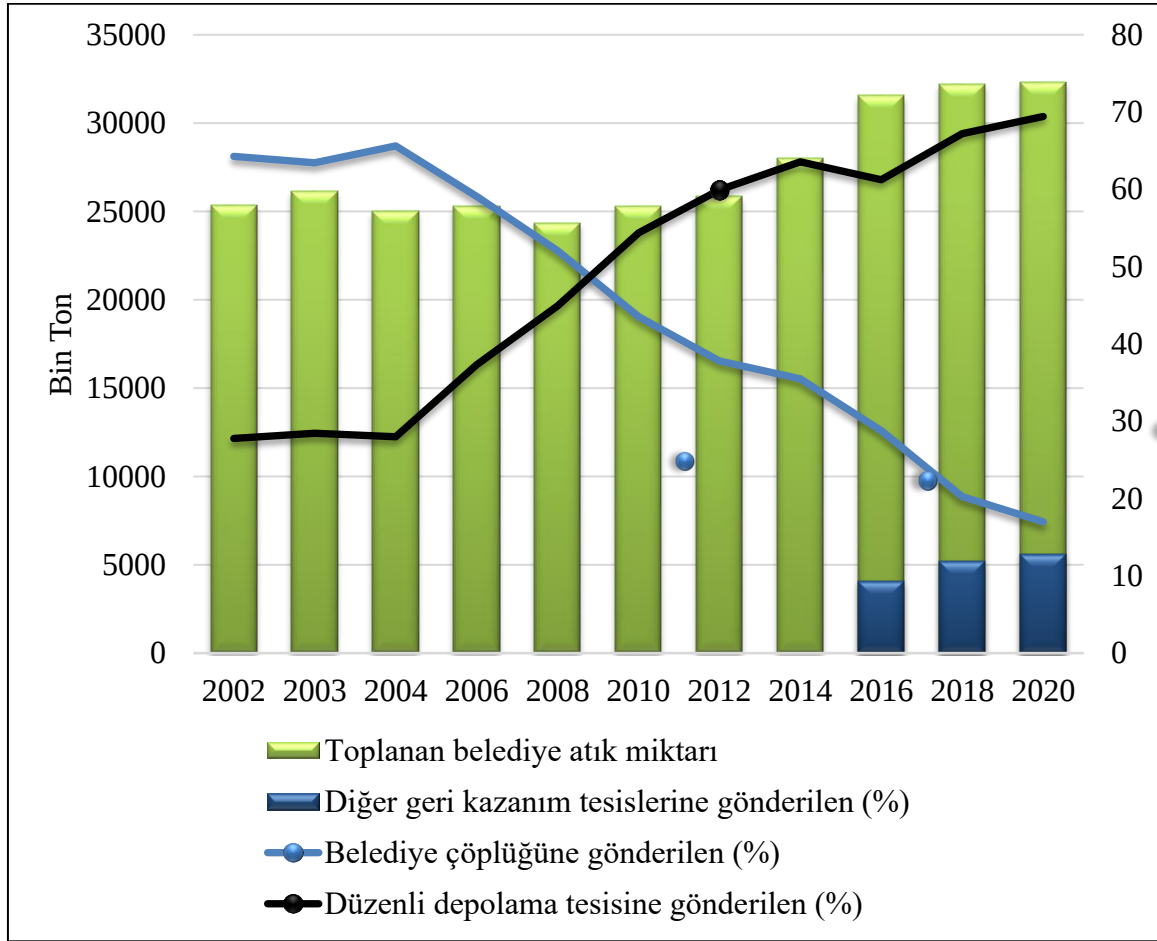
elik cürufunun geoteknik özelliklerine yönelik çalışmalar son beş yıl içerisinde yoğunlaşmış olup en yaygın kullanılan geoteknik uygulamalarından birincisi zemin stabilizasyon malzemesi, diğeri ise yol dolgu malzemesi olarak kullanımıdır. Daha çok miktarda elik cürufunun geri dönüşüm sürecine katılması amacıyla yol dolgularında elik cürufunun tercih edilmesi zemin stabilizasyonuna göre daha avantajlı olmaktadır (Yıldırım, 2022).

Bu kapsamda kullanılan elik cüruflarının üstün mühendislik özelliklerinin yanında kısa ve uzun vadede atık ürün olması sebebiyle çevresel etkilerinin değerlendirilerek atılacak geri dönüşüm adımlarının olumsuz etkileri yok edecek nitelikte profesyonellik taşıması gerekmektedir.

Geri dönüşüm çabalarının hedefi hem çevresel hem de ekonomiktir. Bu nedenle çalışma kapsamında ele alınan elik cüruflarının yol inşaatlarında agrega olarak kullanılması ile doğal kaynakların verimli kullanılması ve atık malzemelerin geri dönüştürülmesi arzu edilmektedir. Bu şekilde bir kullanım sayesinde hem yolun stabilite özelliklerine hem de geri dönüşüm sürecine sağlanan katkı sayesinde ifte fayda sağlanmaktadır. Bu sürdürülebilir bir sistem, evre ve dünya için umut verici bir yöntem olmaktadır.

Ülkemizde çeşitli aşamalardan geçmiş olan atık yönetimi, 2017 yılı Eylül ayı itibariyle ‘‘Sıfır Atık Projesi’’ olarak hayatımıza girmiştir. Bu uygulamada atıkların toplanması ve geri dönüşüm sürecinin amaçlandığı, israfın nlenerak kaynakların verimli kullanılmasının yanında bizlerden sonra gelecek nesillere daha yaşanılabilir bir Dünya bırakmak amacıyla her türlü kaynak kayıplarının engellenmesi öncelikli hedefleri arasındadır (evre şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2018).

Türkiye İstatistik Kurumu verilerine göre oluşturulan Şekil 1.2’ e bakıldığında 2002 yılından 2020’ e kadar olan süreçte belediyelerce toplanan atık miktarında genel itibariyle artış meydana gelmiştir. 2002 yılında toplanan atığın %64,3’ ü belediye çöplüklerine gönderilirken 2020 yılına gelindiğinde oluşan 32 324 000 ton atığın %17’si belediye çöplüklerine %69,43’ ü düzenli depolama tesislerine gönderilmiştir. 2002-2020 yılları arasında atıkların çöplükler yerine düzenli depolama alanlarına gönderilme oranları artmıştır. 2016 yılına gelindiğinde atık yönetim politikaları doğrultusunda geri kazanım tesislerine gönderilmeye başlanmıştır. Geri dönüşüm çabaları etkisiyle 2016-2020 yılları arasında artarak devam etmiştir.



Şekil 1.2. 2002-2020 yılları arasındaki belediyelerce toplanan atık miktarı ile geri kazanım ve depolama değişimi (TÜİK, 2023a)

PBL Hollanda Çevre Değerlendirme Kurumu (2017), günümüzde atık yönetimi sürecinde yer alan kavramlar ve 7 (yedi) R kuralının uygulanmasına yönelik stratejilere öncelik verilmesi gerektiğini belirtmiştir. 7 R kuralı ise Düşün, Yeniden Tasarla, Yeniden Kullan, Onar, Yeniden Üret, Geri Dönüştür ve Kurtar’dır (Brief, 2017). Kullanılmış olanı atmak

yerine cam, cüruflar, geri dönüştürülmüş beton agregalar ve plastik gibi malzemelerin yeniden kullanılması yaşam döngüsü sisteminin daha iyi yönetilmesini sağlayacaktır. Dünyada olduğu gibi ülkemizde Sıfır Atık hedefleri kapsamında çelik cüruflarının verimli, doğru bir şekilde kullanım oranını artırmak ve geri dönüştürülmesi için yeni yöntemlerin araştırılması olumlu bir gelişme olacaktır.

İlk olarak 1970’lerde kullanılmaya başlayan ve zayıf zeminler üzerine inşa edilen yolları, güçlendirmek/stabilize etmek amacıyla çevre dostu ve ekonomik bir alternatif olan geosentetik takviyeleri günümüzde farklı uygulamalarda çeşitli amaçlarla kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Yüksek modüllü geosentetik malzemeler hem yeni inşa edilen tasarımlarda hem de mevcut imalatların rehabilitesini sağlayarak güçlendirme etkisinde bulunmaktadır.

Üstyapı tasarımında geosentetik donatının tabakalar boyunca kullanılması halinde yükün daha geniş bir alana yayılması sayesinde aktarılan düşey gerilmeler azalmakta olup yol performansı artmaktadır. Üstyapının ilk yapım maliyetini artırmasına rağmen uzun vadede servis ömrü boyunca bakım/rehabilitasyon gereksinimini azaltmasına bağlı olarak gerekli harcamalar da düşecektir.

Yaygın olarak kullanılan geosentetik türleri genellikle altı kategoriye ayrılır; geotekstilller, geogridler, geomembranlar, geonetler, geofoam ve geokompozitlerdir. Bu geosentetik türleri içerisinde geogridler ve geotekstilller, kaplama güçlendirme uygulamaları için tercih edilen ürünlerdir.

Yol tasarımında kullanılan geogridler sayesinde taşıma gücündeki artışla birlikte yolun hizmet ömrü uzamakta böylece uzun vadede yol bakım masraflarından da tasarruf etmek mümkün olmaktadır. Özetle geosentetik kullanımı sayesinde agrega tabakası malzemelerinin rijitliği artmaktadır. Sayısal analiz çalışmasının sonucunda geosentetik kullanımı sayesinde artan taşıma gücü değeri ile yolun hizmet ömrünün uzaması ve bununla birlikte kaliteli/konforlu bir hizmet vermesi mümkün olacaktır.

Bu çalışmada olduğu gibi birçok çalışmada geogridler yol yapımında takviye olarak yaygın bir kullanıma sahiptir. Geogridlerin kullanımı sayesinde tekerlek izinin neden olduğu hasarı

azaltmak, kaplama tabakasına uygulanan trafik yüklerinin diğer katmanlar arasında dağıtılmasını sağlamak gibi birçok etkiyi gözlemlemek mümkündür.

Tez çalışmasında ise statik yükler etkisi altında farklı geosentetik donatı yerleşim konumlarında geogrid takviyesinin yol performansının iyileştirilmesine, güçlendirme/taşıma gücüne olan katkısı, geogridin konumunun/derinliğinin etkisi sonlu elemanlar simülasyonlarıyla belirlenmiştir.

Özetle tekrarlı trafik yükleri etkisi altında Demir-çelik sanayinin yan ürünü olan her yıl daha fazla atık olarak karşımıza çıkan çelik cürufunun hareketli ağır taşıt yükleri altında yolun düşey deformasyonuna olan etkisi incelenmiştir. Bu amacı gerçekleştirmek için çelik cüruf ile inşa edilmiş yol temel ve alttemel tabakaları modellenmiştir. Çelik cüruf ile oluşturulan yol temel tabakalarının trafik yüklerinden kaynaklanan deformasyonların doğrusal olmayan davranışını ve farklı tabaka katmanlarında geogrid donatı yerleştirilerek yolun taşıma gücüne olan katkısı, yapısal faydalarını anlamak için 3D sonlu elemanlar analizi yapılmıştır.

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Tezin ilk bölümünde çalışmanın konusu, sonuçlara ulaşmak amacıyla izlenen yolun arka planı, amacı, hedefleri hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde tez konusunun bütününe yönelik teorik bilgilerin yanında geçmişte yürütülen araştırmaların kapsamlı bir literatür taraması yer almaktadır. Günümüzdeki yol tasarımlarından ve yükleme prensibinden, sayısal analizlerde kullanılan malzemelere ait genel bilgiler, yöntemle ait teorik bilgiler ile tekrarlı yüklere maruz kalan yol yapısında meydana gelen deformasyonlardan bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde sayısal analizi yapılacak olan modelin oluşturulmasına yönelik geometrik ve parametrik adımların yanında tekerlek yükleme alanının hesapları gibi detaylar verilmiştir. Geogrid malzeme parametrelerinin hesaplanmasının yanında modele uygulanacak sınır ve yükleme koşulları, sonlu elemanlara ayırmak için seçilen eleman tipi açıklanmıştır. Sayısal çalışmaları kapsayan bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde yol kesitlerinde gerçekleştirilen statik ve dinamik sonlu elemanlar analizlerinin bulguları yer almaktadır. Tekrarlı yükleme adımları altındaki dinamik analizler

sonucunda dört farklı kesitte meydana gelen maksimum düşey deformasyon değerleri hesaplanmıştır. Uygulanan yük sayısına karşılık deformasyon eğrileri oluşturulmuştur. Ayrıca geogrid donatının yerleşim konumuna bağlı olarak taşıma gücüne olan etkisini belirlemek amacıyla yapılan statik analiz bulgularına da yer verilmiştir. Gerçekleştirilen analitik çalışmanın kapsamlı bir incelemesi yer almaktadır.

Beşinci bölümde çalışmanın sonuçları ve gelecekteki araştırma çalışmaları için öneriler özetlenmiştir. Son bölümde ise araştırma sürecinde faydalanılan kaynaklar listelenmiştir.

2. GENEL BAKIŞ VE LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde yol tasarım yöntemleri ve gelişim aşamalarından, karayollarında meydana gelen deformasyonlardan, sayısal analizi yapılacak modelin hazırlanması için gereken koşullardan, analiz yönteminden ve kullanılacak malzemelerden bahsedilmiş olup bu konularda yapılmış olan araştırmalar hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca bu bölümde tezin sayısal analizler kısmında ihtiyaç duyulan verilere, yöntemlere ve konunun anlaşılmasına yönelik yapılan literatür çalışmasına yer verilmiştir.

2.1. Karayolu Tasarımı

Yolların tasarımı ve analizi uzun yıllardır gelişerek devam etmektedir. 1880'lerin başında üstyapıları elastik, homojen ve izotropik tek tabakalı bir yapı olarak varsaymış ve noktasal bir yük altındaki kaplamanın gerilmesini hesaplamıştır. Bununla birlikte 20. yüzyılın ilk yarısında üstyapı tasarımı için kullanılan teknikler, deneysel (ampirik) yöntemlere dayanıyordu. Bu yöntemler laboratuvar test sonuçlarının saha verileriyle bağlantısını kurarak tabaka kalınlıklarını tahmin etmek için kullanılmıştır. Dönem koşulları gereği kaplama üzerindeki dingil yükleri günümüzdeki kadar büyük değildi ve bu yöneme göre tasarımlar hafif araç trafiğini barındıran yükler için yapılmıştı. Bu nedenle ağır dingil yükleri deneysel yöntemlere dahil edilmemiştir (Bodhinayake, 2008).

İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra artan yoğun araç trafiğinin yanında sanayi devrimi ile araç ağırlıkları artmış, dolayısıyla hafif araç trafiğine sahip yollardan toplanan saha verileri ile yapılan ampirik yöneme dayalı tasarım metodu işlevsiz hale gelmiştir. 1959-1961 yılları arasında, Amerika Birleşik Devletleri'nde AASHTO (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği, eski adı AASHO) tarafından bir dizi yol testleri ve tasarım şemalarının bulunduğu "AASHTO Geçici Kılavuz Sert ve Esnek Üstyapı Tasarımı" adlı kapsamlı bir üstyapı tasarım kılavuzu yapılmıştır (Qiao, 2015).

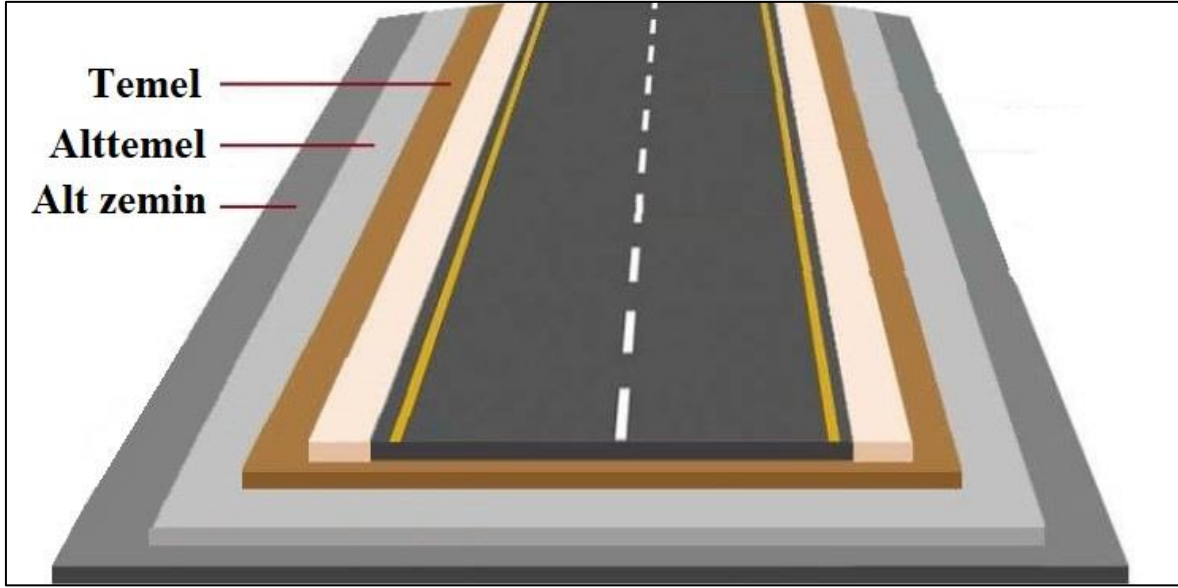
Ancak geçmiş yıllarda uygulanan bu yöntemler 21. yüzyılda farklı araç türleri ve bunlara bağlı olarak birbirinden farklı trafik yükleri, inovatif içerikte malzemelerin kullanımı gibi faktörler dolayısıyla tasarımda güncel yöntemler kullanmak daha zorunlu hale gelmiştir. Değişen koşullara karşı talebi karşılamak amacıyla çok katmanlı elastik teoriye dayalı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemde kaplama tabakaları doğrusal elastik malzeme

davranışı gösterdiği ve lastik basıncının ise dairesel bir alana etki ettiği kabulü yapılmıştır. Çok katmanlı elastik teoride matematiksel modelin tüm katmanlarının aynı özelliklere sahip homojen, yanal olarak sonsuza uzanan ve alt temel hariç düşey yönde sonlu kalınlıklara sahip olan bir yapı olarak ifade edilmektedir. Bu amaçla sayısal analizlerin yapılmasında çok katmanlı elastik teoriyi kullanan çeşitli yazılımlar da bulunmuştur (Bodhinayake, 2008).

Zamanla mevcut yöntemlere ek olarak iklim koşulları, yolların işlevselliği ve araçların türlerine bağlı olarak değişen birçok etkenin dikkate alındığı, tekrarlı trafik yükleri altındaki granüler malzemelerin doğrusal olmayan davranışını simüle edebilen sonlu elemanlar yöntemi geliştirilmiştir.

Yukarda bahsi geçen etkenlerin her biri karayolunun beklenen performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu yüzden geliştirilen analitik yöntemler sayesinde aks yükleri etkisi altındaki tabakaların malzeme özelliklerinin ve davranışlarının birbiri ile olan ilişkileri dikkate alınarak hesaplamalar yapılmaktadır. Uygun tasarım ve yapım yönteminin belirlenmesi, sadece tasarım ve yapım maliyetlerinin düşürülmesi amacıyla değil bununla birlikte uzun vadeli işletme, bakım ve onarım masraflarının da en aza indirilmesi amacıyla önemlidir.

Yük ve yolcu taşımacılığında sıkça kullanılan ve bir günde çok sayıda aracın geçişine kolaylık sağlayan yolların temel bileşenleri Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Bu bileşenler sayesinde yükler alttaki temel, alt temel ve zemine dağıtılarak çevresel etkilere (sıcaklık ve nem gibi) ve araçlardan gelen statik ve dinamik yüklere dayanacak şekilde inşa edilirler (Alimohammadi, Schaefer, Zheng ve Li, 2021).



Şekil 2.1. Üst yapı sisteminin temel bileşenleri

Üstyapı sistemini oluşturan bileşenlere ait bilgilere sonraki bölümlerde yer verilmiştir.

2.1.1. Kaplama tabakası

Kaplama tabakası üst yüzeyi kaymaya, trafik aşınmasına ve çeşitli iklimsel etkilere karşı dayanıklı olan ve trafik yükünü karşılamak için tasarlanmış katmandır. Doğrudan bağlı veya bağlı olmayan granüler malzemeden oluşan temel tabakası üzerinde uzanan üstyapı bölümünün en üst tabakasıdır. Kaplama tabakası sayesinde araçların lastiği aracılığıyla aktarılan trafik yükleri yol yapısını oluşturan diğer katmanlara ve en son alt zemin tabakasına aktarılmaktadır.

Genel olarak yol kaplamaları tasarım ömürleri boyunca çok sayıda tekrarlı trafik yüklerine maruz kalmaktadır. Bu nedenle en fazla aşınma ve yol yapısındaki yıpranma bu tabakada meydana gelmektedir. Kaplamanın yapısal bozulmaları, kaplamanın ömrü boyunca biriken esnek ve kalıcı deformasyonlarla doğrudan ilişkilidir.

İdeal kaplama tasarımı yüzeyde oluşan bozulma sürecini hızlandıran araç trafiğindeki artış dolayısıyla değişen çevre koşulları ve sıcaklık değişimi gibi faktörlere karşı dayanıklı olmalıdır. Kaplama kalitesi bu aşamada belirleyici olmaktadır. Kaplamanın yüzeyi pürüzsüz, nem oranı düşük, mevcut çukur, çatlak ve aşınmalardan da arındırılmış olmalıdır. Bu sayede kaplama tabakası üstyapı yapısına nem girişini en aza indirmek için geçirimsiz bir katman

görevi görmektedir. Yeterli mukavemete sahip olması durumunda ise rijit ve kalıcı deformasyonlara karşı direnç gösterebilmektedir.

Yol yapım projeleri zaman alıcı ve maliyetli olması nedeniyle uygun kaplama türü ve tasarım yönteminin seçimi üst yapıdan beklenen performansı sağlaması açısından hayati önem taşımaktadır (Patel, Singh ve Shanker, 2022). Üstyapı tasarımındaki amaç, tasarımın performansını en üst düzeye çıkararak meydana gelebilecek bozulmaların önüne geçmektir.

Üstyapı sistemlerinin tasarım ömrü boyunca temel işlevi ve bu işlevlerine yönelik amacı, her türlü koşulda araçların güvenle geçebileceği bir yüzeyin devamlılığıdır (Christopher, Schwartz, Boudreaux ve Berg, 2006). Bu nedenle temel bileşenleri aynı olan çeşitli üstyapı sistemleri bulunmaktadır. Karayollarında kullanılan temel kaplama türleri esnek (Şekil 2.2.a), rijit (Şekil 2.2.b) ve kompozit (Şekil 2.2.c) kaplamalardır.



Şekil 2.2. Karayollarında yaygın olarak kullanılan kaplama türleri (Alimohammadi ve diğerleri, 2021)

Yapımına karar verilen kaplama türü ne olursa olsun tüm bileşenlerin uygun bir şekilde tasarlanması gerekmekte aksi takdirde beklenen hizmet kalitesinin azalmasına ve servis ömrünün kısılmasına sebep olmaktadır.

Esnek kaplamalar

Esnek kaplamalar, taşıtların hareketini kolaylaştırmak için yüzeyinde bitümlü asfalt tabakası bulunan ve alttemel tabakası üzerine inşa edilen granüler temel tabakasından oluşmaktadır. Bu kaplama türünde katmanlar zemin yakınında daha zayıf malzemelerden başlanarak yüzeye doğru gerilme yoğunluğunun fazla olması nedeniyle daha güçlü malzemeler ile inşa edilirler (Huang, 2004). Yüzey tabakasında kullanılan bitümlü karışım sayesinde yorulma davranışına ve kalıcı deformasyona dayanıklı çevre dostu, ekonomik vb. özelliklere sahip bir yapı oluşmaktadır.

Esnek kaplamalar iklimsel değişimler, hava koşulları, sıcaklık, nem vb. çevrelerindeki ortamlara ve buradaki değişimlere duyarlı bir yapıya sahiptir. Sıcaklık ve nem kaplamanın tüm derinliklerinde gerilme-şekil değiştirme davranışını, özellikle sıcaklık faktörü bitümlü kaplamalarda asfalt tabakasını ve bu tabakaya bağlı temel tabakasını etkilemektedir. Çünkü bu tabakalar viskozdur ve etkiyen yüklere karşı elastik ve plastik tepki göstermektedirler (Qiao, 2015).

Esnek kaplamalar, uygulanan trafik yükleri altında yapısal hareket davranışı incelendiğinde esnektir ve dolayısıyla düşük eğilme mukavemetine sahiptir. Bu nedenle esnek kaplama tercih edilen yolların alt tabakalarında meydana gelecek deformasyonlara tabaka yüzeyinde rastlamak mümkündür. Çünkü çevresel etkiler ve tekrarlı trafik yükleri nedeniyle kaplama tabakası başlangıçtaki sertliğini ve pürüzsüzlüğünü kaybetmektedir.

Kaplama tabakasına yapısal mukavemet sağlamak amacıyla rijitlik ve yük taşıma kapasitelerinin artırılması ve alttaki tabakaların malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi çalışmaları yapılmaktadır. Bunun nedeni ise kaplama sisteminde en kritik çekme gerilmesi ve birim şekil değiştirmenin asfalt tabakasının alt kısmında meydana gelmesidir. Dolayısıyla kaplamaya yeterli taşıma kapasitesi sağlamak amacıyla yeterli dayanıma sahip bir temel ve alttemel tabakası inşa edilmesi gerekmektedir.

Çizelge 2.1’de esnek kaplamalarda meydana gelen yaygın bozulma türleri ve bunlar üzerindeki geoteknik etkileri özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Esnek kaplamalardaki ana tehlikeler üzerindeki geoteknik etkiler (Christopher ve diğerleri, 2006)

	Yorulma çatlama	Tekerlek izi	Oluklanma	Çökmeler	Çukurlar	Pürüzlülük
Yetersiz temel rijitliği/mukavemeti	•	•	•	•		•
Yetersiz alt zemin rijitliği/mukavemeti	•	•				•
Nem/drenaj problemleri	•	•	•	•	•	•
Donma/çözünme	•	•		•	•	•
Şişme						•
Kirlenme	•	•		•		•
Üç boyutlu değişebilirlik				•	•	•

Esnek üstyapılar, tasarım süresi boyunca trafik yoğunluğuna bağlı olarak yüksek ve düşük hacimli üstyapılar olarak sınıflandırılmaktadırlar. Eşdeğer tek dingil yükünün 3 milyondan daha düşük olduğu yollar, Karayolu Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne göre (2008) düşük hacimli yol sınıfında yer almaktadır. Düşük hacimli yollar iki tabakalı bir kaplama sisteminin örneklerindendir. İnce asfalt beton tabakası olan veya olmayan düşük hacimli üstyapılar için, bağlanmamış granüler malzeme tabakası ana yapı birimini oluşturur. Düşük hacimli yollara kıyasla daha fazla taşıtın geçişine maruz kalan yollar yüksek hacimlidirler. Yüksek hacimli yollar, üstte kalın bir asfalt beton tabakası, temel tabakası ve alttemelin ardından sıkıştırılmış ve doğal alt tabakalardan oluşan 3 ila 4 tabaka halinde tasarlanıp inşa edilmektedir.

Rijit kaplama

Kaplama tabakasının yüzeyi çimento betonundan imal edilmiş ve kaplama yapısı trafik yükleri nedeniyle eğilip yön değiştiremeyeceğinden rijit üstyapı olarak adlandırılmaktadır (Naveen ve diğerleri, 2022).

Rijit kaplamaların hem pistler hem de otoyol, ekspres yollar ve karayollarında tercih edildiği uygulamaları mevcuttur. Rijit kaplamaların sahip olduğu dayanıklılık ve farklı araç türlerinin yüklerine, değişen hava ve iklim koşullarına maruz kaldıkları durumlarda yapısını koruyabilmesi açısından oldukça avantajlıdır. Ancak bu kaplama türünün dezavantajlarından birisi kritik sınırların ötesinde gerilmelerin oluşmasıdır. Ayrıca yorulma çatlaması ve/veya alt tabakalarda malzeme erozyonu da en sık karşılan hasarlar içerisinde yer almaktadır. Her iki hasar türünde de beton kaplama tabakası üzerinde aşırı bir gerilme ve bu gerilme sonucunda oluşacak sehim oldukça etkilidir. Kabul edilebilir sınırları aşan gerilmelerin önceden tahmin edilmesi sayesinde yolun hizmet ömrünü uzatmak ve yol yapısında meydana gelebilecek kusurları önlemek mümkün olmakta ve bu sayede yol tasarımı ekonomik hale gelmektedir. Çizelge 2.2'de rijit kaplamalarda yaygın olarak meydana gelen bozulmalar ve buna karşılık gelen geoteknik sorunları verilmiştir.

Çizelge 2.2. Rijit kaplamalardaki ana tehlikeler üzerindeki geoteknik etkiler (Christopher ve diğerleri, 2006)

	Yorulma çatlaması	Yakın aralıklı kırık alanlar	Pompalama	Faylanma	Pürüzlülük
Yetersiz temel rijitliği/mukavemeti	•	•		•	•
Yetersiz alt zemin rijitliği/mukavemeti	•	•			
Nem/drenaj problemleri	•	•	•	•	•
Donma/çözünme	•	•		•	•
Şişme				•	•
Kirlenme	•	•		•	•
Erozyon	•	•	•	•	•
Üç boyutlu değişebilirlik					•

Kompozit kaplamalar

Kompozit bir kaplama hem sıcak karışım asfalt (Hot Mix Asphalt [HMA]) hem de çimento betonundan (Cement Concrete [PCC]) oluşmaktadır. Kompozit kaplamalar hem esnek hem de rijit kaplama elemanlarının birleşiminden oluşmaktadır. İdeal bir kompozit kaplama için alt katman olarak PCC ve üst katman olarak HMA kullanılması önerilmektedir (Huang, 2004). Yüksek hacimli yollarda, yapısal ve işlevsel olarak esnek ve rijit kaplamalara kıyasla daha ekonomik olduğu ifade edilmektedir (Flintsch, Diefenderfer ve Nunez, 2008). Ayrıca, HMA sayesinde pürüzsüz ve konforlu bir yuvarlanma yüzeyi sağlanırken PCC ile güçlü bir taban sağlanmış olacaktır. Yapım tekniği olarak maliyetli bir kaplama türü olduğunu söylemek mümkündür.

Bu tür kaplamadaki beklenen performansın sağlanabilmesinde HMA ile PCC arasındaki bağın kalitesi etkilidir. Bu bağın bozulmasıyla kaplamada kayma, tabakalara ayrılma ve yukarıdan aşağı yönlü yüzey çatlaması gibi deformasyonlar meydana gelmektedir (Leng, Ozer, Al-Qadi ve Carpenter, 2008; Rahman, Ai, Xin, Gao ve Lu, 2017). Çizelge 2.3’de kompozit kaplama türünde meydana gelen yaygın deformasyonlar ve geoteknik bağlantıları özetlenmiştir.

Çizelge 2.3. Kompozit kaplamalardaki ana tehlikeler üzerindeki geoteknik etkiler
(Christopher ve diğerleri, 2006)

	Yansıma çatlağı	Pürüzlülük
Yetersiz temel rijitliği/mukavemeti	•	•
Yetersiz alt zemin rijitliği/mukavemeti		
Nem/drenaj problemleri	•	•
Donma/çözünme		•
Şişme		•
Kirlenme		
Erozyon	•	•
Üç boyutlu değişebilirlik		•

2.1.2. Temel ve alttemel tabakası

Temel tabakası, kaplama altında uzanan ve üst yapı tasarımında yapısal desteğin ilk aşaması olarak kabul edilen katmandır. Temel, esnek kaplama sistemlerinde taşıma kapasitesini artırmayı rijit kaplamalarda ise temel rijitliğini sağlamaktadır. Temel tabakası, yola gelen yükleri taşıyan ana bileşendir.

Temel tabakası, alt temel tabakasının olmadığı tasarımlarda alt zeminle malzeme geçişini önleyen bir yapı oluşturmaktadır. Kaplama yapısındaki nemin uzaklaştırılmasında da etkilidir ve oluşturulan drenaj sistemi servis ömrünü artıran önemli bir faktördür. Temel tabakasının yapımında malzeme olarak kırma taş, cüruf, çakıl gibi yüksek kaliteli agregalar tercih edilmektedir. Temel tabakasında gerekli niteliğe sahip olmayan malzeme kullanımı durumunda ise katkı malzemeleri ile kullanıma uygun gerekli performansı sağlayabilecek tabakalar haline dönüştürülmektedir. Temel tabakasının stabilize edilmesi aracılığıyla, üstyapının toplam kalınlığının azalması mümkün olmakta ve böylece daha ekonomik bir tasarım meydana gelmektedir.

Yol yüzeyine gelen yükler, temel tabakası tarafından dağıtılması ile alttemel tabakasında herhangi bir deformasyona izin vermeyecek nitelikte olmaktadır. Alttemel tabakası, temel tabakasını desteklemek amacıyla alt zemin üzerine yerleştirilen katmandır. Temel tabakasına göre daha düşük kalitede malzeme kullanımı tercih edilmektedir (Christopher ve diğerleri, 2006). Zemin tabakasının aksine uçucu kül, kireç, portland çimento veya bunların karışımından oluşan katkı maddeleri ile iyileştirilebilmeleri mümkün olmaktadır.

Rijit kaplamaların kullanıldığı üstyapı sistemlerinde ise her zaman temel tabakasının varlığından söz edilmemektedir. Çünkü alt zemin malzemesinin yeterli dayanıklılığı sağlayacak kalitede olmaması ve temel tabakası için gerekli nitelikleri sağlayan malzeme kaynağının ise uzak olması sebebi ile alttemel tabakası inşa edilmesi bir zorunluluk haline dönüşmekte ve maliyetin artmasında etkili olmaktadır. Bu tabakanın varlığı tasarımın maliyetini etkilemesi nedeniyle seçilecek kaplama türü ile mevcut malzeme ve çevre koşullarına göre değerlendirilmesi gerekmektedir.

Alttemel tabakasının esnek kaplamalarda kullanımının faydaları şunlardır:

- İnce taneli alt zemin malzemesinin temel tabakasına hareketini önler.
- Don dolayısıyla oluşacak zararlı etkilerin en aza indirilmesi sağlanır.
- Donmaya karşı duyarlı olan alt zemin üzerinde yalıtımı sağlar.
- Kaplama sistemine serbest suyun girişini önler.
- Taban zeminin yeterli mukavemete sahip olmadığı durumlarda, inşaat işlemleri için bir çalışma platformu sağlamaktır (Christopher ve diğerleri, 2006).

Su içeriğindeki değişimle bağlantılı olan hacim değişikliklerinin alt zeminde oluşturacağı zararlı etkiler ve deformasyonlar kaplama yüzeyine yansiyabilir. Alttemelin varlığı sayesinde yüzeyden sızan suyun tahliyesi ve dolgudaki suyun kılcallığı nedeniyle taban sırasına doğru yükselmesi sağlanır (Saltan ve Fındık, 2008).

2.1.3. Taban zemini

Taban zemini üzerine temel tabakalarının ve kaplama yüzeyinin inşa edildiği yol yatağıdır. Bu tabakanın amacı, kaplama tasarımına bir platform sağlayıp kaplama performansını etkileyecek değişkenlere karşı destek sağlamaktır (Christopher ve diğerleri, 2006).

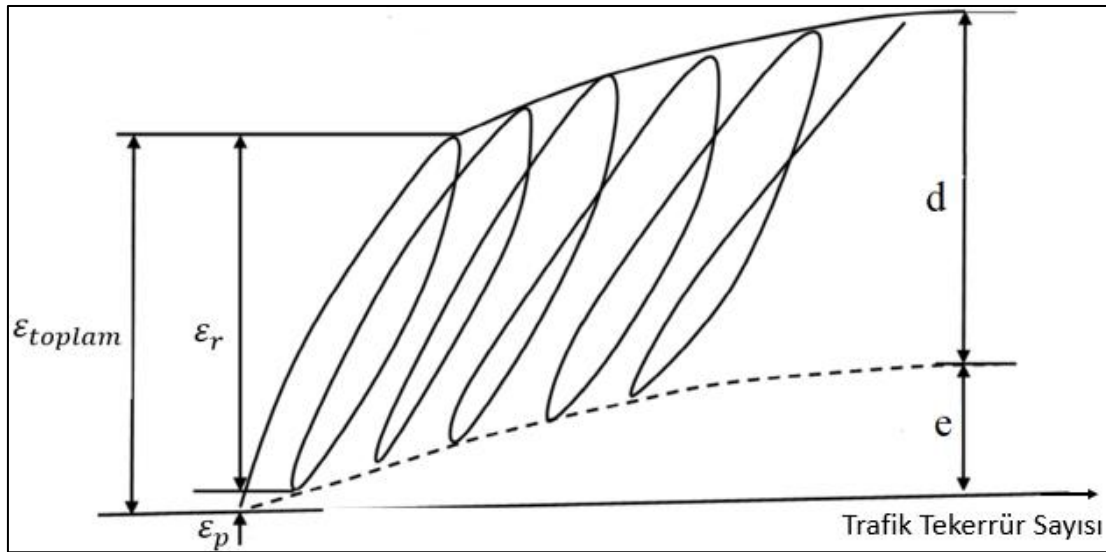
Yol üst yapısının performansı, büyük ölçüde hareketli yükler altındaki alt zeminin davranışına bağlı olarak değişmektedir. Alt zemin tabakası kaplama yapısının neden olduğu hareketlere karşı kararlı bir yapıda olması bu açıdan önemlidir. Düz zeminlerde veya yarmalarda bu tabaka doğal zemin olması nedeniyle özelliklerinin ve performansının iyileştirilmesi üst tabakalara müdahale edilerek sağlanabilmektedir. Ya da üst tabaka sıkıştırılarak mukavemeti artırabilmektedir.

2.2. Karayolunda Meydana Gelen Deformasyonlar

Üstyapıya aktarılan dinamik araç yükleri, üstyapı tabakaları içerisindeki nemin yetersiz drenajı, zayıf temel ve alttemel malzemelerinin seçimi, sert çevresel koşulların ve iklimsel değişikliklerin tümü, üstyapı bozulma hızının artmasına, çatlak ve tekerlek izleri oluşumuna neden olan etkenler arasında yer almaktadır (Lee ve Lauter, 2000; Lade, 2002; Uzan, 2004; Vallejo, Lobo-Guerrero ve Hammer, 2006).

Yol yapısına etki eden tekrarlı yükler, sabit yükler ve çevresel yüklerin yanında rüzgâr, deprem ve sıcaklık etkileri tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır. Ancak yollar tasarım ömrü boyunca en çok tekrarlı trafik yükleri nedeniyle yapısal veya işlevsel olarak zarar görmektedir. Ayrıca gün geçtikçe artan nüfusun lojistik ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla kullanılan karayolu üzerindeki trafik yükü de artmaktadır. Tekrarlı yüklere maruz kalan yol yapısında elastik ve plastik şekil değiştirme (deformasyon) şeklinde iki malzeme davranışı meydana gelir (Şekil 2.3). ε_r elastik deformasyonu ifade ederken ε_p ise plastik deformasyonu ifade etmektedir. Meydana gelen toplam deformasyonlar ε_{toplam} ise Eş. 2.1’de gösterildiği gibi hesap edilmektedir. Ayrıca Şekil 2.3’de geri kazanılabilir deformasyonu d ile toplam plastik deformasyonu ise e ile gösterilmektedir.

$$\varepsilon_{toplam} = \varepsilon_r + \varepsilon_p \quad (2.1)$$



Şekil 2.3. Tekrarlı yük sonucu birim şekil değiştirme eğrisi (Huang, 2004)

Granüler tabakalardaki tekrarlı trafik yükleri ile oluşan deformasyonların bir kısmı elastik iken bir kısmında ise plastik deformasyonlar meydana gelmektedir. Uygulanan yükler nedeniyle plastik deformasyona uğramış bir malzemenin üzerinden yükün kalkmasıyla meydana gelen şekil değiştirmelerin geri kazanılması mümkün değildir.

Kaplama tabakası ve/veya yakınında bulunan bölgede en büyük gerilmelerin meydana gelmesi nedeniyle bu tabakaların yüksek mukavemet değerine sahip olması beklenmektedir. Derin kısımlarda kaplama tabakasından iletilen gerilme değeri azalmakta olup üst yapıdaki stabilite değeri üzerinde olumsuz bir etki oluşturmayacak ve daha küçük mukavemet değerine sahip olacak şekilde tasarım yapılması mümkün olmaktadır (Gaetano, 2010).

Karayollarında meydana gelen bozulmaların yol yüzeyinde görünür hal almasında tüm tabakalarda meydana gelen deformasyonların birleşiminin etkili olduğu bilinmektedir. Tekerlek yükünün uygulanması sonucunda meydana gelecek etkiler ilk olarak asfalt tabakası ve bu tabakaya yakın bölümlerde gözlenmektedir. Bu tabakada düşey gerilmeler basınç etkisi hâkimken, yatay gerilmeler basınç durumundan çekme durumuna geçerek şekil değiştirmeler oluşturmaktadır. Bunun sonucu olarak kaplama tabakasındaki lastik/ kaplama etkileşimi ile yakından ilişkili olan tekerlek izi, yorulma çatlağı üstyapı bozulmasıyla ilgili en yaygın olan iki sorunu meydana getirmektedir.

Yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde yol yapısında oluşan problemlerin yalnızca alt zemin (taşıma kapasitesi) ile ilgili olmayıp yolun en üst kısmında meydana gelen bir deformasyonun aşağı doğru ilerlemesi ile meydana geldiği de belirtilmektedir. Meydana gelen deformasyonlar nedeniyle sürüş konforunun ve yol güvenliğinin azalmasına, bozulmuş yapıdan su ve malzeme geçişine, deformasyonların çevresindeki bölgelerde gerilme dağılımındaki yoğunluğun artmasına yol açmaktadır.

Deformasyonlar dolayısı ile yol pürüzlülüğü artmaktadır, oluşan boşluklara su birikintilerinin dolması nedeniyle kaplamaların performansını etkiler bu da lastik-kaplama arasındaki sürtünme kaybına yol açarak trafik kazalarına, yapısal bozulmalara neden olur (Bakhshi ve Arabani, 2018).

Genel olarak, yol yüzeyindeki bozulmaların varlığı sadece sürüş kalitesini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda trafik gürültü seviyesini de yoğunlaştırmaktadır. Şehirlerarası

yollarda fonksiyonel veya yapısal bozulmaların varlığı dolayısıyla, lastik ve kaplama etkileşimi tarafından üretilen yüksek ses basıncı seviyesi ile sonuçlanmakta ve kaplamanın pürüzsüzlüğünü azalttığı ifade edilmektedir (Khajehvand, Rassafi ve Mirbaha, 2021).

Yol yapısında yaygın olarak meydana gelen deformasyonlar sonraki bölümde açıklanmıştır.

2.2.1. Yorulma hasarı

Yorulma, yük tekrarları ve iklimsel etkilerden kaynaklanan üstyapının karşılaştığı en önemli sorunlardan biridir. Sürüş kalitesini ve güvenliğini önemli ölçüde etkileyen ve kaplamaların hizmet ömrünü azaltarak kaplama malzemelerinin ve yapılarının bozulmasına neden olmaktadır (Cocurullo, Airey, Collop ve Sangiorgi, 2008; Moreno-Navarro ve Rubio-Gámez, 2016).

Huang (2004), bir asfalt kaplamanın yorulması için temel kriter asfalt tabakasının tabanındaki maksimum çekme birim şekil değiştirmesi iken, alt zemin deformasyonundan kaynaklanan kalıcı deformasyon için temel kriter alt zeminin üstündeki maksimum basınç şekil değiştirmesi olduğunu ifade etmiştir.

Timsah sırtı çatlama

Tekrarlı trafik yüklerinin etkisiyle asfalt tabakası altında oluşan gerilmeler, malzemenin çekme dayanımından daha yüksek olması nedeniyle yük tekrarının artması sonucunda üst katmanlara doğru malzeme yorulma hasarına ve çatlamaya eğilim gösterir. Bir asfalt kaplamanın yorulması için temel kriter asfalt tabakasının altındaki çekme şekil değiştirmesinin maksimum olmasıdır. Verilen bilgiler ışığında yorulma çatlamaının meydana gelmesi için üst yapının yorularak zayıflaması, çok sayıda yüklemeyle ağır taşıtların geçişi gereklidir. Başlangıçta sınırlı sayıda olan çatlaklar üst yapıdaki yorulmanın yoğunlaşması ile artacaktır. Keskin açılara sahip çatlakların boyutları 0,3 metreden daha kısa uzunluklara sahip olması şartıyla zamanla “timsah çatlamaı” terimi yani “yorulma çatlamaı” olarak adlandırılmaktadır (Qiao, 2015).

Boyuna çatlama

Kaplama yapısında meydana gelen diğer bir çatlak türü olan boyuna çatlaklar ise kaplama merkezinde bir veya birbirine paralel birkaç çatlağın varlığı şeklinde gözlemlenmektedir. Bu deformasyon ise sıcaklık değişimi ile asfaltın gösterdiği davranış biçimi dolayısıyla ortaya çıkar. Çünkü asfalt malzemesi düşük sıcaklıklarda büzülerek sertleşir. Sertleştiğinde rijit bir hal alan asfalt çatlamağa karşı hassas bir hale gelir. Boyuna olarak meydana gelen çatlaklar genellikle çevresel etkenlere bağlı olsa da tekerlek geçiş bölgesinde meydana gelen bu çatlaklar trafik yüküne de bağlıdır (Casey, Collop, Airey ve Grenfell, 2012a).

2.2.2. Enine çatlama

Termal değişimler dolayısıyla da çatlak oluşumu ve yayılması meydana gelmektedir. Günlük, mevsimsel ve yıllık sıcaklık farkının fazla olduğu bölgelerde termal çatlakların görülme olasılığı artmaktadır. Sıcaklık değişiminin en fazla etkilendiği kaplama tabakasında gerilmeler maksimum düzeyde olması sonucunda çatlaklar yüzeyde başlayıp yerçekimi doğrultusunda hareketine devam etmektedir. Düşük sıcaklığa bağlı olarak soğuk iklimlerde büzülme nedeniyle ve termal etkilerle meydana gelen türleri vardır.

2.2.3. Tekerlek izi oluşumu

Tekerlek izi, kaplama tabakasında tekerlek yolu boyunca yüzeyde girinti halinde meydana gelen deformasyon şeklidir. Her yük tekrarında plastik deformasyon birikerek sonunda kaplamada tekerlek izi oluşmasına neden olmaktadır. Yüzeydeki kümülatif kalıcı deformasyonun, tekerlek izine katkıda bulunan birkaç katman arasında, bir kaplama yüzeyinin tekerlek izi derinliğinin çoğundan sorumlu olduğu kabul edilmektedir (Fang, Haddock, White ve Hand, 2004).

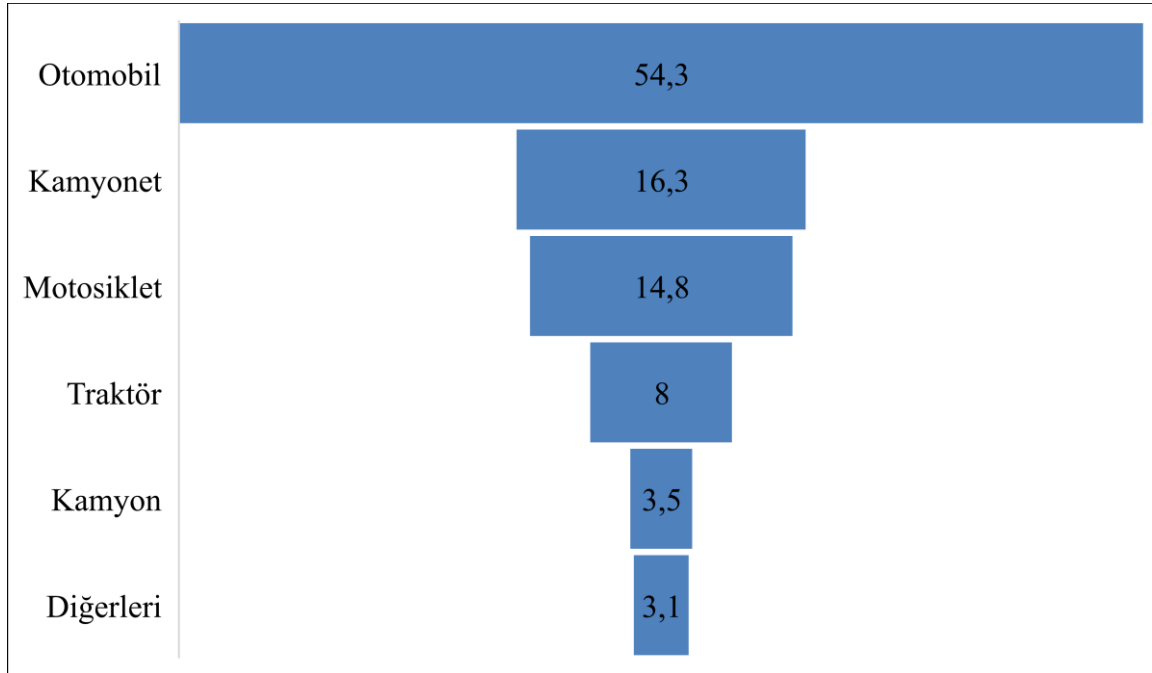
Tekerlek izi asfalt kaplamaların performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve kalıcı kaplama deformasyonuna neden olan yük tekrarının sonucu olarak meydana gelir. Yeteri kalınlığa sahip olmayan kaplama tabakasının tekerlek izi potansiyeli yüksektir. Sonuç olarak tekerlek izi, kaplama ömrünü kısaltmakla kalmaz, aynı zamanda karayolu güvenliğini de riske atar (Etxeberria, Gonzalez-Corominas ve Pardo, 2016).

2.3. Karayoluna Etki Eden Dinamik Araç Yükleri

Kaplama sistemine tekerlekler aracılığıyla aktarılan statik ve dinamik araç yükleri, üst yapıda tekerlek izi ve yorulma çatlakları gibi bozulmalara neden olan ana faktör olarak kabul edilmektedir.

Karayollarının deformasyonunu en çok etkileyen faktörlerden biri şüphesiz üzerindeki dinamik yüküdür. Bu yük ülkemizde trafiğe kayıtlı toplam 24 milyon taşıt tarafından doğrudan veya dolaylı olarak karayollarına uygulanmaktadır. Şekil 2.4’de gösterildiği üzere Temmuz 2023 itibarıyla trafiğe kayıtlı araçların %54,3’ünü otomobil, %16,3’ünü kamyonet, %14,8’ini motosiklet, %8’ini traktör, %3,5’ini kamyon, %3,1’i minibüs ve geri kalanını otobüs ile özel amaçlı taşıtlar oluşturmaktadır (TÜİK, 2023b).

Dinamik yükler, yol üzerinden geçen aracın ağırlığına, taşıt tipine, taşıtın tekerleklerinin yerleşim planına, yolun pürüzlülüğü vb. gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca dinamik yükler doğası gereği zamanla değişkenlik göstermektedir.



Şekil 2.4. 2023 yılı trafiğe kayıtlı taşıt dağılımı (TÜİK, 2023b)

Özellikle karayolunda yük ve yolcu taşımacılığı yapan araçların oluşturduğu deformasyon fazla olduğu için bunların yükleri ile ilgili sınırlamalar Araçların Yüklenmesine İlişkin Ölçü ve Usuller ile Tartı ve Boyut Ölçüm Toleransları Hakkında Yönetmelik tarafından

belirlenmektedir. Örneğin araçların azami genişliği 2,55 metreyi aşmaması yüksekliği ise en fazla 4,00 metre olması gerekmektedir. Bunun yanında uzunluklarının da türlerine göre 12 ile 22 metre arasında olması da gerekmektedir. Bu tür araçların karayoluna zarar veren ağırlığın altında olması ve araç türlerine göre 10 ile 44 ton arasında ağırlığa sahip olması istenmektedir (Resmî Gazete, 2012).

Karayollarını kullanan araçlar Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından dingil mesafesi veya dingil sayısına göre beş sınıfa ayrılarak köprü ve otoyolları bu sınıflara göre ücretlendirilmektedir. Bunlar;

1. Aks aralığı 3,20 metre altında olan araçlar,
2. Aks aralığı 3,20 Metre ve üzerinde olan her türlü 2 akslı araçlar,
3. Aks adedi (dingil sayısı) 3 tane olan her türlü araçlar,
4. Dingil sayısı 4 ve 5 adet olan her türlü araçlar,
5. Dingil sayısı 6 ve daha fazla olan kamyon treyler vb. araçlardır.

Kara yollarında en fazla deformasyon yapan kamyonlar en üst sınıfta yer alarak en yüksek geçiş ücreti ile karayollarını kullanmaktadır.

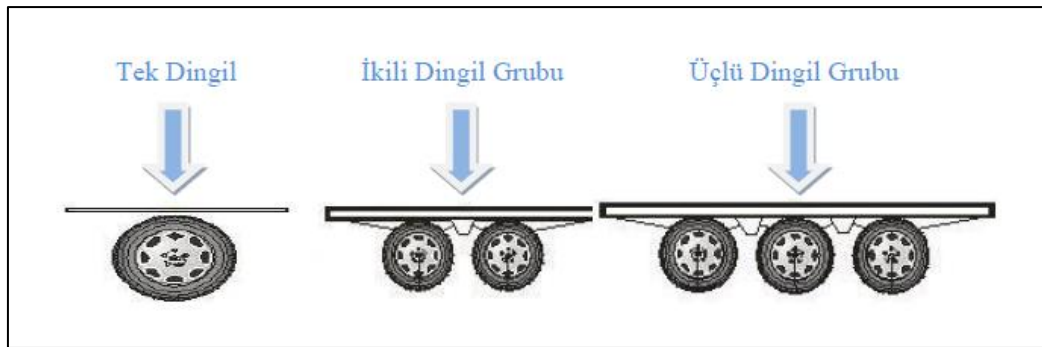
2.3.1. Ağır taşıt trafiğinin belirlenmesi

KGM, Karayollarında Ağır Taşıt Trafiğinin ve Yük Taşımacılığının Özellikleri ve Eğilimleri (2022), çalışmasında 2015-2020 yıllarına ait toplam 550 noktada etüde alınan 112 691 ağır taşıta ait anket ve tartım sonuçları değerlendirilmiştir. Etüde tabi tutulan ağır taşıtların dingil sayısı, dingil ağırlığı ve mesafeleri gibi hususlara dikkat edilmiştir. Elde edilen veriler sonucunda yük taşıyan ağır taşıtlar için yük miktarı (ton), yolcu taşıyan otobüsler için yolcu sayısına bağlı değerler elde edilmiştir. Çizelge 2.4’de karayollarında yük taşımacılığında kullanılan ağır taşıt türünün yıllara göre değişimi verilmiştir. Buna göre 2005 yılında kamyonların karayolu yük taşımacılığındaki payı %76 iken, 2020 yılında bu pay azalarak %30’lara gerilemiştir. Kamyon+römork- çekici+yarı römorkların 2005 yılında yük taşımacılığındaki payı %24 iken, 2020 yılında %70’lere çıkmıştır. Bunun nedeni olarak kamyonlardan daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olmaları nedeniyle kamyon+römork ve özellikle çekici+yarı römorklara doğru yönelim meydana gelmiştir. Son yıllarda meydana gelen değişiklik dikkate alınarak çalışmada buna uygun taşıt modeli kullanılmıştır.

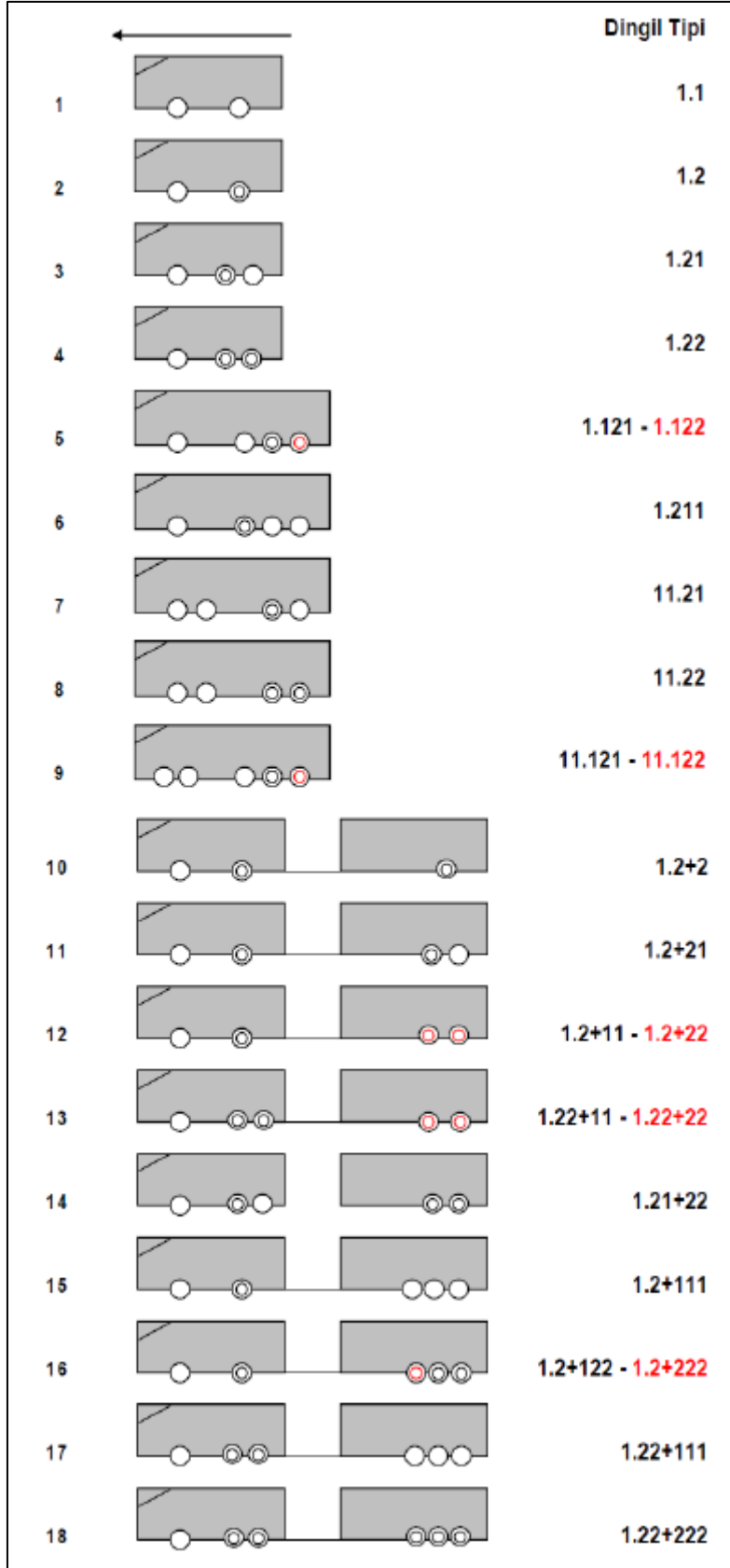
Çizelge 2.4. Yılları göre karayolu yük taşımacılığının taşıt sınıflarına göre dağılımı (KGM, 2022)

Yıllar	Kamyon (milyon ton) (km)	Oran (%)	Kamyon+Römork- Çekici+Yarı Römork (milyon ton) (km)	Oran (%)	Toplam (milyon ton) (km)	Yıllık Artış Oranı (%)
2005	127 297	76	39 534	24	166 831	6,4
2006	130 853	74	46 547	26	177 400	6,3
2007	128 751	71	52 579	29	181 330	2,2
2008	124 190	68	57 745	32	181 935	0,3
2009	107 622	61	68 833	39	176 455	-3,0
2010	103 477	54	86 888	46	190 365	7,9
2011	103 020	51	100 052	49	203 072	6,7
2012	103 552	48	112 571	52	216 123	6,4
2013	105 399	47	118 649	53	224 048	3,7
2014	95 238	41	139 254	59	234 492	4,7
2015	91 202	37	153 127	63	244 329	4,2
2016	91 580	36	161 559	64	253 139	3,6
2017	81 834	31	180 905	69	262 739	3,8
2018	81 076	30	185 426	70	266 502	1,4
2019	82 086	31	185 493	69	267 579	0,4
2020	81 770	30	191 143	70	272 913	2

Yapılan etüt çalışmalarında karşılaşılan dingil tipleri tek (single), ikili (tandem) ve üçlü (tridem) dingil gruplarının görselleri Şekil 2.5’de verilmiştir. Yine etüt çalışmalarının sonuçlarına göre etüt kapsamına alınan kamyonların %36,3’ünün dingil tipinin 1.22, %23,9’unun 1.2 ve %18,6’sının 1.122 dingil tipi olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2.5. Etütlerde Karşılaşılan Dingil Grupları (Karayollarında Ağır Taşıt Trafikinin ve Yük Taşımacılığının Özellikleri ve Eğilimleri, 2022)



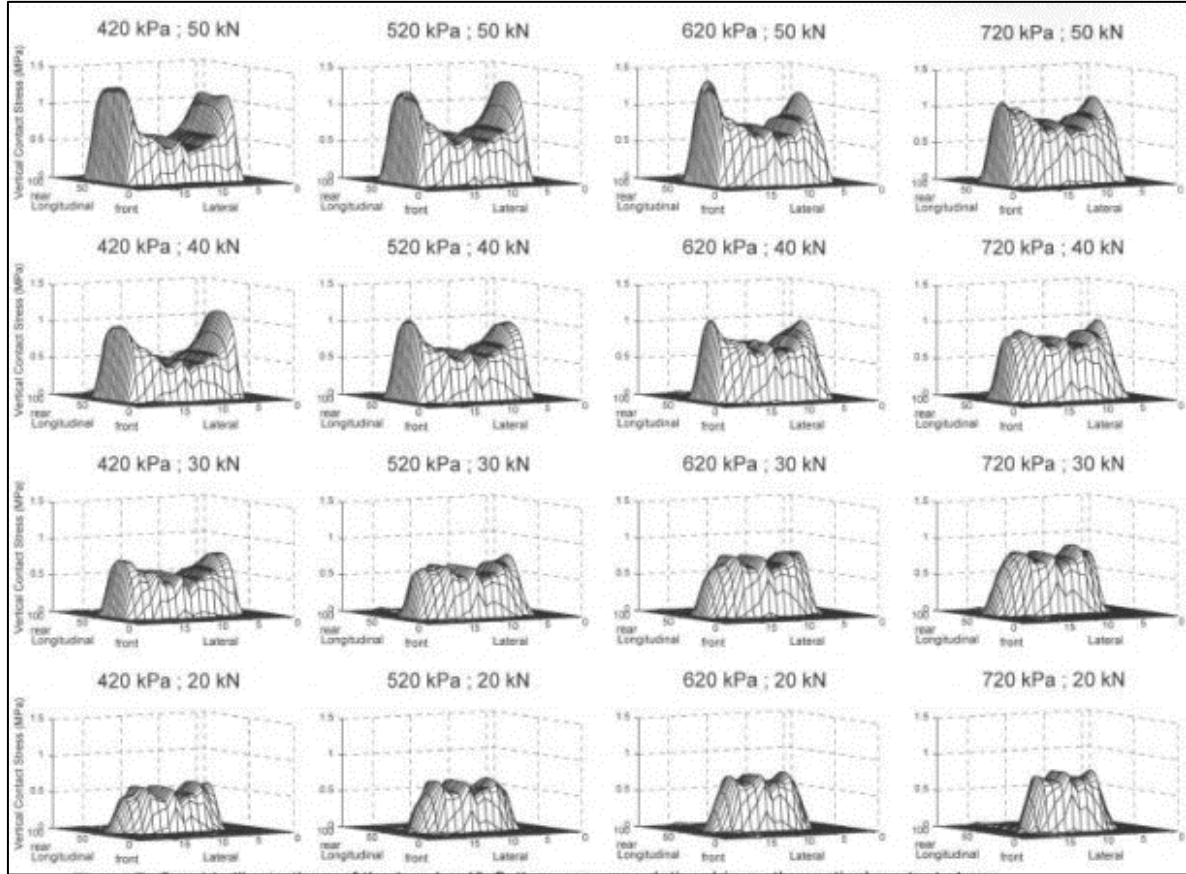
Şekil 2.6. Dingil Tipleri (Karayollarında Ağır Taşıt Trafikinin ve Yük Taşımacılığının Özellikleri ve Eğilimleri, 2022)

Ayrıca karayolu taşımacılığında en çok kullanılan ağır taşıt tiplerinden kamyon+römork çekici+yarı römorklar grubu için ise en çok kullanılan dingil tipinin %97,6 ile 1.2+111 olduğu ifade edilmiştir (Şekil 2.6). Hafif araçlar her iki ucunda bir tekerlek bulunan iki dingile sahiptir. Ancak otobüsler, kamyonlar, yarı römorklar ve trenler gibi ağır ticari araçlar, önde her iki ucta birer teker olmak üzere tek dingile, çift tekerli tek dingile veya çift tekerli tandem dingile, çift tekerli veya dörtlü üç dingile sahiptir (Bodhinayake, 2008).

Taşıtlar üzerindeki yükler, dingiller ve tekerlekler sayesinde yol yüzeyine aktarılmaktadır. Bu nedenle farklı dingil ve tekerlek tiplerine sahip araçların yolda meydana getireceği gerilme-deformasyon etkileri de farklı olacaktır.

2.3.2. Tekerlek yükü ve temas alanının belirlenmesi

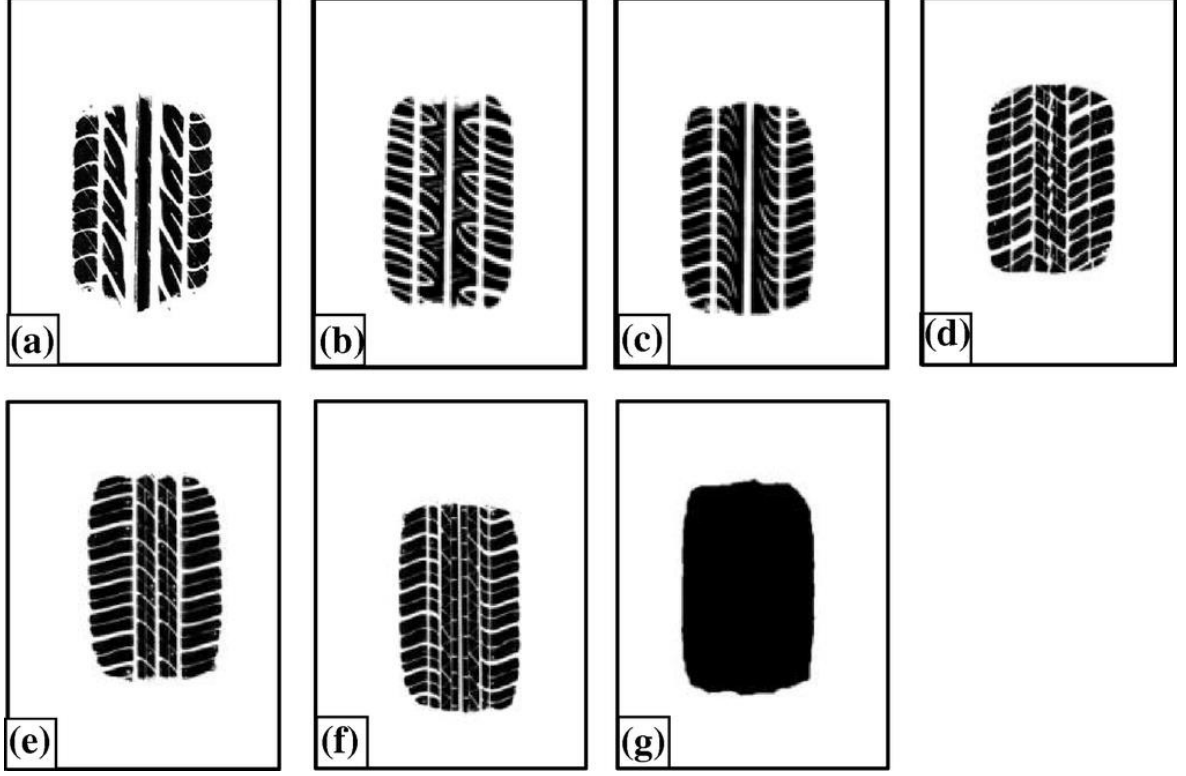
De Beer ve Fisher (1997), lastiğin düşey temas gerilme dağılımını şişirme basıncı ve yük ile ilişkisini incelemek amacıyla tekerlek yükünün sabit şişirme basıncında artırıldığı ve lastiğin nerede olduğuna yönelik Araç-Yol Yüzey Basınç Dönüştürücü Dizisi (VRSPTA) ile birkaç test yapıp sabit yük koşullarında şişirme basıncını incelenmiştir. Test sonuçlarına göre (Şekil 2.7) yükteki bir artış lastik kenarlarındaki temas gerilmelerinde bir artışa neden olurken, şişirme basıncındaki bir artış ise lastik merkezindeki temas gerilmesinde artışa neden olmuştur. Bu nedenle lastik/kaplama temas gerilmesi hem şişirme basıncı hem de lastik yükünü içerdiği tespit edilmiştir.



Şekil 2.7. Yavaş hareket eden bir aracın düşey temas gerilmesi dağılımları üzerindeki lastik yükü/şişirme basıncı ilişkisinin grafik çizimleri (De Beer ve Fisher, 1997)

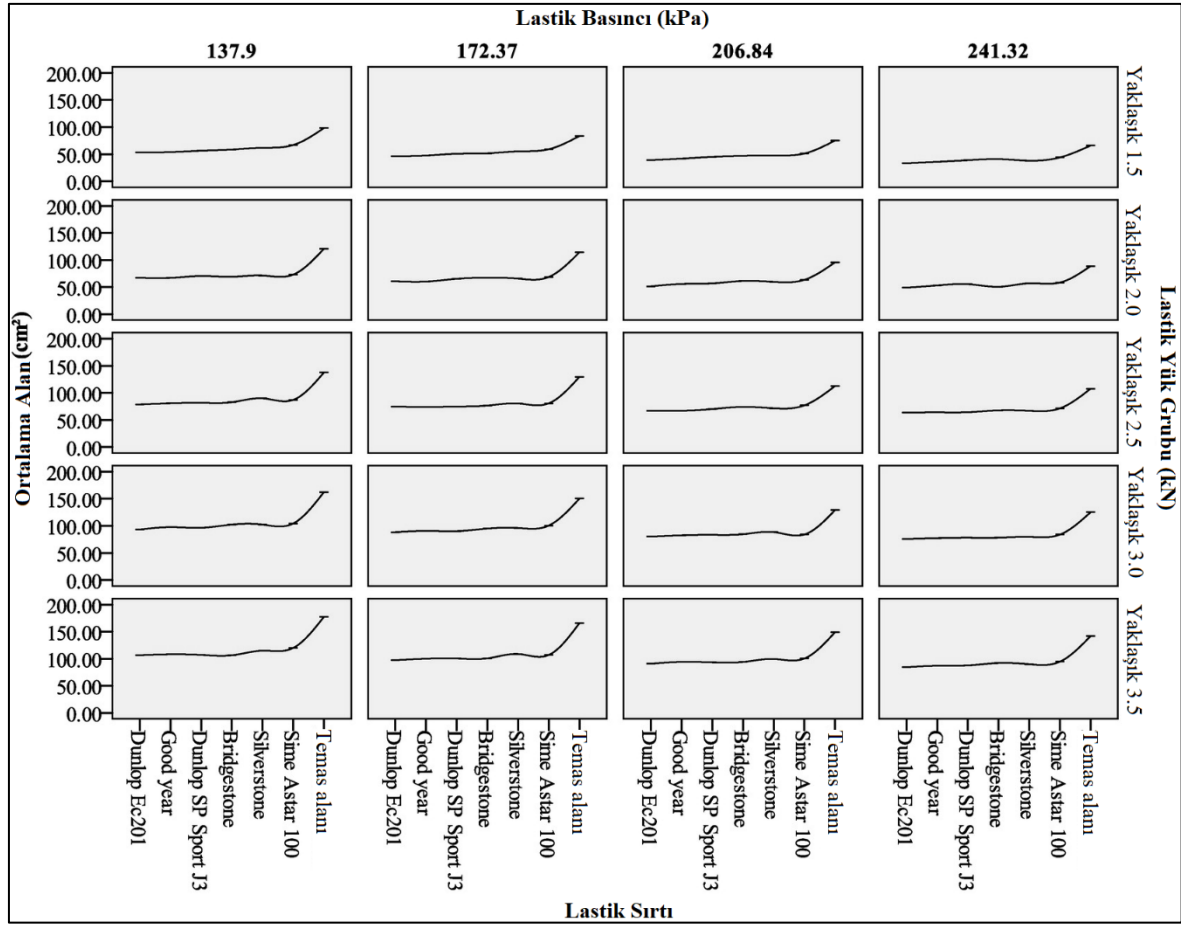
Moazami ve Muniandy (2018) tarafından temas gerilmesi ve kaplama hasarı arasındaki ilişki üstel olması nedeniyle lastik temas alanları arasındaki küçük bir farkın bile kaplama hasarı açısından önemli farklılıklara yol açtığı ifade edilmiştir. Bu çalışmada tam temas alanına (TCA) göre gerçekçi lastik-kaplama temas alanının (ECA) neden olduğu hasarı ölçmüşlerdir. Döner kompaktör ve tekerlek izleyici ekipmanı kullanılarak üç lastik yük grubunda farklı temas alanlarının kalıcı deformasyon profilleri elde edilmiş, lastik sırtı olan ve olmayan lastikler arasında çeşitli yönlerden bağlı hasar analizleri yapılmıştır. Bu nedenle lastik sırt desenlerinin, lastik yük (TL)'lerinin ve lastik şişirme basıncı (TIP)'lerinin çeşitli kombinasyonları için gerçekçi lastik-kaplama temas alanları ölçülmüştür. 155/70R12 binek otomobil lastiği için etkili lastik temas alanları tespit edilmiştir. 12 inçlik lastik, binek otomobiller için en küçük lastik boyutu olduğundan, döner kompaktör ve tekerlek izleyici ekipmanı tekerlek takip kolunun içine takılabileceği için bu boyut seçilmiştir. Çeşitli lastik sırtı desenlerinin ECA'larını karakterize etmek için Şekil 2.8'de verilen lastik sırtı görselleri elde edilmiştir. Bu izler beş farklı yük değerinde ve dört farklı şişirme basıncı değerinde hesaplanmıştır. Elde edilen lastik izleri görselleri ECA'ları hesaplamak için MATLAB

tabanlı doğrulanmış bir görüntü işleme programına yüklenmiştir. Sırt deseni, TL ve TIP ile lastik temas alanlarının varyasyonları incelenmiştir ve birkaç regresyon modeli kurulmuştur.



Şekil 2.8. Lastik baskı örnekleri (a): Dunlop Ec201; (b): Dunlop SP Sport J3; (c): Sime Astar 100; (d): GPS2; (e): PBZ1800; (f): B250; ve (g): Worn-out tread (Moazami ve Muniandy, 2018)

Şekil 2.9’da verilen grafikler incelendiğinde farklı TL değerlerinde ve TIP seviyelerinde neredeyse lineer bir davranış etkin olduğu görülmektedir. Bu lineer davranış eğilimi dolayısıyla gerçek lastik temas alanı, TL ve TIP arasındaki ilişkinin değerlendirilmesinde basit doğrusal modelin uygun olacağı değerlendirilmiştir.



Şekil 2.9. Farklı lastik dişleri, TL'ler ve TIP'ler için temas alanı varyasyonları (Moazami ve Muniandy, 2018)

Park, Fernando ve Leidy (2005) diğer çalışmalarda olduğu gibi tekerlek yükünün temsili için düzgün dairesel bir düşey temas gerilmesi modeli tercih etmişlerdir. Ancak yapılan deneysel çalışmalar ve gerçek yükleme koşulları da dikkate alındığında temas gerilmesinin lastik yapısı, lastik yükü ve lastik şişirme basıncına bağlı olduğunu göstermiştir. Çalışma kapsamında California Üniversitesi'nde yürütülen başka bir çalışmadan lastik temas basıncı ölçümleri elde edilmiştir. Dört lastik üzerindeki temas basıncı ölçümleri, çeşitli lastik yüklerinde ve lastik şişirme basınçlarında ölçülen lastik temas basınçlarının girilmesine izin veren bir 3D sonlu elemanlar programı ile kaplamanın tepkisini tahmin etmek için kullanılmıştır. Bu çalışmada 3D sonlu elemanlar modeli geliştirilmiş ve 3D lastik temas gerilmelerinin tahmini, kaplama ömrü ve Mohr-Coulomb göçme kriteri değerleri üzerindeki etkisini araştırmak farklı analiz metotları kullanmışlardır.

Xia ve Yang (2012) lastik/zemin etkileşimi için üç boyutlu bir sonlu elemanlar modeli oluşturmuşlardır. Lastik malzemesi rijit bir tekerlek olarak modellenmesinin aksine

sıkıştırılmaz hiperelastik olarak modellenmiştir. Dinamik lastik/arazi etkileşim modelinin hareketli araç nedeniyle dinamik zemin tepkisini tahmin etmek için kullanılabileceğini göstermek için çok sayıda simülasyon ABAQUS’de gerçekleştirilmiştir. Lastiğin sahip olduğu şişme basıncı değerine bağlı olarak temas alanı değişmiştir. Daha düşük lastik şişirme basıncına sahip olan tekerlekte temas alanının daha fazla olduğu görülmüştür. Artan lastik şişirme basıncı ile temas alanının azaldığı aynı zamanda şişirme basıncı arttığında düşey yer değiştirmenin azalacağı ifade edilmiştir

Al-Qadi, Loulizi, Janajreh ve Freeman (2002) tarafından farklı lastik türleri için yapılan deneysel çalışma sonucunda yüksek şişme basıncına sahip olan radyal lastiklerin HMA tabakası altındaki gerilmeyi azalttığı ifade edilmiştir. Ayrıca geniş tabanlı tek lastiklerin kaplamaya çift lastiklerden daha fazla zarar verdiği görülmüştür. Lastiklerin dış genişliklerinin ve şişme basınçlarının önemli olduğu vurgulanmıştır.

Saad, Mitri ve Poorooshab (2005) geleneksel esnek kaplama sistemlerindeki tek tekerlekli trafik yüklerine karşı dinamik tepkisini kaplama tasarım kriterleri, yani asfalt beton tabakasının altındaki yorulma birim deformasyonu ve alt zemin malzemesi üzerindeki tekerlek izi birim deformasyonu açısından incelemişlerdir. Yol yüzeyindeki tekerleğin modellenmesinde ise lastik dış kaplamasının sertleştirme etkisinin ihmal edilebileceği bu nedenle yoldaki temas basıncının lastik basıncına eşit olduğunu varsaymışlardır.

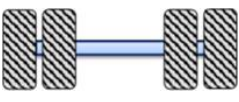
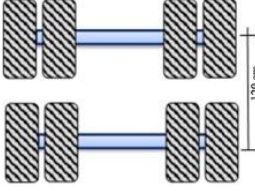
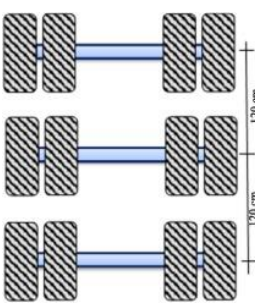
Weissman (1999), lastik izlerinin ve ölçülen lastik-kaplama temas gerilme dağılımı analizine bakıldığında temas alanının şekli yüke, lastik basıncına bağlı olduğu ve temas gerilme dağılımının üniform olmadığını ifade etmiştir. Aynı zamanda üniform olmayan temas gerilmesi dağılımı, üniform gerilme dağılımı durumuna göre kaplamada önemli ölçüde daha büyük gerilmelere yol açtığı görülmüştür. Ayrıca aşırı yüklü lastikler için temas alanının dikdörtgen olduğu ve temas genişliğinin uygulanan yükten bağımsız bir lastik özelliği olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle, yükü dairesel bir alan üzerinde düzgün dağılmış bir gerilme olarak tahmin etmek çatlakların enine veya boyuna yönüne ilişkin hatalı tahminlere yol açabileceği ifade edilmiştir.

Yoo, Al-Qadi, Elseifi ve Janajreh (2006), çalışmalarında lastiğin hareketi sırasında, kaplamaya iletilen gerilmelerin değişkenlik göstereceği ve lastiğin merkezinde en fazla, kenarlarında ise en az olması beklendiği ifade edilmiştir. Büyüklük olarak düşey gerilmeden

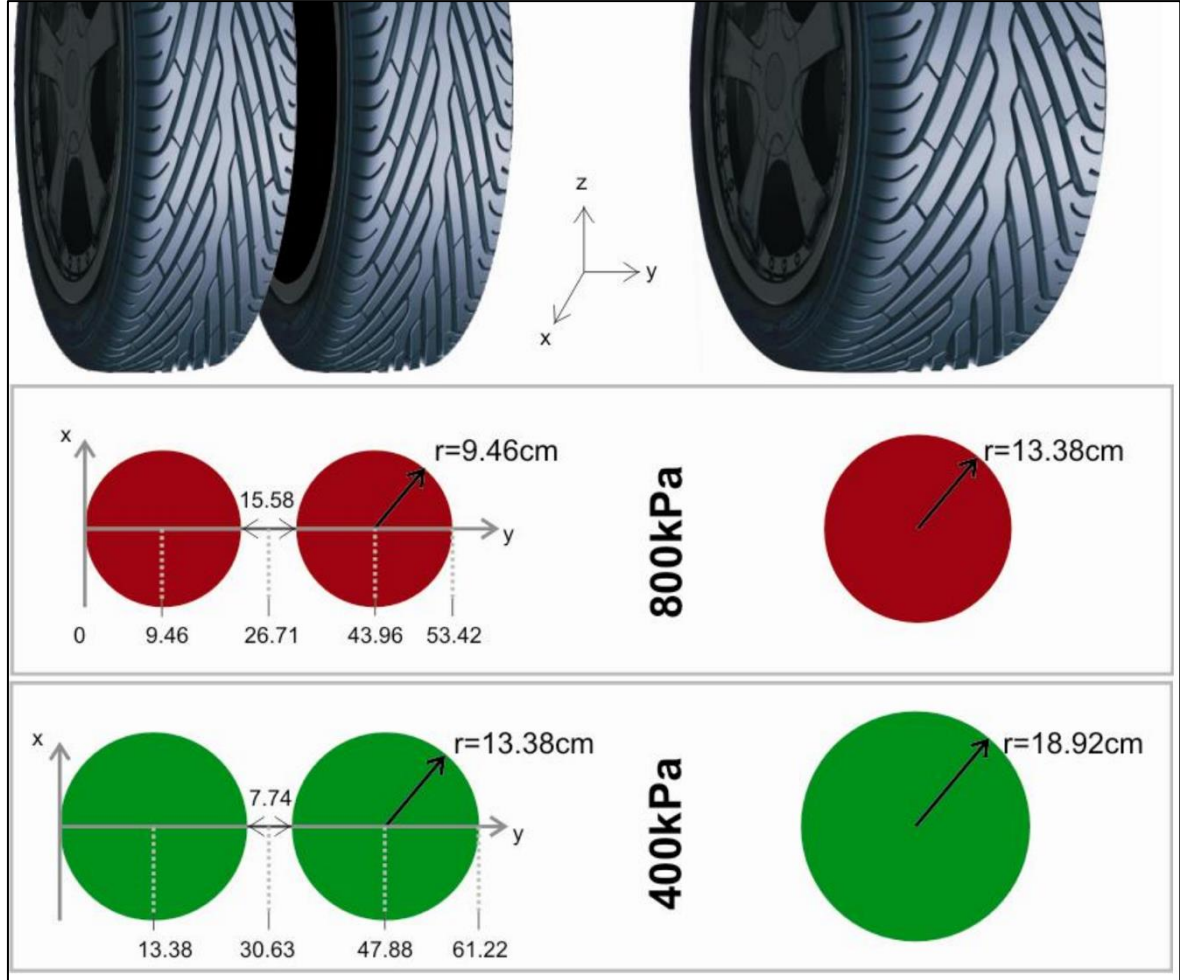
çok daha küçük olmasına rağmen, enine ve boyuna temas kesme gerilmeleri de lastik basıncı nedeniyle oluşacağını ve kaplama yüzeyindeki gerilmelerin durumunu etkileyebileceği de ifade edilmiştir.

Patel ve diğerleri (2022), farklı aks yükü konumları ve dingil mesafesi özellikleri altında sonlu elemanlar metodu kullanarak beton kaplamalarda meydana gelen eğilme gerilmesi değişimini incelemiştir. Rijit üstyapının modellenmesi KENPAVE yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üst yapının modellenmesi yapılırken hem aks yükü hem de sıcaklık farkının meydana getireceği etki dikkate alınmıştır. Dingil tasarımında Tek Dingil Tek Teker, Tek Dingil Çift Teker, Tandem ve Tridem dingil türleri için sayısal veriler verilmiştir. Farklı kaplama kalınlıkları, elastisite modülü, sıcaklık değerleri gibi koşullarda, mevcut alt zemin, temel ve dingil konumu özellikleri için maksimum çekme gerilmesi değeri ve aks konum değişimi hakkında bilgi verilmiştir. Çizelge 2.5’de farklı dingillere sahip araçlar için yük ve konum bilgileri verilmiştir. Lastik izinin şekli, Kaplama yüzeyiyle temas halinde olduğunda dikdörtgen değildir fakat yazılımlarda tekerlek yükü için dikdörtgen temas alanı kullanılır.

Çizelge 2.5. Aks konum görseli ve yük değerleri (Patel ve diğerleri, 2022)

Aks tipi	Analiz için yapılandırma	Aks yükü	Temas basıncı
Tek aks tek teker		72 kN	700 kPa
Tek aks çift teker		108 kN	700 kPa
Tandem aks		216 kN	700 kPa
Tridem aks		264 kN	700 kPa

Brito (2011), Birleşik Krallıkta yaygın olarak kullanılan tipik kamyonları temsil eden taşıtlar üzerinde deneysel çalışmalar yapmıştır. 45 kN'luk tekerlek yüklerinin lastik basıncında dairesel alanlara dağıtılmasıyla eşdeğer yarıçaplar elde edilmiş olup, dairesel yükler için Kenlayer modülleri kullanılmıştır. Şekil 2.9'da gösterildiği gibi lastik genişliği olarak dairesel alanın çapı alınmıştır. Ayrıca bu şekle bakarak lastik şişirme basıncının lastik temas alanını etkilediği ve yüksek şişirme basıncında temas alanının azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 2.9. Dairesel yüklü tekerlek alanları (Brito, 2011)

2.3.3. Lastik şişirme basıncı ile düz lastiğin temas gerilmesi arasındaki temel ilişkiler

Lastik ve yol yüzeyi arasındaki düşey temas gerilmesini ölçmek için literatürde çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerin çoğu ortalama düşey temas gerilmesini elde etmek için lastik izini kullanarak temas alanının ölçülmesi ve ölçülen düşey yükün bu alana bölünmesi gibi oldukça basit bir yaklaşıma dayanmaktadır. Bu yöntemin çeşitli eksiklikleri bulunmakta olup ilki gerilmenin temas alanı üzerinde eşit olarak dağıldığı varsayıldığından,

yalnızca “ortalama” gerilme elde edilir. İkincisi ise, böyle bir analizde lastik sırt deseni her zaman dikkate alınmaz. Ancak bu durum gerilme hesaplanmadan önce lastik izi içindeki sıfır temas alanlarını çıkararak ölçülen toplam alanı etkin alana indirgeyerek hesaba katılabilir (Van Vuuren, 1974). Bu yöntem literatürde geniş çapta uygulanmış ve günümüzde çoğu kaplama tasarım yöntemi, lastik şişirme basıncına eşit olan ortalama veya düzgün dağılmış düşey gerilme varsayımına dayanmaktadır. Bu yaklaşım, nispeten kalın (>100 mm) asfalt kaplama ve temel katmanlarının tasarımı ve analizi için yeterli olabilir ancak ince kaplama tasarımlarında, bu varsayımın daha fazla doğrulanması gerektiği ifade edilmiştir. Van Vuuren (1974), kamyon lastikleri için ortalama düşey temas gerilmesinin şişirme basıncından daha düşük olduğunu ve Eş.2.2’de denklemden hesaplandığını belirtmiştir.

$$q = 0.61p + 145 \quad (2.2)$$

Eş. 2.2’de q ortalama düşey temas gerilmesini (kPa) ve p ise lastik şişirme basıncını (kPa) göstermektedir. Bu yöntem tarafından asıl düşey gerilmeyi göz ardı etmesi dolayısıyla kullanımı tavsiye edilmemiştir. Bunun yerine, lastik yükü bilinmiyorsa, farklı yüzdelik tasarım değerlerinde Çizelge 2.6’da cross /bias ply lastikler için yeni geliştirilen bağıntıların (yalnızca şişirme basıncı dahil) kullanılması önerilmektedir. Burada önerilen tasarım yüzdelik yaklaşımı Theyse, De Beer ve Rust (1996), tarafından önerilen yapısal tasarım güvenilirliğine yönelik benzer bir yaklaşımla bağlantılıdır. Eş. 2.3’de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

Çizelge 2.6. Farklı tasarım yüzdelik değerlerinde lastik şişirme basıncı ile dikey lastik temas gerilmeleri arasında önerilen ara tasarım ilişkileri (De Beer ve Fisher, 1997)

Tasarım Yüzdesi (%)	A	B (kPa)	Tasarım Temas Gerilmesi (kPa)
50	0,730	174	700
80	0,690	296	800
90	0,723	310	840
95	0,746	311	860
Van Vuuren (1974)	0,61	145	590
Maximum	0,833	312	920

$$q = Ap + B \quad (2.3)$$

Eş. 2.3’de q , tasarım temas gerilmesini (kPa) ve p ise lastik şişirme basıncını (kPa) göstermektedir. A ve B tasarım yüzdesine bağlı sabitlerdir. Ayrıca Çizelge 2.6’ya bakıldığında tasarım yüzdelik değeri ne kadar yüksek olursa, beklendiği gibi üst yapı tasarımı amaçları için kullanılacak düşey temas gerilmesinin de o kadar yüksek olduğu görülmektedir.

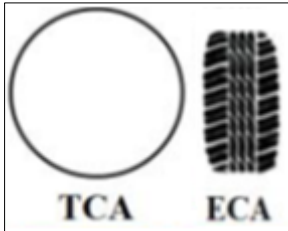
Yapılan deneysel çalışma sonucunda lastik dişleri, lastik yükleri ve lastik şişirme basınçlarının tüm kombinasyonları üzerinden Eş. 2.4 ve 2.5 elde edilmiştir. Şekil 2.10’da TCA ve ECA görselleri verilmiştir.

$$ECA = 0,58FCA \quad (2.4)$$

$$ECA = 0,52TCA \quad (2.5)$$

AASHTO (1993), modeli Eş. 2.4 ile Eş. 2.5 kullanılarak hem TCA hem de ECA için geleneksel metot TCA için Eş. 2.6’da verilen denklem kullanılmıştır.

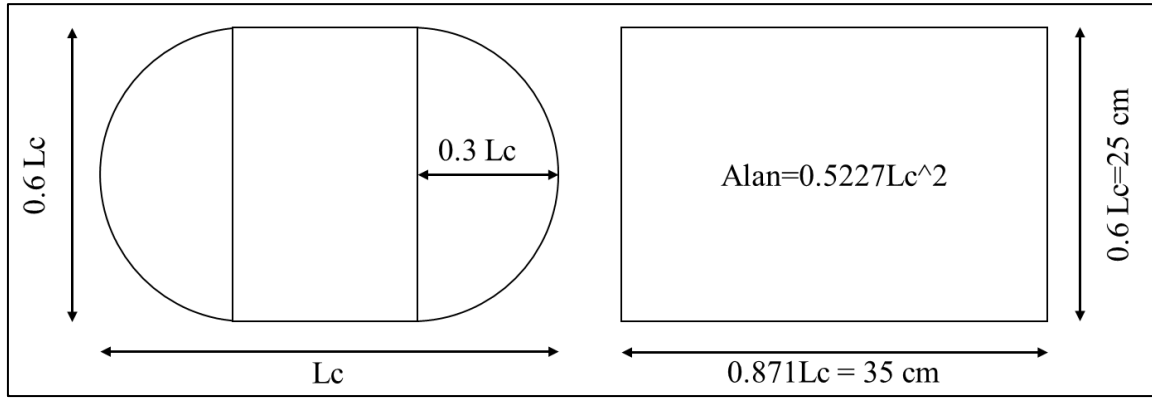
$$TCA = TL / TIP; \quad r = \sqrt{TCA/\pi} \quad (2.6)$$



Şekil 2.10. TCA VE ECA görselleri

Geçmişten günümüze kaplama sistemlerinin analizinde, lastik yüklemesi düzgün temas basıncına sahip dairesel alan üzerine etki ettiği düşünülerek tasarımı ve sayısal analizleri yapılmaktadır. Ancak son yıllarda kabulü yapılan bu tasarım ve sayısal analiz ilkesine ek olarak kaplamanın gerilme dağılımı üzerinde lastik tipi, araç yükü ve şişirme basıncının da etkili olduğu tespit edilmiştir. Lastik izleri kaplama yüzeyiyle temas halinde bulunması dolayısıyla yapılan çalışmalarda lastik kaplama temas alanı dikdörtgen, kare veya elips şeklinde modellenmektedir.

Huang (2004) lastik temas alanının simüle edilmesinde bir dikdörtgen ve iki yarım daireden oluşan şeklin basitleştirilmesini önermiştir. Basitleştirilmiş şekil $0,6 L$ genişliğe ve $0,5227 L^2$ eşdeğer alana sahip olması beklenmektedir. Düzlem deformasyon modeli için bu varsayım yapılmaktadır. Eksenel simetrik modeller için bu varsayımın doğru olmayacağı belirtilmiştir. Bu nedenle araç tekerleği, Şekil 2.11’de gösterilen uzunluk ve genişliğe sahip bir dikdörtgen ile temsil edilmektedir.

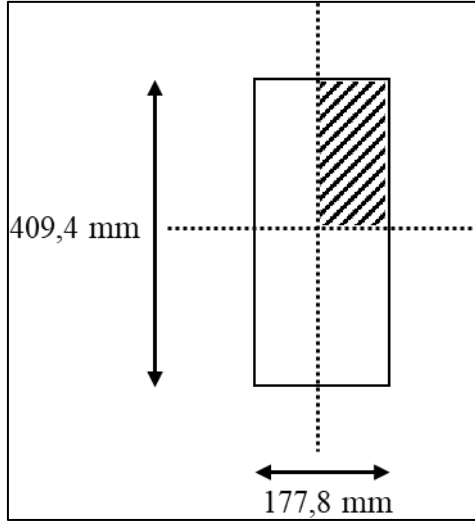


Şekil 2.11. Basitleştirilmiş lastik temas alanı hesabı a) Asıl temas alanı (b) Eşdeğer dikdörtgen temas alanı (Huang, 2004)

3D analizde lastik izinin şeklini ölçülebilen L uzunluğuna sahip yuvarlak köşeli bir dikdörtgenin fonksiyonu (Eş. 2.7) olarak hesaplanmaktadır. Hesaplamalarda kullanılacak olan yükün belirlenmesi için yapılan çalışmalarda; bir aks için 80 kN (18.000 lb) ile 90 kN (20.000 lb) arasındaki yük değerleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yükün tek bir lastiğin temas basıncı yoluyla kaplama yüzeyine aktarıldığı varsayılmaktadır (Yoder ve Witczak, 1991).

$$L = \sqrt{A/0.5226} \quad (2.7)$$

Eş. 2.7’de, A , inç kare cinsinden temas alanıdır. Ulaşım Araştırma Merkezi, tekerlek yüküne karşılık gelen lastik temas alanını araştırmış ve 40 kN tekerlek yükü altındaki ortalama temas alanının $64\,520 \text{ mm}^2$ (100 inç^2) ve $70\,972 \text{ mm}^2$ (110 inç^2) arasında olduğunu belirtmiştir. Bu alan sonrasında eşdeğer bir dikdörtgene (Şekil 2.12) dönüştürülmektedir.



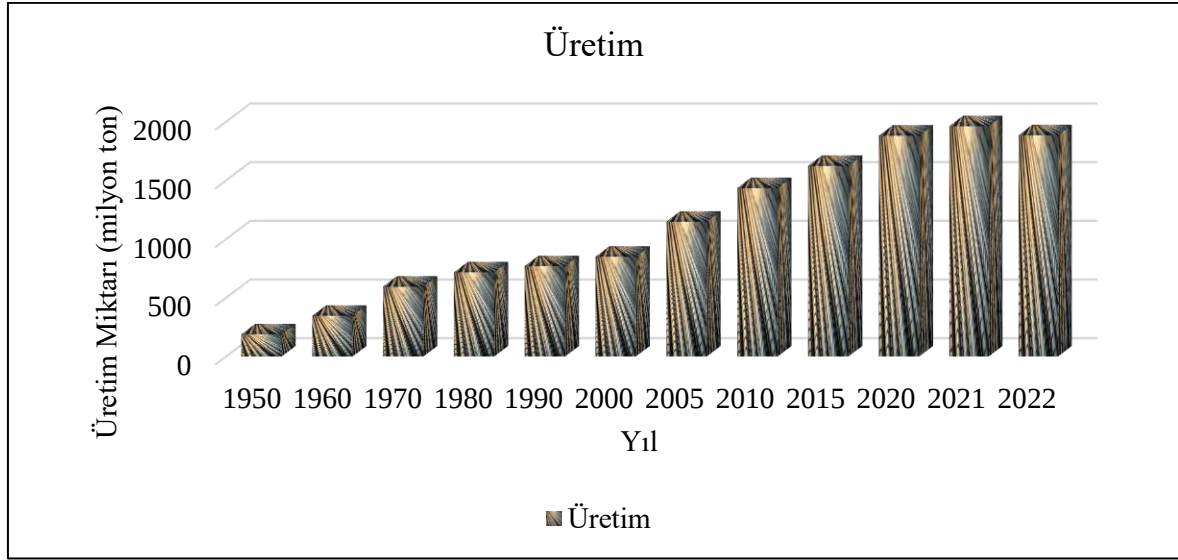
Şekil 2.12. Lastik temas alanı (Yoder ve Witczak, 1991)

Birçok araştırmacı, üstyapı yükleme analizinde dairesel veya eşdeğer dikdörtgen temas alanını kullanmıştır. Yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, bir kamyon lastiğinin temas alanı gerçekte dairesel bir şekle değil, dikdörtgene daha yakındır. Temas alanı uzunluğunun belirlenmesinde uygulanan yükün değeri etkilidir. Ancak lastik genişliği, lastik boyutuna bağlı olarak sabit kalmaktadır (Huang, 2004).

2.4. Çelik Cürufu Hakkında Genel bilgiler

Endüstriyel üretimler sonucunda ortaya çıkan birçok atık malzeme gibi çelik cürufu da çelik üretimi sonucunda yan ürün olarak ortaya çıkan katı atıktır. Cüruf, çeşitli inşaat projelerinde soğuk öğütme makinesinin kullanılmasıyla birçok kez geri dönüştürülebilen ve çeşitli uygulamalar için yeniden kullanılabilen sürdürülebilir bir üründür (Beshears ve Tutumluer, 2013). Sert bir malzemedir, genleşme potansiyeline, çok pürüzlü yüzey dokusuna ve sürtünme özelliklerine sahiptir (Murphy, 2023).

Şekil 2.13’de verilen Dünya’daki ham çelik üretim miktarındaki değişime bakıldığında sürekli olarak artış eğiliminde olduğunu söylemek mümkündür. Küresel olarak meydana gelen endüstrileşme hareketi sonucu artan üretimlere bağlı olarak cüruf miktarının artmakta olduğu bununla birlikte depolama alanlarının yetersiz kaldığının ve cürufların tasfiye maliyetlerinin artmasının yanında hava, su ve toprak kirliliği gibi sorunlara yol açtığı ifade edilmektedir (Reuter, Xiao, ve Boin ,2004). Ancak çelik cüruflarının etkin bir şekilde kullanılıp, geri dönüşüme katılması halinde doğada serbest halde bulunan bu yan ürünün zararlı etkilerini ortadan kaldırmak mümkün olmaktadır.



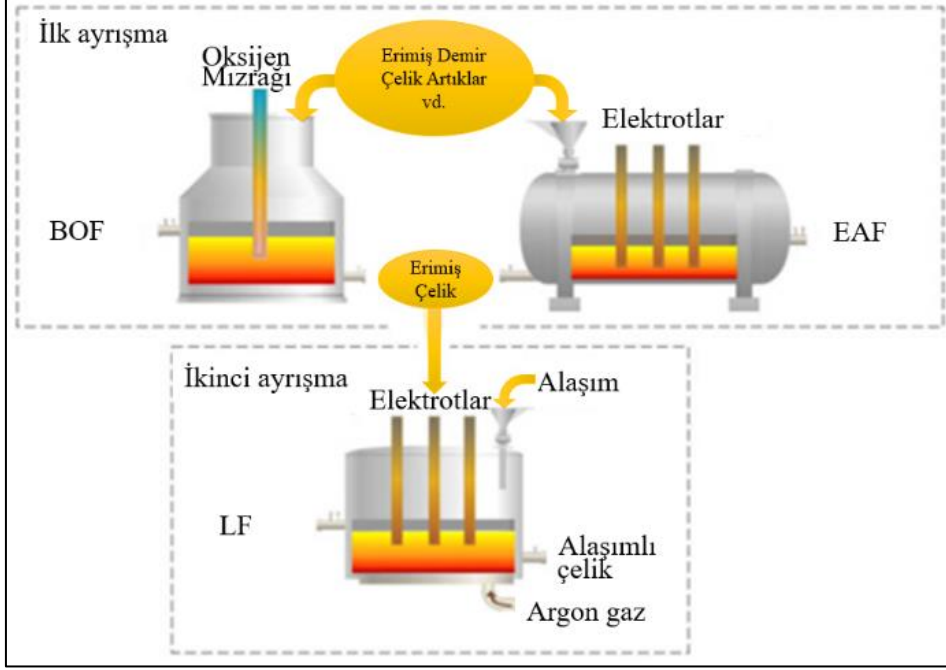
Şekil 2.13. 1950-2022 yılları arası Dünya'daki ham çelik üretim miktarı değişimi (milyon ton) (Dünya Çelik Birliği Raporu, 2023)

Dünya Çelik Birliği (2023), raporuna göre Türkiye’de 2022 yılı itibariyle 35,1 milyon ton (Mt) çelik üretilmiş olup en fazla çelik üreten ilk yirmi ülke arasından sekizinci, toplam 18 Mt ile ihracatta altıncı, 17,1 Mt ile ithalatta beşinci sırada yer almaktadır. 2018-2022 yılları arasında ülkemizde 2018 yılında 37 311,7, 2019 yılında 33 743,1, 2020 yılında 35 810,3, 2021 yılında 40 360,0 ve 2022 yılında 35 133,8 bin ton ham çelik üretimi gerçekleşmiştir (Dünya Çelik Birliği, 2023:17).

Ülkemizde Marmara, Ege, Karadeniz, Akdeniz, İç Anadolu Bölgelerinde 2021 yılı itibariyle toplamda 40 demir çelik tesisi bulunmaktadır. Bu tesislerden 12 tanesi Akdeniz bölgesinde yer alırken sırayı 9 tesisle Marmara bölgesi ikinci, 9 tesis ile Ege bölgesi üçüncü sırada, 7 tesis ile Karadeniz bölgesi dördüncü sırada ve 3 tesis ile İç Anadolu bölgesi son sırada yer almaktadır. Tesislerin 26’sı EAF (Elektrik Ark Fırını), 11’i indüksiyon ocaklı ve 3’ü BOF (Bazık Oksijen Fırını) olarak dağılım göstermektedir (TOBB Yayınları, Türkiye Demir ve Demir Dişi Metaller Meclisi Raporu, 2022).

Bir ton çelik üretimi, üretim tekniğine ve kullanılan fırın tipine bağlı olarak yaklaşık 200-400 kg cüruf üretmektedir. Çelik üretimi sonrası cüruf fırından erimiş olarak çıkmaktadır. Daha sonra soğuma işlemi ile serbest metaller uzaklaştırılıp işlenerek agrega haline getirilmektedir. Çelik cürufunun tam kimyasal bileşimi, üretilen çeliğin derecesine, çeşitli ham maddelerin dozlarına ve çelik üretim sürecinde kullanılan fırın tipine bağlı olarak Şekil 2.14’de gösterildiği üzere üç gruba ayrılmaktadır (Yıldırım ve Prezzi, 2009). Bunlar BOF,

pota fırını (LF) ve EAF cürufudur. Hem BOF cürufu hem de EAF cürufu çeliğin ilk rafine edilmesi sırasında üretilir (Humbert ve Castro-Gomes, 2019).



Şekil 2.14. Fırın tipine bağlı çelik cürufu üretimi (Li, Ling ve Pan, 2022)

EAF cürufu, çelik hurdasının sırasıyla elektrik ve akıllar kullanılarak eritildiği ve saflaştırıldığı elektrik ark ocağında çelik üretim sürecinin başlangıcında üretilir. Yine çelik üretimi sırasında yoğun sıcaklığa sahip olan çeliğin işlenmesi ve son haline getirilmesi amacıyla pota fırınına (LF) dökülmektedir. Bu ürünün niteliğinin (saf ve işlenebilirlik) artırılması için erimiş çeliğe kireç ilave edilir ve böylece pota ocağının altında kalan malzeme LF cürufu olmaktadır (Maghool, Arulrajah, Mirzababaei, Suksiripattanapong ve Horpibulsuk, 2020). BOF cürufu, fırına hurda metal, pik demir ve tozların eklenmesi ve ardından yaklaşık 1600 °C gibi yüksek bir sıcaklıkta oksidasyon reaksiyonunu başlatmak için saf oksijen kullanılarak üretilmektedir (Yıldırım ve Prezzi, 2011). Şekil 2.15’de yaygın olarak kullanılan iki çelik cürufunun görüntüsü verilmiştir. BOF cürufu ve EAF cürufu köşeli yüzeylere sahip koyu renkli ve kaya biçimli malzemelerdir (Shen, Forssberg ve Nordström, 2004).



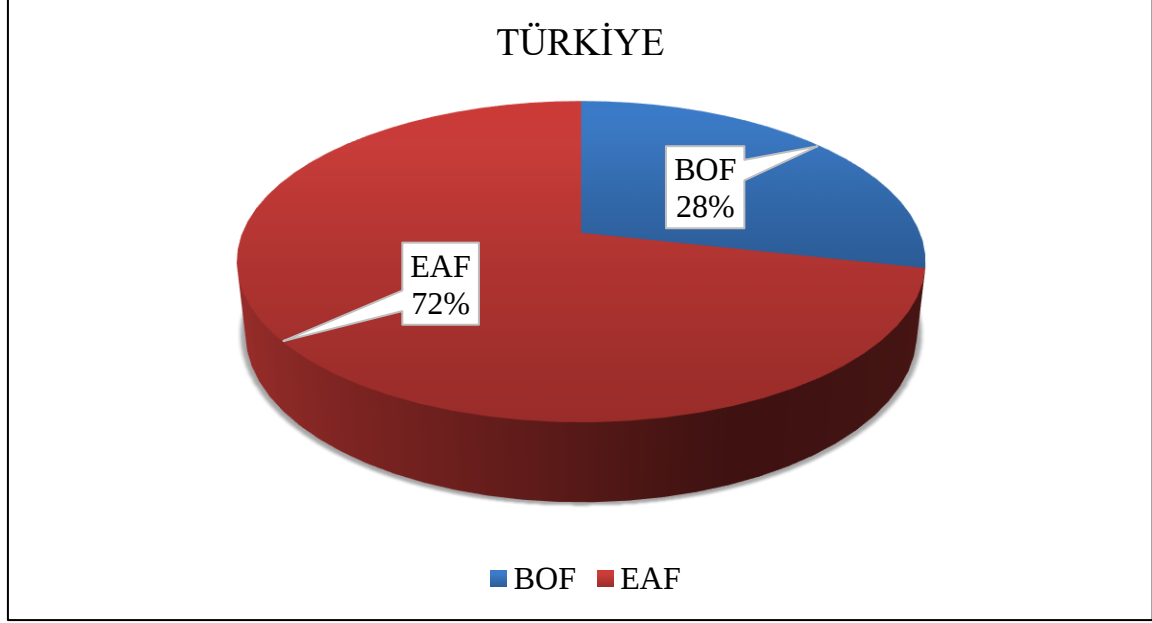
Şekil 2.15. Çelik cürufu türleri a) BOF cürufu b) EAF cürufu c) LF cürufu (Euroslag, 2022)

Çizelge 2.7’de 2010-2021 yılların arasında fırın tipine bağlı olarak üretilen çelik cürufu miktarındaki değişim verilmiştir. Üretim yüzdelere bakıldığında EAF cürufunun üretim yoğunluğu BOF cürufuna kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. Ancak her iki fırın tipinde de yıllara göre değişim pozitif yönde olduğunu söylemek mümkündür.

Çizelge 2.7. Fırın türüne göre üretilen cüruf miktarı yıllara göre değişimi (Bin ton) (TOBB Yayınları, Türkiye Demir ve Demir Dışı Metaller Meclisi Raporu, 2022)

Yıl	EAF	BOF	Toplam
2010	20,905	8,238	29,143
2015	20,482	11,035	31,517
2016	21,846	11,317	33,163
2017	25,963	11,561	37,524
2018	25,799	11,513	37,312
2019	22,884	10,859	33,743
2020	24,782	11,028	35,81
2021	28,902	11,458	40,36
% Değişim 21/20	16,6	3,9	12,7
% Pay 2021	71,6	28,4	100

Şekil 2.16’da Dünya Çelik Birliği (2023) raporunda 2022 yılına ait ülkemizdeki BOF ve EAF üretim yüzdeleri verilmiştir. EAF’nın daha fazla paya sahip olduğu görülmektedir. 2022 yılında 35,1 Mt üretilen ham çeliğin %28,5 BOF cürufu iken %71,5 EAF cürufuna aittir.



Şekil 2.16. Fırın tipine bağlı üretilen ham çelik yüzdesi (Dünya Çelik Birliği, 2023)

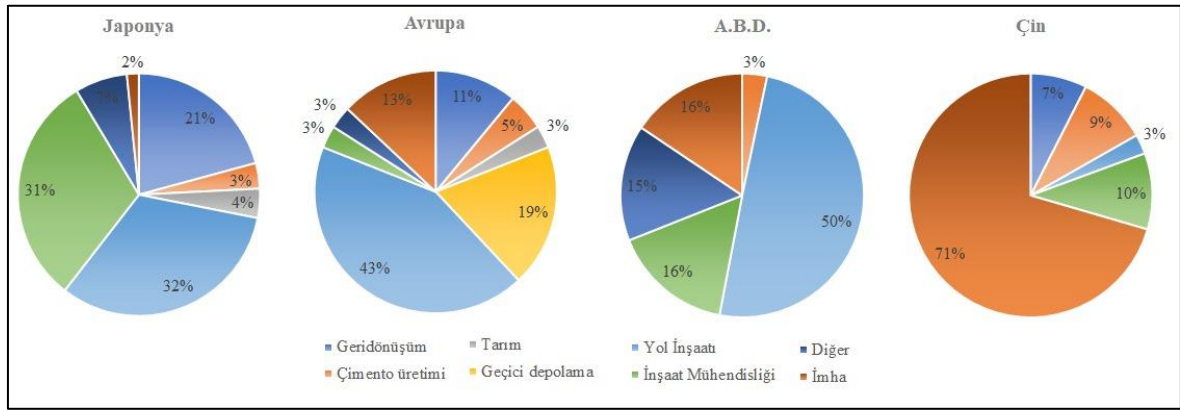
Çelik cürufunun kayma dayanımı parametrelerinin yüksek, fiziksel özellikleri itibariyle yoğun ve sert bir malzeme olmasından kaynaklı yol üstyapısının yanı sıra altyapı malzemesi olarak arazide tesviye tabakasında, yol inşaatında, su yapıları için dolgu ve balast malzemesi olarak değerlendirilmektedir. Çelikhane cürufu agregalı sıcak karışım asfaltın olumlu özellikleri ise iyi sürtünme ve sıyrılma direnci, yüksek stabilite ve tekerlek izi direnci olarak belirtilmektedir (FHWA, 2012).

Sürtünme özellikleri, dayanıklılık/kararlılık, maliyet ve asfalt bağlayıcı özelliği dikkate alındığında doğal kaynakların kullanımına yönelik değerlendirildiğinde cüruf işlenmemiş agregaya karşı uygun bir alternatiftir. İngiltere ilk cüruf yolunu 1817’de Amerika Birleşik Devletleri ise 1830’da inşa etmiştir. Bu da her iki ülke için 1880’de çelik cürufunun yol inşaatlarında kullanılması genel olarak kabul edildiğini göstermektedir (Murphy, 2023).

Şekil 2.17’de çelik cürufunun inşaat alanında uygulamasına yönelik üretiminden kullanımına kadar olan akış verilmiştir. Kırmızı noktalar yoğun enerjinin kullanıldığı ve yüksek emisyonun bulunduğu aşamaları ifade etmektedir. Sarı ve yeşil noktadaki karbonatlaşma işlemleri karşılaştırıldığında sarı renk nokta ile gösterilen hızlandırılmış karbonatlaşma sırasında tutulan CO₂, kullanım ve bertaraf olarak yeşil renk nokta ile gösterilen doğal karbonasyon aşamasındakinden daha kritik olduğu ifade edilmektedir (Li, Ling ve Pan, 2022).

2023; Mercado-Borrayo, González-Chávez, Ramírez-Zamora ve Schouwenaars, 2018), ek olarak çelik cürufu Ca, Si ve P'nin yanı sıra bitki büyümesi dostu elementleri içerir ve gübre üretiminde kullanılabilir (Gao, Wang, Wang ve Zeng, 2020; Deus, Büll, Guppy, Santos, ve Moreira, 2020).

Günümüzde, Avrupa'da üretilen çelik cürufunun yaklaşık %77'si yeşil çimento üretmek veya agrega ve bloklar gibi inşaat malzemesi olarak faydalanmak için ikame malzeme niteliğinde kullanılmaktadır (Jiang ve diğerleri, 2018). Şekil 2.18'de Japonya, Avrupa, A.B.D ve Çin'de yaygın kullanım alanlarına ait grafik verilmiştir. Kullanılmayan çelik cürufları çelik üretim tesisinde depolanarak ardından bertaraf tesislerinde imha edilirler.



Şekil 2.18. Çelik cürufu kullanım alanları (Guo, Bao ve Wang, 2018)

Çelik cürufunun inşaat sektöründeki uygulamalarının yanında tarım alanında alkali özelliği nedeniyle Al^{3+} toksisitesini nötralize ederek toprağın pH'ını yükseltmek ve toprak asitliğini düzeltmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Deus ve diğerleri, 2018). CaO, SiO_2 ve MgO gibi sahip olduğu kimyasal bileşenleri nedeniyle gübrenin maddesel olarak zenginleşmesini sağlayarak besin içeriğinin artmasına yardımcı olmaktadır (Mäkelä, Watkins, Pöykö, Nurmesniemi ve Dahl, 2012).

Çizelge 2.8'de verilen çelik cürufu kimyasal bileşimine bakıldığında eser miktarda MnO , P_2O_5 ve TiO_2 bulunmaktadır. Bileşenlerinin büyük bir kısmını CaO, Fe_2O_3 oluşturmaktadır. BOF cürufunun kimyasal içeriğine bakıldığında CaO miktarı %30-55 arasında değişmektedir. Fe_2O_3/FeO içeriğinin de %38'e ulaştığı görülmektedir. EAF cürufu için hem CaO hem de Fe_2O_3/FeO büyük bir orana sahiptir CaO içeriği %24 ile %60 arasında değişir ve Fe_2O_3/FeO içeriği %35'e kadar çıkabilmektedir. LF cürufunun FeO içeriği %1,69 nispeten daha yüksek SiO_2 içeriği %23,5'tir ve %55,79 oranında CaO içeriği bulunmaktadır.

Çelik cürufunun yoğunluğu genellikle 3,1–3,6 g/cm³ arasında değişmekte olup sahip olduğu yüksek demir içeriği sayesinde kazanılan aşınma direnci ile yol temel ve dolgu malzeme olarak seçilmesi uygundur (Gao ve diğerleri, 2023). Özellikle temel katmanlarının tasarımında cüruf gibi kaliteli agrega malzemesi seçimi ile herhangi bir stabilize edici işlem olmadan kullanımı mümkün olmaktadır.

Çizelge 2.8. Çelik cürufu türüne göre kimyasal bileşimi

Çelik Cüruf Tipi	Kimyasal Bileşimi								Kaynaklar
	¹ CaO	² Al ₂ O ₃	³ SiO ₂	⁴ MgO	⁵ Fe ₂ O ₃ FeO	⁶ MnO	⁷ P ₂ O ₅	⁸ TiO ₂	
BOF	45,11	1,01	11,33	6,13	29,55	4,39	1,49	0,45	Carvalho, Vernilli, Almeida, Demarco ve Silva (2017)
BOF	39,3	0,98	7,8	8,56	38,06	4,2	–	0,9	Shen, Wu ve Du (2009)
BOF	30-55	1-6	8-20	5-15	10-35	2-8	0,2-2	0,4	Shi (2004)
EAF	24,4	12,2	15,4	2,9	34,4	5,6	1,2	0,56	Luxán, Sotolongo, Dorrego ve Herrero (2000)
EAF	35-60	2-9	9-20	5-15	15-30	3-8	–	0-0,3	Shi (2004)
EAF	35,62	7,22	18,81	3,89	29,65	0,84	–	–	Singh, Vashistha, Chandra ve Rai (2021)
LFS	55,79	4,29	23,50	6,00	1,69	–	–	–	Vilaplana ve diğerleri (2015)
¹ Kalsiyum oksit, ² Alüminyum Oksit, ³ Silisyum oksit, ⁴ Magnezyum oksit, ⁵ Demir oksit, ⁶ Manganez oksit, ⁷ Fosfor pentaoksit, ⁸ Titanyum dioksit									

Cüruf uygulamalarında mukavemet, dayanıklılık, sürtünme ve çevresel kaygılara yönelik atılan adımların ve iyileştirme potansiyeli değerlendirilerek yapılan tasarımların geri dönüşüm sürecine katkı sağlaması açısından gelecekteki girişimler için de önemlidir. Ayrıca her geçen yıl sürekli artan çelik cüruflarının ciddi bir bertaraf sorununu da beraberinde getirdiği bilinmektedir. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda inşaat sektörü, çimento endüstrisi ve bahsedilen diğer kullanım alanlarının yanında geomalzeme olarak kullanımı da büyük önem taşımaktadır.

Çelik cürufu kullanımı inşaat ve imalat gibi sektörlerde özellikle sürdürülebilir malzemeler tercih edilmesi doğal agrega kaynaklarımızın korunması ve sera gazı emisyonlarının azaltılması mümkün olacaktır.

2.4.1. Çelik cürufu kullanıma yönelik çalışmalar

Ahmetzade ve Şengöz (2009) çelik cürufunun agrega olarak kullanılmasının sıcak karışım asfaltın özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmaya yönelik iri agrega ve iki tip asfalt çimentosu kullanılarak dört farklı asfalt karışımının optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi için Marshall numuneleri hazırlanmıştır. Çelik cürufu iri agregalı karışımların rijitlik modülü değerlerinin tüm test sıcaklıklarında kireçtaşı agregalı karışımlardan daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Çelik cüruf iri agregalı karışımların daha yüksek sünme rijitliği tekerlek izi direncinin daha iyi olduğunu göstermiştir.

Bagampadde, Wahhab ve Aiban (1999) çelik cüruf agregasının etkinliğini esneklik modülü, çekme mukavemeti, stabilite, yorulma ve kalıcı deformasyon testleri ile değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında çelik cürufu ve kireçtaşı ile yapılan karışımların yüksek yorulma ömrü ve kalıcı deformasyona karşı direnç gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Li, Ling ve Pan (2022) çelik cürufu üretimindeki hızlı artış, küresel olarak bertaraf veya kullanım süreçlerini yönetmeye yönelik acil ihtiyacı vurgulamışlardır. Geleneksel atık depolama bertarafına ek olarak inşaat, kimya ve tarım alanlarında çelik cürufunu başarıyla yeniden kullanmışlardır. Sonuçlar çelik cürufunun doğal agregaların ikamesi olarak büyük ölçüde kaplama betonu kullanıldığını göstermektedir. Bununla birlikte çoğunlukla kullanılan büyük miktarlardaki çimento tüketiminden kaçınılmıştır.

Çelik cürufunun daha yüksek yoğunluğa, aşınma direncine ve parçacıklar arası sürtünme açısına sahip olduğunu ve dolayısıyla döngüsel yükleme altında daha az parçacık kırılması, daha yüksek esneklik modülü ve daha az kalıcı deformasyon sergilediği ortaya koyulmuştur. Düşük oturmalar ve kırılma nedeniyle yol bakım maliyetlerinde azalma, yüksek yoğunluğa sahip olması nedeniyle yanal direnç artışı ve yüksek esneklik modülü sayesinde sürüş konforu sağlanmıştır (Hussain ve Hussaini, 2022).

Fırat, Dikmen, Yılmaz ve Khatib (2020) alt temel malzemesi olarak BOF cürufu ve uçucu külün kullanımına yönelik çalışmalarında, ilk olarak bu malzemelerin kimyasal ve

mineralojik bileşimlerinin yanı sıra mikroyapısal analizleri açısından karakterize edilmiştir. Doğal zemini temsil etmek amacıyla Kaolinin kullanılmış ve farklı oranlarda kaolin, uçucu kül, BOF cürufu (ağırlıkça % 0, % 15, % 20 ve % 25) ve sabit oranda (% 5) kireç içeren zemin karışımları hazırlanmıştır. Yapılan deneysel analiz çalışmaları neticesinde uçucu kül ve BOF cürufunun yol temel ve alttemel tabakalarında kullanılabileceği belirtilmiştir.

Chen ve diğerleri (2021) ile Behnood ve Ameri (2012) çeşitli farklı deney kategorileri verilerinden yola çıkarak, yüksek çelik cüruf içeriğinin kayma direncini, kararlılığı, nem hasarı direncini, kendi kendini iyileştirmeyi ve tekerlek izi direncini artırdığını ifade etmişlerdir.

Yıldırım ve Prezzi (2015) çelik cürufunun inşaat endüstrisinde geomalzeme olarak doğru kullanılması halindeki performansının değerlendirilmesine yönelik BOF cürufları kullanarak yaptıkları testler sonucunda hem taze hem de yaşlandırılmış BOF çelik cürufunun geleneksel malzemelere göre üstün mukavemet ve sertlik özellikleri gösterdiği tespit etmişlerdir. Uzun süreli şişme testi sonuçlarına göre kimyasal bileşimlerinde serbest CaO ve MgO bulunması nedeniyle, hem taze hem de yaşlandırılmış BOF çelik cürufunun suya maruz kaldığında hacminin arttığını göstermişlerdir. Sonuç olarak inşaat mühendisliği uygulamalarında çelik cürufunun kullanılması sayesinde bertaraf sorunlarının hafifletilmesi ve doğal kaynakların verimli kullanılması mümkün olacağı belirtilmiştir.

Diaz-Piloneta, Terrados-Cristos, Álvarez-Cabal ve Vergara-González (2021) tarafından işlem görmemiş BOF cüruflarının kullanımının teknik ve çevresel açıdan incelemeleri yapılmış yol yüzeyi katmanlarında ve asfalt kaplamalarda doğal agrega yerine tercih edilmesinin uygun olacağı önerilmiştir. İri agrega olarak kireç taşının ve % 15 oranında BOF cüruflarının kullanıldığı karışımlar hazırlayarak gerçekleştirilen test uygulamasında kaba agrega olarak BOF cürufunun kullanımının asfalt karışımlarının teknik performansını nasıl iyileştirdiği gösterilmiştir. Bununla birlikte BOF cürufunun asfalt karışımlarına kireçtaşı yerine iri agrega olarak katılması halinde karbon emisyon oranında %14'den fazla azalma meydana geleceği ifade edilmiştir.

Dayioglu, Aydılek ve Cetin (2014) yol temel ve alttemel tabakalarında çelik cürufu kullanımını teşvik edecek nitelikte cürufların şişme potansiyelini ve alkalilik etkilerini en aza indirecek yöntemler aramışlardır. Bunun için cürufa uygulanan iki iyileştirme tekniği ile

cürufun dezavantajı sayılabilecek özellikleri iyileştirilmiştir. Çelik cürufunun karayolu uygulamalarında, özellikle granüler temel veya alttemel malzemesi olarak kullanımında büyük bir potansiyele sahip olduğu belirtilmiştir.

Karadağ, Fırat ve Işık (2020) çalışmalarında, çelik cürufunun yol temel ve alt temel tabakalarında kullanımına yönelik yapılan 2D sonlu elemanlar sayısal analizleri sonucunda cürufun alttemelde kullanılması sonucunda tekrarlı trafik yükleri altında meydana gelen düşey deformasyon değerlerinin daha düşük olduğu sayısal analizler sonucunda belirlenmiştir.

Wen, Wu ve Bhusal (2016) sıcak karışım asfalt içerisine %0, 20, 40 ve 60 oranlarına eklenen çelik cürufunun termal çatlama direnci, nem duyarlılığı ve tekerlek izi açısından kapsamlı bir şekilde performansını değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, çelik cüruf ilavesinin karışımların lastik aşınma direncini, dinamik modül değerlerini, termal çatlama direncini ve tekerlek izi direncini arttırdığını göstermiştir.

Karadağ, Fırat, Işık ve Yılmaz (2022) rezonant kolon testi kullanılarak kayma deformasyon modülü (G_{max}) belirlenen farklı rijitlik ve yoğunluk değerlerine sahip granüler malzemelerin temel ve alttemel tabakasında kullanıldığı durumda meydana gelen kalıcı deformasyonları, çok sayıda yük çevrimi uygulanarak sonlu elemanlar yöntemi ile hesap edilmiştir. Oturma eğrileri kullanılarak her bir kaplama kesiti için kalıcı deformasyon model denklemi geliştirilmiştir. Yeni bir düşey kalıcı deformasyon yaklaşımı kullanılarak çalışmada yüzeydeki toplam deformasyon dikkate alınmıştır.

Sarımurat (2021) tarafından sıvılaştırılabilir zeminlerde çelik cürufundan imal edilmiş kolon ve taş kolon kullanımının sıvılaşma üzerindeki etkisi tez çalışmasında incelenmiştir. Yapılan sayısal analiz sonuçlarına göre, çelik cürufundan imal edilmiş kolonların kullanıldığı zeminlerde sıvılaşma meydana gelirken boşluk suyu basınçlarının büyük ölçüde sönmüldüğü belirlenmiştir. Çelik cürufundan imal edilmiş kolonların çaplarında ve boylarında yapılan değişiklikler sayesinde zemin iyileştirme hususunda taş kolonla aynı performansı gösterdiği görülmüştür.

Özsoy ve Fırat (2023), 2D eksenel simetrik olarak modellenen yol tasarımında temel ve alttemel tabakasında çelik cürufu kullanılarak yapılan sayısal analizlerde 400 kPa'lık

dinamik tekerlek yükleri altındaki düşey deformasyon değerleri hesaplanmıştır. İlk 50 yükleme adımında minimum deformasyonlar KC (kireçtaşı temel, cüruf alttemel) ve CC (temel ve alttemel, cüruf) kesitlerinde meydana gelmiştir.

2.5. Geosentetiklerin Kullanımına Genel Bakış

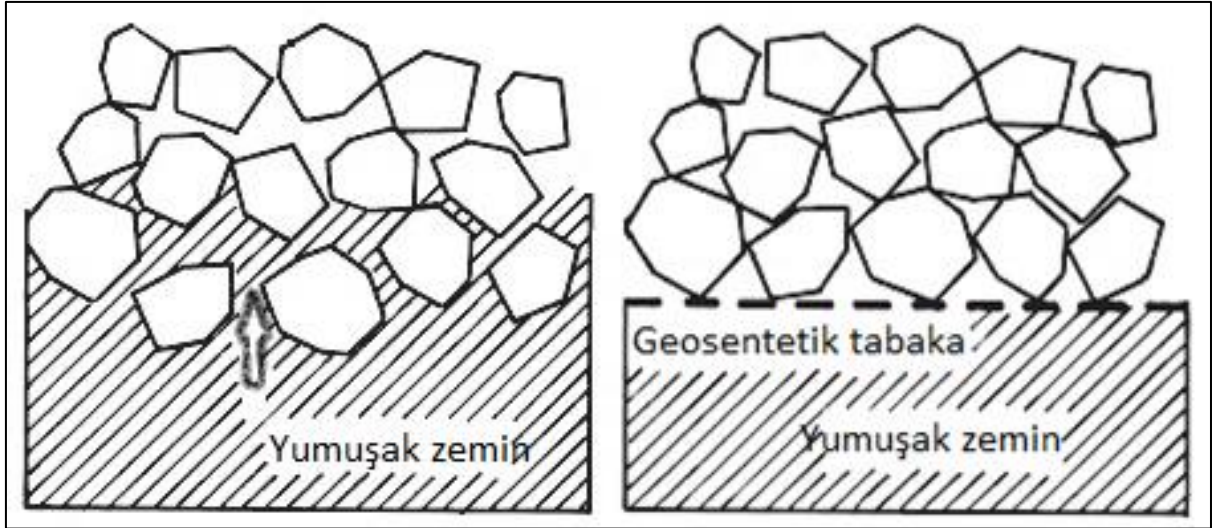
Geosentetikler farklı saha koşullarında ve çeşitli yapısal malzemeler ile uygulanabilir olması nedeniyle geoteknik, ulaşım, çevre ve hidrolik mühendisliği olmak üzere inşaat mühendisliğinin birçok alanı ile madencilik, ziraat ve su ürünleri mühendisliğinin özellikle bazı alanlarında yaygın bir kullanıma sahiptir. Geçtiğimiz son 50 yılda inşaat mühendisleri geosentetikler ve bu malzemelerin kullanıldığı saha uygulamaları üzerinde çeşitli araştırma ve geliştirme çalışmalarında bulunmuş olup inşaat mühendisliği problemlerine yönelik teknik açıdan verimli, uygun maliyetli ve çevre dostu bir uygulama olduğuna dair sonuçlar elde edilmiştir.

Geosentetik ile zemin arasındaki bağ, temas yüzeylerinin etkileşimine bağlıdır. Bu etkileşim sayesinde gerilmeler zeminden geosentetik malzemeye aktarılmaktadır. Zemin kütlesi içerisinde bulunan geosentetiğin kullanıldığı uygulamalarda, tasarım ömrü olarak belirtilen süre içerisinde belirtilen işlevleri yerine getirmesi öncelikli hedefler arasındadır.

Geosentetiklerin yüksek çekme dayanımına karşılık basınç dayanımları düşüktür. Zemin malzemelerinin basınç dayanımları geosentetik donatıların aksine çekme dayanımından daha yüksektir. Bununla birlikte hem maliyet hem de ulaşılabilirlik açısından değerlendirildiğinde zemin malzemeleri daha ucuz ve kolay elde edilebilir nitelikte olup geosentetik donatılar maliyetli ürünlerdir. Çekme ve basınç dayanımı gibi parametreler açısından değerlendirildiğinde bu iki malzemenin oluşturduğu kombinasyon sayesinde birbirlerinin eksikliklerini telafi etmektedirler (Karaoğlu, 2014). Zemin ve geosentetik malzemenin birlikte kullanılmasıyla, betonarme ile benzer prensipte yüksek basınç ve çekme dayanımlarına sahip bir kompozit yapı meydana gelerek donatılı zemin yapısı oluşur. Böylece zemin kütlesinin mekanik özelliklerini geliştirerek güçlendirme fonksiyonunu yerine getirir.

Geosentetikler hizmet ömrü boyunca temas halinde bulunduğu zemin katmanlarının birbirine karışmasını engelleyerek ayırma görevini yerine getirmektedir. Şekil 2.19'da granüle malzeme ile yumuşak zeminin birbirine karışmasını engelleyen geosentetiğin

ayırma mekanizması gösterilmektedir. Ayırma mekanizması sayesinde ince taneli zemin malzemelerinin granüler tabakaların içlerine nüfuz etmesini önlemek mümkün olmaktadır. Yapılan birçok geosentetik uygulamasında, özellikle yollarda, demiryolu hatlarında, sıg temellerde ve dolgularda, yumuşak temel zemini ile onu örten granüler tabakanın ara yüzüne bir geosentetik tabaka yerleştirilmesi uygun görülmektedir.



Şekil 2.19. Geosentetiğin yumuşak ve granüler zemin ile ayırma mekanizması (Shukla, 2017)

Geosentetiklerin güçlendirme ve ayırma mekanizması birbiri ile etkileşimli bir şekilde çalışmaktadır. Güçlendirme etkisi ile deformasyonlar azaltılması, ayırma mekanizması ile katmanların karışması engellenerek mukavemetlerindeki kayıp önlenebilmektedir.

Geosentetikler uygun şekilde kullanıldığında, zeminlerin yük taşıma kapasitesini arttırdığı, alt zemin tabakasındaki şekil değiştirmeleri azalttığı ve yüzey oturmasının başlangıcını sınırladığı sonucuna varılmıştır. Güçlendirmenin sahip olduğu düşük eğilme rijitliği nedeniyle birim şekil değiştirmelerin sadece çekme yükleri altında oluşmasını sağlamaktadır (Komastu ve diğerleri, 1998; Gabr ve Hunter, 1994; Khing, Das, Puri, Cook ve Yen, 1993; Mandal ve Gupta, 1994). Geosentetik donatı ile güçlendirilmiş sistemlerde, donatısız sistemler ile kıyaslandığında daha az plastik deformasyon meydana gelirken elastik deformasyonun payı fazla olmaktadır. Dolayısıyla donatılı sistemlerin yük direnci daha yüksektir (Nair ve Latha, 2016).

Geosentetiklerin bu işlevlerinin yanında Çizelge 2.9'da verilen işlevleri sayesinde tüm dünyada yaygın olarak kullanılır hale gelmiştir.

Çizelge 2.9. Geosentetiklerin işlevleri (Tenax, 2023)

Mekanizması		Geosentetik türü	Görevi
Duvarlar ve şevler için güçlendirme		Tek yönlü geogridler, dokuma geotekstiller	Zeminin çekme mukavemetini artırarak mekanik performansını geliştirmek
Zemin güçlendirme		Çift yönlü geogridler, üç boyutlu geogridler, geokompozitler, geotekstiller	Boşlukları ve tekerlek izi oluşumunu ve oturmayı azaltma ve taşıma kapasitesini artırma
Drenaj		Geonetler ve geokompozitler	Yağmur suları, yer altı suları gibi sıvıların tahliyesi
Erozyon kontrolü		Geomatlar, geoseller, biyomatlar, biyonetler	Meteorolojik hadiseler dolayısıyla meydana gelen zemin kütlesi hareketlerini engellemek
Sınırlama		Geoseller	Zemin kütlesinin yanal hareketini engellemek
Filtrasyon		Geotekstiller, geokompozitler	Sıvı geçişine izin vererek malzeme geçişini engellemek
Ayırma		Geotekstiller, geokompozitler	Farklı granülometriye sahip malzemeleri ayırmak
Koruma		Örgüsüz geotekstiller, geonetler, geokompozitler	Yapıların ve malzemelerin mekanik zararını önlemek
Su yalıtımı		Geomembranlar, geokompozitler	Sıvı geçişini önlemek ve sınırlandırmak

Geosentetikler geotekstil, geogrid, geonet, geomembran, geocel, geofoam, geokompozit vb. gibi polimerik malzeme içeriğine sahip zeminle temas eden geniş bir ürün yelpazesine sahiptir.

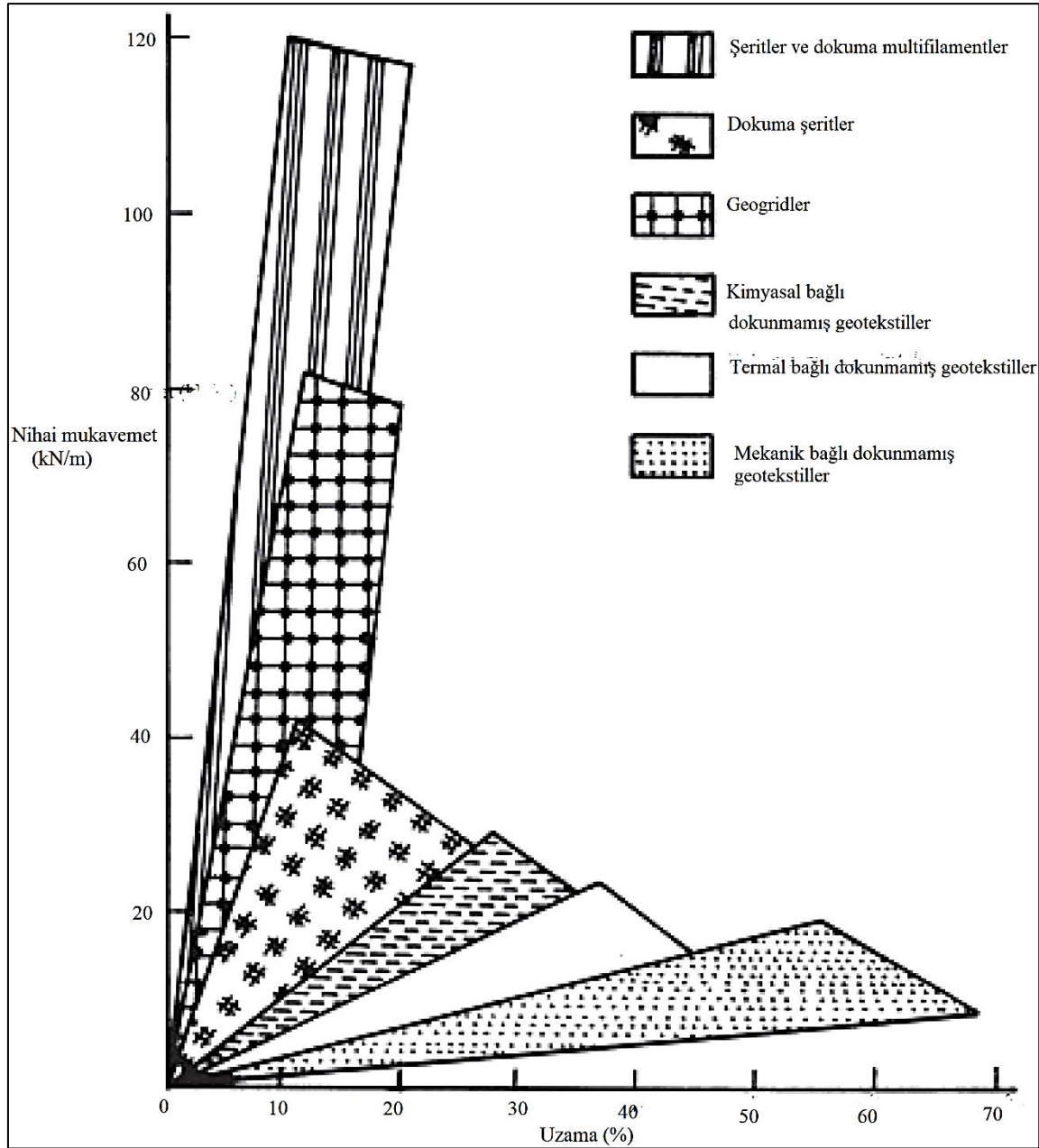
Geosentetiklerin imalatında kullanılan malzemeler, genellikle ham petrol yağlarından elde edilen sentetik polimerlerdir, ancak bazen kauçuk, cam elyafı ve bitüm gibi diğer malzemeler de bazen geosentetiklerin imalatı için kullanılır. Geosentetik üretiminden yaygın olarak kullanılan polimerler türleri Çizelge 2.10'da verilmiştir. Polimer tipi geosentetiğin dayanıklılığı ve maliyetini etkilemektedir. Daha yaygın olarak kullanılan türleri polipropilen (PP), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve polyesterdir (PET) (Shukla, 2017). Geosentetikler polimer esaslı viskoelastik malzeme olmasına bağlı olarak performansları sıcaklık, gerilme seviyesi ve uygulanan gerilmenin süresi gibi birçok faktöre bağlıdır.

Çizelge 2.10. Geosentetik üretimi için kullanılan polimerler

Polimer Tipleri	Kısaltmalar
Polipropilen	PP
Polyester (polietilen terephthalate)	PET
Polietilen	
Düşük yoğunluklu polietilen	LDPE
Çok düşük yoğunluklu polietilen	VLDPE
Lineer düşük yoğunluklu polietilen	LLDPE
Orta yoğunluklu polietilen	MDPE
Yüksek yoğunluklu polietilen	HDPE
Klorlu polietilen	CPE
Klorosülfonatlı polietilen	CSPE
Polivinil klorür	PVC
Poliamid	PA
Polistiren	PS

Geosentetik içeren tasarımların hedeflenen servis ömrü boyunca istenilen performansı gösterebilecek nitelikte hizmet vermesi amaçlanmaktadır. Karşılaşılan problemin niteliğine uygun çözüm sunacak olan geosentetiğin seçimi oldukça önemlidir.

Şekil 2.20’de bazı geosentetiklerin tipik dayanım özellikleri gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde dokuma geotekstiller diğer tekstillerle karşılaştırıldığında düşük uzama miktarına karşılık yüksek mukavemet göstermektedir. Geogridler ise düşük birim deformasyon seviyelerinde yüksek çekme mukavemeti ve/veya çekme modülü nispeten yüksek boyutsal kararlılığa sahiptir. Geogridin sahip olduğu bu özellik nedeniyle yol iyileştirme çalışmalarında yaygın olarak tercih edilen bir geosentetik türüdür.



Şekil 2.20. Bazı geosentetiklerin yaygın dayanım değerleri (John, 1987)

İki ana geosentetik türü olan geotekstiller ve geogridler trafik yükleri altında farklı malzeme özelliklerine sahip olması nedeniyle farklı performans gösterirler. Yük taşıma kabiliyetini

etkili bir şekilde iyileştirmek için yalnızca geogridin kullanılabileceği ifade edilmiş olup geotekstil yerine geogrid kullanıldığında temel tabakası kalınlığı azaltılsa dahi istenilen performans elde edilememiştir (Kwon ve Tutumluer, 2009).

Mevcut karayolu sistemlerinin değişken bozulma koşulları nedeniyle geosentetik seçimi karmaşıktır. Bozulmalar kaplama yüzeyinden başlayıp alt tabakalara doğru ilerlemektedir. Geogridler, yol tabakasında oluşan deformasyonları gerilmelerin dağıtılıp artmasını engelleyerek, hali hazırda bulunan çatlakların ilerlemesini durdurup takviye ara katmanı olarak güçlendirme ve iyileştirme görevini başarılı bir şekilde yapmaktadırlar. Geogridler düşük birim şekil değiştirmelerde yüksek çekme kuvvetlerini absorbe edebildiği için sahip olduğu yüksek mukavemeti ile düşük deformasyonlarda bile alt zemini koruyucu bir tabaka olarak etkili bir şekilde çalışmaktadır.

Aynı zamanda doğru seçilen geosentetik sayesinde kaplama tabakasının gerekli kalınlığını azaltılabilir veya kaplamanın hizmet ömrü uzatılabilir. Geosentetikler, özellikle geogridler ve yüksek mukavemetli geotekstiller, zayıf alt tabakanın performansını artırmak için kullanılmaktadır (Kwon ve Tutumluer, 2009).

Geogridler ve agrega arasındaki kenetlenme sayesinde, geotekstillere göre geogridler daha yüksek sürtünmeye ve sınırlandırma gerilmesine sahiptir. Geotekstiller ise agrega içerisine alt zeminde bulunan malzemenin girmesini engeller. Geotekstillerin zayıf sürtünme özelliklerine sahip olması nedeniyle, agrega parçacıkları ile iyi bir kenetlenmeye izin vermez (Webster, 1991). Bununla birlikte karayolu tasarımında tercih edilen geosentetikler sayesinde hem kaplamalı hem de kaplamasız yolların performansının artması ve zayıf zemin tabakalarında yapılan güçlendirme sayesinde zemin stabilizasyonu sağlanmaktadır. Geosentetik takviye kullanımı sayesinde gerekli tabaka kalınlıklarının azaltılması mümkün olmakla birlikte bu sayede maliyetlerden tasarruf sağlanabilmektedir.

Özetle üstyapılarda geosentetik donatı kullanımı sayesinde kaplamaların hizmet ömrünü uzatılabilir bununla birlikte esneklik modüllerini artırarak temel tabakasını ve alt zemin sertliğini geliştirir. Temel malzemeleri üzerinde güçlendirme etkisine sahip olması ve esneklik katsayısını artırması dolayısıyla temel tabakası kalınlığını azaltmasını sağlar, alttemel üzerindeki kalıcı deformasyonu azaltarak alttemel malzemeleri üzerinde stabilizasyon etkisi oluşturarak; yüklerin daha iyi dağılmasını sağlar böylece tekerlek izi

oluşumunu geciktirir ve üstyapı bölümlerinde göçene kadar yük tekrar sayısını artırır (Alimohammadi ve diğerleri, 2021).

2.5.1. Geosentetikler ve geogridler ile ilgili çalışmalar

Geosentetikle ilgili yapıların/sistemlerin analizi ve tasarımına yönelik veriler birçok yazılım programında mevcuttur. Geosentetiklerin güçlendirilmiş şev ve duvarlar, şev stabilitesi veya zemin iyileştirme kategorileri altında sayısal analizlerini yapmak mümkündür. Temel zemininde zayıf bölgelere ek olarak boşluklar var ise birden fazla geosentetik tabaka yerleşimi gerekebilmektedir. Literatürde geosentetik kullanımın etkisi açıklayan birçok deneysel ve sayısal analiz çalışmaları yapılmıştır. Bu bölümde yapılan çalışmaların bir kısmına yer verilmiştir.

Yang ve diğerleri (2012), çalışmalarında tabanı kum takviyeli geocel içeren dört farklı stabilize yol kesimlerinde testler gerçekleştirmişlerdir. Agregalı tabakanın alt kısımları polimer alaşım geocel ile güçlendirilmiştir. Her bir yol kesimde yük uygulanarak (552 kPa) ileri geri hareketli olarak tekerlek yüklemesi yapılmıştır. Test sonuçlarına göre stabilize yollardaki dayanıklılığı sağlamada ve kalıcı deformasyonları azaltmada önemli bir etki sağladığı görülmüştür.

Saad, Mitri ve Poorooshasb (2006) yüksek modüllü geosentetiklerin kaplama temeline uygulamanın faydalarını değerlendirmek amacıyla bir dizi sonlu eleman simülasyonu gerçekleştirmişlerdir. Geosentetik donatı, temel-asfalt betonu, temel-taban zemini arasına ve temel tabakasının altından 1/3 yüksekliğe yerleştirilerek dinamik analizler yapılmıştır. Temel-asfalt betonu arasında yerleştirilen geosentetik sayesinde yorulmaya bağlı deformasyonda %46-48 bir değerde azalmaya yol açtığı tespit edilmiştir. Temel tabakasının 1/3 yüksekliğinde geosentetik yerleştirilmesi durumunda ise tekerlek izinde en yüksek %16-34 azalma meydana gelmiştir.

Yadav, Bharath, Kumar, Reddy ve Reddy (2018) düşük CBR değerine sahip yollardan istenen verimin sağlanamaması sebebiyle zeminlere geogrid takviyesiyle bu sorunun giderilip giderilemeyeceğini incelemişlerdir. Geogridli CBR kalıbının 3H/4, H/2 ve H/4 noktalarına yerleştirmişlerdir. Yapılan tüm deneylerde geogrid ilavesi zeminin CBR değerini arttırmıştır. Geogrid tabakası yüzeye yaklaştıkça iyileşme değerlerinin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek oran geogridin 3H/4 noktasına yerleştirildiğinde

bulunmuştur. Çalışma sonucunda geogridle iyileştirilmiş zeminlerde gereken asfalt tabakası kalınlığının azaltılabileceği, dolayısıyla ekonomik yönden kazanç sağlanabileceği ve yolların kullanım ömrünün uzatılabileceği sonuçlarına ulaşılmıştır.

Perkins, Ismeik ve Fogelson (1999), geogrid takviyeli olan ve olmayan bitümlü kaplamanın statik ve dinamik yükleme koşulları altında nasıl davrandığını analiz etmek için iki boyutlu bir eksenel simetrik FE modeli kullanmışlardır. Geogrid takviyesi temel-bitümlü kaplama ara yüzüne eklendiğinde yorulma veya yatay birim şekil değiştirmenin önemli ölçüde azaldığını bulmuşlardır. Geogrid takviyesinin temel ve alttemel katmanları arasındaki ara yüze yerleştirilmesi durumunda ise düşey deformasyon belirgin bir şekilde azalmıştır.

Moayedi, Kazemian, Prasad ve Huat (2009), geogridin yol davranışına etkisini tespit etmek amacıyla 2D sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmişlerdir. Eksenel simetrik olarak oluşturulan sonlu eleman modelinde üst yapının davranışına statik analiz yapılarak incelenmiştir. Bitümlü beton tabaka altına yerleştirilen geogrid sayesinde kaplamada meydana gelen düşey deformasyonda azalma olduğu tespit edilmiştir.

Nazzal, Abu-Farsakh ve Mohammad (2010), donatılı ve donatısız çeşitli esnek kaplama modelleri sonlu elemanlar analizlerine tabi tutulmuş ve sonuçları incelendiğinde temel tabakası ve yol zemin tabakaları arasında yerleştirilen geosentetik donatı sayesinde yanal birim şekil değiştirmelerin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca alt zemin üzerindeki düşey birim deformasyon ve kayma deformasyonlarında önemli ölçüde iyileşme sağlandığı görülmüştür.

Geogridler, tekerlek izi gerilmesini azaltarak tabakanın yorulmaya veya yatay gerilmeye karşı olan dayanımının artmasını sağlar (Pandey, Rao ve Tiwari, 2012; Graziani, Pasquini, Ferrotti, Virgili ve Canestrari, 2014).

Wang (2016) tarafından geogridlerin taban zeminin performansını dört mekanizma aracılığıyla iyileştirebildiği ifade edilmiştir. Buna göre alt zeminin yerel kaymasının önlenmesi, temel tabakası boyunca yük dağılımının iyileştirilmesi, taban zemini üzerindeki kesme gerilmelerinin azaltılması veya yeniden yönlendirilmesi ve gerilmiş membran etkisi ile hem yeni inşa edilen tasarımlarda hem de mevcut imalatların rehabilitesini sağlayarak güçlendirme etkisinde bulunduğu belirtilmiştir.

Maghool, Arulrajah, Mirzababaei, Suksiripattanapong ve Horpibulsuk (2020), tarafından geogrid donatılı PFC (Pota fırın cürufu) ve EAFC (elektrik ark ocağı fırın cürufunun) karışımlarının kayma dayanımı özellikleri değerlendirilmiştir. Geogrid ile çelik cürufu arasındaki arayüz etkileşimini belirlemek için kayma direnci, doğrudan kesme testi kullanılarak ölçülmüştür. Kalın nervürlere sahip geogrid, cüruf-geogrid ara yüzeyinde daha büyük bir pasif direnç sağlamış ve dolayısıyla takviyeli cürufun kayma direncine katkıda bulunmuştur. Arayüzde meydana gelen içsel sürtünme açısı geogrid donatının cüruf malzemelerini ayırdığı ve doğrudan doğal sürtünmeyi engellediği için azalma eğilimi göstermiştir.

Wang, Li, Tao ve Wang (2019), çalışmasında geogrid donatılı çelik cürufunun iyileştirme amacıyla kullanımında basınç deformasyon davranışına dikkat edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Bunun için tek eksenli sıkıştırma testleri yapılarak geogrid donatılı çelik cürufunun sıkıştırma deformasyon davranışları incelenmiştir. Normal zeminlerle karşılaştırılarak iki katmanlı geogrid donatı kullanılması durumunda sıkıştırma modüllerinde güçlendirme etkisi belirgin olmuştur. Geogrid donatı sayesinde basınç direncinin geliştiği ve böylece geoteknik olarak dolgu malzemesi niteliğine uygun olduğu belirtilmiştir. Düşey basınçla birlikte donatılı çelik cürufunun sıkıştırma modülü de artmıştır.

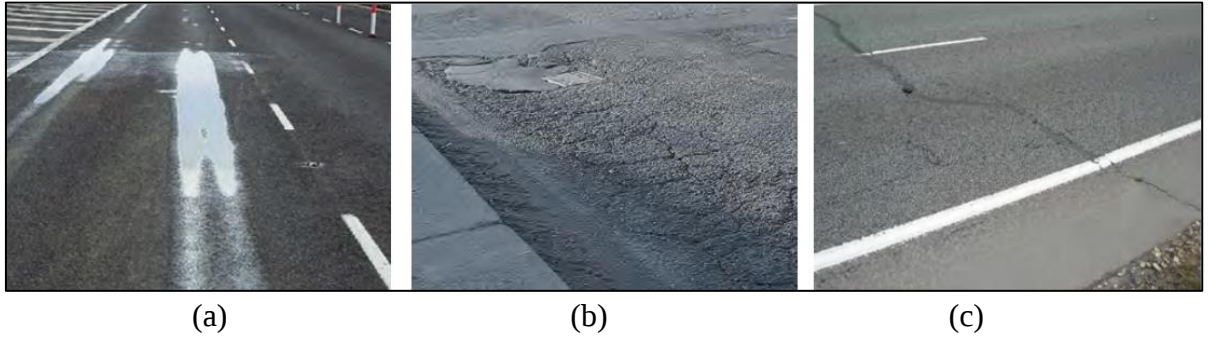
Alimohammadi, Schaefer, Zheng ve Li (2021), yaptıkları çalışmada zayıf alt zemin malzemesi üzerinde inşa edilmiş ince temel tabakalı 10 donatılı, 2 donatısız 12 kesit için düşen ağırlıklı deflektometre testi yapmışlardır. Bu kesitlere yük uygulamak için tam yüklü üç dingilli kamyon kullanılmış olup ortalama 100 mm kalıcı deformasyona ulaşana kadar her test kesitinde tek yönde yük uygulanmıştır. Yapılan deney sonuçlarının analizlerine göre geogridlerin birleşme yeri mukavemeti ve rijitliği, en-boy mukavemeti ve çapraz makine yönündeki periyodik rijitliğin tekerlek izi performansı ile ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Ghafoori ve Sharbaf (2016), geogridlerin nervürlerine yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerler ve yükleme sisteminin üstüne yerleştirilmiş LVDT' ler (Lineer Değişken Deplasman Transformatörü) sayesinde alt zemin/temel arayüzünün ortasındaki düşey basınç, iki eksenli ve üç eksenli geogrid takviyeli bölümler için sırasıyla ortalama %18 ve %24 oranında azaldığını ölçmüşlerdir. Geogrid uygulaması sayesinde farklı yükleme uygulamaları sonucundaki tekerlek izi derinliği ölçümlerine bakıldığında geogrid tipine göre yük sayısını 1,5 ila 7 kat artırmıştır. Ayrıca temel kalınlığının %11'den %44'e düşürülmesini sağlamıştır.

2.5.2. Yol yapımında geogrid kullanımı

Yol her zaman taşıma mukavemeti yeterli olan zeminler üzerine inşa edilememektedir. Zayıf zeminler üzerine de benzer yapıların inşası gerekmektedir. Zayıf zeminlerin taşıma mukavemetinin artırılmasına ve üzerlerine endüstriyel yapıların inşa edilebilmesi için farklı oturmaların kontrol çözümleri; yol üstyapısını destekleyen yapılarda, geosentetik kullanımı geleneksel çözümlere göre %75'e kadar maliyet avantajı sağlamaktadır.

Şekil 2.21'de üst yapıda yaygın olarak dinamik yükler nedeniyle meydana gelen tekerlek izi, yorulma çatlağı vb. deformasyonların görüntüsü verilmiştir. Bu tür deformasyonlar hem yapısal hem de işlevsel olarak yol performansını etkilemektedir. Dinamik yükler vasıtasıyla oluşan gerilmeler ve uniform olmayan oturmaların oluşmasının engellenmesi ya da iyileştirilmesi amacıyla kullanılan geosentetik donatılar sayesinde yolların hizmet ömrü artmaktadır. Ayrıca inşa edilecek tabaka kalınlığının azaltılmasının yanında sağlanacak malzeme ve işçilik tasarrufu gibi konular değerlendirildiğinde geosentetik kullanımı cazip bir çözüm olmaktadır. Geogridler yüksek mukavemetleri ve yük dağıtma özellikleri nedeniyle, zemin iyileştirmelerinde donatı olarak kullanımı tercih sebebidir.



Şekil 2.21. Üst yapıda oluşan hasarlar a) tekerlek izi görüntüsü b) yorulma çatlağı c) yansıma çatlağı (Tensar, 2022)

Yolun yapısını oluşturan tabakaların çeşitli bölümlerinde kullanılan geogrid takviyesinin esnek kaplama sistemine eklenmesi, uygulanan lastik yüklerinin tabakalar boyunca dağılımını değiştirirken, taban katmanında yaşanan kavislenme etkisini değiştirecektir. Geogridin kullanıldığı tabakaya sağladığı gerilme artışı sayesinde yükün daha geniş bir alana yayılması söz konusu olmaktadır. Şekil 2.22'de kaplama tabakası üzerinde bulunan tekerlek yükünün farklı açılarda dağılımı verilmiştir. Geogridin sağladığı çevreleme etkisi sayesinde

tekerlek yükünün neden olduğu düşey gerilmeler azalarak kaplamada meydana gelen kalıcı deformasyonlar azaltmaktadır.



Şekil 2.22. Tekerlek yükünün kaplama tabakasındaki dağılımı (Baselok, 2022)

Asfalt tabakasının güçlendirilmesinde fazla esnekliği olmayan sert geogridler en etkili geosentetiklerdir. Geogridlerin asfalt güçlendirmesinde kullanımları sayesinde, yorulma çatlakları ömrünün uzatılması, asfaltın çökmesinin/oturmasının azaltılması, güçlendirilmesi, takviyelerde oluşan yansıma çatlaklarını önleme gibi etkileri bulunmaktadır.

Temel ve zemin tabakaları açısından geogrid kullanımı değerlendirildiğinde bu tabakalarda serbest halde bulunan agregalar tekerlek yükünün etkisiyle hareket etme eğilimindedirler. Alt zemin-temel tabakası arasına ya da temel içerisine yerleştirilen geogrid donatı yardımıyla, agrega daneleri kenetlenir. Şekil 2.23’de tekerlek altında katmanlar halinde yerleştirilmiş geogridin granüler malzemeyi nasıl kenetlediği görülmektedir. Bu sayede yol kesitinin rijitliğinde bir artış meydana gelir ayrıca agrega malzemesinin uygulanan tekerlek yükü altında yanal olarak hareket etmesini önlenir böylece temel katmanında yerel güçlenme ve sertlik artmaktadır. Rijitliğin artması ile gerekli agrega miktarı ve tekerlek izi oluşumu azalır yol performansında iyileşme meydana gelir tüm bunların sonucunda sürücü güvenliği ve kaliteli bir servis ömrü sağlanırken yol bakım ve onarım maliyelerinin de azalmasını sağlar.

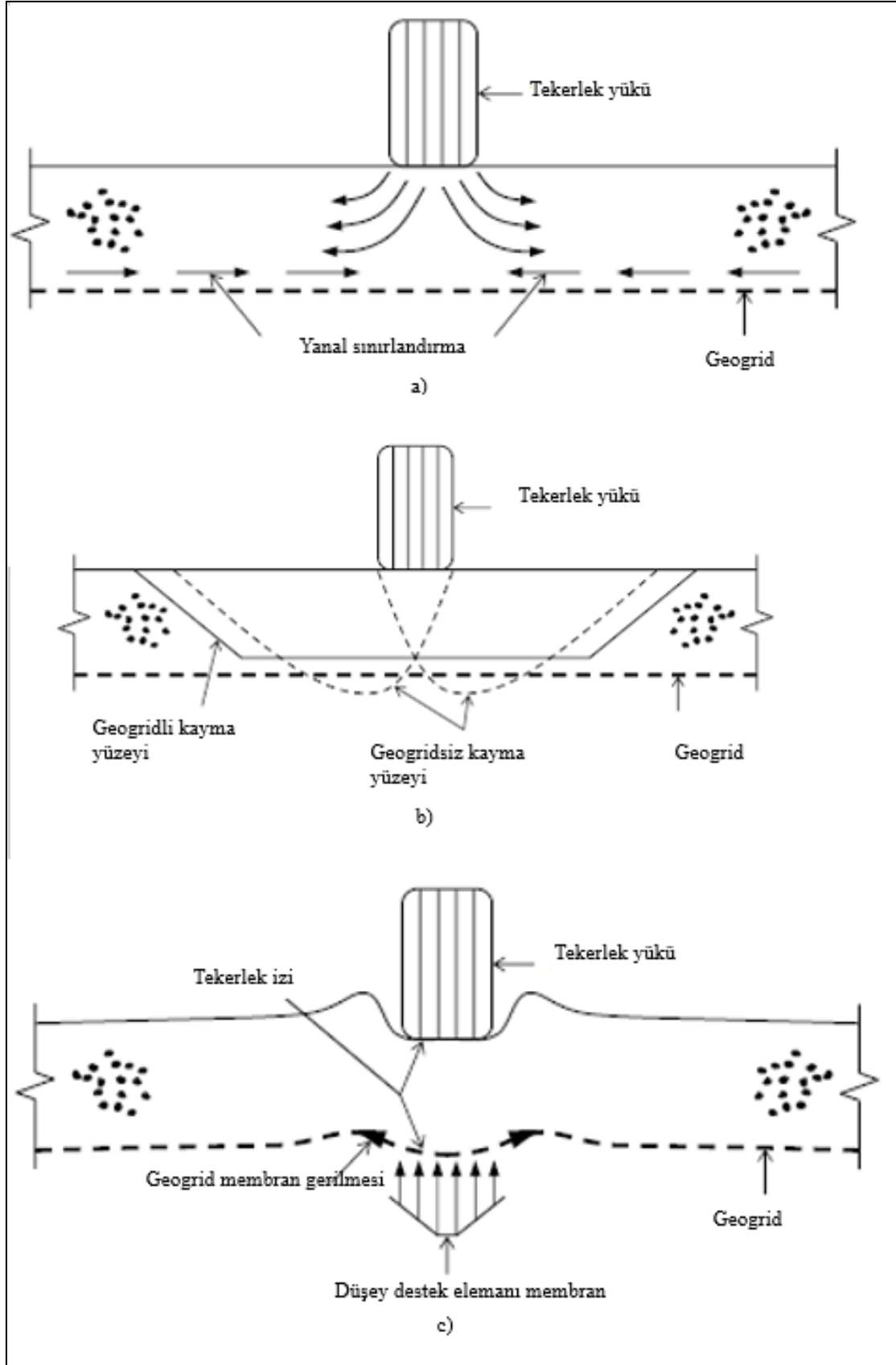


Şekil 2.23. Secugrid® ile güçlendirilmiş çakıl sütun üzerinde duran bir araba ile kilitleme etkisinin gösterilmesi (NAUE, Secugrid)

Yollar tekrarlı trafik yüklerine maruz kaldığında temel tabakasında bulunan granüler malzemeler tekerlek yükü altında yanıl hareket etme eğiliminde bulunmaktadırlar ve çekme birim deformasyonları başlamaktadır. Geogrid donatı kullanımı sayesinde Şekil 2.24 (a)'da gösterildiği gibi agrega parçacıkları ile ızgara kenetlenmesi sağlayarak tekerlek yükü altında agregaların yanıl hareketi engellenir ve uygulanan tekerlek yükünün tabakalara dağıtımını sağlanır. Zemin ile geosentetik tabaka arasında meydana gelen sürtünme ile zeminin malzemesi sınırlandırılacaktır.

Şekil 2.24 (b)'de ise geogrid kullanımının güçlendirme etkisi gösterilmiştir. Geogrid donatılı temellerin potansiyel kayma yenilmesi, yolun taşıma kapasitesini artırma eğiliminde olan daha yüksek bir kayma mukavemeti yolu boyunca meydana gelmektedir. Bu davranışı ise “kohezyon kavramı” ve “sınırlayıcı etki kavramı” ile yapmaktadır. Ayrıca geosentetik tabaka, üstteki zemin/dolgudan alttaki temel zeminine iletilen dışa doğru yatay/kesme gerilmelerinin azaltılmasında etkili olmaktadır. Bunun sonucunda yerel kayma gerilmesi yerine genel kayma gerilme mekanizması oluşarak temel zemininin taşıma kapasitesinde bir artış ile sonuçlanmaktadır.

Şekil 2.24 (c)'de gösterilen üçüncü mekanizmada ise tekerlek yükleri dolayısıyla meydana gelen düşey deformasyonlar tabakada çekme gerilmesini oluşturacaktır. Geogridin sağladığı çekme kuvveti etkisiyle tekerlek yüküne dik destek sağlanmaktadır. Geosentetiklerin bu etkisi membran etkisi olarak tanımlanır. Membran etkisi sayesinde yol yüzeyindeki yüklü alanın her iki yanına bir yükleme ve bu alanın altındaki temel zeminindeki yük taşıma kapasitesinde bir artış meydana gelirken kabarma potansiyelinde ve alt zemine iletilen düşey gerilmede ise azalma olur.



Şekil 2.24. Karayollarında kullanılan geosentetiklerin olası güçlendirme mekanizmaları a) Yanal sınırlandırma, b) Taşıma kapasitesinin artırılması, c) Gerilmiş membran etkisi (Wang, 2016)

Geogrid kullanılması durumunda yol yapısının kazanacağı iyileşme ve güçlendirme mekanizmalarına ait bilgiler bu bölümde özetlenmiştir. Bölüm 3’de sayısal analizlerde kullanılan Secugrid malzeme parametreleri hakkında bilgi verilmiştir.

2.6. Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu Elemanlar Metodu (FEM, Finite Element Method), farklı geometrileri çözümleme, çeşitli malzeme bünye modelleri ve özelliklerini tanımlama bununla birlikte çok sayıda sayısal model oluşturabilme imkânı sunmaktadır. Büyük deformasyonlara maruz kalan tasarımlarda hesaplanan gerilmeler, şekil değiştirmeler, deplasmanlar uygulanan yükler altında modelin sayısal analizi yapılabilmektedir.

Sonlu elemanlar metodu, zemin sürekliliğini sonsuz elemanlar olarak adlandırılan ayırık elemanlara böler. Bu elemanlar düğümlerde birbirine bağlıdır. Sonlu elemanlar yöntemi, kısmi diferansiyel denklemleri cebirsel denklemlere dönüştürmek için bilinmeyen değişkenlerin basit bir yaklaşımını varsayar. Gerekli çözümlere göre fiziksel kanunlar ve sayısal yöntemler geliştirilmekte ve hesaplamalar bilgisayar ortamında yapılmaktadır.

Mühendislik problemlerinin çoğunun sayısal olarak çözümlenmesini sağlayan sonlu elemanlar yönteminde, her bir üstyapı katmanının görsel olarak sürekli olduğu kabul edilmektedir. Sayısal bir çözüm bulmak amacıyla bu etki alanları sürekli olan alt alanlara ve basit geometrik şekillere ayrılmıştır. Her bir alt alan ağ oluşturma yoluyla sonlu elemanlara bölünmekte olup analiz esnasında problemle bir araya gelmektedir. Ortak düğümler sonlu elemanları birbirine bağlar. Sınır koşulları da kullanılarak farklı yükleme tiplerinde karmaşık yapıya genel bir yaklaşım elde edilmesini sağlar. Özellikle son yıllarda kişisel bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte FEM mühendislik tasarımlarının eksiksiz ve kapsamlı analizleri için kullanılmaktadır.

Aşağıda verilen hususların dikkate alınması gerektiğinde, geleneksel analiz yöntemleri yerine FEM tercih edilmektedir. Bunlar;

- Karmaşık zemin davranışı (doğrusal olmayan rijitlik, anizotropi, sünme, pekleşme vb.), daha gerçekçi zemin davranışı ile değişen zemin davranışı (zemin iyileştirme, konsolidasyon vb.)
- Karmaşık hidrolik koşullar

- Farklı geometrik şekil
- Zemin yapı etkileşimi ve iç yapısal kuvvetler
- Karmaşık yükler
- Yapım sırası ve yapım metodunun özellikleri
- Tasarıma gözlemsel yaklaşımlar uygulamak
- Zaman etkileri (sünme, konsolidasyon vb.)
- Saha denemelerinin veya izlenen yapıların geriye dönük analizi (Lees, 2016)

Sayısal simülasyonlar sayesinde, hareketli araç yükleri etkisiyle üstyapıda meydana gelecek olan değişimleri belirlemek ve bununla birlikte yol katmanlarının gerçekçi performansının değerlendirilmesi mümkün olmaktadır. Tabakalar halinde inşa edilen üstyapının her bir tabakasında meydana gelen kritik gerilme ve şekil değiştirmeye karşı yapının oluşturduğu tepki, sayısal analizler ile tahmin edilebilmektedir. Üst yapı tasarımında kullanılan 3 tür model uygulaması bulunmaktadır. Bunlar; düzlem deformasyon, eksenel simetrik ve 3D modellerdir.

İki boyutlu (2D) düzlem deformasyon (plain-strain) modelde, diğer modelleme türlerine kıyasla daha az hesaplama süresi ve depolama kapasitesi gereklidir. Bu nedenle kaplama davranışını modellemek amacıyla sıkça tercih edilmektedir. Fakat trafik yüklerinin simüle edilmesi konusunda modelleme türün yetersiz kalmaktadır. Düzlem deformasyon modellerin yüklemeleri çizgisel yük olarak yapılmaktadır. “Üçüncü boyuttaki” (yani düzleme dik) birim şekil değiştirme ve deplasmanın sıfır olduğu varsayımı yapılır. Bunun sonucu olarak birim deformasyonlar yalnızca düzlem içindeki yönlerde meydana gelebilir ve düzlem dışı yönden bağımsızdırlar (Lees, 2016).

İkinci olarak eksenel simetrik model yaklaşımı tercih edilmektedir. Bu model yaklaşımında kaplama yapısı yatay düzlemde sabit özelliklere sahip olduğu varsayımı hakimdir ve araç yükü dairesel olarak modele etki etmektedir. Bu nedenle çift tekerlek yükü etkisinin hesap edilmesi mümkün değildir. Yatay eksen, simetri ekseninin yarıçapıdır ve düzleme dik olan daire/çember yönündeki gerilmenin sıfır olduğu varsayımı yapılır. Bu nedenle deplasman, birim şekil değiştirme ve kayma gerilmesi yalnızca analiz düzleminde meydana gelebilir. Çember yönündeki normal gerilme dışında, düzleme dik olan tüm gerilmeler ve şekil değiştirmeler sıfırdır (Lees, 2016). Eksenel simetrik modelde, üstyapıda bulunan derzler

veya çatlaklar gibi süreksizlikler hesaba katılmamaktadır (Cho, McCullough ve Weissmann, 1996).

Sonuncusu ise kartezyen koordinatlara sahip 3D modeldir. Yaylar veya basınç elemanları gibi özel elemanların tanımlanabilmesi ve yüklemenin konumu, çatlaklar gibi süreksizlikler dahil kaplama yapısı doğru bir şekilde tahmin edilebilir. 3D modelleme sayesinde farklı lastik-aks kombinasyonlarının yanında bir asfalt tabakası üzerindeki farklı lastik izlerinin simülasyonunu sağlamaktadır. Eksenel simetrik ve düzlem deformasyon modele göre daha fazla sürede çözüm elde edilmekte ve geniş depolama alanı gerektirmektedir.

3D FEM, 2D FEM'in sorunlarının ve sınırlamalarının üstesinden gelmek için giderek daha fazla kullanılmaktadır. 3D modelleme yöntemi, çok zorlu ön işleme süreçlerine ve daha fazla hesaplama süresi ile yüksek depolama kapasiteli donanım ihtiyacına rağmen 2D modelden daha gerçekçi sonuçlar üretir. Özetle esnek kaplamaların doğru bir şekilde modellenmesi için 3D FEM kullanılması gereklidir.

Bu yöntemle tasarım tekniğinde sayısal analize başlamadan önce yapısal bileşenlerin, yükün ve malzemelerin modellenmesi gereklidir. Tasarımın yapılması aşamasındaki detaylı bilgiler Bölüm 3'de açıklanmıştır.

İkinci bölümde çalışma kapsamında bulunan konuların anlaşılması amaçlanmıştır. Karayollarının tasarımından başlanarak karayollarına ait temel bilgilerden ve sıkça karşılaşılan deformasyon türlerinden bahsedilmiştir. Buna ek olarak yine çalışma içeriğinde kullanılan malzemelerden ve sayısal analiz yöntemlerine değinilmiştir. Özetle çalışmanın teorik arka planı bu bölümde sunulmuştur.

3. MATERYAL VE METOT

Karayollarının tasarımında, üstyapı bölümlerini oluşturan tabakaların malzeme özelliklerinin seçimi dikkat edilmesi gereken önemli önemli konulardan biridir. Üstyapının servis ömrü boyunca maruz kalacağı çeşitli yükler ve çevresel etkenler dolayısıyla meydana gelebilecek şekil değiştirmelere, gerilmelere ve deformasyonlara karşı dayanıklı olmalıdır. Bu aşamada analiz ve tasarım süreçlerinde malzemelerin mühendislik özellikleri belirten; elastisite modülü (E), Poisson oranı (ν) ve esneklik (rezilient) modülü (M_R) (tekrarlı yükler altındaki elastik modül) gibi değişkenlerin parametre değerleri önemlidir.

Doğrusal elastik bir malzemenin modellenmesinde Hooke kanunu geçerli olması sebebiyle, E ve ν iki önemli parametredir. Ancak karayolu tasarım sisteminde, çoğu malzeme davranışının elastik olmadığı gibi her yük uygulamasında bir miktar kalıcı deformasyona maruz kaldığı bilinmektedir. Granüler malzemelerin anizotropik, doğrusal olmayan davranışa sahip olması tasarım aşamasında malzeme bünye modellerinin seçiminde dikkate alınmaktadır.

Sayısal analize başlamadan önce modelin boyutlarının belirlenmesi, kaplama yapısı ve kaplama yapısına uygulanan yükün bilinmesi yani analiz modeline dahil edilmesi gereken ve çıktılar üzerinde önemli bir etkiye sahip olan temel unsurların belirlenmesi gerekmektedir. Bu aşamada gerçek üstyapı, hesaplanabilecek matematiksel bir modele dönüştürülmektedir. Bu bölümde çalışmanın sonlu elemanlar simülasyonu için izlenen adımlar, gerekli parametreler ile tasarım aşaması hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

3.1. Malzemelerin Modellenmesine Genel Bakış

Genel olarak, çoğu zeminler doğrusal olmayan özelliklere sahiptir ve bu nedenle zeminin dinamik tepkisi, doğrusal olmayan zaman analizi kullanılarak doğru bir şekilde simüle edilebilir. Temel olarak saha koşullarını yansıtan bir zemin modelinin seçilmesi gereklidir. Malzeme modeli seçimi karmaşık zemin davranışının ve zemin-yapı etkileşimi problemlerinin simülasyonlarının doğruluğunu etkilemektedir.

Zemin sadece sonsuz küçük şekil değiştirmelerde elastik davrandığından ve yük yoğunluğunun artmasıyla plastik şekil değiştirmeler oluşturmaya başlamaktadır. Bu nedenle trafik yüklerine maruz kalan üstyapı tasarımlarına yönelik sayısal hesaplarda daha doğru

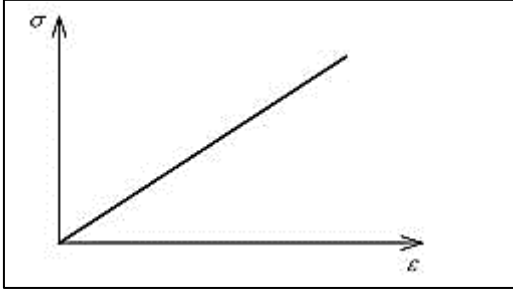
sonuçlar elde etmek amacıyla elasto-plastik yapısal modelleri içeren doğrusal olmayan yük-yer değiştirme analizi yapılmalıdır. Bölüm 2.2’de bahsi geçtiği üzere tekrarlı trafik yükleri altında granüler malzemelerin bulunduğu tabakalarda elasto-plastik bir davranışın meydana gelmesi beklenmektedir. Yani meydana gelen deformasyonların bir kısmı elastik iken bir kısmı ise kalıcı olmaktadır.

Çalışma kapsamında kullanılan yazılım bünyesinde, zeminler için kullanılabilen “Elastik (Elastic) , Tresca, Von Mises, Mohr-Coulomb, Drucker Prager, Hoek Brown, Generalized Hoek Brown, Hiperbolik (Hyperbolic (Duncan-Chang)), Strain Softening, Modified Cam Clay, Jardine, D-min, Modified Mohr-Coulomb, Soft Soil, Modified UBCSAND, Sekiguchi-Ohta (Inviscid), Sekiguchi-Ohta (Viscid), Modified Ramberg-Osgood, Modified Hardin-Drnevich, Küçük birim şekil değiştirme değerlerinde pekleşen zemin bünye modeli (Hardening Soil (small strain stiffness)), Transversely Isotropic, Jointed Rock Mass, 2D Orthotropic, 2 Dimensional Equivalent” malzeme modelleri bulunmaktadır.

Yazılım kütüphanesinde bulunan zemin modellerinden bazılarına genel hatlarıyla değinilirken Mohr-Coulomb ve küçük birim şekil değiştirme değerlerinde pekleşen zemin bünye modeli daha ayrıntılı bir şekilde ifade edilmiştir.

3.1.1. Doğrusal elastik malzeme bünye modeli

Gerilme ve şekil değiştirmenin birbiri ile doğru orantılı olarak değiştiği zemin bünye modelidir. Bu modelde E ve ν önemli rijitlik parametreleri arasında yer almaktadır. Bu malzeme bünye modeline sahip malzemelerde gerilmeler meydana geldiğinde elastisite modülüne bağlı olarak birim şekil değiştirme davranışını uzama veya kısalma olarak göstermektedirler (Önalp ve Arel, 2013). Ayrıca bu model, temelde Hooke kanununa dayanmaktadır (Khalid, 2013). İdeal elastik malzemenin davranışını temsil eden eğri Şekil 3.1’deki gibi çizilmektedir.



Şekil 3.1. Doğrusal-elastik şekil değiştirme davranışı (Midas Kullanım Kılavuzu, 2020)

Doğrusal elastik malzeme bünye modeli parametreleri Eşitlik 3.1,3.2 ve 3.3’de verilmiştir. Eşitlik 3.1 ile birim şekil değiştirme, Eşitlik 3.2 ile kayma rijitlik modülünü, Eşitlik 3.3 ile kayma birim şekil değiştirme değerleri hesap edilmektedir.

$$\varepsilon = \sigma/E \quad (3.1)$$

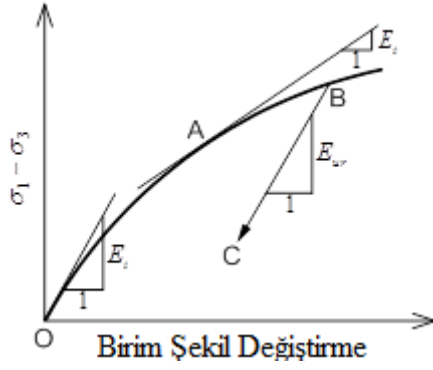
$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.2)$$

$$\gamma_{zx} = 2 \frac{(1 + \nu)}{E} \tau_{zx} \quad (3.3)$$

Günümüzde zeminlerin modellenmesinde elastik modeller malzeme davranışını yansıtmaması nedeniyle tercih edilmemektedirler.

3.1.2. Hiperbolik (Duncan-Chang) malzeme bünye modeli

Duncan-Chang model, aynı zamanda hiperbolik model olarak da bilinmektedir. Bu model ilk olarak Kondner (1963) tarafından önerilmiş olup günümüzde Duncan ve Chang (1970) tarafından düzenlenen fonksiyonları kullanılmaktadır. Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışı, göçmeye yaklaştığında doğrusal olmayan bir davranış göstermektedir ve doğrusal olmayan elastik malzemelerin modülleri değiştirilerek bu tür zemin malzemelerinin davranışının simüle edilmesinde tercih edilmektedir (Midas Kullanım Kılavuzu, 2020). Şekil 3.2’de verilen gerilme-şekil değiştirme eğrisinin yaklaşık olarak hiperbole benzediği görülmektedir.

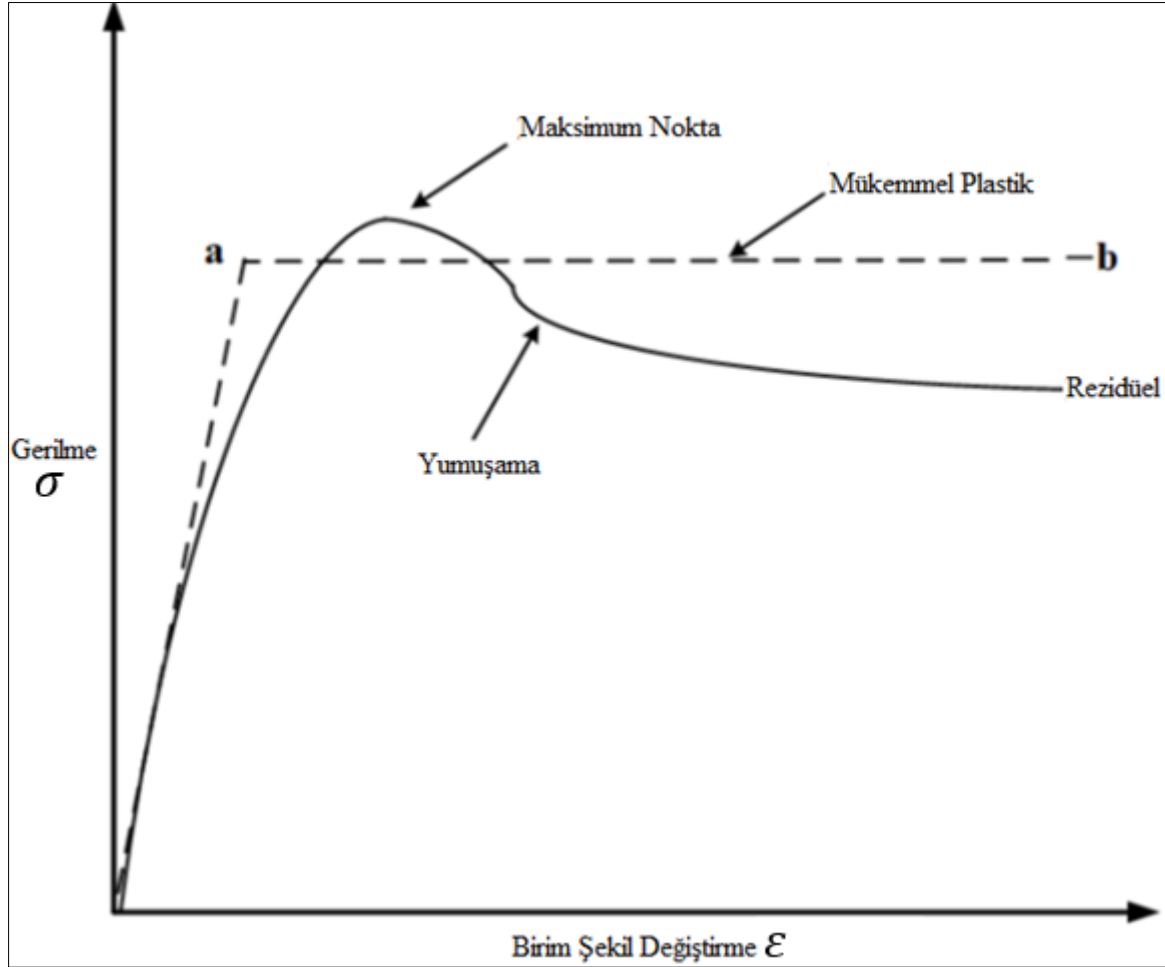


Şekil 3.2. Duncan-Chang deviator gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Midas Kullanım Kılavuzu, 2020)

Bu malzeme modeline ait parametreler üç eksenli basınç deneyinden elde edilmektedir. Gerilme durumu ve gerilme izine bağlı olarak üç adet modül bulunmaktadır. Bunlar başlangıç modülü (E_i), tanjant modülü (E_t) ve boşaltma-yeniden yükleme modülü (E_{ur})'dür.

3.1.3. Mohr-Coulomb malzeme bünye modeli

Mohr-Coulomb malzeme modeli, elastik-mükemmel plastik davranışa sahip bünye modeli olarak ifade edilmektedir. Hooke kanunu ve genelleştirilmiş Coulomb göçme kriterinin kombinasyonudur (Brinkgreve, 2005). Elastisite modülü (E), Poisson oranı (ν), içsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyon (c) ve dilatasyon açısı (ψ) gibi temelde beş adet olmak üzere hem elastik hem de plastik malzeme parametrelerini içermektedir. Bu malzeme modeli genellikle zemin davranışının simüle edilmesinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Şekil 3.3'de verilen egride düz çizgi gerçek zemin davranışını, kesikli çizgilerle verilen eğri ise varsayılan Mohr-Coulomb malzeme davranışını temsil etmektedir (Ti, Huat, Noorzaei, Jaafar ve Sew, 2009).

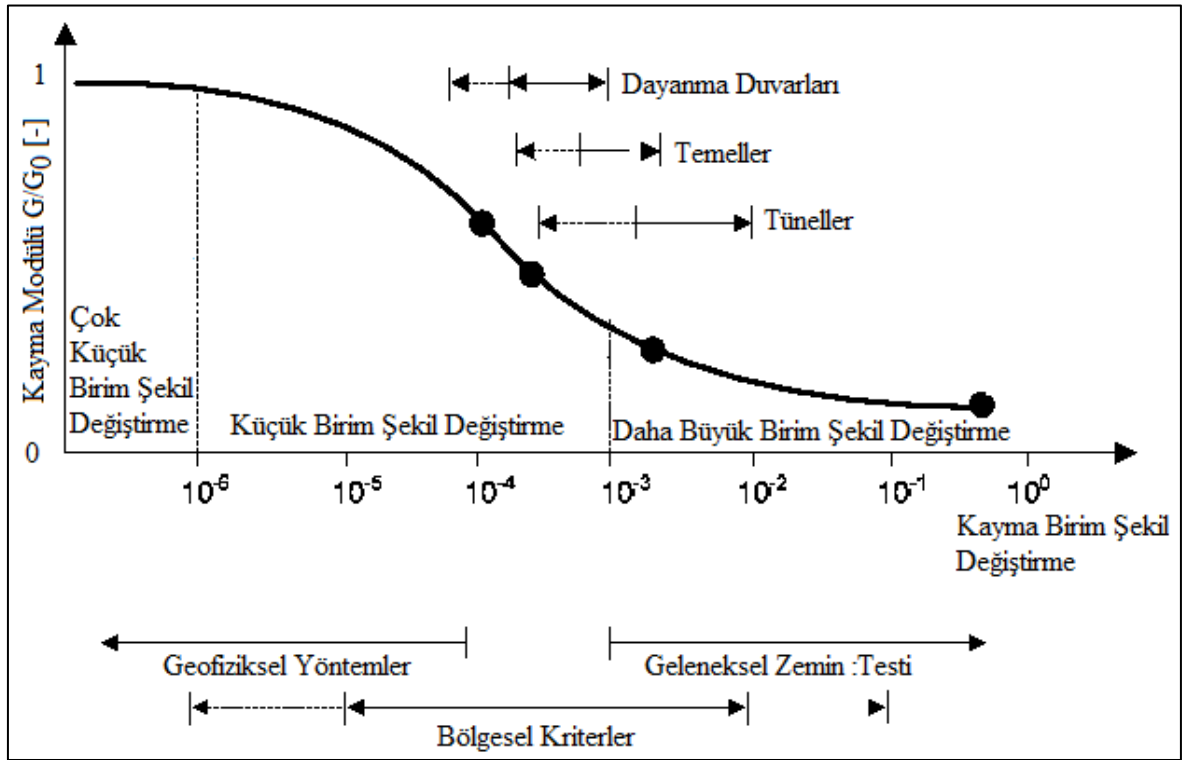


Şekil 3.3. Mohr- Coulomb malzeme modeli varsayılan ve gerçek malzeme davranışı gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Ti ve diğerleri, 2009)

Modelin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinden hareketle, “a” noktasına kadar zemin elastik davranış göstermektedir. “a” ve “b” bölgesi arasındaki bölgede mükemmel plastik davranış gösterdiği varsayımı yapılmaktadır. Uygulanan gerilmeler sonucunda malzeme ilk etapta sıkışmaktadır. Gerilmelerin, malzemelerin dayanım sınırına ulaşmasıyla birlikte yumuşama davranışı görülmektedir. Şekil değiştirmelerdeki artışla zeminin mukavemeti rezidüel değere ulaşmaktadır (Shiri, 2022). Bu modelde, zemin katmanlarında bulunan malzemelerin rijitliklerinin derinlikle değişmemesi nedeniyle ortalama bir rijitlik parametresi kullanıldığı ifade edilmiştir. Buna ek olarak toprak dolgu baraj, dolgu, şev, istinat duvarlarının stabilite analizlerinde (güvenlik analizi) ve temel projelerinin taşıma kapasitesi hesaplamalarında kullanılmasının uygun olduğu vurgulanmaktadır (Bahadır, 2022).

3.1.4. Küçük birim şekil değiştirme değerlerinde pekleşen zemin ve pekleşen zemin bünye modeli

Çoğu zemin malzemesi düşük birim şekil değiştirme değerlerinde daha yüksek rijitlik göstermektedir. Şekil 3.4’de çeşitli geoteknik tasarımlardaki farklı şekil değiştirme seviyeleri ile değişen kayma modülü davranışa ait eğri verilmiştir. Pekleşen zemin modeli için tanımlanan tüm parametrelerin küçük birim şekil değiştirme değerlerinde pekleşen zemin model için de geçerli olduğu ifade edilmektedir (Benz, 2007).

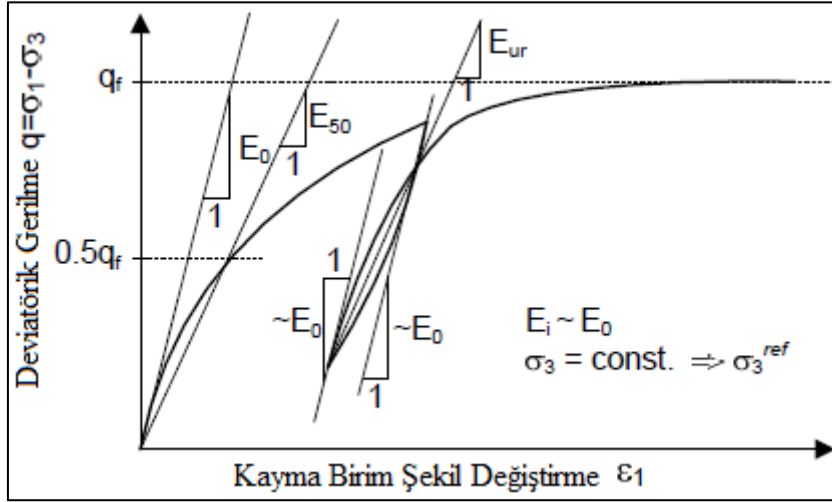


Şekil 3.4. Geoteknik projelerde tipik deformasyon aralıkları (Atkinson ve Sallfors, 1991)

Pekleşen zemin modelinin parametrelerinin çoğu standart üç eksenli basınç ve ödometre deneylerinden hesaplanmaktadır. Şekil 3.5’de düşey ekseninde bulunan q_f yenilme durumundaki deviatörük (kayma gerilmesi) gerilmesini ifade etmekte olup yatay eksen birim şekil değiştirmeye değerlerine karşılık gelmektedir. Pekleşen zemin modeli parametrelerinden olan E_{50} , üç eksenli deneyde eğrisinden $q_f/2$ ’ye karşılık gelen sekant rijitlik modülüdür. Aynı zamanda Eşitlik 3.4’de verilen denklem yardımıyla da hesaplanmaktadır.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (3.4)$$

Bu denklemde $p^{ref} = 100 \text{ kPa}$ referans gerilme değeri olmak üzere E_{50}^{ref} , referans gerilme değerine bağlı sekant rijitlik modülüdür. φ göçme anındaki içsel sürtünme açısını, c kohezyon ve m gerilmeye bağlı rijitlik değerini ifade etmektedir.



Şekil 3.5. Zeminler için tipik gerilme-şekil değiştirme eğrisindeki farklı modüllerin gösterimi (Obrzud, 2010)

E_{ur} , üç eksenli basınç deneyinde yükleme ve boşaltma durumunda zeminin rijitliğini ifade etmektedir. Yükleme ve boşaltma gerilme yolu Hook Yasasına göre elastik olarak modellenmektedir (Bahadır,2022). Eşitlik 3.5’de verilen denklem yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (3.5)$$

E_{ur}^{ref} , $p^{ref} = 100 \text{ kPa}$ ’daki rijitlik modülü değeridir.

E_{oed} , tanjant (ödometre) rijitlik modülü ödometre deneyi sonucunda hesaplanmaktadır. Ayrıca referans basınca dayalı tanjant modülünün hesaplanmasında Eşitlik 3.6 kullanılmaktadır.

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{\sigma'}{p^{ref}} \right)^m \quad (3.6)$$

Pekleşen zemin bünye modelinde, gerilme seviyesine bağlı rijitlik parametresi (m) sükunetteki zemin basıncı (K_0^{nc}), referans basıncı (p_{ref}), Poisson oranı (ν_{ur}), göçme oranı (R_f) gibi gelişmiş parametrelerin de tanımlanması sayısal analizler için önemlidir. $K_0^{nc} = 1 - \sin \varphi$ (Jaky, 1944) denklemiyle hesaplanmaktadır.

m değeri Janbu (1985) Norveç kumu ile silti için 0.5, Kempfert ve Gebreselassie (2006) yumuşak killer için 0,38-0,84 önermişlerdir (Bahadır, 2022). Von Soos ve Bohac (2002) tarafından sıkı kumlar için 0.5, yumuşak killer için 1 olarak 0,5-1 aralığında değerlerin uygun olduğu ifade edilmiştir.

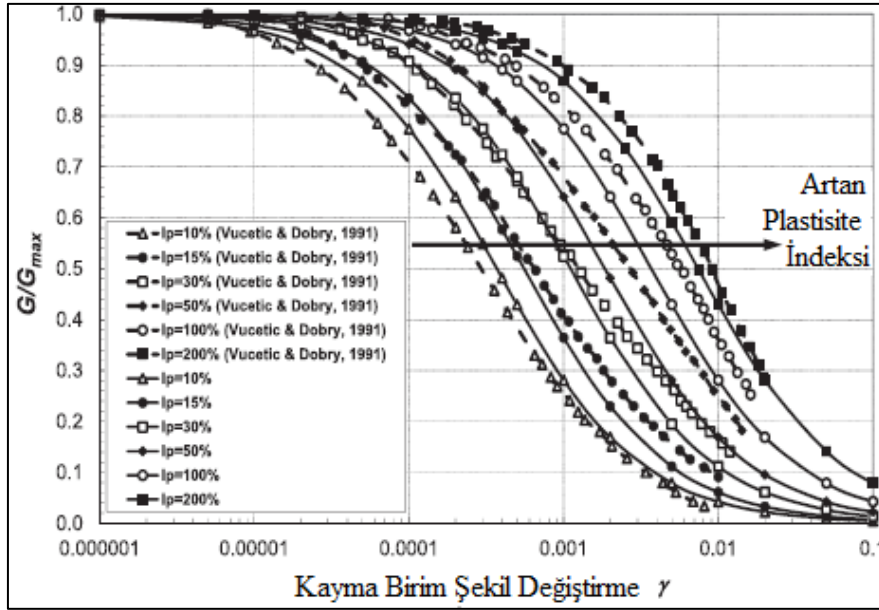
Küçük birim şekil değiştirme değerlerinde pekleşen zemin bünye modelinde, pekleşen zemin modelinde kullanılan parametrelere ek olarak G_0^{ref} (kayma rijitlik modülü) ve $\gamma_{0.7}$ (kayma modülü -birim şekil değiştirme eğrisinde kayma modülünün % 70'ine karşılık gelen kayma birim şekil değiştirme eşik değeri) parametreleri de gerekli olmaktadır (Midas Kullanım Kılavuzu,2020). G_0^{ref} , Eşitlik 3.7'da verilen denklem yardımıyla hesap edilmektedir.

$$G_0 = G_0^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (3.7)$$

Şekil 3.6'da farklı plastisite seviyelerindeki siltli ve killi zeminlerde, $\gamma_{0.7}$ değerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan $G/G_{max} - \gamma$ (kayma modülü-şekil değiştirme) eğrileri verilmiştir. Ayrıca kayma birim şekil değiştirme eşik değeri değerinin ($\gamma_{0.7}$) belirlenmesinde Hardin ve Drnevich (1972), Mohr-Coulomb yenilme kriterine göre Eşitlik 3.8 ve 3.9 sunulan denklemleri önermiştir.

$$\gamma_{0.7} = 3/28 G_0 [2c'(1 + \cos 2\varphi') - \sigma'_1(1 + K_0) \sin 2\varphi'] \quad (3.8)$$

$$\gamma_{0.7} = 3/9 G_0 [2c'(1 + \cos 2\varphi') - \sigma'_1(1 + K_0) \sin 2\varphi'] \quad (3.9)$$



Şekil 3.6. Kil ve siltlerin rijitlik değişimi için yeni tasarım şemaları dinamik uygulamalar (Vardanega ve Bolton, 2013)

3.1.5. Ortotropik malzeme bünye modeli

Bu model kabuk, düzlem gerilme ve 2D geogrid gibi iki boyutlu eleman türlerinde uygulanmaktadır. Doğrusal elastik ve elasto-plastik davranışı temsil eden türleri bulunmaktadır. Yatay ve düşey yöndeki farklı rijitlik değerlerinin önemli olduğu durumlarda tercih edilirler. Elastik modülü (E_1 , E_2), kayma modülü (G_{12} , G_{23} , G_{31}) ve Poisson oranı (ν), çekme mukavemeti ve termal parametreler tanımlanabilmektedir (Midas Kullanım Kılavuzu, 2020).

Yukarıda verilen altı malzeme bünye modeli, zeminlerin davranışının modellenmesinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Modellere ait parametreler yapılan deneysel çalışmalar sonucunda hesaplanabildiği gibi verilen denklemler yardımıyla da hesaplanması mümkün olmaktadır.

Sayısal analizlerde güvenilir ve gerçeğine en yakın sonuçlar elde etmek amacıyla doğru malzeme modelinin seçimi oldukça önemlidir. Özellikle dinamik analizlerde zemin davranışının simüle edilmesinde gelişmiş yapısal modellerin kullanımı gereklidir.

Zemin malzemeleri, çok küçük birim şekil değiştirmelerde elastik davranırken artan gerilme ve döngüsel yüklemelere bağlı olarak plastik davranışı göstermektedir. Bu nedenle elasto-plastik davranışını temsil eden malzeme bünye modellerinin tercih edilmesi uygun

görülmektedir. Küçük birim şekil değiştirme değerlerinde pekleşen zemin bünye modelinin, dinamik analiz için en iyi seçeneklerden biri olduğu ifade edilmiştir (Brinkgreve, Swolfs, Engine, 2008). Bununla birlikte tekrarlı trafik yükleri etkisiyle meydana gelen deformasyonların çok küçük bir kısmı elastik iken plastik deformasyonların etkisinin daha fazla olduğu belirtilmiştir. Ancak yükleme-boşaltma döngülerinde esneklik modülü değerinin yük boşalım sırasında daha yüksek bir değer aldığı belirtilmiştir (PLAXİS, Malzeme Modelleri Kılavuzu, 2023). Bu nedenle küçük birim şekil değiştirme değerlerinde pekleşen zemin bünye modelinin bu davranış ile uyumlu olduğunu söylemek mümkündür.

Bu nedenle granüler malzeme içeriğine sahip olan temel ile alttemel tabakaları ve doğal zemin tabakası için zemin davranışını en iyi yansıtan malzeme modelinin küçük birim şekil değiştirme değerlerinde pekleşen zemin bünye modeli olması nedeniyle çalışma kapsamında da tercih edilmiştir.

3.2. Asfalt Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi

Asfalt karışımlarının dinamik özellikleri üzerinde farklı sıcaklık, yük ve hızların etkileri Zhang, Zheng ve Kang (2013) tarafından incelenmiştir. Asfalt karışımlarının gerilmeleri ve yer değiştirmeleri ile araç özellikleri arasında ilişki olmadığını ayrıca sıcaklığın, dinamik özellikler üzerindeki etkisi daha önemli olduğunu belirtmişlerdir. Asfalt malzemesi sıcaklık dolayısıyla yumuşayıp sertliğini kaybederek rijitliği etkilenmektedir. Bu nedenle yüklere maruz kalan asfalt malzemesinin gerilmeyi yayma kabiliyeti azalacaktır. Böylece meydana gelecek olan deformasyonlar artacaktır.

Von Quintus (1994) asfalt kaplamanın, düşük sıcaklıklarda elastik yada visko-elastik davrandığını ifade etmiştir. Bununla birlikte günümüzde yapılan çoğu çalışmada asfalt elastik olarak kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır (Kim, Tutumluer ve Kwon, 2009; Yan, Ye, Wang ve Wang 2021). Viskoelastik olarak modellendiği çalışmalar da bulunmaktadır (Elseifi, Al-Qadi ve Yoo, Al-Qadi, Elseifi, Janajreh, 2006; Yoo ve Al-Qadi, 2007; Zhao ve Wang, 2021). Wang ve Al-Qadi (2010) agrega, hava ve su gibi malzemelerin kombinasyonu ile oluşan asfalt betonunun temelde bu içeriklere sahip olması nedeniyle zemin özelliklerine benzetilmiştir. Daha önce bahsedildiği üzere zeminin sonsuz küçük birim şekil değiştirmelerde elastik davranması ve uygulanan yükün şiddetinin artmasıyla plastik şekil değiştirmeler oluşturmaktadır. Tekrarlı trafik yükleri altındaki kaplama yapılarına yönelik yapılan analizlerden doğru sonuçlar alabilmek amacıyla elasto-plastik yapısal modelleri

içeren, doğrusal olmayan yük-deplasman analizi yapılmalıdır. Bu nedenle sayısal analizlerde asfalt için seçilecek olan malzeme modelinin Mohr-Coulomb olabileceği belirtilmiş olup buna uygun olacak şekilde asfalt betonu için malzeme modeli seçilmiştir. Ayrıca literatürde asfalt betonu için mukavemet parametrelerinin 40° sürtünme açısında, 45°C 'de 400 kPa ve 25°C 'de 600 kPa kohezyon değerine sahip olduğu belirtilmiştir (Gokhale, 2001; Hajj, Siddharthan, Sebaaly ve Weitzel, 2007). Mattos, Núñez, Ceratti, Zingano ve Fedrigo (2016) geleneksel asfaltın, ve modifiye edilmiş asfaltın mukavemet parametrelerini belirlemek amacıyla üç eksenli deneysel çalışmalar yapmışlardır. Elde edilen bulgulara göre geleneksel asfalt için 25°C 'de yapılan deneylerde 46° sürtünme açısında 480 kPa kohezyon değeri hesaplanmıştır. Aynı zamanda asfaltın modülünün ve Poisson oranının tanımlanabilmesi için yapılan literatür çalışmalarından bazılarına ait değerler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Asfalt betonun mekanik özellikleri

Malzeme	Esneklik Modülü (E) (kPa)	Poisson oranı (ν)	Kaynak
Asfalt Betonu	4 134 693	0,30	Saad, Mitri ve Poorooshasb (2006)
Asfalt Betonu	4 230 000	0,33	Yoo ve Al-Qadi (2007)
Asfalt Betonu	4 500 000	0,30	Alzabeebee, Chapman ve Faramarzi (2018)
Asfalt Betonu	4 000 000	0,35	Arvin ve Tamiz (2018)
Asfalt Betonu	4 000 000	0,35	Al-Jumaili (2016)

Çalışma kapsamında elde edilen veriler ışığında kaplama tabakasının modellenmesinde kullanılan Mohr-Coulomb malzeme bünye modeli parametreleri esneklik modülü (E), 4 500 000 kPa; Poisson oranı (ν), 0,3; içsel sürtünme açısı 46° ve kohezyon ise 480 kPa olarak belirlenmiştir.

3.3. Çelik Cürufu Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi

Yol yapısını oluşturan tabakalarda kullanılan malzemeler içerisinde yer alan agregalar, çeşitli kayaların ayrışması sonucunda elde edilmektedir. Ayrışma sonucunda kırma taş olarak elde edilen bu ürünün çeşitli kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olması gerekmektedir.

Çelik cürufu, çelik endüstrisinin bir yan ürünüdür ve granit, kireç taşı gibi geleneksel ezilmiş agregaya kıyasla yüksek sertlik özelliğine sahiptir (Wen, Wu ve Bhusal, 2016). Çelik cürufları ilk olarak çelik üretim tesislerinde erimiş halde cüruf çukurlarına dökülmektedir. Tipik olarak hava soğutma ya da hem hava hem de su püskürtme yöntemleri kullanılarak yavaş bir şekilde soğutulmasının ardından farklı geometri ve boyutlara sahip yapıda malzeme oluşmaktadır. Tıpkı agrega işleme tesislerinde olduğu gibi kırma, boyutlandırma, eleme, işleme ve stoklama faaliyetleri sonucunda metal kısmı ayrışması sonucu çelik cürufları ortaya çıkmaktadır. Bölüm 2.4’de çelik cürufuna ait kimyasal bileşen tablosunda verildiği üzere içeriğindeki manganez ve demir yoğunluğu nedeniyle doğal agregaya kıyasla ağırdır (Yıldırım, 2022).

Çelik cürufunun sahip olduğu yüksek mukavemet, aşınma direnci ve kararlılığı yol yapımında doğal agregaya alternatif olarak tercih edilmektedir. Sayısal analizlerde kullanılan BOF cürufu, agrega niteliklerini karşılamaktadır. Üstelik diğer agregalara kıyasla fiziksel şeklinin keskin, köşeli olması sayesinde daha yüksek tekerlek izi ve sürtünme direnci sunmaktadır.

Çelik cürufunun agrega olarak ve asfalt kaplama karışımlarında kullanımına yönelik çok sayıda çalışma olmasına rağmen geomalzeme olarak kullanımına yönelik kısıtlı çalışmanın varlığı dolayısıyla bu tez çalışması kapsamında, yol temel ve alttemel tabakalarında kullanımı değerlendirilmiştir.

BOF cürufuna ait malzeme parametreleri, Karadağ (2020) tez çalışmasından temin edilmiştir. Referans alınan çalışmada malzeme parametrelerine yönelik yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

3.3.1. Çelik cürufunun mekanik ve fiziksel özellikleri

Çelik cürufunun agrega olarak, yol temel ve alttemel tabaklarında kullanımı Karayolları Teknik Şartnamesi limitleri açısından değerlendirilmesi önemlidir. Çalışma kapsamında kullanılan BOF cürufuna ait bazı teknik özellikler Çizelge 3.2’de verilmiştir. Çizelge 3.3’de Karayolları Teknik Şartnamesi ‘ne göre şartname limitlerini sağladığı Karadağ (2020) çalışmasında ifade edilmiştir.

Çizelge 3.2. BOF cürufu teknik özellikleri (Karadağ, 2020)

Su emme oranı (%)	3
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık, Mg ₂ SO ₄ ile kayıp (%)	20
Los Angles Aşınma (%)	8,56
Yassılık İndeksi (%)	15,5
Organik Madde (%3NaOH ile)	Negatif
Likit limit, Plastik limit (%)	NP

Çizelge 3.3. Karayolları Teknik Şartnamesi Temel ve Alttemel tabakaları teknik özellikleri limit değerleri (KTŞ, 2023)

Deney Adı	Alttemel şartname limitleri	Temel şartname limitleri	Deney Standardı
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık, Mg ₂ SO ₄ ile kayıp (%)	≤25	≤20	TS EN 1367-2
Parçalanma direnci (Los Angeles), (%)	≤45	≤35	TS EN 1097-2, ASHTO T 96
Yassılık indeksi (%)	35, ≤30	30, ≤25	BS 812, TS EN 933-3
Su emme oranı (%)	≤3,50	≤3,00	TS EN 1097-6
Likit limit (%)	≤25	NP (Plastik olmayan)	TS 1900-1, ASHTO T 89
Plastik limit (%)	≤6	NP (Plastik olmayan)	TS 1900-1, ASHTO T 90
Kil Topağı ve Dağılabilen Tane Oranı, %	İri malzeme (4.75mm elek üstü) ≤2	≤1,00	ASTM C 142
Organik Madde (%3NaOH ile)	Negatif	Negatif	TE EN 1744-1
CBR (yaş)	Tip A %30, Tip B %50	Granüler Temel %100, PMT %120	ASHTO T 193, TS 1900-2

FHWA (2023)'e göre çelik cürufunun temel mekanik özellikleri Çizelge 3.4'de verilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan BOF cürufunun FHWA'ya göre limit değerler arasında olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.4. Çelik cürufu mekanik özellikleri (FHWA, 2023)

Mekanik Özellikler	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) (Öğütülmüş kireç taşı CBR'ı 100%)	300'e kadar
Sertlik (Moh skalası) (Dolomit sertliği 3-4)	45113,00

Yi (2008) tez çalışmasında doğal agrega ile çelik cürufunun mekanik özelliklerini kıyasladığında benzer özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Çalışmada mekanik özelliklerine ait değerler Karayolları Teknik Şartnamesi (2013), temel ve alttemel tabakaları için verilmiş olan limitler ile karşılaştırılarak Çizelge 3.5'de sunulmuştur.

Çizelge 3.5. Granit ve çelik cürufu mekanik özelliklerinin Karayolları Teknik Şartnamesi ile kıyaslanması

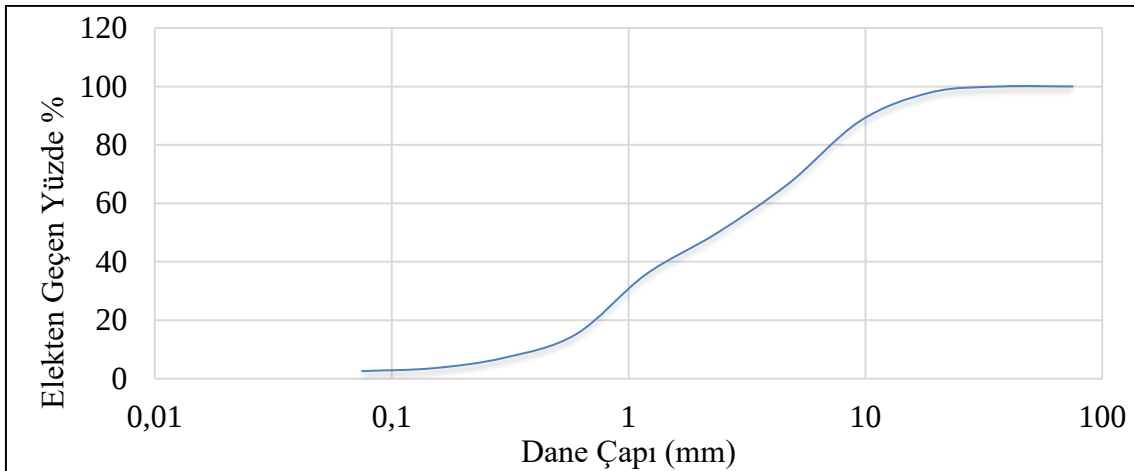
Test	Granit (Yi, 2008)	Çelik Cürufu (Yi, 2008)	Temel (KTŞ, 2013)	Alttemel (KTŞ, 2013)
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık	5,20%	Parçalanma yok	≤20	≤25
Yassılık indeksi	19,00%	4,00%	≤25	≤30
Parlaklık/cılalanma değeri	52,70%	56,60%	-	-
Su absorpsiyonu	0,51%	1,20%	≤3,00	≤3,50
Los Angeles aşınma	9,80%	9,80%	≤35	≤45

Çalışma kapsamında kullanılan çelik cüruflarının fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Karadağ (2020) çalışmasında, temin edilen çelik cüruflarına yönelik elek analizi yapılmıştır. Elek analizi sonucunda hesaplanan değerler Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Çelik Cürufu elek analizi sonuçları (Karadağ, 2020)

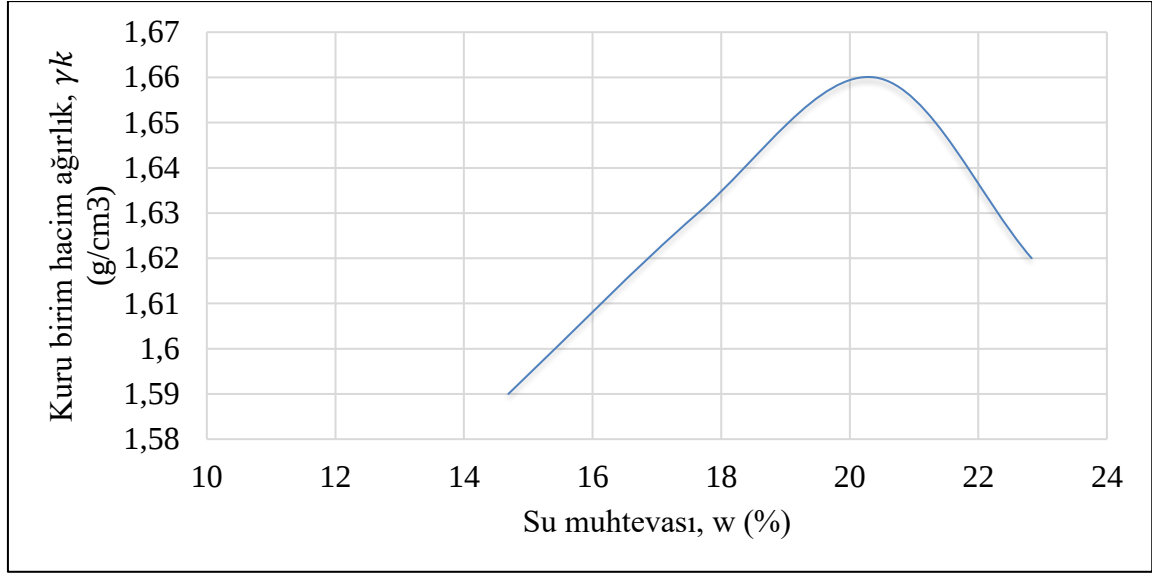
Elek no	D(mm)	Elek Üzerinde Kalan (g)	Elekten Geçen (g)	Geçen yüzdesi (%)
3"	75	0	1 000	100
11/2"	37,5	0	1 000	100
3/4"	19	20	980	98
3/8"	9,51	98	882	88,2
4	4,75	214	668	66,8
8	2,36	170	498	49,8
16	1,18	142	356	35,6
30	0,6	204	152	15,2
50	0,3	80	72	7,2
100	0,15	36	36	3,6
200	0,075	10	26	2,6

Çelik cürufuna ait granülometri eğrisi Şekil 3.7’de verilmiştir. KTŞ (2013)’ne göre çelik cürufunun malzeme dağılımı değerlendirilmiştir. KTŞ (2013)’de Tip-A ve Tip-B olmak üzere sırasıyla kum-çakıl ile kırmataş malzemeyi ifade eden alttemel gradasyon limitleri bulunmaktadır. Çelik cürufunun elek analizi sonuçlarına göre alttemel için gradasyon limitlerini sağladığı görülmüştür. Temel tabakası için de aynı değerlendirmeler yapıldığında yine şartname limitlerine uygunluğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.7. Çelik Cürufu granülometre eğrisi

Çelik cürufuna yönelik kuru birim hacim ağırlık ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Yapılan standart proktor sonucunda kuru birim hacim ağırlık değeri $1,66 \text{ g/cm}^3$ ve optimum su muhtevası %20,39 hesaplanmıştır ve kompaksiyon eğrisi Şekil 3.8’de verilmiştir. Özgül ağırlık değeri 2,9 su emme oranı %3 olarak belirlenmiştir (Karadağ, 2023). Çizelge 3.7’de çelik cürufunun fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan deneylerin sonuçları özetlenmiştir.



Şekil 3.8. Çelik cürufu Su muhtevası w(%) - kuru birim hacim ağırlık (γ_k) değişim kompaksiyon eğrisi

Çizelge 3.7. Çelik cürufunun geoteknik özellikleri

Özellikler	Alttemel/temel
Çakıl (%) ($D > 4.76 \text{ mm}$)	33,2
Kum (%) ($0.074 \text{ mm} < D < 4.76 \text{ mm}$)	64,2
İnce dane içeriği (%) (0.074 mm)	2,6
Cu	9,49
Cc	0,69
$\gamma_d \text{ max - standart (kN/m}^3 \text{)}$	1,66
$w_{\text{opt - standart}} (\%)$	20,39
$\phi(^{\circ})$	45°/47°
c (kPa)	45/47

3.3.2. Çelik cürufunun dinamik kayma modülünün belirlenmesi

Dinamik yükler etkisi altındaki zemin malzemelerinin davranışının tanımlanmasında elastik kayma modülü (G_{maks}) değeri kullanılmaktadır. Rezonant Kolon Deneyi ya da Bender Elemanı deneyi yapılarak hesaplanmaktadır. Rezonant kolon deneyi sayesinde elastik ve viskoelastik malzeme teorilerinden faydalanılarak zeminin sönüm oranı ve kayma modülü değerleri hesaplanabilmektedir (Richart, Hall ve Woods, 1970).

Malzeme parametrelerinin alındığı referans çalışmada (Karadağ, 2020), ERDEMİR' den temin edilen çelik cürufları kullanılarak Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında rezonant kolon deneyleri yapılmıştır. 50, 100, 150 ve 200 kPa hücre basınçlarında ve optimum sıklığa sahip numune için gerçekleştirilen deneyde kayma dalgası hızına bağlı olarak dinamik kayma deformasyon modülü (G_0) belirlenmiştir. Deneyde kullanılan malzeme boşluk oranı 0,68'dir.

Hardin ve Richart (1963), dinamik kayma modülünün (G_0) boşluk oranı ve ortalama çevre basıncına bağlı parametreler yardımıyla gerekli hesaplamaların yapılabilmesi amacıyla Eşitlik 3.10 verilen denklemi önermiştir.

$$G_0 = A_G F(e) (\sigma_c)^{n_G} \quad (3.10)$$

A_G ve n_G , malzemenin gerilme tarihçesi, fiziksel ve mineralojik özellikleri vb. bağlı olarak değişen sabitler olduğu ifade edilmiştir (Clayton, 2011). $F(e)$ ise boşluk oranına bağlı fonksiyondur. Bu fonksiyon Eşitlik 3.11'de verilmiştir. B malzeme türüne bağlı sabit, e boşluk oranını ifade etmektedir.

$$F(e) = (B - e)^2 / (1 + e) \quad (3.11)$$

Menq (2003) çalışmasında, A_G ve n_G sabitleri için zemin tipine ve malzemelerin gradasyonlarına ve şekillerine bağlı sabitler önermiştir.

Karadağ (2020) çalışmasında deney sonuçlarına yönelik yaptığı regresyon analizine göre dinamik kayma modülü ve çevre basıncı arasındaki ilişki için Eşitlik 3.12'de verilen denkleme dönüştürülmüştür.

$$G_0 = 9009 F(e) (\sigma_3)^{0,4891} \quad (3.12)$$

Menq (2003) çalışmasında kırmataş için önerilen $F(e) = (2,17 - e)^2 / (1 + e)$ denkleminde faydalanılarak $F(e)$ değerleri hesaplanmaktadır. KTŞ (2013) 'de temel ve alttemelin sahip olması gereken maximum boşluk oranları sırasıyla 0,475 ve 0,55 olması gerektiği ifade edilmiştir. Belirtilen boşluk oranları için $F(e)$ hesaplanmıştır. Yazılımda G_0 'ın $p_{ref} = 100$ kPa referans basınçtaki değerinin tanımlanması gerektiğinden Bölüm 3.1.4'de verilen Bknz: Eşitlik 3.7 kullanılarak $c = 47$ kPa ve $\varphi = 47^\circ$ çelik cürufu G_0^{ref} değerleri hesaplanmıştır. $\gamma_{0,7}$ Bölüm 3.1.4'de verilen Bknz: Eşitlik 3.9 kullanılarak belirlenmektedir. Hesaplanan dinamik kayma modüllerine ait değerler Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Çelik cürufu dinamik kayma modülü değerleri (Karadağ, 2020)

	e (Boşluk Oranı)	C (kohezyon, kPa)	φ° (içsel sürtünme açısı)	G_0^{ref} (kPa)	$\gamma_{0,7}$
Temel	0,475	47	47	180 000	2,14 E ⁻⁴
Alttemel	0,55	47	47	138 000	2,18 E ⁻⁴

Kireçtaşına ait malzeme parametreleri ise Karadağ (2020) çalışmasında, Ayithi ve Hiltunen (2017)'den temin edilmiş olup iyi sıkıştırılmış, kaliteli granüler malzeme olduğu ifade edilmektedir.

3.4. Yumuşak Kil Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi

Sayısal analizde seçilen yumuşak kilin temel parametre değerlerinden bazıları; $c = 50$ kPa, $\frac{E_{50}}{C_u} = 100$, $\varphi = 0^\circ$ olarak seçilmiştir. Belirlenen ve hesaplanan değerlerin drenajsız parametreler olmasına dikkat edilmiştir.

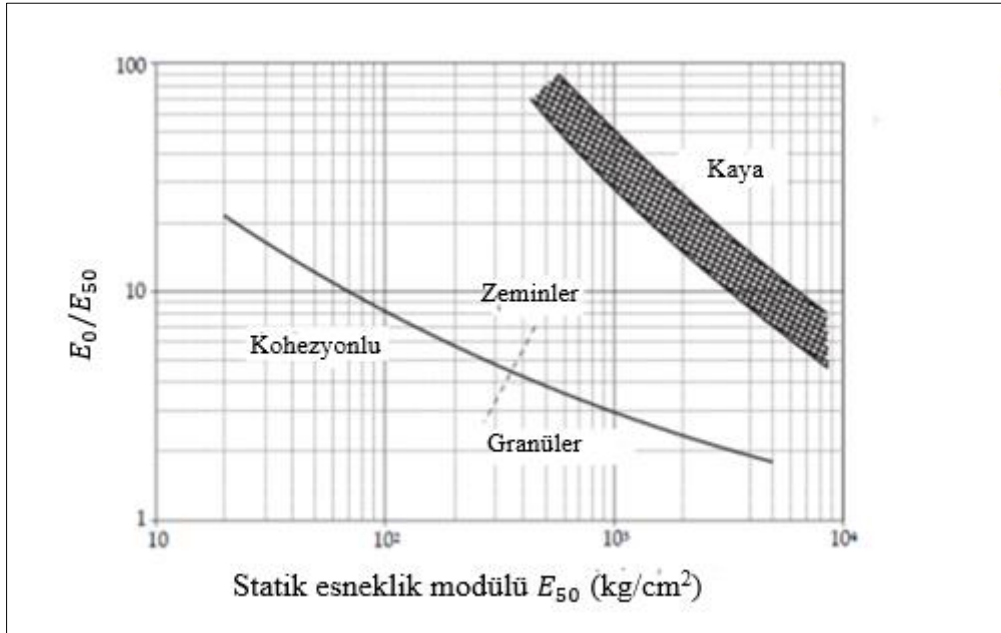
Drenajsız koşullardaki yumuşak kil için m değeri 0,1 olarak kabul edilmiştir. E_{50}^{ref} rijitlik modülü, Bknz: Eşitlik 3.4 kullanılarak hesap edilmektedir. E_{eod}^{ref} ve E_{ur}^{ref} rijitlik parametrelerinin hesap edilmesi amacıyla Eşitlik 3.13 (Midas Kullanım Kılavuzu, 2020) sıklıkla kullanılmaktadır.

$$E_{50}^{ref} = E_{eod}^{ref} = E_{ur}^{ref} / 3 \quad (3.13)$$

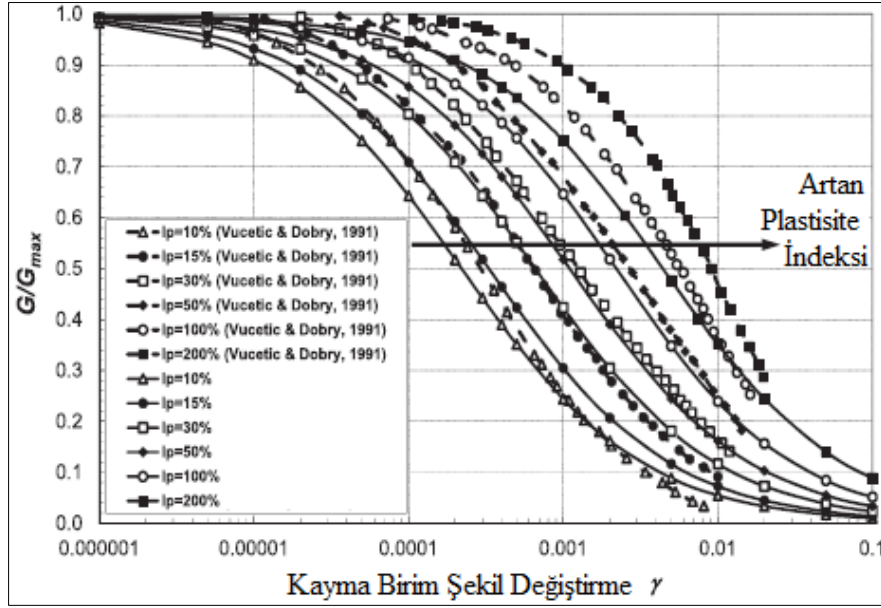
E_{50} rijitlik modülü değerinin bilinmesi halinde Alpan (1970) çalışmasında bulunan dinamik ve statik esneklik modülü eğrisinden (Şekil 3.9), E_0 (küçük birim şekil değiştirme esneklik modülü), G_0 ise Eşitlik 3.14'den (Wichtmann ve Triantafyllidis, 2009) hesaplanmaktadır.

$$G_0 = E_0 \frac{1}{2(1 + \nu_{ur})} \quad (3.14)$$

Şekil 3.10'da verilen $G/G_{max} - \gamma$ eğrisinden PI'ne (Plastisite İndisi) bağlı olarak $G/G_{max} = 0.7$ değeri için $\gamma_{0,7}$ kayma birim deformasyon modülü belirlenmektedir.



Şekil 3.9. Dinamik ve statik esneklik modülü arasındaki ilişki (Bahadır, 2022; Alpan, 1970)



Şekil 3.10. G/G_{max} - γ değişim eğrisi (Vardanega ve Bolton, 2013)

Yumuşak kile ait malzeme parametreleri Çizelge 3.9'da özetlenmiştir

Çizelge 3.9. Yumuşak kil malzeme parametreleri

	$E_{50}/c_u = 100$
γ (Birim hacim ağırlık) kN/m^3	16,5
c_u (Kohezyon) kN/m^2	50
ϕ (İçsel sürtünme açısı)	0
E_{50} (kPa)	5000
E_{50}^{ref} (kPa)	5000
E_{ur}^{ref} (kPa) = $(3 \times E_{50}^{\text{ref}})$	15000
$E_{oed}^{\text{ref}} = E_{50\text{ref}}$	5000
E_o (Alphan Chart 1970)	60000
G_0^{ref} (kPa)	25000
$\gamma_{0,7}$	3,00E-04

3.5. Geogrid Malzeme Parametresi Çalışması

Bir geosentetik malzemenin maruz kaldığı dış kuvvetler tarafından oluşan deformasyonlara karşı gösterdiği direnç çekme mukavemetine bağlıdır. Geosentetik malzemenin sahip olduğu geometrik özellikleri ve düzensiz kesit alanı dolayısıyla hesaplamalarda tanımlanan gerilme

cinsi ile farklılık göstermektedir. Bu sebeple çoğunlukla birim uzunluk başına düşen yük olarak tanımlanır. Çekme mukavemetine yönelik sayısal verilerin hesaplanmasında çekme dayanımı testi sonucu elde edilen kuvvet-uzama eğrisi kullanılmaktadır.

Geosentetik güçlendirme uygulamalarında kullanılacak olan geogridin çekme dayanımı malzeme özelliklerine, üretim şekline, uygulama yapılacak alanın çevresel özelliklerine ve zamana bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Buna göre üretici verileri geogridin kullanım koşullarına göre çeşitli katsayılarla düzenlenerek Eş. 3.15 (FHWA-NHI-10-025,2009) kullanılarak tasarım dayanımı hesaplanır. Bu azaltma faktörleri uygun indirgeme süreçlerini yansıtmakta olup değerleri bire (1'e) eşit ve büyük olmaktadır. Bu faktörlerin sayısal değeri saha uygulamaları neticesinde elde edilmesinden dolayı uygulama yapılan saha koşulları ve alana bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

$$P = \frac{T_{\text{üretici}}}{(FS_{\text{sünme}} \cdot FS_{\text{uygulama hasar etkileri}} \cdot FS_{\text{çevresel etkiler}})} \quad (3.15)$$

$FS_{\text{sünme}}$: Sünme Azaltma Faktörü, her bir ürün için laboratuvar sünme testlerinden elde edilen nihai mukavemetin, proje tasarım ömrüne bağlı olarak hesaplanan sünme sınır mukavemetine oranıdır (FHWA-NHI-10-025, 2009). Polimer tipine göre değişen katsayılar Çizelge 3.10'da verilmiştir. Sünme davranışı, uygulanan sabit bir yükten kaynaklanan polimer tipine ve ortam sıcaklığına bağlı olarak geosentetikte biriken birim şekil değiştirme-uzamadaki zamana bağlı artışı ifade etmektedir. Sünme, bazı geosentetik donatılı inşaat tasarımları, istinat duvarları, dik şevler, zayıf temeller üzerindeki dolgular vb. tasarımı ve performansında önemli bir faktördür.

Çizelge 3.10. Sünme faktörü polimer tipine bağlı katsayılar (FHWA-NHI-10-025, 2009)

Polimer tipi	Sünme azaltma faktörü
Polyester	1,6 - 2,5
Polipropilen	4 - 5
Yüksek yoğunluklu polietilen	2,6 - 5

$FS_{\text{Uygulama hasarı}}$: Uygulama (yükleme) Hasarı Faktörü, ilk mukavemetin alınan numunelerin mukavemetine oranı olarak tanımlanır. Kullanılan geosentetik ürüne ait testlerin

bulunmadığı durumlarda yerleştirme hasarı etkilerini hesaplamak amacıyla Çizelge 3.11’de verilen dolgu özelliklerine göre katsayı belirlenmektedir. Ayrıca yine spesifik bir şekilde projeye uygun değerlerin bulunmadığı durumlarda en büyük değer alınarak güvenli tarafta kalma hedeflenmektedir. Cho, An ve Lee (2001), yükleme hasarına ilişkin geosentetik malzeme türüne ve birlikte kullanıldığı granüler malzemenin tane boyutuna bağlı olarak Çizelge 3.12’de verilen değerleri önermiştir.

Çizelge 3.11. Yükleme hasarı azaltma faktörleri (Elias, 2000)

No	Geosentetik	Tip 1 dolgu max. boyut 102 mm D ₅₀ yaklaşık 30mm	Tip 2 dolgu max. boyut 20mm D ₅₀ yaklaşık 0.7mm
1	HDPE tek eksenli geogrid	1,20 - 1,45	1,10 - 1,20
2	PP çift eksenli geogrid	1,20 - 1,45	1,10 - 1,20
3	PVC kaplı PET geogrid	1,30 - 1,85	1,10 - 1,30
4	Akrilik kaplı PET geogrid	1,30 - 2,05	1,20 - 1,40
5	Dokuma geotekstiller (PP & PET) ⁽¹⁾	1,40 - 2,20	1,10 - 1,40
6	Dokunmamış geotekstil (PP & PET) ⁽¹⁾	1,40 - 2,50	1,10 - 1,40
7	Kesik film dokuma PP geotekstiller ⁽¹⁾	1,60 - 3,00	1,10 - 2,00
⁽¹⁾ Minimum ağırlık 270 g/m ²			

Çizelge 3.12. Önerilen kurulum hasar faktörleri (Cho, An ve Lee, 2001)

Dolgu zeminin maksimum parçacık çapı (mm)	Hasar faktörü	
	PET geogridler	HDPE geogridler
40	(1,21 – 1,35) → 1,35	(1,02 – 1,06) → 1,10
60	(1,30 – 1,55) → 1,55	(1,07 – 1,14) → 1,15
80	(1,45 – 1,70) → 1,70	(1,05 – 1,16) → 1,20

FS_{Çevresel} etkiler: Çevresel Azaltma Faktörü, geosentetik maddenin mikroorganizmalar, kimyasallar, termal oksidasyon, hidroliz ve gerilim çatlaması tarafından saldırıya karşı duyarlılığına bağlıdır ve tipik olarak 1,1 ila 2 arasında değişebilir (Çizelge 3.13). Minimum azaltma faktörü 1,1 hesaplarda yaygın olarak kullanılmaktadır (FHWA-NHI-10-025,2009).

PET geosentetiklerin yalnızca $3 < \text{pH} < 9$ ile karakterize edilen ortamlarda kullanılması önerilir.

Çizelge 3.13. Çevresel azaltma faktörleri, PET (FHWA-NHI-10-025, 2009)

No	Ürün*	Çevresel Azaltma faktörü, $FS_{\text{çevresel etkiler}}$	
		$5 \leq \text{pH} \leq 8$	$3 \leq \text{pH} \leq 5$ $8 \leq \text{pH} \leq 9$
1	Geotekstilller ($M_n < 20,000$, $40 < \text{CEG} < 50$)	1,6	2,0
2	Kaplamalı geogridler, Geotekstilller ($M_n > 25,000$, $\text{CEG} < 30$)	1,15	1,3
M_n = ortalama moleküler ağırlık CEG = karboksil uç grubu * Dışardaki malzemelerin kullanımı			

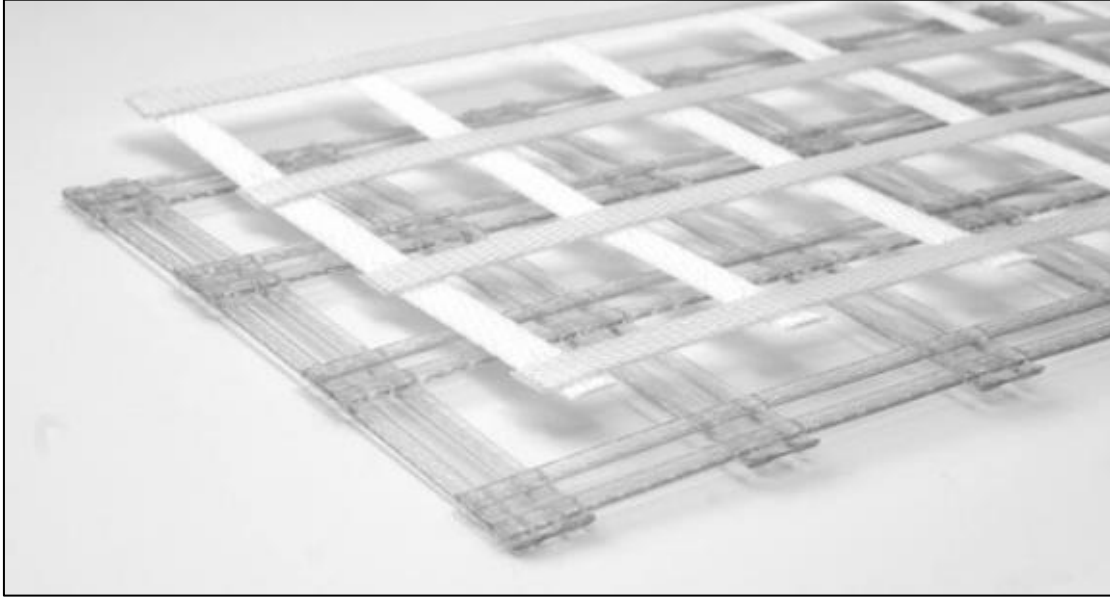
Çalışma kapsamında kullanılacak ekstrüde geogridler içerisinde en yüksek çekme dayanımına sahip olan geosentetik malzemenin belirlenmesi amacıyla literatür çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda önemli geosentetik üreticilerin ürünleri içerisinde en yüksek çekme dayanımına sahip olan ürünlere ait liste Çizelge 3.14’de verilmiştir. Sayısal analizlerde en yüksek çekme dayanımına sahip olan Secugrid malzeme parametreleri dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

Çizelge 3.14. Geogrid ürün türleri ve çekme dayanımları

Geosentetik türü	Uygulanan tabaka	Ürün üsmi	Çekme dayanımı (MD/XD)	Referans
Glas grid	Kaplama	GG 100	$100 \times 100 \text{ kN/m}$	Adfors (2023)
Glas grid	Kaplama	GG 8550	$50 \times 50 \text{ kN/m}$	Tensarcorp (2023a)
Tensar SS	Temel/Alttemel/Zemin	SS40	$40 \times 40 \text{ kN/m}$	Tensar (2023)
Tensar BXS	Temel/Alttemel/Zemin	Q3030	$30 \times 30 \text{ kN/m}$	Tensarcorp (2023b)
Geo grid	Temel/Alttemel/Zemin	BX3030	$30 \times 30 \text{ kN/m}$	Baselok (2023)
TENAX LBO	Temel/Alttemel/Zemin	LBO 440	$40 \times 40 \text{ kN/m}$	Tenax (2023b)
TENAX LBO	Temel/Alttemel/Zemin	LBO 330	$30 \times 30 \text{ kN/m}$	Tenax (2023c)
Secugrid	Temel/Alttemel/Zemin	80/80 Q6	$80 \times 80 \text{ kN/m}$	Naue (2023)

3.5.1. Sayısal analizlerde kullanılan secugrid malzeme parametrelerinin belirlenmesi

Şekil 3.11’de gösterilen Secugrid geogridler tek parça polyester (PET) ya da polipropilen (PP)’den düz veya kaynaklı birleşimli profil çubuklardan imal edilmektedir. Secugridler yüksek modül (düşük birim şekil değiştirmelerde yüksek çekme mukavemeti) ve düşük sünme eğilimi gösterirler. Zemine uygulanan çekme kuvvetlerini absorbe ederek, gerilmeleri düz ve sert çubuklar aracılığıyla dağıtır.



Şekil 3.11. Securid geogrid ürün görseli (Naue, 2023)

Çizelge 3.15’de sayısal analizlerde kullanıcak parametrelerin hesaplanması için gerekli üretici tarafından paylaşılan teknik veriler bulunmaktadır.

Çizelge 3.15. Secugrid teknik veriler (Naue, 2023)

Hammadde	Polyester (pet) 80/80 Q6
Çekme dayanımı (Boyuna/enine) (EN ISO 10319)	$\geq 80 / \geq 80$ kN/m
2% uzamadaki çekme dayanımı (Boyuna/enine) (EN ISO 10319)	36 / 36 kN/m
Nominal çekme mukavemetinde uzama (Boyuna/enine) (EN ISO 10319))	$\leq 7 / \leq 7$ %
%1 birim deformasyondaki uzama rijitliği (Boyuna/enine) (EN ISO 10319)	2000 kN/m / 2000 kN/m
%0,5 birim deformasyondaki radyal rijitlik (EN ISO 10319)	≥ 1236 kN/m

Secugrid için sayısal analizlerde kullanılacak olan malzeme parametrelerinin belirlenmesi adımına ilk olarak nihai çekme mukavemeti değerinin hesaplanması ile başlanmıştır. Mukavemet değerinin belirlenmesi amacıyla (Bkz. Eşitlik 3.15) kullanılan eşitliğe göre sünme, çevresel ve yükleme hasarı faktörleri belirlenmiştir.

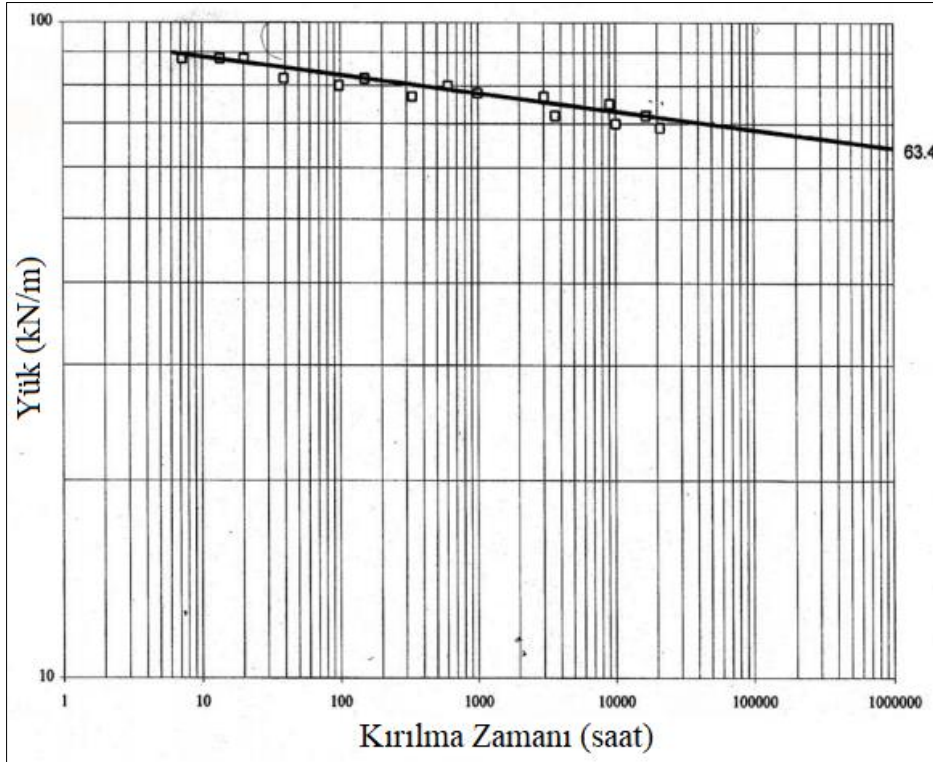
KGM, Karayolları Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberi'nde (2008), analiz süresi için ilk inşaat sürecinden itibaren ve sonrasında yapılacak olan takviye, farklı alternatif projelerin kıyaslamalarının yapıldığı toplam zaman olarak ifade edilmektedir. Sünme faktörünün hesaplanması için gereken süre, ASSHTO'ya (1993) göre analiz süreleri proje süresine eşit olduğu varsayımına dayanarak yolun sınıfına göre Çizelge 3.16'de uygun olan sayısal değer seçilmiştir.

Çizelge 3.16. Yol sınıfına bağlı analiz süreleri (KGM, Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi, 2008)

Yolun Sınıfı	Analiz süresi (yıl)
Otoyollar ve devlet yolları	20-50
Sathi kaplamalı yollar	10-20

Buna göre sünme hasarı faktörü FHWA-NHI-10-025, (2009)'da verilen Eş. 3.16 (FHWA-NHI-10-025,2009) kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu eşitliğe ait T_1 değeri Şekil 3.12'de verilen logaritmik eğriden 50 yıllık proje ömrü için hesaplanmıştır. Şekil 3.12'de verilen grafiğin yatay ekseninde 50 yıl saate dönüştürülerek hesaplanan değer işaretlenerek düşey ekseninde karşılık gelen T_1 değeri belirlenmiştir.

$$FS_{sünme} = \frac{T_{ulttot}}{T_1} \quad (3.16)$$



Şekil 3.12. Polyester (PET) geosentetik için zamana bağlı yük değişimi (FHWA-NHI-10-025, 2009)

Çevresel azaltma faktörü yine üretici tarafından paylaşılan Çizelge 3.17’de pH 4,1-9 için verilen değeri kullanılmıştır.

Çizelge 3.17. Secugrid pH değerine bağlı çevresel azaltma faktörleri (Fibertex, 2023)

pH (2,0 – 4,0)	pH (4,1 – 9,0)	pH (9,1 – 10,0)	pH (10,1 – 11,0)	pH (11,1 – 12,5)
1,10	1,01	1,02	1,06	1,21

Yükleme (yerleştirme) hasarının belirlenmesi amacıyla öncelikle literatür çalışması yapılmıştır. Sayısal analizleri yapılacak yol tasarımında granüler malzeme olarak çelik cürufunun kullanılacak olması nedeniyle geogrid ile çelik cürufunun birlikte davranışını doğru şekilde yansıtacak olan değer belirlenmesi açısından gerekli görülmüştür.

Bu amaçla Almanya Geoteknik Topluluğu’nun hazırlamış olduğu, “Geosentetiklerle Donatının Planlanması ve Boyutlandırılması için Öneriler” EBGeo (2010), raporunda ince taneli zeminlerde kalıcı yapılar için geosentetik malzeme kullanımı durumunda hasar azaltma faktörü (FS) 1,5, yuvarlak ve iri taneli karışık zeminler için azaltma faktörünün en az 2 olması gerektiği ifade edilmiştir.

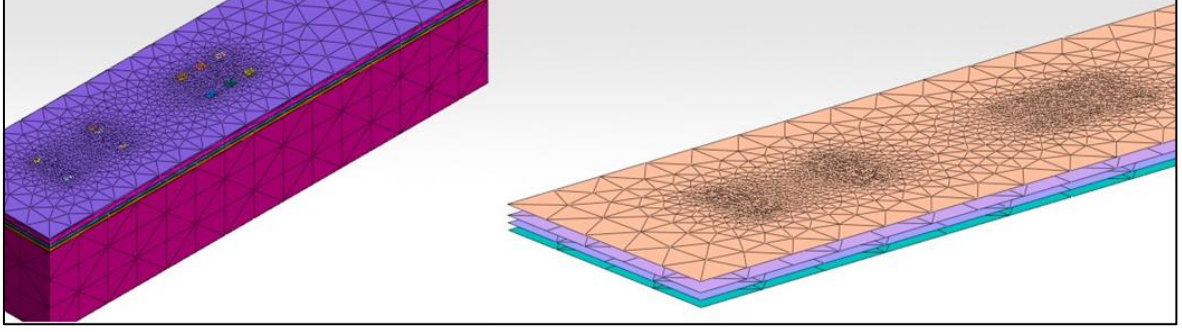
Schwerdt, Mirschel, Hildebrandt, Wilke ve Schneider (2021) çalışmalarında, bazık fırın cürufu (BFS), elektrik fırın cürufu (EFS), yol balast (TB) ve geri dönüştürülmüş beton (RC) olmak üzere dört farklı ikame malzeme, dolgu malzemesi olarak tercih edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kullanılan dolgu malzemeleri tıpkı bir çakıl gibi ana dolgu malzemelerine benzer hatta daha iyi bir davranış sergilediği sonucuna varılmıştır. Yerleştirme hasarını tespit etmek amacıyla ilave testler yapılmıştır. EBGEO (2010)'da verilen deneysel prosedürlere uygun olarak yapılan çalışma neticesinde yerleştirme hasarı katsayıları farklı malzeme içeriklerine göre belirlenmiştir. Çizelge 3.18'de kullanılan malzeme türüne bağlı hasar azaltma faktörü değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 3.18. Hasar azaltma faktörü F_s değerleri

Kullanılan malzeme	F_s -Değeri (Boyuna)	F_s -Değeri (Enine)
EFS	1,01	1,03
BFS	1,00	1,00
RC	1,01	1,00
TB	1,08	1,06

Çizelge 3.18'de verilen çelikhane cürufuna ait yerleştirme hasar değeri referans alınarak hesaplamalarda kullanılmıştır. Belirlenen tüm nihai katsayılar sonucunda hesaplanan ve sayısal analizlerde kullanılacak geogride ait yazılıma tanımlanan malzeme parametrelerinin değerleri Bölüm 4'de sunulmaktadır.

Geogride ait malzeme bünye modelinin seçiminde yazılımda iki yönde rijitlik parametrelerinin tanımlanabileceği Ortotropik-Geogrid bünye modeli seçilmiştir. Bu bünye modelinde malzeme davranışı elasto-plastik olarak açıklanmaktadır. Geogrid tabakalarının tanımlanmasında geogrid açıklıkları yazılımda modele aktarılamamıştır. Şekil 3.13'de gösterilen geogrid tabakaları kabuk levha elemanları olarak yazılıma tanımlanmıştır.



Şekil 3.13. Geogrid tabaka levhaları

3.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi Model Çalışması

FE modeli oluşturulmadan önce FE analizinin amaçlarının da belirlenmesi oldukça önemlidir. Bununla birlikte modellenecek tasarımın niteliği, dayanımı, göçmeye karşı güvenirliliği, yapı zemin etkileşimi vb. gibi birçok etkene karşı farklı yaklaşımlar gereklidir. Bu nedenle modelin hazırlanmasından sayısal analize kadar olan süreçte başlangıç hedeflerinin belirlenmesi önemlidir.

Birçok mühendislik uygulamasında olduğu gibi yol tasarımında da sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri olan basit katmanlı elastik teori ile kıyaslandığında FEM, karmaşık bir analiz türü olarak gözükmektedir. Ancak sonlu elemanlar tekniğinin uygulanması sayesinde farklı malzeme özellikleri ve yine kaplama deformasyon hesaplamalarında önemli rol oynayan lastik-kaplama etkileşimi simülasyonlarında daha başarılı olduğu bir gerçektir.

Sayısal analizi yapılacak olan modeli kurarken ve analizini yaparken en hızlı şekilde sonuca varılabilmesi için oluşturulacak FE modelin geometrisinin optimum boyutlarda ve gerçeği ile çelişmeyecek nitelikte olması tercih sebebidir.

Üstyapı tasarımında doğrusal olmayan malzeme davranışını doğru hesap edebilmek amacıyla son zamanlarda yaygın olarak tercih edilen Plaxis, ABAQUS, ANYS, ILLI-PAVE, KENLAYER, CHEVRON, VESYS, FENLAP, MICH-PAVE ve Midas GTS NX gibi sonlu elemanlar yöntemini kullanan çok sayıda yazılım bulunmaktadır. Bu yazılımları birbirinden ayıran avantajlı ve dezavantajlı yönleri bulunmaktadır. Ayrıca sayısal analizi yapılacak modelin malzeme davranışı, tasarımı ve hesaplama türü gibi farklılıklara bağlı olarak seçilen yazılım türü de değişmektedir. Sınır koşulları, yükleme durumu gibi etkenlerin dikkate

alındığı bununla birlikte doğrusal olmayan malzeme davranışının modellenemediği yazılımlar, esnek üstyapı tasarımında kullanılması daha faydalı olacaktır.

Midas GTS NX, 2D ve 3D olarak zemin yapı etkileşiminin ya da yalnızca zemin yapılarının analizi için geliştirilmiş bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Yazılım kütüphanesinde çok sayıda malzemenin modellenmesine imkan tanıyan bünye modellerinin bulunmasının yanında, dinamik ve statik analiz, doğrusal/doğrusal olmayan zaman analizi ve farklı sınır koşullarının tanımlanabilmesi mümkündür.

Katmanlar halinde inşa edilen esnek üstyapı tasarımlarında, oluşturulan modellerde herhangi bir sınır hatasından kaçınmak amacıyla yeteri kadar büyüklükte modellenmesi önemlidir. İlk olarak sayısal analizi yapılacak olan modelin geometrisi oluşturulmaktadır. Yol genişliğinin belirlenmesinde Karayolu Geometrik Standartları kent dışı iki şeritli yollar için tabloda verilen sayısal veriler dikkate alınarak 8 m olarak belirlenmiştir.

Tabaka kalınlıklarının belirlenmesi adımı ise KGM, Karayolları Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberi'ne (2008) göre kum-çakıldan oluşan alttemel tabakası kalınlığı minimum 20 cm, kırmataş için ise minimum 15 cm olmalıdır. Temelin ise granüler ve plent-miks için kalınlık değeri minimum değerler 15 cm ile çimento bağlayıcılı granüler malzeme için 20 cm ve sıcak karışımli bitümlü temel kalınlığı 8 cm olması gerektiği ifade edilmiştir. Karayolları Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberi'ne (2008) göre yolun sınıfına bağlı olarak değişen güvenilirlik değerlerine (Çizelge 3.19), MR değerine ve yolun proje süresi boyunca maruz kalacağı standart dingil yükü tekrür sayısına bağlı olarak belirlenen trafik kategorisi (milyon) değerine göre asfalt beton kaplamalı yollarda uygulanacak üstyapı tabaka kalınları değişmektedir.

Çizelge 3.19. KGM, Tavsiye Edilen Güvenirlik Değerleri (Karayolları Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberi, 2008)

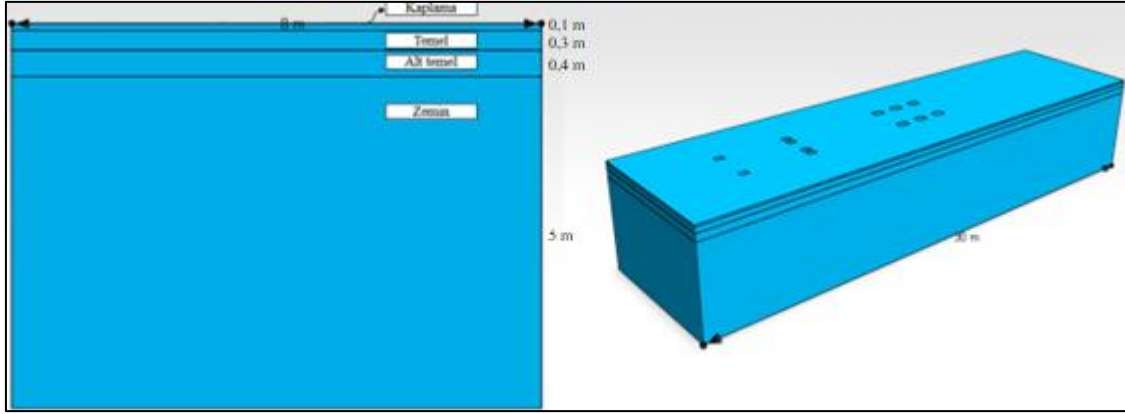
Yolun Sınıfı	Şartname Güvenirlik Değeri, %R	Standart Normal Sapma, Z_r
Otoyollar	95	-1,645
Devlet Yolu	85	-1,037
İl Yolu	70	-0,524

Buna göre %85 güvenilirlik değerine sahip olan bir devlet yolunun sahip olması gereken minimum ve maximum tabaka kalınlıkları Şekil 3.14’de verilmiştir. Temel tabakasının kalınlık değeri granüler temel, plent-miks ve çimento bağlayıcılı granüler temel olması durumuna göre değişmekte olup çalışma kapsamında granüler temel kullanılmıştır.

Aşınma Tabakası (5 cm)
Binder Tabakası (6-12 cm)
Temel Tabakası (15-20 cm)
Alttemel Tabakası (15-50 cm)
Doğal Zemin

Şekil 3.14. R=%85 güvenilirlik değeri için önerilen üstyapı tabaka kalınlıkları (Karayolları Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberi, 2008)

20 yıllık proje ömrü ne sahip bir devlet yolunda, servis ömrü süresince 74 745 362 milyon standart dingil tekerrür sayısına bağlı olarak temel ve alttemel tabakası kalınlığına karar verilmiştir. Bu çalışmada 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, taşıyıcı doğal zemin ise kilden oluşmaktadır. Temel tabakası kaplama tabakasından gelen yüklerin ilk dağıtıldığı diğer alt katmanlara göre daha fazla gerilmeye maruz kalması nedeniyle temel tabakası 10 cm daha kalın seçilmiştir. 3D modelde yol uzunluğu 30 m’dir. Şekil 3.15’de sayısal analizi yapılacak modelin enine kesit ve 3D geometrisi verilmiştir.



Şekil 3.15. Sonlu elemanlar analizi için enine kesit ve 3D geometri modeli

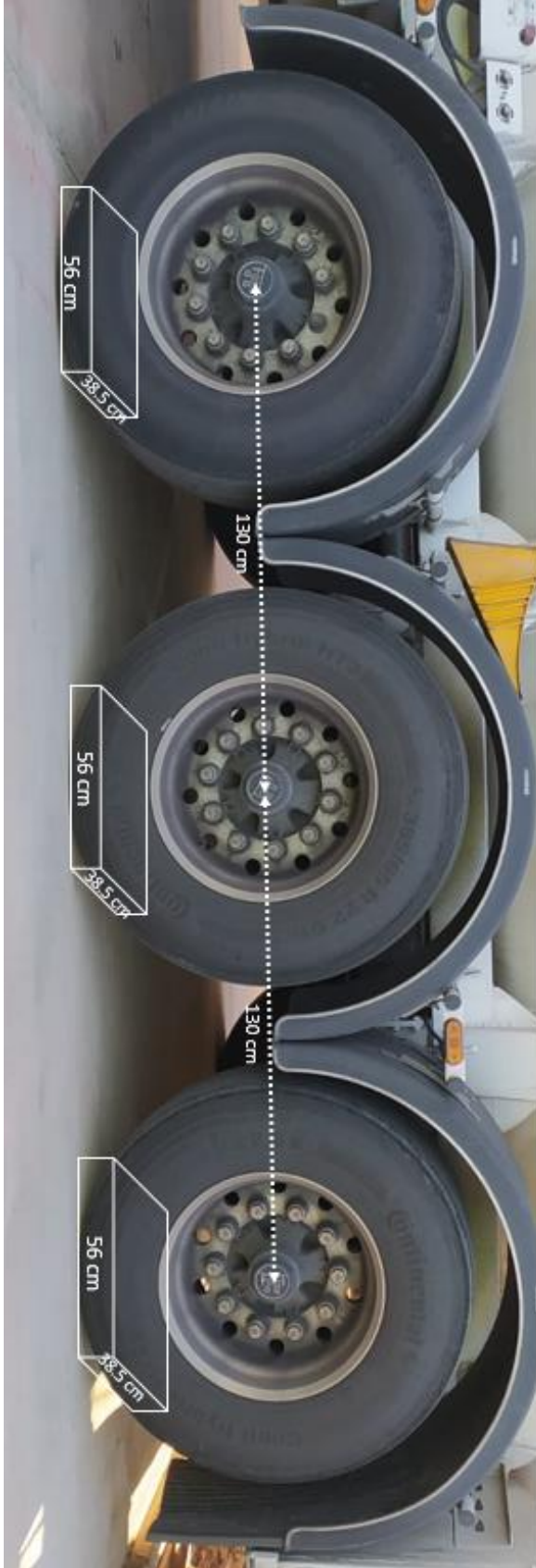
3.7. Tekerleklerin Modellenmesi

Ülkemizde lojistik alanında en fazla kullanılan ağır taşıt türlerinden olan tırların yol yapısına daha çok zarar verdiği bilinmektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında 3D modelin dinamik ve statik analizlerinde tırın lastik yerleşim planı dikkate alınmıştır. Lastik yerleşim planının yazılımda modellenmesi için gerekli lastik ölçüleri ve akslar arası mesafeleri yerinde ölçüm yapılarak belirlenmiştir. Lastik temas alanı Bölüm 2.3’de bahsi geçtiği üzere dikdörtgen alanı temsil ettiği varsayımı yapılarak sayısal analizler yapılmaktadır. Yine çalışma kapsamında temas eden lastik genişliğinin ölçülmesinin sonucunda dikdörtgen alanın uzunluğunu belirlemek amacıyla sıklıkla kullanılan Huang’ın (2004), lastik temas alanının eşdeğer dikdörtgene dönüştürülmesi prensibi dikkate alınarak hesaplanmıştır. Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de ön ve arka aks için hesaplanan lastik temas alanları ve kesit ölçüleri gösterilmiştir.



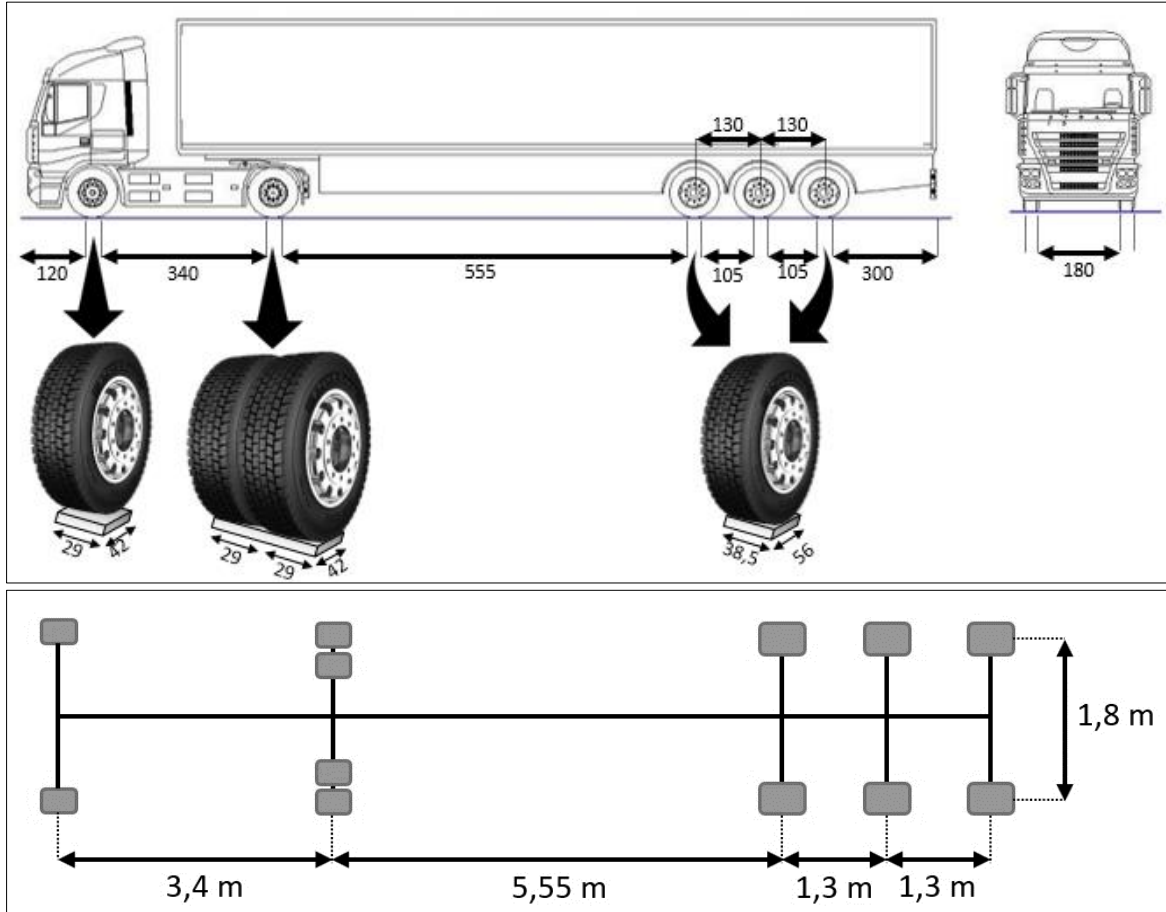
Şekil 3.16. Ön lastik temas alanı görseli

Lastik genişliği ön akslar için 29 cm, tridem bölgesinde ise 38,5 cm olarak ölçülmüştür. Dingil yüklerinin dikdörtgen temas alanına etki etmesi nedeniyle basitleştirilmiş lastik temas alanı (Şekil 3.19) hesabından ön akslar için dikdörtgenin uzun kenarı 42 cm, tridem bölgesinde bulunan lastiklerin dikdörtgen temas alanı uzun kenarı ise 56 cm olarak hesap edilmiştir.



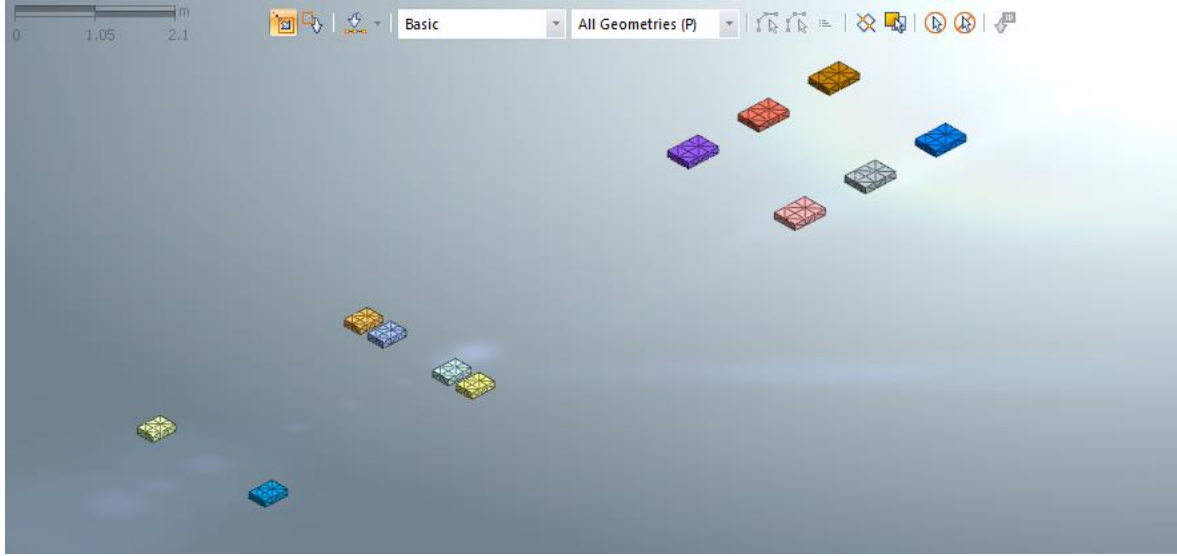
Şekil 3.17. Tridem lastik temas alanları

Akslar arası ve tekerlekler arası mesafeler yerinde ölçüm yapılarak oluşturulan Şekil 3.18’de görseli verilen ağır taşıt mesafe ölçüleri ve aks planı dikkate alınarak yazılımda modellenmiştir.



Şekil 3.18. Ağır taşıt akslar arası mesafeler lastik ölçüleri gösterimi

Belirtilen dikdörtgen alanlar kaplama tabakası derinliğinde solid elemanlar olarak modellenmiştir. Şekil 3.19’de yazılımda modellenen 3D tekerlek yükleme alanları verilmiştir.



Şekil 3.19. 3D Tekerlek yükleme alanları

Sonlu elemanlar analizi boyunca belirlenen bu yüklü alanlar döngüsel bir yüklemeye tabi tutulacaktır.

3.8. Modelin Sonlu Elemanlar Ağının Oluşturulması

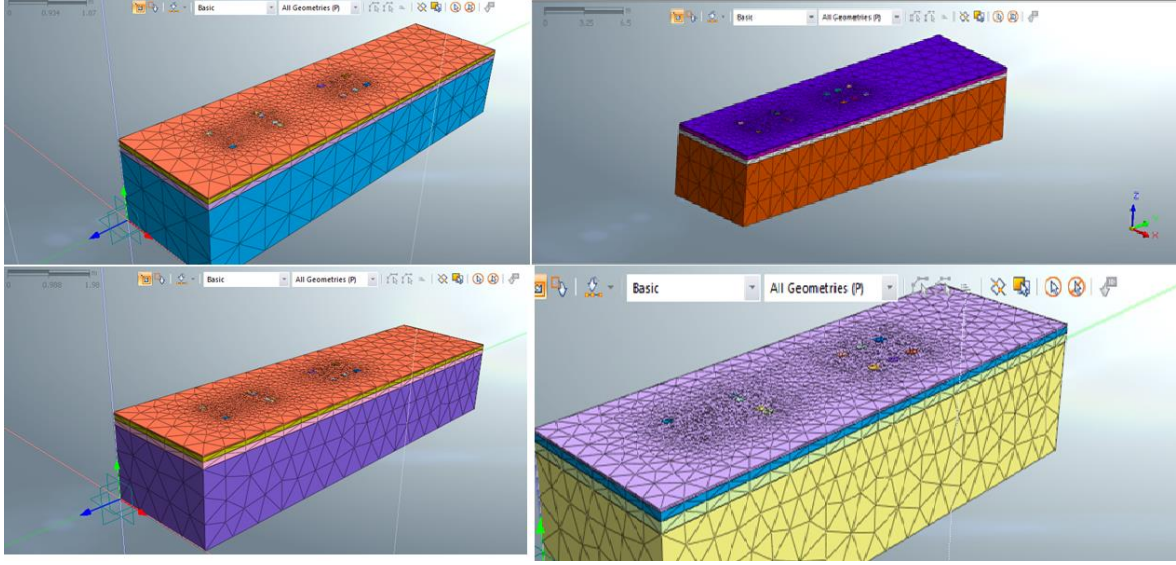
FE ağının doğru boyutlarda ve yoğunlukta seçimi yapılan analizin doğruluğunda kritik bir öneme sahiptir. Doğru bir şekilde biçimlendirilmemiş bir ağ sisteminden oluşan sayısal analizlerde hataların olması kaçınılmazdır. Aynı zamanda hem hesaplama hem de depolama etkisi açısından değerlendirildiğinde ağ boyutunun seçimine dikkat edilmelidir.

Çoğunlukla küçük elemanlardan oluşan sık ağ sistemi ile oluşturulmuş modellerde hesaplama süresi bir hayli uzamaktadır. Büyük gerilme konsantrasyonlarının olduğu bölgelerde daha küçük elemanlara ihtiyaç duyulmaktadır (Lees, 2016). Cho, McCullough ve Weissmann (1996), yükleme bölgelerinin yakınında daha sıkı ağ sisteminin kullanımı sayesinde doğru sonuçların elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Optimum bir analiz koşullarının sağlanması için yükleme alanına en yakın bölgedeki elemanların en uzak bölgeye göre daha sıkı bir ağ sistemine sahip olması gerekmektedir (Hamim, Yusoff, Ceylan, Rosyidi ve El-Shafie, 2018).

Düğüm sayısı artırılmış ve sık meshlerin kullanılması ile tasarımın analiz hassasiyetini artmakta olup aynı zamanda hem analiz süresini hem de depolama alanının da artışına neden olmaktadır. Buradan da anlaşılacağı üzere gerilme ve şekil değiştirmelerin daha uniform

olduğu, ilgili alandan uzak bölgelere doğru eleman boyutları büyütülmelidir. Böylece hesaplama süresi kısalmaktadır.

Hesaplama süresi ve depolama alanı değerleri de dikkate alınarak tasarım için en ideal boyutlardaki ağ sisteminin belirlenmesi amacıyla deneme modelleri oluşturulmuştur. Şekil 3.20’de deneme modellerinden bir kısmı gösterilmiştir.



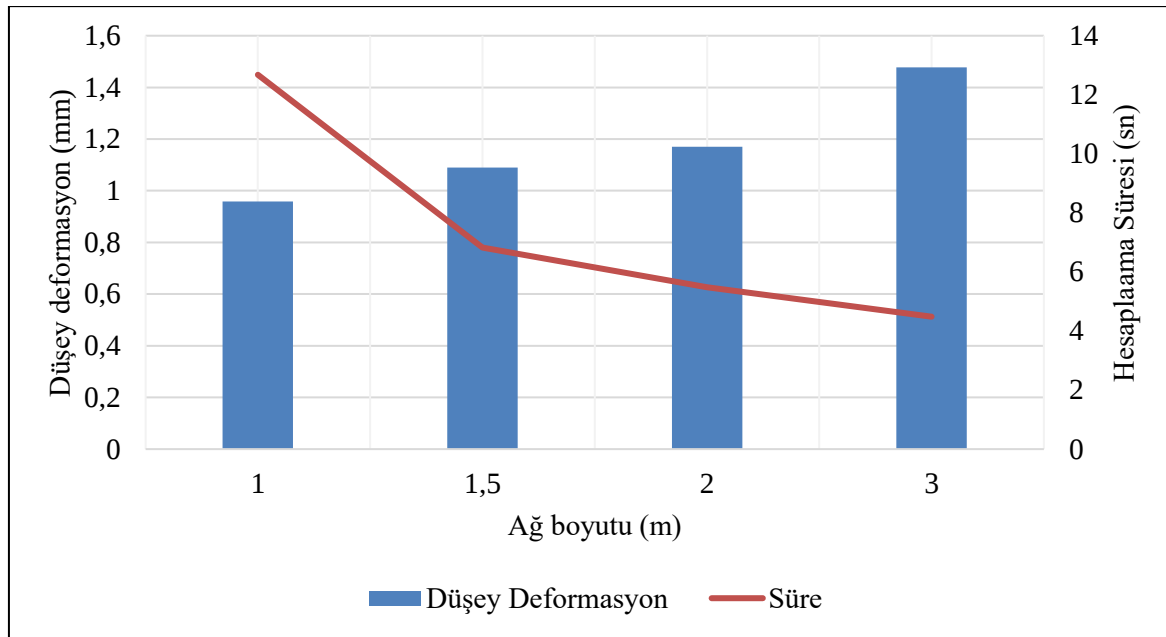
Şekil 3.20. Ağ sıklığı etkisi deneme modelleri

Deneme modellerinde ağ boyutlarındaki değişime bağlı olarak toplam analiz süresi, düşey deformasyon değerleri kullanılarak duyarlılık analizi yapılmıştır. Aynı zamanda gerilme ve birim şekil değiştirme değerleri de kontrol edilmiştir. Ancak farklı ağ boyutlarındaki kesitlerde kıyasın yapılması açısından önemli veri değişiklikleri oluşmaması ve kıyas edilebilecek saha ölçümlerinin mevcut olmaması nedeniyle zaman ve deformasyon değişkenleri üzerinden hassasiyeti ölçülmüştür.

Tekerlek yüklerinin ilk olarak kaplama tabakasını etkilediği bilinmektedir. Özellikle kaplama tabakasında ve tekerlek yükleme alanlarında meydana gelen gerilme yoğunlaşmaları hesaplama süresini etkilemektedir. Yapılan analizlerde ağ elemanının en-boy oranı sabit tutulup yalnızca temel, alttemel ve doğal zemin boyutları değiştirilmiştir. Tekerlek yükleme alanlarında 0,1 m ağ boyutu baz alınarak kontrol grubuna göre değerlendirmeler yapılmıştır. Bu boyutun seçilmesinde tekerlek yükleme alan boyutlarının 0,29/0,42 m ve 0,38/0,50 m gibi küçük boyutlara sahip olması etkilidir. Tekerlek yükleme

alanında 0,1 m'den daha sık ağ elemanlarının kullanılması halinde sayısal analizlerde yakınsama problemi ile karşılaşmıştır.

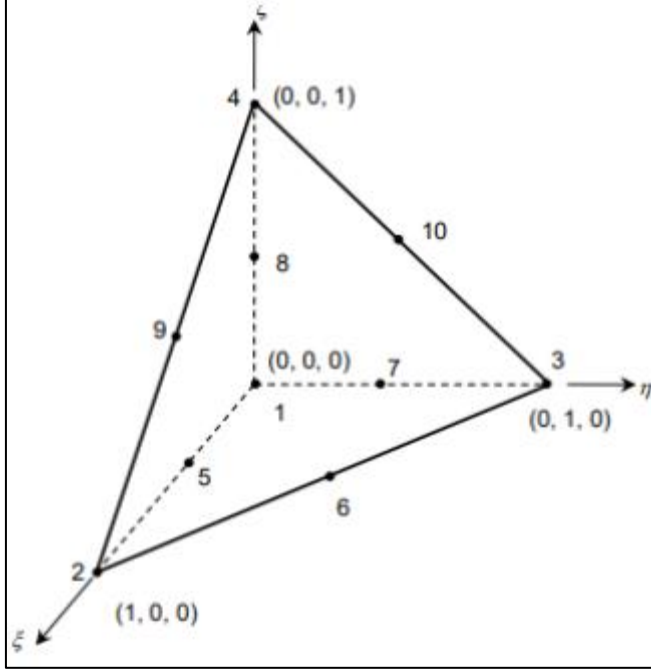
Kaplama, temel, alttemel ve doğal zemin tabakalarında ağ boyutunun 1m ,2m ve 3 m olması durumundaki üç farklı senaryo için düşey deformasyon değişimi ve analiz süreleri hesap edilmiştir. Şekil 3.21'de ağ boyutuna bağlı analiz süresi ve hesaplanan düşey deformasyon değerleri verilmiştir.



Şekil 3.21. Analiz süresi- düşey deformasyon değişimi

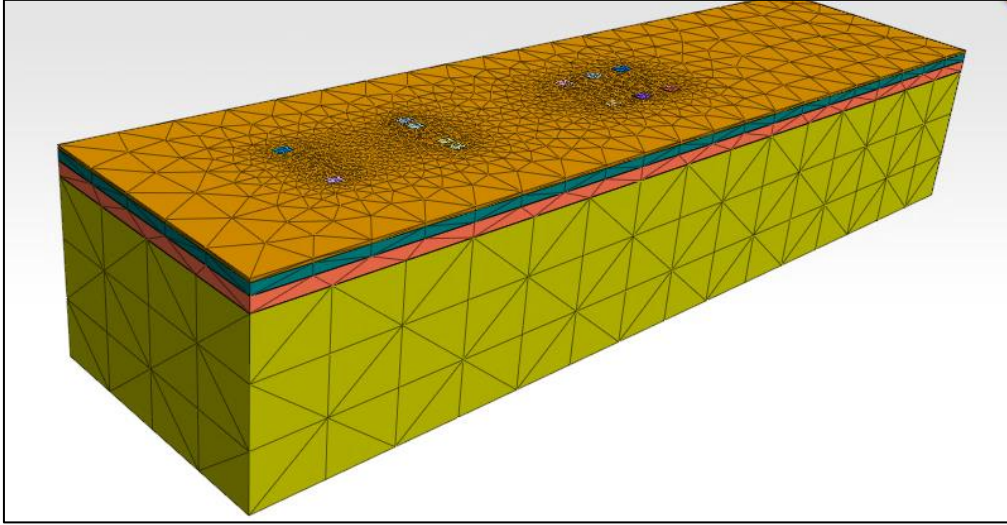
Ağ boyutunun artmasıyla birlikte düşey deformasyon değerleri de artmıştır. Ancak mesh boyutu artışının süreye olan etkisi en fazla 1 m ile 1,5 m ağ boyutlarında görülmüştür. Ağ boyutundaki %50 oranında artış sonucunda süre ise %100'e yakın bir değerde azalmıştır. 1,5 m referans ağ boyutuna göre 2 m ve 3 m ağ boyutlarındaki modelde analiz süreleri sırasıyla %20 ve %34 oranında azalmıştır. Ayrıca düşey deformasyon arasındaki rölatif farkın belirleyici olmaması nedeniyle boyutun analiz süresine etkisi üzerinde durulmuştur. Buradan hareketle referans alınan 1,5 m ağ boyutundan sonraki boyut artışlarında analiz süresi etkisinin azaldığı gözlenmiştir. Ağ boyutlarındaki değişimin hedef sonuca olan etkisi değerlendirilerek model için en uygun ağ sistemi belirlenmiştir. Ayrıca çok sıkı ağ sistemi kullanılması durumundaki yakınsama hatalarından da kaçınmak amacıyla optimum ağ boyutu 1,5 m olarak seçilmiştir.

Sayısal analizlerin yapıldığı yazılımda 2D ve 3D modeller için farklı yüz ve düğüm sayısına sahip ağ elemanları bulunmaktadır. Mevcut çalışmada yol modelinin sonlu elemanlar ağının oluşturulmasında dört (4) düğümlü Şekil 3.22’de gösterilen şekle sahip tetra mesh elemanı seçilmiştir.



Şekil 3.22. 3D dört yüzlü (tetrahedron) eleman şekil fonksiyonu ve doğal koordinat sistemi (Midas Kullanım Kılavuzu, 2020)

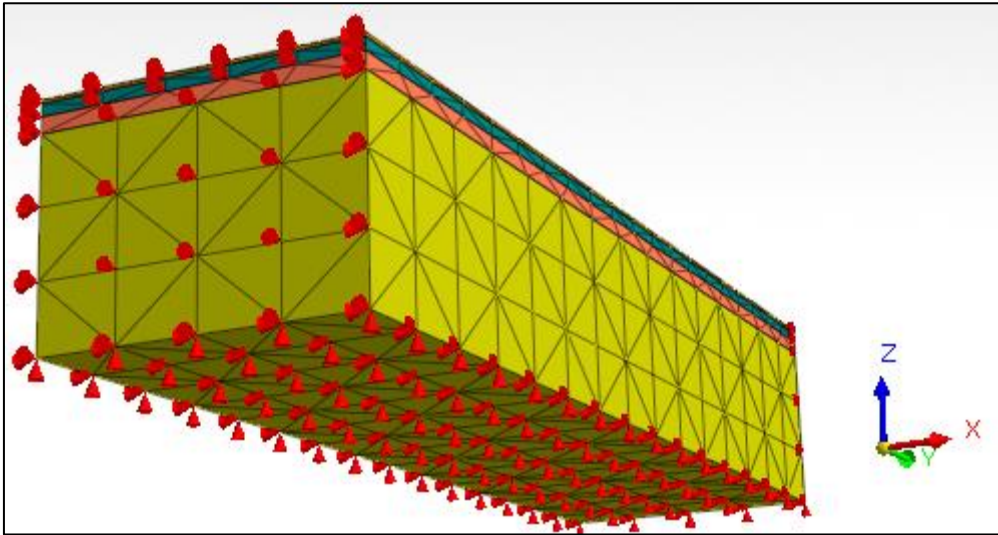
En küçük geometrik boyutlara sahip elemandan başlayarak ağ oluşturma adımı tamamlanmıştır. Şekil 3.23’de gösterilen sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş model sisteminde tekerlek yükleme bölgelerinde sık meshler kullanılmış olup yükleme alanından uzaklaştıkça mesh boyutları artırılmıştır.



Şekil 3.23. Sayısal analizlerde kullanılan sonlu elemanlar modeli

3.9. Model Sınırları Koşulları

Şekil 3.24’de gösterilen modelin yan sınırlarında yatay yönde hareketi kısıtlanırken düşey yönde harekete izin verilmiştir. Modelin alt sınırı boyunca hem yatay hem de düşey yönde hareket etmesi kısıtlanmıştır.



Şekil 3.24. Üstyapı modelinde kullanılan koşulları

Model sınır koşullarının atanması ile yapılan analizler sonucunda oluşan gerilmelerin model sınırlarına ulaşma durumu boyutların seçimi konusunda önemli bir göstergedir. Yapılan analizlerde böyle bir sorunla karşılaşılmaması ile seçilen boyutların da doğruluğu kanıtlanmıştır.

3.10. Statik ve Dinamik Yüklerin Uygulanması

Dinamik ve statik analizlerde yükleme koşulları ve değerleri belirlenirken Bölüm 2.3’de bahsi geçen literatür bilgileri dikkate alınmıştır. Buradan hareketle temas basıncı lastik şişirme basıncına eşit alınarak ağır taşıtlar için geçerli olan 700 kPa değerindeki tekerlek yükü altında sayısal analizler yapılmıştır.

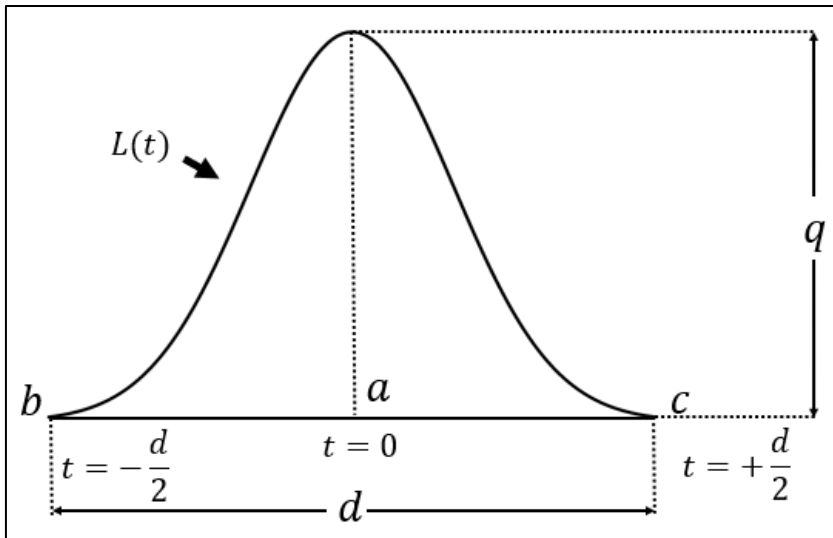
3.10.1. Dinamik yükleme

Yol üstyapısında meydana gelecek olan gerilmeler aracın hızına ve bunun yanında bulunduğu noktanın derinliğine bağlı olarak değişmektedir. Yük dağılımlarının hesaplanmasında Eş. 3.17’de verilen denklem kullanılmaktadır.

$$L(t) = q \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi t}{d} \right) \quad d = 12 * \frac{a}{s} \quad (3.17)$$

Eş. 3.17’de, d basınç darbesinin süresini, s aracın hızının m/sn cinsinden değerini, q yükün yoğunluğunu ve a lastik temas çapını ifade etmektedir.

Haversine yük fonsiyonuna göre zamanla yük değişimi Şekil 3.25’de verilmiştir. Eğrinin en tepe noktasındaki yük fonksiyonu “Eş.3.17” den hesaplanmaktadır. Yük a noktası üzerinde olduğunda bu noktada $t=0$ zamanında yük yoğunluğu q ’dur.



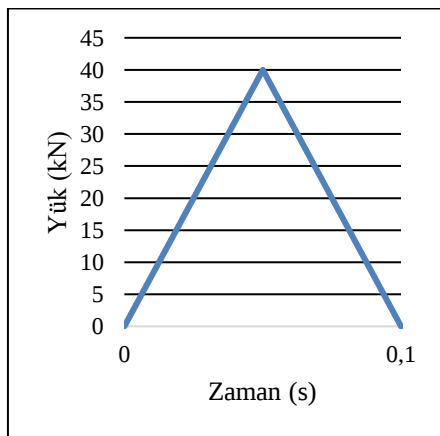
Şekil 3.25. Haversine hareketli yükün zaman fonksiyonu eğrisi

Sinüs fonksiyonu dikkate alınarak basınç dağılımına göre hesaplanan zamana bağlı yük değişim grafiği incelendiğinde fazla sayıda alt adım içermekte ve hesaplama süresi uzun sürmektedir. Literatürdeki birçok çalışmada uygulanan yükün süresinin, taşıtın hızına ve uygulama noktasının derinliğine bağlı olarak değiştiği ifade edilirken gerilme dalgalarının üçgen ya da sinüzoidal varsayılabilceği ifade edilmiştir (Al-Khateeb, Saoud ve Al-Msouti, 2011; Wu ve Chen, 2011; Gao, Dan ve Li, 2019).

Buonsanti ve Leonardi (2012), elastik ve toplam birim şekil değiştirmelerin büyüklüğünde üçgen ve sinüzoidal gerilme dalgası arasında önemli bir fark olmadığını ifade etmişlerdir.

Barksdale (1971), yaptığı çalışmasında yüzeyde veya yüzeye yakın bölgede gerilme darbesi şeklinin yarı sinüzoidal (yalnızca pozitif değerler) olduğunu, alt zemine yakın bölgelerde ise üçgen şeklini aldığını belirtmiştir. Buna göre çalışmada doğrusal olmayan malzeme davranışına sahip granüler malzemelerin bulunduğu tabakalarda gerilme darbesinin uygulanmasında tıpkı Barksdale (1971)'nin çalışmasında olduğu gibi üçgen darbe prensibi kullanılarak yüklemeler yapılmıştır.

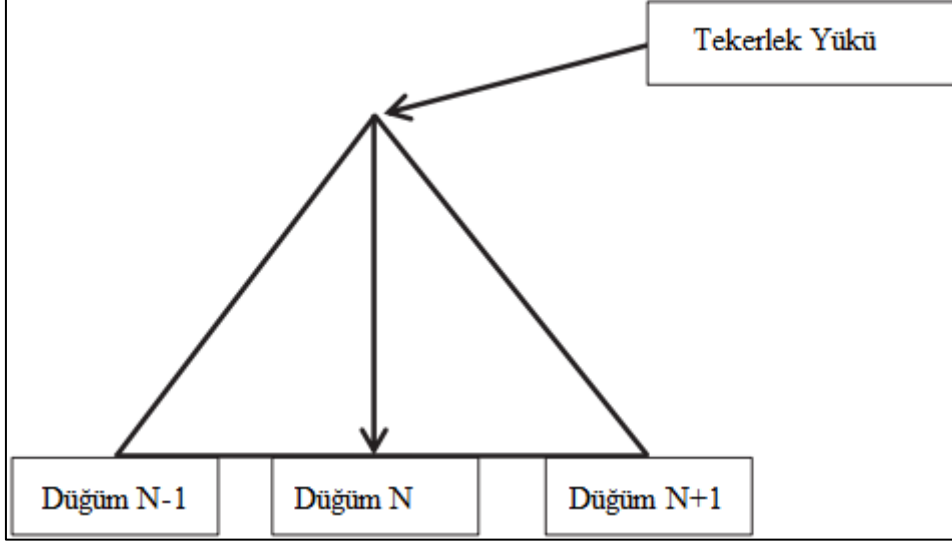
Saad, Mitri ve Poorooshab (2006), çalışmalarında Şekil 3.26'da verilen 32,18 km/saat hız, 40 kN'luk yük genliği ve hıza bağlı olarak hesaplanan 0.1 saniyelik yükleme süresine sahip bir taşıtın dinamik analizi üçgen dalga prensibi kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.26. Üçgen yük-zaman değişimi (Saad, Mitri ve Poorooshab, 2006)

Alzabeebee, Chapman ve Faramarzi (2018) çalışmalarında, hareketli tekerlek yükleri için Midas GTS/NX'de tren için oluşturulan dinamik yük tablosundan faydalanmışlardır. Kullandıkları modelleme tekniğinde yolun düğüm noktaları belirlenmiştir. Ardından

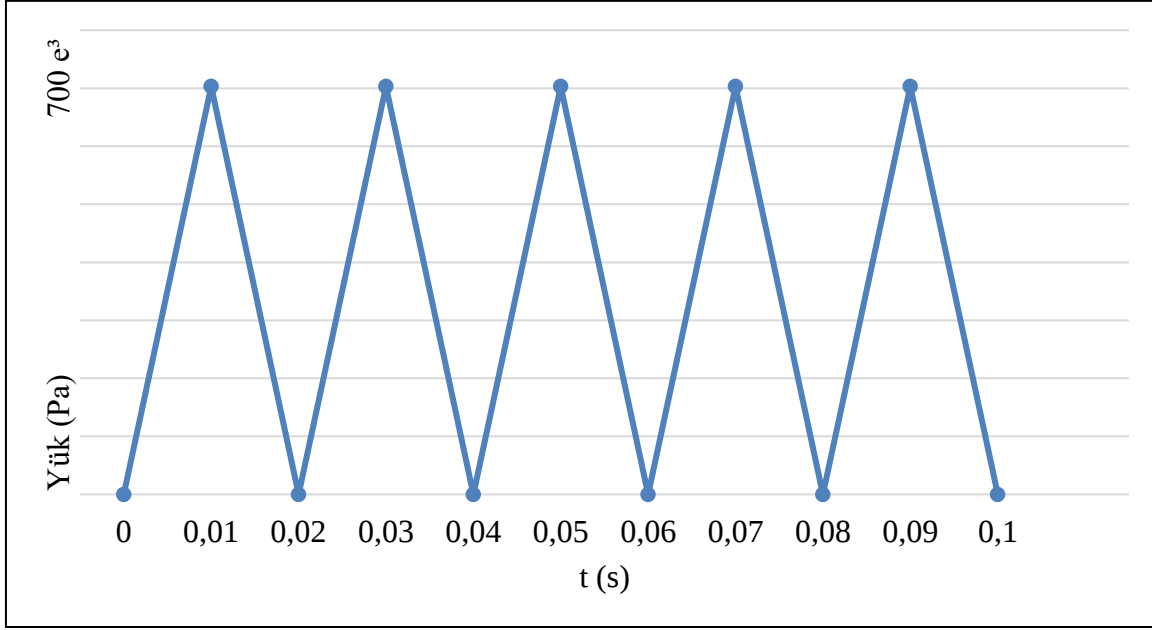
tekerlekler arasındaki mesafeler tanımlanmıştır. Yazılımın ayrıca her bir nokta yükün Şekil 3.27’de gösterildiği üzere üç düğüm arasında üçgen şeklinde dağılım gösterdiği ifade edilmiştir.



Şekil 3.27. Hareketli yük dağılımı varsayımının varsayımı (Alzabeebee, Chapman ve Faramarzi, 2018)

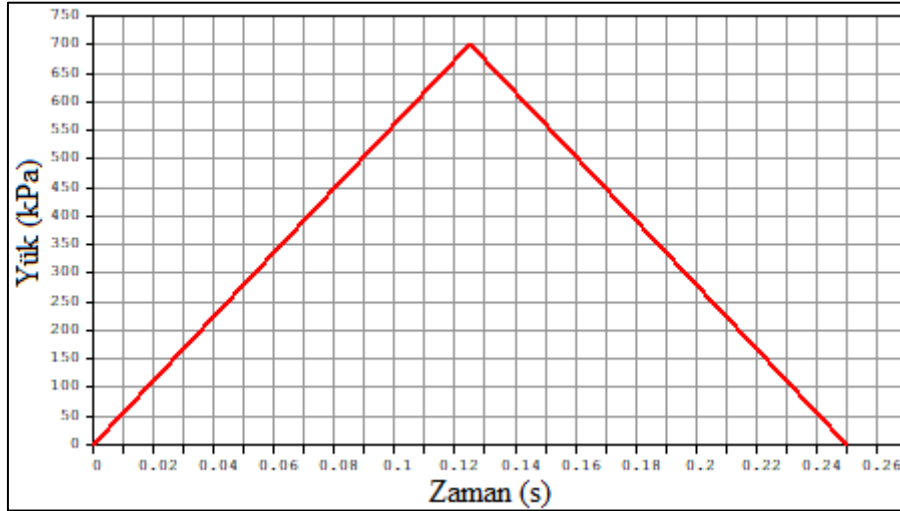
Ghadimi, Nikraz ve Rosano (2016), 3D esnek kaplama simülasyonunu yaptıkları çalışmada, dinamik analizleri tanımlamak amacıyla Haversine yük fonksiyonunun basitleştirilmiş hali olan üçgen yük dağılımını kullanarak sayısal analizleri yapmışlardır.

Leonardi ve Suraci (2022) çalışmalarında, döngüsel yükü maruz kalan esnek üstyapıda geosentetik kullanılarak iyileştirilmesinin etkisini belirlemek amacıyla yaptığı çalışmada tekerlek yüklerinin simüle edilmesinde üçgen yük dağılımını (Şekil 3.28) kullanmıştır.

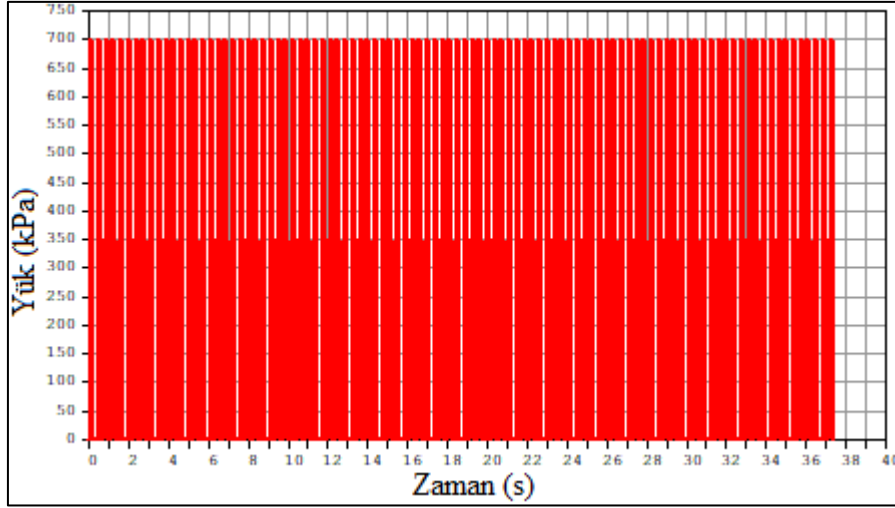


Şekil 3.28. Eşdeğer üçgen yük dağılımı (Leonardi ve Suraci, 2022)

Çalışma kapsamında basınç darbe süresi d , $V=100$ km/h hıza sahip bir ağır taşıt için 0,125 sn olarak hesaplanmıştır. Temas basıncı değeri diğer bir ifadeyle gerilme darbesinin genliği için 700 kPa yük basıncı kullanılmıştır. Şekil 3.29 ve Şekil 3.30’de verilen $N=1$ ve $N=100$ yükleme adımları için yük-zaman grafikleri yazılıma tanımlanmıştır.



Şekil 3.29. $N=1$ yükleme adımı yük-zaman grafiği



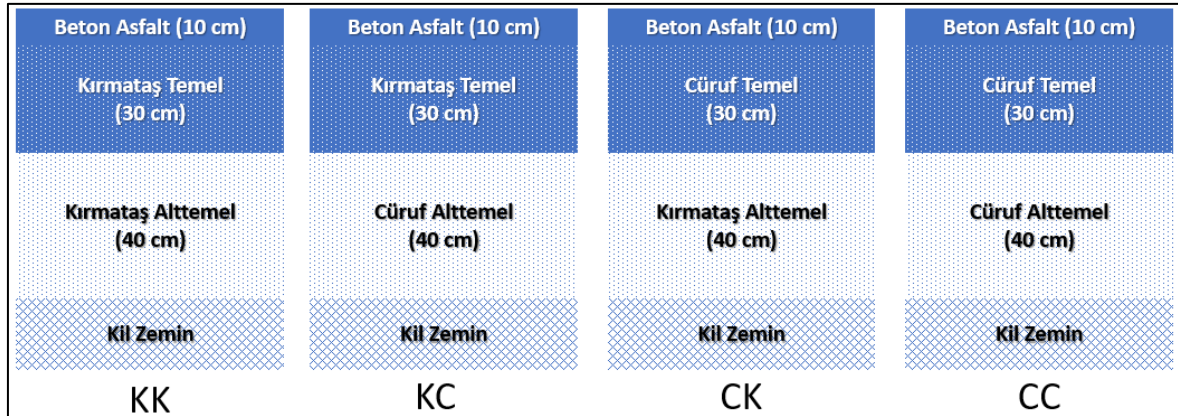
Şekil 3.30. N=100 yükleme adımı yük-zaman grafiği

3.10.2. Statik yükleme

Statik yüklemede tekerlek yükleme alanlarına 700 kPa değerindeki yük herhangi bir zaman değişkeni tanımlanmaksızın hedef yüzey alanlarına düzgün yayılı yük olarak eşit bir biçimde etki ettirilmiştir. Tekerlek yükünün atamasında tekerlek yükleme alanının üst yüzeyi (eleman yüzü) seçilmiştir.

3.11. Analizlerin Tanımlanması

Yol üst yapısının modellenmesinde Şekil 3.31’de verilen kesitler yazılıma tanımlanarak aşamalı (Construction stage) olarak nümerik analizleri yapılmıştır. Çalışmada, kırmataş temel ve alttmelden oluşan kesit KK ile; kırmataş temel ve cüruf alttmelden oluşan kesit KC ile; cüruf temel ve kırmataş alttemelden oluşan kesit CK ile; cüruf temel ve cüruf alttemelden oluşan kesit ise CC ile ifade edilmiştir. Bu dört kesit aynı yükleme ve sınır koşullarına tabi tutularak sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.31. Sayısal analizleri yapılan yol üst yapısı kesitleri

İki aşama şeklinde tanımlanan bu analiz türünde ilk aşamada kendi ağırlığı altında sistem çözdürülmüştür. İkinci aşamada dinamik analize devam edilmiştir. İlk aşamadan farklı olarak yazılıma tanımlanan hareketli tekerlek yükleri aktif veri kısmına aktarılarak doğrusal olmayan dinamik analizler yapılmıştır.

Kademeli analizde herhangi bir aşamada tanımlanan veriler kendinden önceki aşamada da aktif olduğu kabulü yapılmaktadır. Bu nedenle değişen sınır koşulları ve analiz tipi, yükleme türü değişimleri, aktif ya da pasif edilmesi gereken ağ sistemlerinin değişimleri sonraki aşama koşullarına göre yeniden düzenlenip tanımlanması gerekmektedir.

3.11.1. Dinamik analiz

Sayısal analiz için başlangıç koşulları ve sınır koşullarının oluşturulması ile model döngüsel bir yüklemeye tabi tutulmaktadır. Dinamik analize başlamadan önce ilk olarak özdeğer analizi (eigenvalue analysis) yapılmıştır. Dinamik analizin temelini oluşturan özdeğer analiz kütlelerin tepkilerini ve zamana bağlı analizlerde kullanılan sönümleme (damping) değerlerini belirleyebilmek amacıyla yapılmakta olup sonucunda ise titreşim modları elde edilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan dinamik analizlerde tasarımın tepkisinin doğru tahmininde sönümleme mekanizmasının etkisi dikkate alınmalıdır. Bu amaçla kaplama tasarımlarında yaygın olarak Rayleigh sönüm yaklaşımı kullanılmaktadır.

Rayleigh sönüm yaklaşımına ait kütle ve rijitlik parametrelerin yazılıma doğrudan tanımlanması mümkündür. Ancak çalışma kapsamında olduğu gibi Özdeğer Analiz sayesinde hesaplanan tasarıma ait doğal modlar, frekans, periyotlar ve moda dayalı katılım

faktörleri gibi dinamik özellikleri belirlenmektedir. Şekil 3.32’de Özdeğer Analiz sonuç tabloları verilmiştir.

REAL EIGENVALUES								
MODE NUMBER	EIGENVALUE	RADIANS	CYCLES	PERIOD	GENERALIZED MASS	GENERALIZED STIFFNESS	ORTHOGONALITY LOSS	ERROR MEASURE
1	2.836974e+003	5.326325e+001	8.477109e+000	1.179647e-001	1.000000e+000	2.836974e+003	0.000000e+000	0.000000e+000
2	5.286883e+003	7.271095e+001	1.157231e+001	8.641317e-002	1.000000e+000	5.286883e+003	0.000000e+000	0.000000e+000
3	6.442769e+003	8.026686e+001	1.277487e+001	7.827868e-002	1.000000e+000	6.442769e+003	0.000000e+000	0.000000e+000
4	6.794736e+003	8.243019e+001	1.311917e+001	7.622433e-002	1.000000e+000	6.794736e+003	0.000000e+000	0.000000e+000
5	8.176258e+003	9.042266e+001	1.439121e+001	6.948686e-002	1.000000e+000	8.176258e+003	0.000000e+000	1.135303e-012
6	8.552110e+003	9.247762e+001	1.471827e+001	6.794277e-002	1.000000e+000	8.552110e+003	0.000000e+000	9.155758e-012
7	8.592111e+003	9.269364e+001	1.475265e+001	6.778443e-002	1.000000e+000	8.592111e+003	0.000000e+000	1.048523e-011
8	8.825398e+003	9.394359e+001	1.495159e+001	6.688252e-002	1.000000e+000	8.825398e+003	0.000000e+000	3.457633e-011
9	9.079415e+003	9.528596e+001	1.516523e+001	6.594031e-002	1.000000e+000	9.079415e+003	0.000000e+000	4.090580e-011
10	9.976193e+003	9.988089e+001	1.589654e+001	6.290677e-002	1.000000e+000	9.976193e+003	0.000000e+000	1.609072e-010
PERCENTAGE MODAL EFFECTIVE MASS								
MODE NUMBER	T1	T2	T3	R1	R2	R3		
1	0.00%	60.25%	0.00%	2.16%	0.00%	0.00%		
2	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%		
3	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	6.74%		
4	0.00%	2.15%	0.00%	0.45%	0.00%	0.11%		
5	13.99%	0.00%	0.00%	0.01%	18.50%	2.12%		
6	0.25%	0.01%	0.00%	0.01%	0.30%	3.16%		
7	1.46%	0.00%	0.00%	0.02%	2.07%	7.97%		
8	0.94%	0.00%	0.00%	1.31%	1.32%	5.91%		
9	0.15%	0.01%	0.00%	7.48%	0.21%	1.16%		
10	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.00%	0.00%		
TOTAL	16.80%	62.45%	0.00%	11.46%	22.43%	27.18%		

Şekil 3.32. Özdeğer Analizi yazılım sonuç penceresi

Özdeğer analizi sonucunda hesaplanan ve en yüksek kütle katılım faktörüne sahip olan T1 (birinci) ve T2 (ikinci) modları değerlendirilmiştir. T1 ve T2 modlarındaki en yüksek kütle katılım oranına sahip kritik modlardaki periyod değerleri $1,179647 \text{ E}^{-1}$ ve $6,948686 \text{ E}^{-2}$ olarak belirlenmiş olup yazılımda ilgili alana tanımlanmıştır.

3.11.2. Geogrid donatılı kesitlerde statik analiz

700-3500 kPa arasındaki lastik temas basıncı değerleri kademeli olarak artırılarak bu yükler altında meydana gelen deformasyon değerleri hesaplanmıştır. Uygulanan yükteki kademeli artışa bağlı CK, KC ve CC kesitleri için yükleme-deformasyon grafikleri çizdirilmiştir. Belirtilen yük değerleri arasında 100 kPa’lık yük artış periyotlarında emniyetle taşıyabileceği maksimum yük değeri her bir kesit için hesap edilmiştir.

Bu bölümde kullanılan malzeme parametrelerinin belirlenmesine yönelik yapılan hesaplamaların yanı sıra yazılımda sayısal modelin oluşturulması aşamaları yer almaktadır. Ayrıca kullanılan analiz türlerine ilişkin ve tekerlek yükleme koşulları ile ilgili gerekli detaylar verilmiştir.

4. SAYISAL ANALİZ BULGULARI

Günümüzde sürekli değişen ve gelişen teknolojik hareketler dolayısıyla hızlı ve gerçek saha davranış koşullarına en yakın şekilde simülasyonunu sağlayan yazılım türleri ve buna bağlı olarak yapılan kuramsal çalışmalar giderek artmaktadır. Özellikle geoteknik tasarımlarda çeşitli yazılımlar kullanılarak yapılan hesaplamalar ve simülasyonlar sıkça tercih edilmektedir.

Bir önceki bölümde model geometrisi, özellikleri, yükleme ve sınır koşulları, malzeme ve yöntemle dair bilgiler detaylı olarak açıklanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemine göre hesaplamaların yapıldığı bu bölümde KK, CK, KC ve CC kesitlerinde farklı katmanlarda ve sayılarda kullanılan geogrid donatının yolun emniyetle taşıyabileceği yük değerine olan etkisi yapılan statik analizler sonucunda hesap edilmiştir. Sayısal analizler kapsamında tek, iki ve üç sıra geogrid yerleşimi ve altı farklı yerleşim konumu için statik analizler yapılmıştır ve kesitlerin emniyetle taşıyabileceği yük eğrileri oluşturulmuştur.

Bununla birlikte tekrarlı trafik yükleri altında çelik cürufu kullanılan granüler tabakalarda KC, CC, CK ve KK kesitlerindeki deformasyon değerlerine etkisi yapılan dinamik analizler ile belirlenmiştir.

Sayısal analizin yapılması adına her bir yükleme adımı için 2 aşamalı analiz seti tanımlanmıştır. İlk aşamada gerilme analizi yapılmıştır. İkinci aşama da ise doğrusal olmayan (nonlinear time history) dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan sayısal analizlerin tamamına bu bölümde yer verilmiştir.

4.1. Sayısal Analizlerde Kullanılan Zemin ve Geogrid Malzeme Parametreleri

Sayısal analizlerde kullanılan Secugridlerin parametre çalışmalarına ait bilgiler Bölüm 3.2.1’de verilmiş olup yazılıma tanımlanan sayısal değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Analiz için gerekli olan parametrelerin hesaplanmasında kullanılan Poisson oranı (ν) ve Elastisite Modülü (E) değerleri için Shukla ve Yin (2006) çalışmalarından faydalanılmıştır. Yazılımda geosentetik donatının çekme mukavemeti değerinin tanımlanabilmesi için çekme gerilmesi ve alan değerinden faydalanılarak maksimum çekme dayanımı hesap edilmektedir. Alan değerinin hesaplanmasında, E ve birim deformasyondaki uzama rijitliği değerleri kullanılmaktadır.

Çizelge 4.1. Secugrid teknik özellikleri

Teknik özellikler	Birim	Geogrid (80/80 Q6) (Boyuna/Enine)
%1 birim deformasyondaki uzama rijitliği	kN/m	2 000
Maksimum çekme dayanımı	kN/m ²	591 091
Elastisite Modülü (Shukla ve Yin, 2006)	GPa	18
Poisson oranı		0,25

Çalışma kapsamında yapılan sayısal analizlerin tümünde kullanılan malzemelere ait parametreler Çizelge 4.2’de verilmiştir. Granüler tabakalarda kullanılan kireç taşı ve cürufa ait malzeme parametreleri Karadağ (2020) tez çalışmasından alınmıştır. Yumuşak kil ve geogrid donatı parametrelerinin hesaplanmasına ait detaylara Bölüm 3’de yer verilmiştir.

Çizelge 4.2. Sayısal analizlerde kullanılan malzemelerin parametreleri

Malzeme*	A	B	C	D	E	F	G	H
Malzeme Bünye Modeli	Küçük Birim Şekil Değiştirme Değerlerinde Pekleşen Zemin Bünye Modeli						Mohr-Coulomb	
Elastisite Modülü (MPa)	-	-	-	-	-	-	4 500	18 000
ν (Poisson oranı)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,2	0,45	0,3	0,25
γ (Birim hacim ağırlık) kN/m ³	23,11	22,47	21,33	20,77	18	16,5	24	5
c (Kohezyon) kN/m ²	47	45	40	40	100	50	480	-
ϕ° (İçsel sürtünme açısı)	47	45	40	35	10	0	46	-
E_{50}^{ref} (MPa)	160	124	165	115	24	5	-	-
E_{ur}^{ref} (MPa)	485	372	495	345	72	15	-	-
G_0^{ref} (MPa)	180	138	185	128	55	25	-	-
G (kayma mukavemeti) (MPa)								7 200
Çekme Gerilmesi (MPa)								594,091

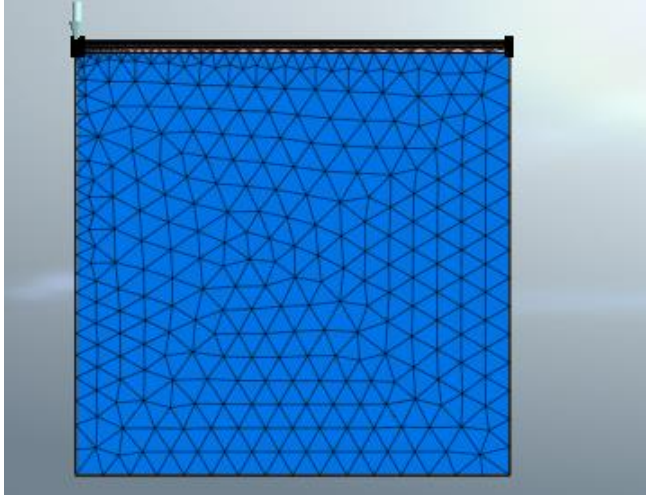
*Malzeme A: Temel-Cüruf, B: Alttemel-Cüruf, C: Temel-Kireçtaşı, D: Alttemel-Kireçtaşı, E: Katı Kil, F: Yumuşak Kil, G: Asfalt, H: Geogrid (Ortotropik -Geogrid (80/80 Q6))

4.2. Çelik Cürufu Kullanımı Etkisinin 2D Dinamik Analizlerle Belirlenmesi

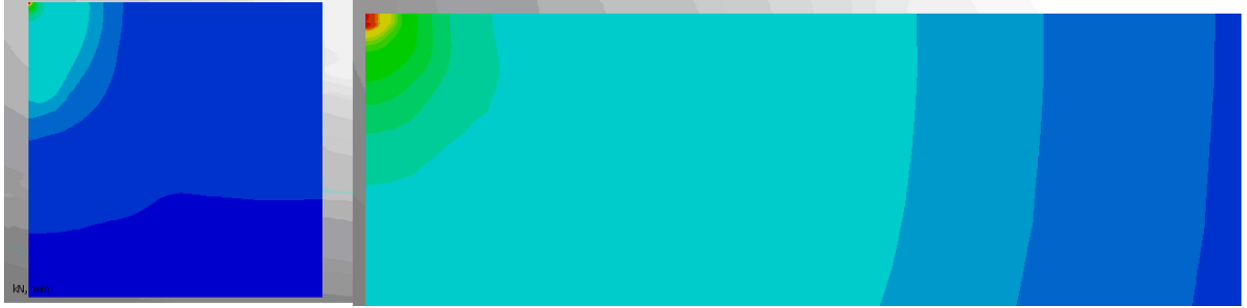
2D dinamik analizlerde eksenel simetrik model kullanılmıştır. Bu modelleme sayesinde silindirik koordinatlar ile simetri eksenini koşullarının kullanılmasıyla 3D bir problem 2D olarak çözülebilmektedir. 2D bir geometri uzayında geliştirilen eksenel simetrik model düşey bir eksen etrafında dönmekte ve silindirik bir şekle sahiptir (Tarefder ve Ahmed, 2014). Eksenel simetrik modellerde, simetri eksenini etrafında dönen dairesel bir yükleme alanının tüm radyal yönlerdeki gerilmelerin aynı olduğu varsayımına dayanmaktadır (Howard ve Warren, 2009). Yapılan birçok çalışmada eksenel simetrik model kullanılarak kaplama tasarımlarına yönelik sayısal analizler yapılmıştır (Ranadive ve Tapase, 2016; Sinha, Chandra ve Kumar, 2014; Tutumluer, Little ve Kim, 2003).

Eksenel simetrik modellerde, 2D eksenel simetrik esnek kaplama tasarımlarının boyutlarının belirlenmesinde tekerlek temas yüzeyinin dikkate alındığı ve özellikle yükleme yarıçapına bağlı olarak önerilen boyutlandırmaların yer aldığı literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bunlardan ilki, Duncan, Monismith ve Wilson (1968) tarafından ele alınmış olup anlamlı sonuçların elde edilebilmesi amacıyla eksenel simetrik olarak oluşturulan yol modellerinde genişliğin 12R yol derinliğinin ise 50R alınması gerektiğini belirtmiştir. Kim (2007) ise model boyutlarının 20R×140R olarak alınması durumunda, Adu-Osei (2000) ise temas yarıçapının yaklaşık 10R×20R büyüklüğündeki model sınırlarının analiz sonuçlarına olacak etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğunu ifade etmişlerdir. Karadağ (2020) tarafından yürütülen çalışmada ise model boyutları 200R×200R olarak seçilmiştir. Helwany, Dyer ve Leidy (1998) çalışmalarında model boyutlarının belirlenmesinde lastik temas yarıçapının sekiz katını kullanırken, Sinha, Chandra ve Kumar (2014) ise yedi katını kullanarak sayısal simülasyonları gerçekleştirmişlerdir.

Çalışma kapsamında tekerlek yükleme yarıçapı 0,15 m için sayısal analizler yapılmıştır. Tabaka kalınları ise 3D model ile aynı ölçülerde olacak şekilde kaplama tabakası 10 cm, 30 cm temel tabakası ve alttemel tabakası 40 cm kalınlığında modellenmiştir. 200R×200R boyutlarında hazırlanan model Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Sayısal analizi yapılan 2D eksenel simetrik model

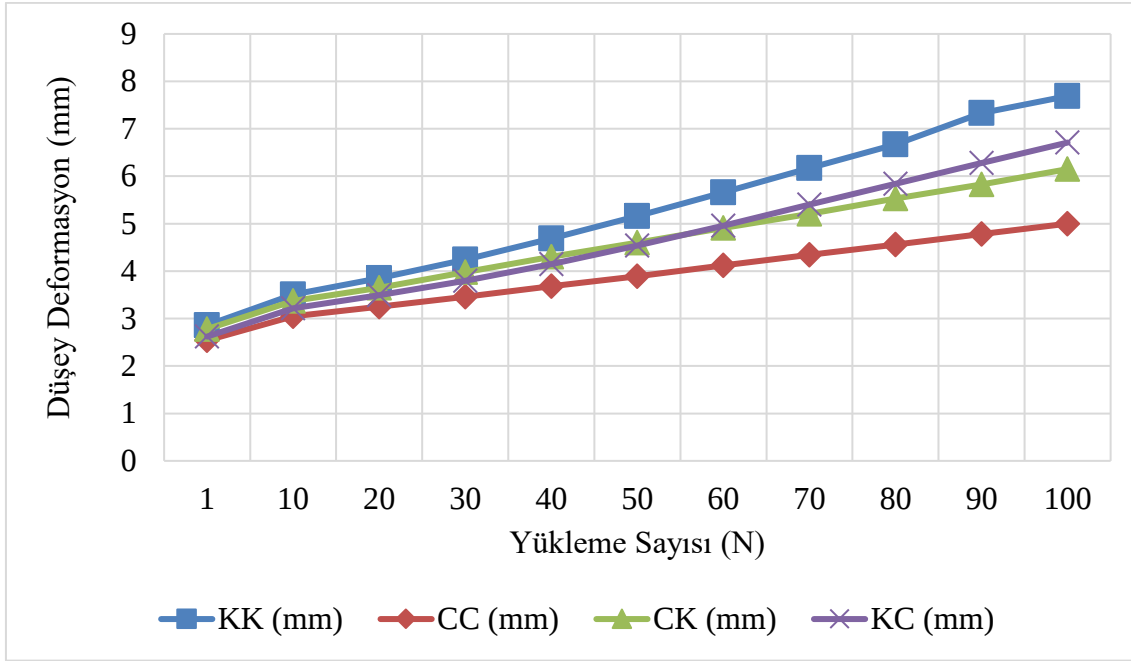


Şekil 4.2. KK kesiti N=100 yükleme adımı deformasyon görüntüsü

Her bir kesitteki yükleme adımına bağlı olarak değişen lastik orta noktasındaki düşey deformasyon değerleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Asfalt yüzeyinde, lastik orta noktasında oluşan düşey deformasyon değerleri

Yükleme sayısı (N)	KK (mm)	CC (mm)	CK (mm)	KC (mm)
1	2,86	2,54	2,78	2,62
10	3,51	3,05	3,37	3,22
20	3,85	3,25	3,65	3,49
30	4,24	3,46	3,98	3,80
40	4,69	3,68	4,30	4,15
50	5,16	3,89	4,6	4,54
60	5,66	4,12	4,91	4,96
70	6,17	4,34	5,21	5,40
80	6,67	4,56	5,53	5,84
90	7,33	4,78	5,83	6,28
100	7,69	5,0	6,15	6,71



Şekil 4.3. 2D eksenel simetrik model için N=100 yüklemeye adımına kadar hesaplanan maksimum düşey deformasyon değerleri

Dört kesit için N=100 yüklemeye adımına kadar olan dinamik analiz sonuçları Şekil 4.3’de verilmiştir. Tüm yüklemeye adımlarında yalnızca doğal agreganın kullanıldığı KK kesitinde diğer kesitlere kıyasla daha fazla düşey deformasyon meydana gelmiştir. Kesitlerin yüz yüklemeye adımına kadar olan davranışları için yapılan bir başka değerlendirme ise KC ve CK kesitlerinde düşük yüklemeye adımlarında düşey deformasyonları arasında önemli farklılıkların meydana gelmediğidir. Yüklemeye adım sayısındaki artışlarla birlikte kesitlerdeki düşey deformasyon değerleri arasındaki değişim davranışı daha belirgin bir hal almıştır. Çelik cürufu kullanılan kesitlerin yalnızca doğal agregaya kullanılan kesitlere kıyasla düşey deformasyona olan pozitif etkisi görülmüştür. KGM, Karayolları Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberi’nde (2008) oturma değerinin 15 mm’den düşük olması durumunda bozulma şiddetinin hafif olduğu ifade edilmiştir. Bu gibi durumlarda deformasyonun gelişiminin incelenmesi önerilmiştir. Bu anlamda yapılan yüklemeye adımı sayısındaki bozulma şiddetinin özellikle cürufu kesitlerde hafif şiddette olduğu da görülmektedir. Çelik cürufu doğal agregaya kıyasla yoğunluğunun ve özgül ağırlığının yüksek olmasının sağladığı olumlu etkisinin yanında, sahip olduğu keskin köşeli geometrik yapısı nedeniyle sürtünme direncini artırmaktadır. Bu etkenler dolayısıyla tekrarlı trafik yüklerine karşı tasarımın daha stabil bir hale gelmesini sağlayarak çelik cürufu kullanılan kesitlerdeki düşey deformasyon değerleri düşük çıkmaktadır. Çünkü çelik cürufları doğal agregalardan daha iyi fiziksel ve mekanik özellikleri sağlaması tasarım üzerinde olumlu etkilere yol açmaktadır.

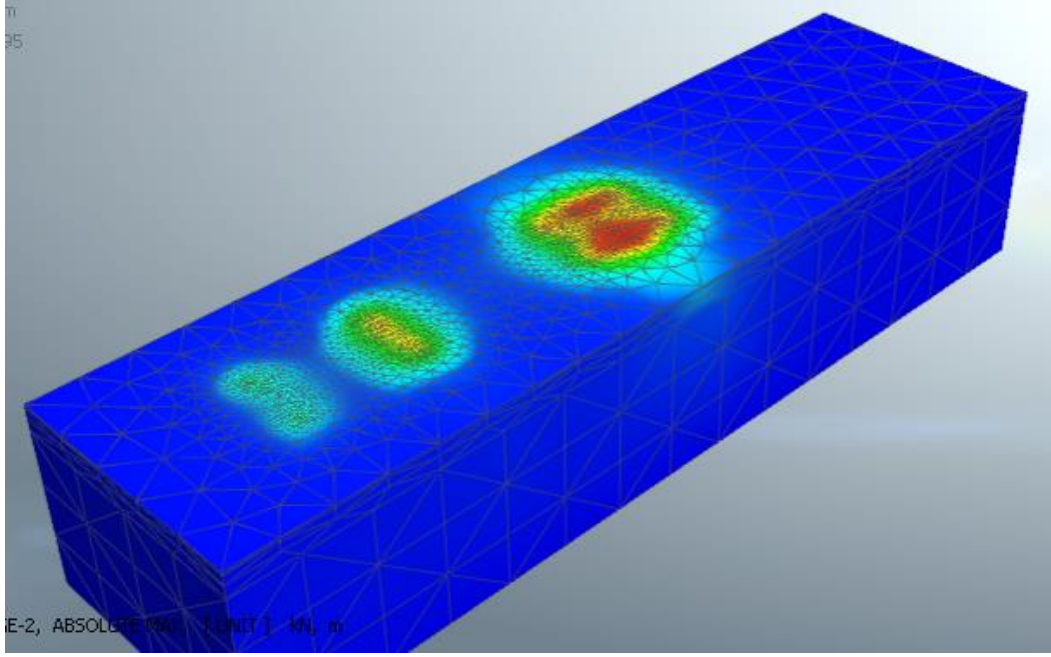
Çelik cürufunun yolun hem temel hem de alttemelde kullanımı sayesinde çelik cürufu agregalarının geri dönüşüme katkısının sağlanacak olmasının yanında yolun uzun vadede servis ömrünün artırılması üzerinde de etkili olacağını söylemek mümkündür.

Eksenel simetrik modellerde çift lastik ya da çok akslı yükleme koşullarının simülasyonlara yansıtılması mümkün değildir. Ancak eksenel simetrik model tasarımlarının en önemli avantajları ise hesaplama süresinin ve ihtiyaç duyulan depolama kapasitesinin diğer modelleme yöntemlerine göre daha az olmasıdır. Bu nedenle sıklıkla tercih edilmektedir. Esnek kaplama tasarımlarında hareketli trafik yükler etkisiyle meydana gelen yanıl ve düşey deformasyonlar, birim şekil değıştirmeler vb. gibi üstyapı tepkileri belirlenmektedir. 3D FE modelleri ile farklı lastik yükü ve yerleşim planına sahip araçların simülasyonlarının yapılmasında, doğrusal olmayan malzeme davranışının modellenenbilmesinde ayrıca model geometrilerinin gerçeğe en yakın şekilde tasarlanabilmesinin mümkün olması nedeniyle daha avantajlı olduğu görülmektedir.

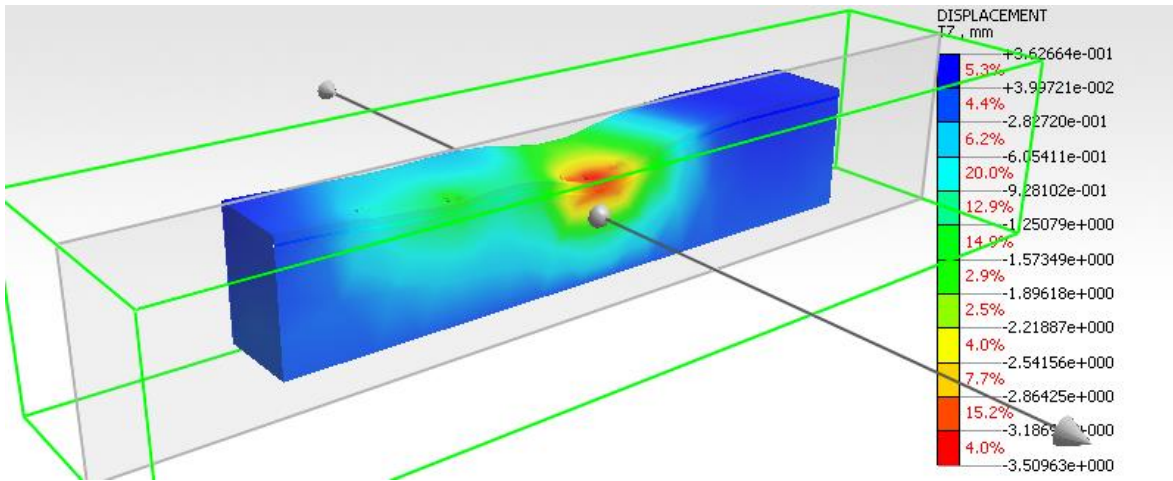
4.3. Çelik Cürufu Kullanımı Etkisinin 3D Dinamik Analizlerle Belirlenmesi

Yapılan dinamik analizde amaç çevrimsel (tekrarlı) yüklemeye maruz kalan sistemde meydana gelen deformasyonları tespit etmektir. 3D modelde $N=100$ yükleme adımına kadar olan hesaplar yapılmıştır. Her yükleme adımı sonunda hesaplanan en yüksek deformasyon değeri kaplama yüzeyine uygulanan toplam döngü sayısına göre değışmiştir.

Şekil 4.4’de KK kesitinde hesaplanan en son yükleme adımı deformasyon görüntüsü verilmiştir. Tüm kesitlerde deformasyon görüntüsü ağır taşıtın dorse bölümünde meydana gelmiştir.

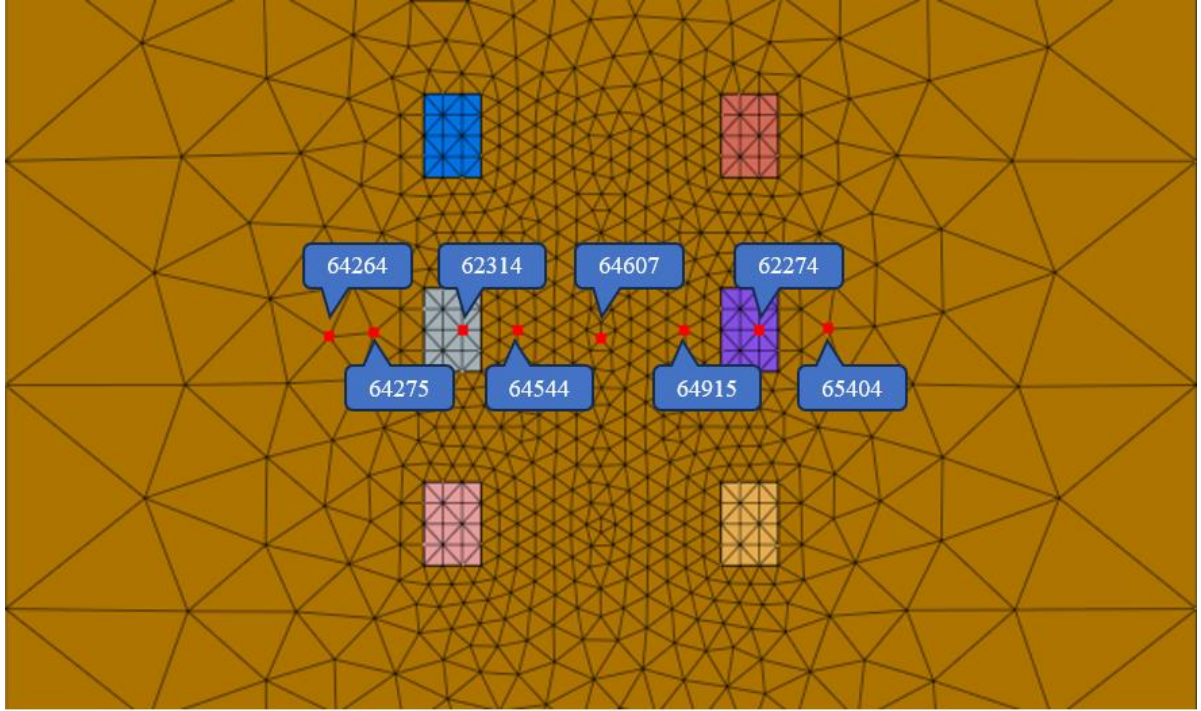


Şekil 4.4. KK kesiti N=100 yükleme adımı deformasyon görüntüsü

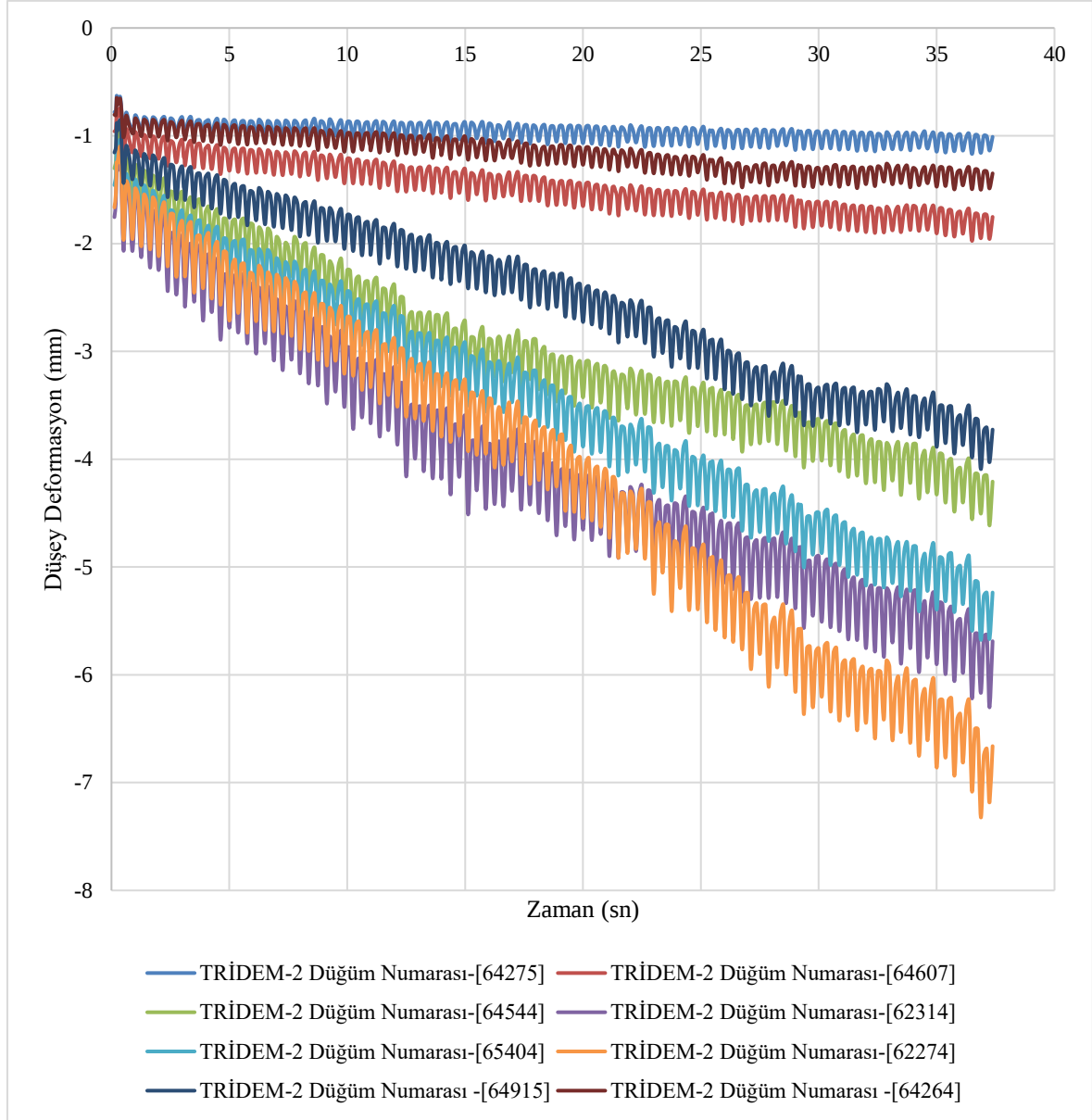


Şekil 4.5. KK boy kesit deformasyon görüntüsü

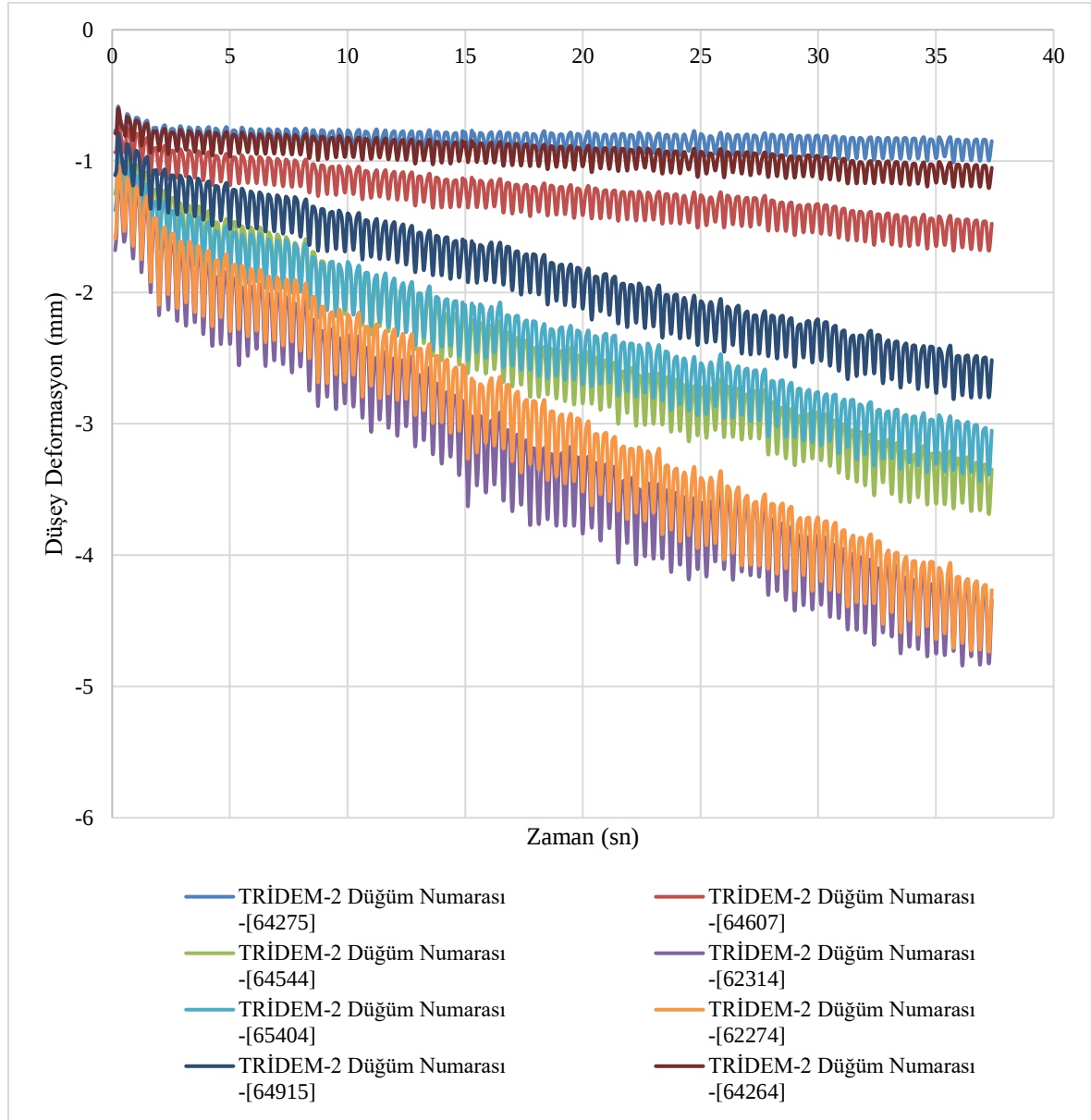
Tüm kesitlerde ve yükleme adımlarında meydana gelen deformasyon görüntüleri ve değerleri incelenmiştir. Tridem bölgesinde yer alan tekerleklerin orta aksında meydana gelen düşey deformasyon değerleri diğer alternatiflere göre KK kesitinde tridem bölgesindeki en fazla düşey deformasyon değerinin meydana geldiği orta aks bölümündeki tekerlek yükleme alanları ve çevresinden belirlenen referans düğüm noktalarının (Şekil 4.6) zamana bağlı deformasyon değeri değişimini veren tüm kesitler için grafikler Şekil 4.7-Şekil 4.10 arasında verilmiştir.



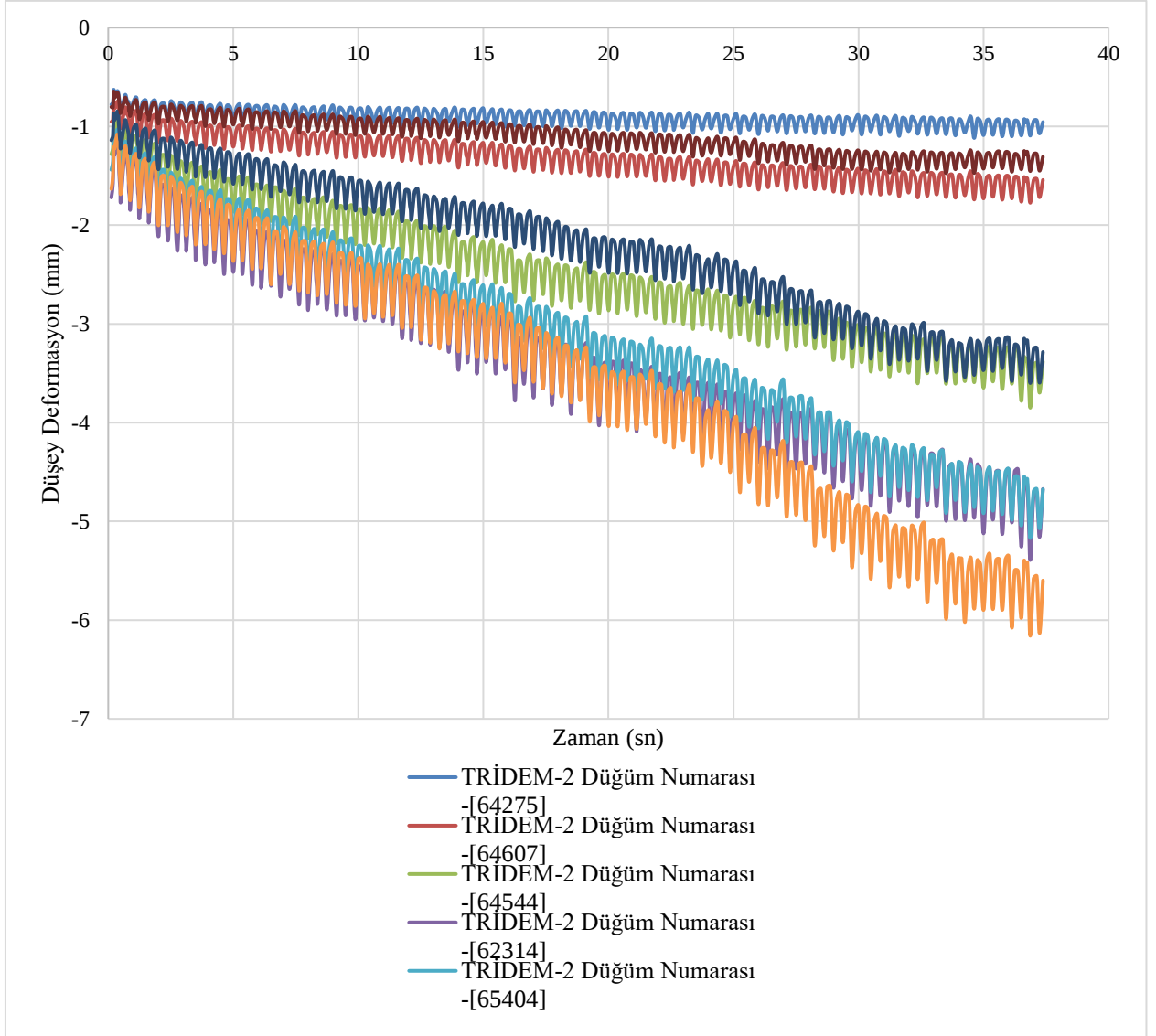
Şekil 4.6. Tridem bölgesi deformasyon değerleri referans noktaları



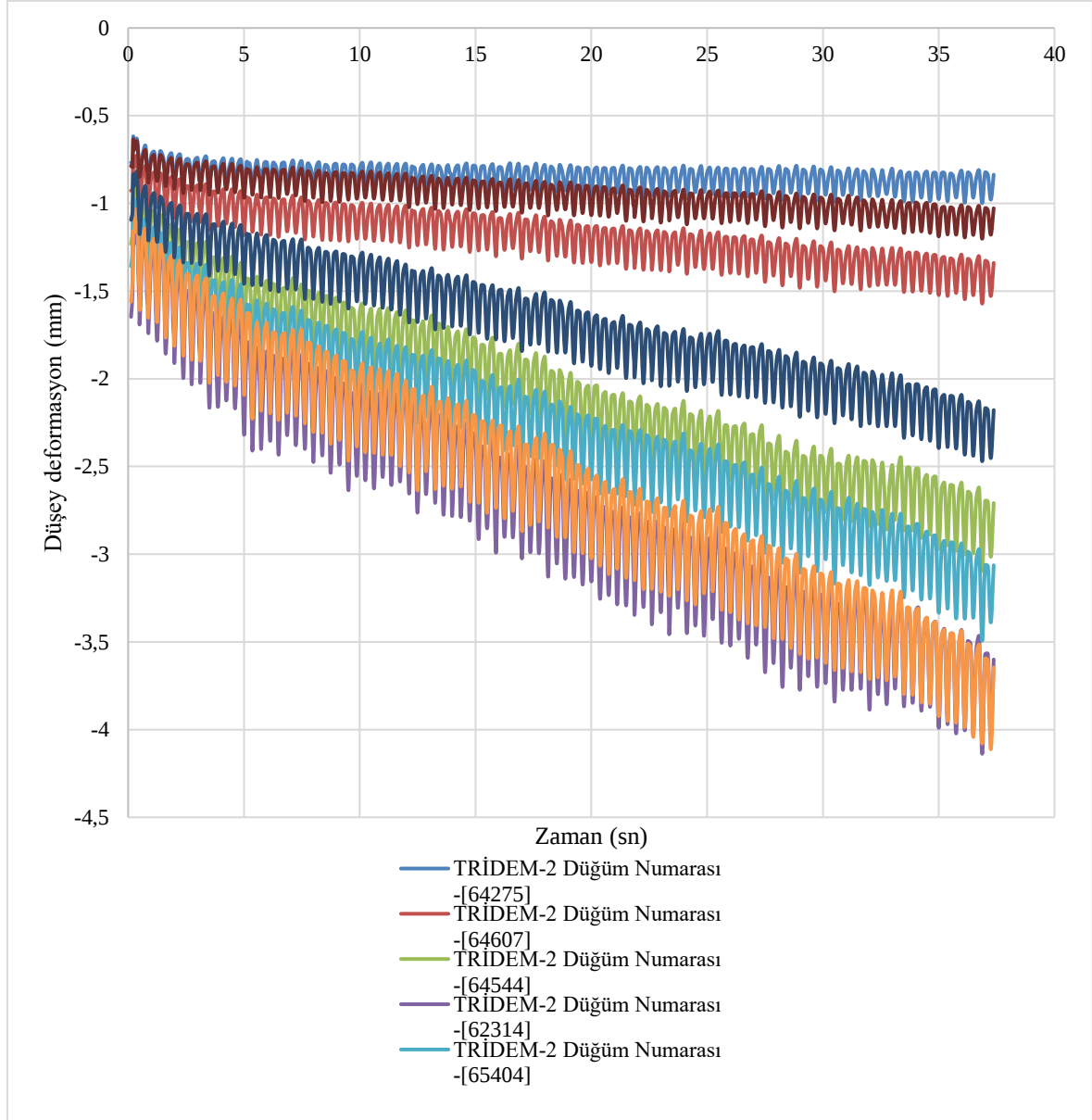
Şekil 4.7. KK kesiti N=100 yükleme adımı zamana bağlı deformasyon grafiği



Şekil 4.8. KC kesiti N=100 yükleme adımı zamana bağlı deformasyon grafiği



Şekil 4.9. CK kesiti N=100 yükleme adımı zamana bağlı deformasyon grafiği

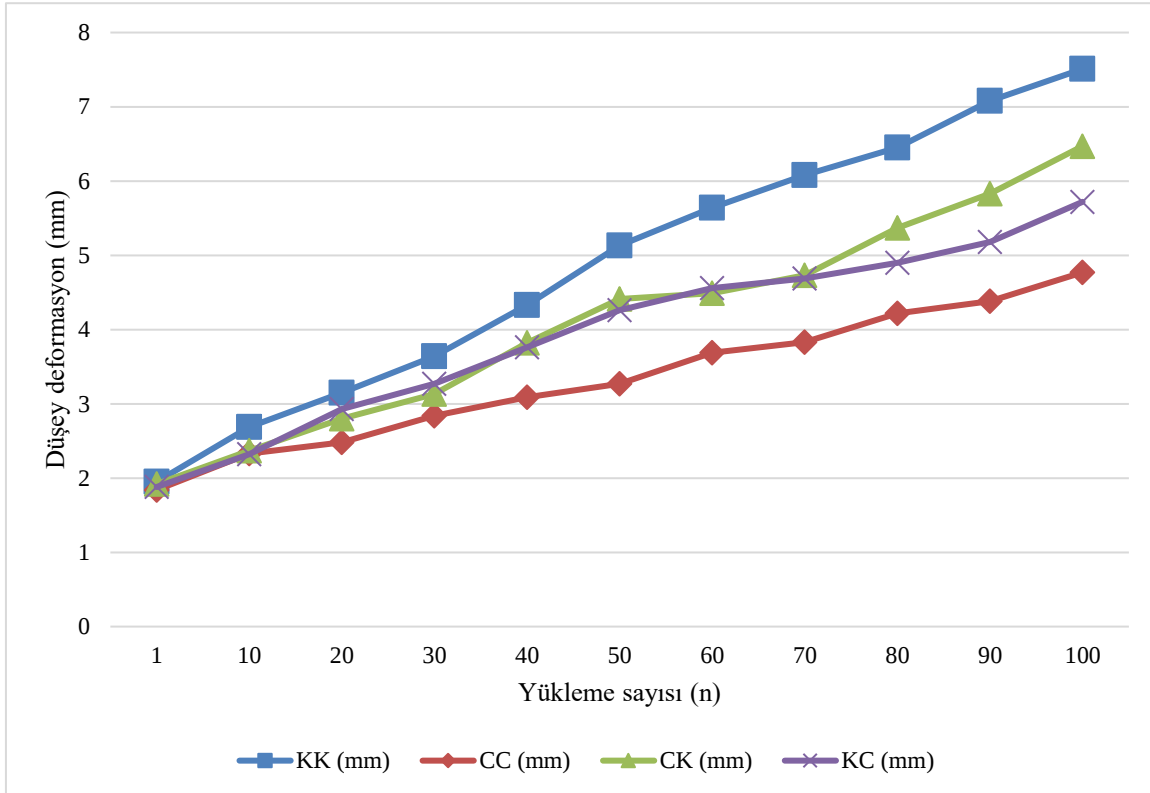


Şekil 4.10. CK kesiti N=100 yükleme adımı zamana bağlı deformasyon grafiği

Çizelge 4.4’de uygulanan tekrarlı yüklemeler sonucunda hesaplanan düşey deformasyon değerleri yer almaktadır. Bu çizelgedeki hesaplanan değerler her bir yükleme adımı sonunda kaplama yüzeyinde meydana gelen en yüksek deformasyon değerleridir. Hesaplanan bu değerlere ait grafik Şekil 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. N=100 yükleme adımına kadar hesaplanan maksimum düşey deformasyon değerleri

Yükleme sayısı (N)	KK (mm)	CC (mm)	CK (mm)	KC (mm)
1	1,95	1,84	1,92	1,88
10	2,69	2,33	2,37	2,32
20	3,15	2,48	2,80	2,93
30	3,64	2,84	3,13	3,27
40	4,33	3,09	3,82	3,76
50	5,13	3,27	4,41	4,26
60	5,64	3,69	4,49	4,56
70	6,08	3,83	4,73	4,69
80	6,45	4,22	5,37	4,90
90	7,08	4,38	5,83	5,18
100	7,51	4,77	6,47	5,72



Şekil 4.11. N=100 yükleme adımına kadar hesaplanan maksimum düşey deformasyon değerleri

Yazılımda tüm kesitler için N=100 yükleme adımına kadar olan dinamik analizler yapılmıştır. Çizelge 4.4’de yer alan sonuçlara göre KK kesitindeki deformasyon değerleri

tüm yükleme adımlarında en yüksektir, KC ve CK kesitleri takip etmektedir. En düşük deformasyon değeri CC kesitinde meydana gelmiştir. Düşük yükleme döngülerinde CK ve KC kesitlerindeki düşey deformasyon değerleri birbirine çok yakın hesaplanmıştır. Şekil 4.11'e göre doğal agrega ile çelik cürufu kombinasyonundan oluşan CK ve KC kesitlerindeki davranışa yönelik daha fazla sayıda yükleme adımı gerekli olduğu görülmektedir. Çünkü N=70 yükleme adımından sonra bu kesitler arasındaki oturma değerleri farklılık göstermeye başlamıştır. Çelik cürufunun sahip olduğu yüksek rijitlik modüllerinin etkisiyle, çelik cürufu kullanılan kesitlerin yalnızca doğal agrega kullanılan kesitlere kıyasla daha iyi performans göstermesi mümkündür. Ancak kesitlerin zamana bağlı oturma grafikleri aynı eğilimdedir. En fazla düşey deformasyon değerinin 15 mm'den düşük olması nedeniyle Karayolu Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne (2008) göre, izin verilebilir oturma değeri sınırının da altında kaldığı tespit edilmiştir. Çelik cürufu granüler tabakaların oluşturduğu kesitlerde meydana gelen kalıcı deformasyon değerlerinin düşük olmasında; çelik cürufunun geçirgenliği, yoğunluğu, yüksek sürtünme açısı değeri ve aşınmaya karşı gösterdiği direncin etkili olduğunu söylemek mümkündür. Bu faktörler çelik cürufunun üstün mekanik ve mühendislik özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca temel ve alttemel tabakalarındaki kullanılacak olan çelik cürufu agregaların dinamik modüllerinin doğal agregaya kıyasla yüksek değerlere sahip olması oturmalara karşı gösterilen direncin artışı sağlamaktadır. Yapılan analizler çerçevesinde ideal dayanıklılığa sahip bir malzeme olmasının etkileri oturma değerleri üzerinde görülmüştür.

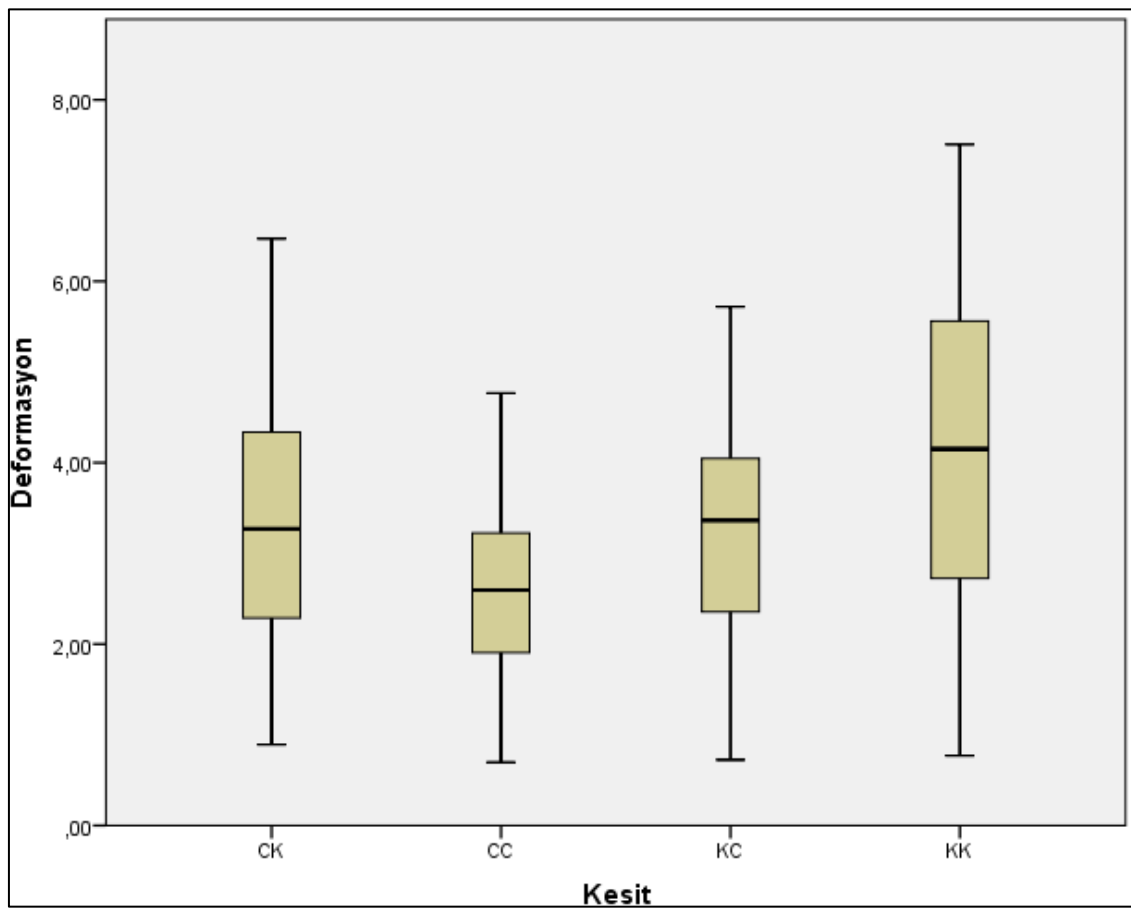
N=100 yükleme adımı sonrasındaki devam edecek yüklemelerde daha fazla depolama alanının gerekmesi ve dinamik analiz sürelerindeki artış dolayısıyla deformasyon değerlerinin hesaplanmasında istatistiksel yöntemler kullanılmıştır. Sonraki bölümde uygulanan istatistiksel yöntemlere ait teorik bilgiler ve hesaplanan deformasyon değerleri yer almaktadır.

4.3.1. Deformasyon sonuçlarının tanımlayıcı istatistikleri

Her kesit için deformasyon değerleri ayrı ayrı incelenmiş olup deformasyon miktarlarına ait tanımlayıcı istatistikler Çizelge 4.5'de gösterilmiştir. Buna göre en az deformasyonun CC kesitinde olduğu en fazla deformasyonun ise KK kesitinde olduğu gözlemlenmiştir. Daha ayrıntılı sonuç elde edebilmek için her bir kesite ait kutu grafiği Şekil 4.12'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Deformasyon miktarlarına ait tanımlayıcı istatistikler

Düşey Deformasyon Değerleri	CK (mm)	CC (mm)	KC (mm)	KK (mm)
Ortalama	3,34	2,61	3,23	4,15
Minimum	0,89	0,69	0,73	0,77
Maksimum	6,47	4,77	5,72	7,51
Std. Sapma	1,26	0,87	1,10	1,66



Şekil 4.12. Her kesit için deformasyon değerlerinin kutu grafiği

Kesitlerin birbiri arasında anlamlı bir ilişkinin varlığının belirlenmesi çalışmanın ana amaçlarından biridir. Bu yüzden anlamlı fark olup olmadığını test etmek için öncelikli olarak normallik varsayımı durumu kontrol edilmelidir. Bu amaç doğrultusunda Kolmogorov-Smirnov testi ile normallik varsayımı test edilmiştir. Test sonucuna göre normallik varsayımı sağlanmadığı gözlemlenmiş olup parametrik test yerine parametrik olmayan Kruskal Wallis testi uygulanmıştır.

Çizelge 4.6. Kruskal Wallis test sonucu

Sıralamalar				Test İstatistiği	
	Kesit	N	Ortalama Sıralama		Deformasyon
Deformasyon	CK	396	778,51	Chi-Square	194,238
	CC	390	531,56		
	KC	372	761,21	df	3
	KK	355	976,26	Asymp. Sig. (p değeri)	0,000
	Toplam	1513			

Kruskal Wallis test sonuçlarının yer aldığı Çizelge 4.6'ya göre p değerinin $0,000 < 0,05$ olması sebebi ile kesitler arasında anlamlı fark olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla Çizelge 4.5'de verilen ortalama düşey deformasyon değerlerinden de anlaşılacağı üzere KK kesitinde deformasyon miktarı fazla olurken CC kesitinde daha az deformasyon olduğu bu yüzden kesitler arasında farklılık bulunduğu ifade edilmektedir.

4.3.2. Sonraki yükleme adımlarının regresyon analizi ile tahmin edilmesi

Değişkenler arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak modellemek için kullanılan regresyon analizi istatistiksel bir yöntemdir. Bu yöntem, değişkenler arasındaki ilişkinin gücünü değerlendirmek ve gelecekteki tahminleri modellemek için kullanılmaktadır. Regresyon analizinde bağımlı ve bağımsız değişkenler kullanılarak modelleme yapılmaktadır. Bağımlı değişkenler, bağımsız değişkenler tarafından etkilendiği düşünülen veya bağımsız değişkenlere bağlı olarak değiştiği kabul edilen değişkenlerdir. Bağımsız değişkenler ise bağımlı değişkenleri etkilediği düşünülen değişkenlerdir. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki matematiksel ilişkinin biçiminin belirlenmesine verinin modellenmesi veya veriye model uydurma adı verilmektedir. Regresyon analizinde k adet bağımsız değişken $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ ile gösterilirken bağımlı değişken ise y ile gösterilmektedir. Bir regresyon modelinin genel biçimi $y = f(x, \beta) + \varepsilon$ şeklinde olup sistematik kısım olan $f(x)$ bağımsız değişkene bağlı iken rasgele kısım olan ε ise tahmin ediciden bağımsızdır. Regresyon analizinde doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon modeli bulunmaktadır.

Doğrusal regresyon modeli

Bağımsız değişkenlerin $x_1, x_2, \dots, x_p$ bağlı olduğu tek bir bağımlı değişkenin y olduğu doğrusal regresyon modeli $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \varepsilon$ olarak ifade edilir. Doğrusal regresyon modelinde $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ bilinmeyen parametreler olup veri kümesinden tahmin edilmektedirler. Doğrusal regresyon modelinin basit hali olan basit doğrusal regresyon modeli ise $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon$ olarak ifade edilmektedir. Bu modelde β_0 regresyon doğrusunun eğimini, β_1 regresyon doğrusunun y eksenini kesim noktasını ve ε ise hata terimini ifade etmektedir. Basit doğrusal regresyon modelinde bilinmeyen β_0 parametresinin tahmin edicisini b_0 ile bilinmeyen β_1 parametresinin tahmin edicisini ise b_1 ile göstermek mümkündür. Tahmin edicileri kullanarak basit doğrusal regresyon modelini $y = b_0 + b_1 x + e$ biçiminde ifade etmek mümkündür. Burada artık terim olarak adlandırılan e , gözlem değeri (y) ile tahmin değeri ($\hat{y}$) arasındaki farktır. ε ile gösterilen hata terimi ise gözlem değeri ile gerçek değer arasındaki farktır. Dolayısıyla i . birimin hata terimi $\varepsilon_i = y_i - E(y_i)$ ile ifade edilirken, artık terim $e_i = y_i - \hat{y}_i$ olarak ifade edilmektedir.

Basit doğrusal regresyon modeli olan $y_i = b_0 + b_1 x_i + e_i$ ifadesinde artık terim (e_i) yerine $y_i - \hat{y}_i$ konulması halinde $\hat{y}_i = b_0 + b_1 x$ olarak elde edilir. Burada bilinmeyen b_0 ve b_1 gibi parametreler ise en küçük kareler yöntemi, ağırlıklı en küçük kareler yöntemi ya da en çok olabilirlik yöntemi ile elde edilmektedir (Gamgam ve Altunkaynak, 2015). Doğrusal regresyon modellerinin türevlenebilir olması sebebi ile parametrelerini tahmin etmek oldukça kolaydır. Ancak çoğu zaman gerçek hayat problemleri doğrusal regresyon modelleri ile modellenmeleri mümkün olmamaktadır. Bu yüzden doğrusal olmayan regresyon modelleri geliştirilmiştir. Düşey deformasyon değerleri de doğrusal regresyon modelleri ile modellenemediği için doğrusal olmayan regresyon modelleri kullanılmıştır.

Doğrusal olmayan regresyon modeli

Doğrusal bir regresyon modelinde, regresyon fonksiyonu bilinmeyen parametrelerin doğrusal bir fonksiyonuyken, doğrusal olmayan bir regresyon modelinde regresyon fonksiyonu bilinmeyen parametrelerin doğrusal bir fonksiyonu değildir. Doğrusal olmayan regresyon modelleri, model parametrelerinden en az birinin model ifadesinde doğrusal olmayan bir şekilde gerçekleştiği modeller olarak da tanımlanır. Doğrusal olmayan regresyon modelleri, değişkenler arasındaki karmaşık ilişkileri modellemek için kullanılır

ve çeşitli bilimsel disiplinlerde ve mühendislikte önemli bir rol oynar (Ratkowsky, 1983; Seber ve Wild, 1989).

Üstel fonksiyonlar, logaritmik fonksiyonlar, trigonometrik fonksiyonlar, Power fonksiyonları ve Gauss fonksiyonu doğrusal olmayan regresyon modellerinden biridir. Byun, Han, Tutumluer ve Lee (2016), tarafından kontrollü düşük mukavemetli malzeme numuneleri için, geçen zamana göre V_s 'deki değişim, Power fonksiyonu ile modellenmiştir. Li ve ark. (2022) tarafından yarı esnek kaplamanın viskoelastik davranışı ve tekerlek izi ilerlemesi test sonuçları Power fonksiyonu ile modellenmiştir. Ayrıca birçok araştırmacı, difüzyon katsayısı ile hacimsel su içeriği arasındaki ilişkinin, sıvı su difüzyon katsayısının deneysel verilerini Power fonksiyonuna modelleyerek elde etmişlerdir (Liu ve Wang, 2023). Bu çalışmada literatür ile uyumlu olarak Eş. (4.1)'de ifade edilen Power fonksiyonu kullanılmıştır.

$$f(x_i, \beta) = \beta_1 \cdot x_i^{\beta_2} \quad (4.1)$$

Regresyon modellerinde parametre tahmini

Doğrusal regresyon modellerinde parametre tahmini neredeyse tamamen gelişmişken, doğrusal olmayan durumda hala tam olarak çözülememiştir. Hem doğrusal hem de doğrusal olmayan regresyon modelinde bir y bağımlı değişkenin $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ bağımsız değişkenleri tarafından modellenmeye çalışılmaktadır. Doğrusal olmayan regresyon modelinde, gözlenen verileri kullanarak bilinmeyen parametrelerin doğrusal olmayan bir fonksiyonunu elde etmeye çalışan kullanışlı bir istatistiksel araçtır. n gözlem içeren bir (x_i, y_i) çifti için, doğrusal olmayan bir regresyon modeli $y_i = f(x_i, \beta) + \varepsilon; i = 1, \dots, n$ şeklindedir. ε_i 'nin genellikle ortalama sıfır ve sabit varyans ile ilişkisiz olduğu varsayılır.

Doğrusal olmayan bir regresyon modelinde bilinmeyen p farklı $\beta_1, \dots, \beta_p$ parametrelerini tahmin etmek için popüler yöntem, en küçük kareler yöntemidir (Seber ve Wild, 1989). Bu yöntemle göre, Eş. (4.2)'de gösterilen artık terimlerin karelerinin toplamının minimize edilmesiyle $\beta_1, \dots, \beta_p$ parametrelerinin tahminleri elde edilir.

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \beta))^2 \quad (4.2)$$

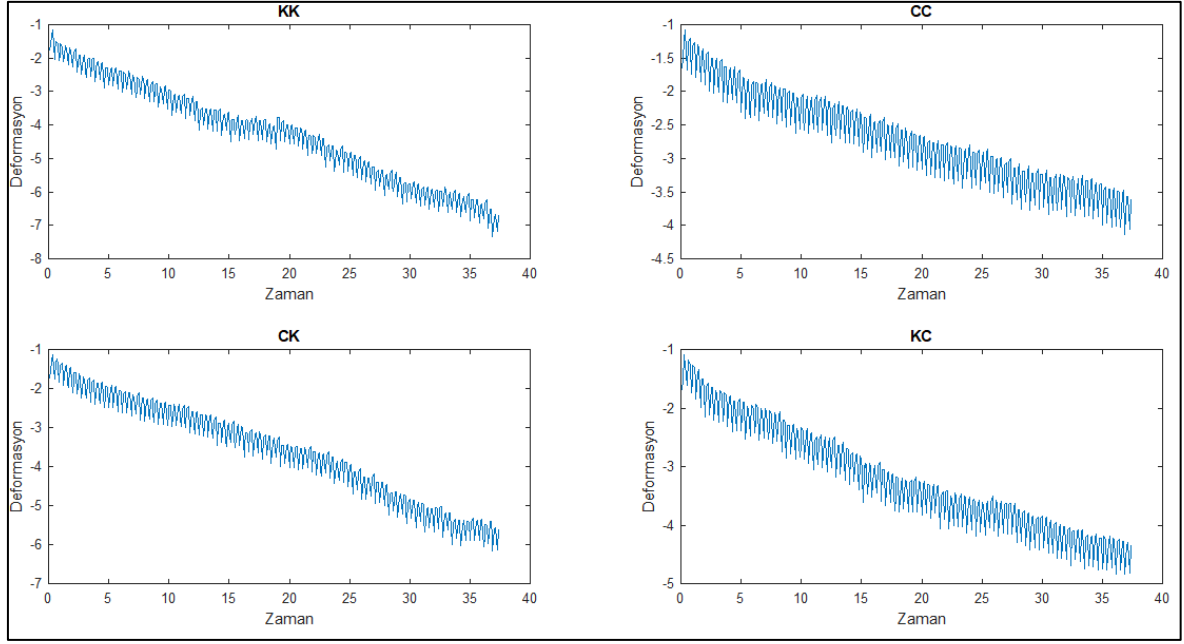
Doğrusal olmayan regresyon modelinde $f(x_i, \beta)$ doğrusal olmayan bir yapıya sahip olduğu için doğrudan türevinin alınması mümkün olmamaktadır. Bu yüzden doğrusal olmayan regresyon analizinde bilinmeyen parametrelerin tahmin edilmesi problemi aslında Eş. (4.2)'de gösterilen amaç fonksiyonunun minimize edildiği bir optimizasyon problemidir (Özsoy ve Örkücü, 2016).

Regresyon analizinin önemli kavramlarından birisi olan belirleme katsayısı genel olarak R^2 ile gösterilir. Eş. (4.3)'de gösterilen belirleme katsayısı bağımlı değişkendeki toplam değişkenliğin ne kadarlık bir kısmını kullanılan model ile açıkladığını gösterir. Bu değer 1'e ne kadar yakın ise regresyon modeli gözlem değerlerini o kadar iyi yansıttığını göstermektedir.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.3)$$

Düşey deformasyon değerlerinin Power fonksiyonu ile kestirimi

Sonraki yükleme adımları için tahmin metodunun uygulanmasında yol gösterici olan eğrinin davranışının tespit edilmesi amacıyla zamana bağlı deformasyon eğrileri çizdirilmiş olup Şekil 4.13'de verilmiştir.



Şekil 4.13. Her kesit için zaman–deformasyon grafiği

Literatürde zamana bağlı deformasyon tahmini için kullanılan Power fonksiyonu olan $f(t) = a \times t^b$ sonraki yüklemelerin kestirimi için tercih edilmiştir. Her kesit için ayrı ayrı parametreler tahmin edilmiş olup Çizelge 4.7’de tahmin verileri gösterilmektedir.

Çizelge 4.7. Her kesit için tahmin edilen parametre değerleri

İstatistikler	KK	CC	CK	KC
a	0,8341	1,0024	0,8791	1,0149
b	0,5703	0,3558	0,4850	0,4203
R^2	0,9290	0,8463	0,8942	0,9079
SSE	109,0029	92,9024	117,0719	85,8288
RMSE	0,5557	0,4893	0,5451	0,4816
Serbestlik Derecesi	353	388	394	370
Düzeltilmiş R^2	0,8887	0,6855	0,8138	0,8074

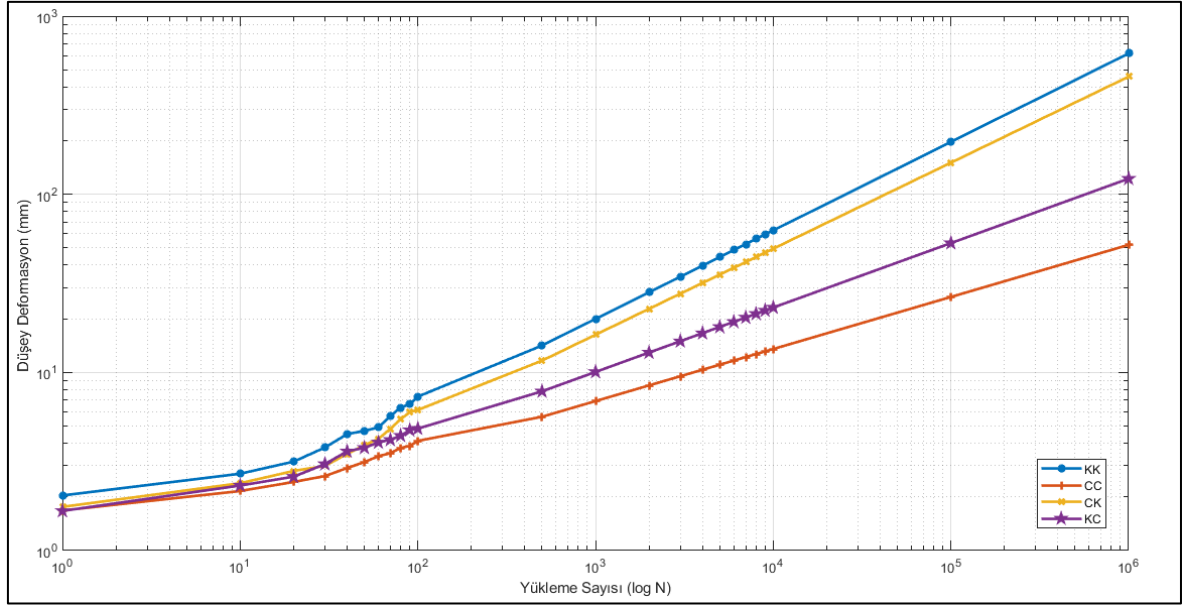
Örneğin KK kesit için elde edilen fonksiyon $f_{KK}(t) = 0,8341 \times t^{0,5703}$, CC kesit için elde edilen fonksiyon $f_{CC}(t) = 1,0024 \times t^{0,3558}$, CK kesit için elde edilen fonksiyon $f_{CK}(t) = 0,8791 \times t^{0,4850}$, KC kesit için elde edilen fonksiyon $f_{KC}(t) = 1,0149 \times t^{0,4203}$ ’dir. R^2 deformasyon değerlerinin Power fonksiyonuna ne kadar iyi uyduğunun ölçütünü belirleme katsayısıdır. Her kesit için belirleme katsayısının %100’e yakın olması tahminin iyi

olduğunu göstermektedir. SSE ise gerçek deformasyon değerleri ile tahmin edilen deformasyon değerleri arasındaki farkların kareler toplamıdır. Deformasyon değerlerine göre bu değer değişeceği ve tek başına bir anlam ifade etmeyeceği için RMSE ile kullanılmaktadır. RMSE ise SSE'nin deformasyon sayısına bölümünün kareköküdür. Dolayısıyla bu değer ne kadar küçük olursa tahminler de o kadar gerçeğe yakın tahmin edildiği anlamına gelmektedir.

Sonraki yüklemeler için 500, 1 000, 2 000, 3 000, 4 000, 5 000, 6 000, 7 000, 8 000, 9 000, 10 000, 100 000 ve 1 000 000 yükleme adımlarında her kesit için elde edilen fonksiyonlar yardımı ile hesaplanan tahmini deformasyon değerleri Çizelge 4.7 verilmiştir. Şekil 4.7'de çizelgede verilen yükleme adımlarına bağlı her bir kesit için değişen deformasyon değerlerinin logaritmik eğrisi verilmiştir.

Çizelge 4.8. Power 1 fonksiyonuna göre her kesit için deformasyon tahmin değerleri

Yüklemeler	KK (mm)	CC (mm)	CK (mm)	KC (mm)
500	10,5089	6,4536	11,1361	8,1581
1 000	18,5083	8,2577	15,5847	11,2534
2 000	24,3874	10,5668	21,8120	13,3959
3 000	30,8525	11,2064	26,5526	15,4414
4 000	32,0268	13,5218	30,5288	17,9396
5 000	42,3584	14,6391	34,0187	19,0965
6 000	50,0814	15,6202	37,1644	20,0152
7 000	58,3373	16,5008	40,0500	21,7563
8 000	61,2192	17,3036	42,7301	22,3583
9 000	66,7926	18,0441	45,2426	23,8481
10 000	69,1055	18,7334	47,6150	24,2446
100 000	142,7213	30,5025	145,4948	50,8611
1 000 000	561,3519	69,4310	444,5869	115,3392



Şekil 4.14. Yükleme sayısı-deformasyon değişim eğrisi

Yapılan sayısal analiz ve tahmin sonuçlarına göre kesitler arasındaki deformasyon değerleri kıyasladığında tüm yükleme adımlarında alttemel tabakasında çelik cürufunun kullanılması halinde deformasyon değerlerinde önemli oranda azalma meydana gelmiştir. Yükleme sayısının artması ile KK kesitindeki deformasyon değerlerindeki değişim miktarı oldukça yüksektir. Doğal agregadan oluşan kesitin malzeme rijitlik modülleri, çelik cürufuna göre daha düşük olması sebebiyle çelik cürufu ve doğal agreganın oluşturacağı kombinasyondaki dayanım parametrelerinin yüksek olması sonucu oturmaların azalması da beklenmektedir. Özellikle alttemel tabakası çelik cürufulu kesitler, daha düşük deformasyon değerine sahiptir. Kireçtaşı ve çelik cürufu agregalarının temel için tanımlanan rijitlik parametreleri birbirine oldukça yakındır. Bu nedenle deformasyonlarda temel tabakasının malzeme türünden çok alttemel tabakasının türü bu sayısal analizde etkili olmuştur. Özellikle alttemelde çelik cürufu kullanılması durumundaki sayısal analizlerde deformasyon değerleri daha düşüktür.

Tabaka yüzeyinde meydana gelen deformasyonların artışı ilk 100 yükleme adımında daha düşük oranlarda seyretmiştir. Çünkü ilk yüklemelerde, yüzeydeki plastik deformasyonlar düşük seviyede iken yük döngü sayısındaki artışlara bağlı olarak biriken kalıcı deformasyonların arttığını söylemek mümkündür. Döngü sayısının artmasıyla deformasyon hızı da artmıştır.

Her bir kesit için ileri yükleme adımlarının tahmin edilen deformasyon değerleri Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne (2008) göre değerlendirilmiştir. KK kesitinde 1 000 ile 3 000 yükleme arasındaki oturma değerine göre orta şiddette bozulma meydana gelirken 3 000 yükleme adımından sonra bozulma şiddeti artmıştır. Artık 7 000 yükleme sınırından sonra 5 cm oturma değerinin aşılması ile geçici ya da kalıcı çözümler önerilmektedir. CC ve KC kesitinde bu sınıra 100 000, CK kesitinde ise 10 000 yükleme adımından sonra ulaşılmaktadır. KGM tarafından önerilen geçici çözüm oturma derinliği miktarında malzemenin kazılarak yeniden yapılmasıdır. Kalıcı çözüm ise geçici çözüme ek olarak takviyelerin uygulanmasıdır.

Tahmin edilen ve sayısal analizlerde hesaplanan deformasyon değerleri literatürde yapılan farklı çalışmalarla da kıyaslanmıştır. Bodhinayake (2008) tekrarlı yüklemeler dolayısıyla doğal zeminin doğrusal olmayan davranışını belirlemek amacıyla yaptığı çalışmada 100, 1 000, 5 000, 10 000, 50 000, 100 000 ve 200 000 yükleme döngülerindeki deformasyon değerlerini hesaplamıştır. Bu yük döngüleri içerisinde maksimum deformasyon değeri 5,54 mm olarak hesap edilmiştir. Ancak bu tasarımda doğal zemin üzerinde iki kat dolgunun ve bu dolgu katmanlarından birinin türünün kaya olduğu ifade edilmiştir. Leng ve Gabr (2002) geosentetik donatı etkisini belirlemek amacıyla 10 000 yük döngüsünün uygulandığı deneysel çalışmada, 8 000 yükleme adımında donatısız kesitte 73 mm gibi bir düşey deformasyon değeri hesap edilmiştir. Abu-Farsakh ve Chen (2011) geogrid etkisini belirlemek amacıyla yaptıkları deneysel çalışmalarında, 20 000 yükleme adımında donatısız modelde yaklaşık 25 mm oturma meydana gelmiştir. Yükleme döngü sayısı, tekerlek yükü değeri ve malzeme parametreleri vb. gibi birçok etkene bağlı olarak hesaplanan düşey deformasyon değerlerinde farklılıklar olduğu görülmektedir. Mevcut çalışmanın malzeme parametre değerlerinin, tabaka sayılarının, tabakalardaki malzeme içeriklerinin, yükleme koşullarının da farklı olduğu göz önünde bulundurulduğunda sayısal verilerinin farklı olması kaçınılmazdır.

4.3.3. 2D ve 3D dinamik analiz sonuçlarının kıyaslanması

Cho, McCullough, Weissmann (1996) tarafından ifade edildiği üzere sayısal analizin hızı ve depolama kapasitesi açısından mevcut koşullar ve kaynakların durumuna göre tasarım yönteminin seçilmesi önemlidir. Literatürde 2D eksenel simetrik modellerin, saha gerilmeleriyle karşılaştırıldığında genellikle iyi sonuç verdiği de ifade edilmiştir (Elseifi,

2003). 2D eksenel simetrik modelin sınırlamaları, çok akslı yüklemelere imkan tanımaması vb. nedenlerle 3D FEM tercih edilmektedir. Ancak 3D FEM’de süre ve hafıza gibi etkenlerin dikkate alınması gereklidir. Çalışma kapsamında 2D ve 3D olarak oluşturulan modellerde dinamik analizler yapılmıştır.

Dinamik analiz sonuçlarına göre 2D eksenel simetrik modelde, ilk $N=50$ yükleme adımında deformasyon değerleri 3D modele kıyasla 0,5-1 mm daha fazla hesaplanmıştır. Kesit olarak değerlendirildiğinde, KK kesiti hem 2D hem de 3D modelde en yüksek deformasyona sahip kesittir. CC kesiti ise her iki durumda da en düşük deformasyona sahip kesit olmuştur. İki modelleme türü arasındaki düşey deformasyon değerlerinde anlamlı bir fark tespit edilmemiştir.

Kim, Tutumluer ve Kwon (2009) çalışmalarında, eksenel simetrik ve 3D sayısal analizlerde düşey deformasyon, birim şekil değiştirme ve düşey gerilme değerlerinin birbirine çok yakın hesapladıklarını ifade etmişlerdir. Kuo ve Huang (2006) çalışmalarında, 2D eksenel simetrik modelde meydana gelen gerilmelerin 3D ile olan uyumundan bahsetmiştir. Bu anlamda çalışma kapsamında da 2D ile 3D sonuçlarını benzerlik göstermesi literatür ile çelişmeyecek niteliktedir.

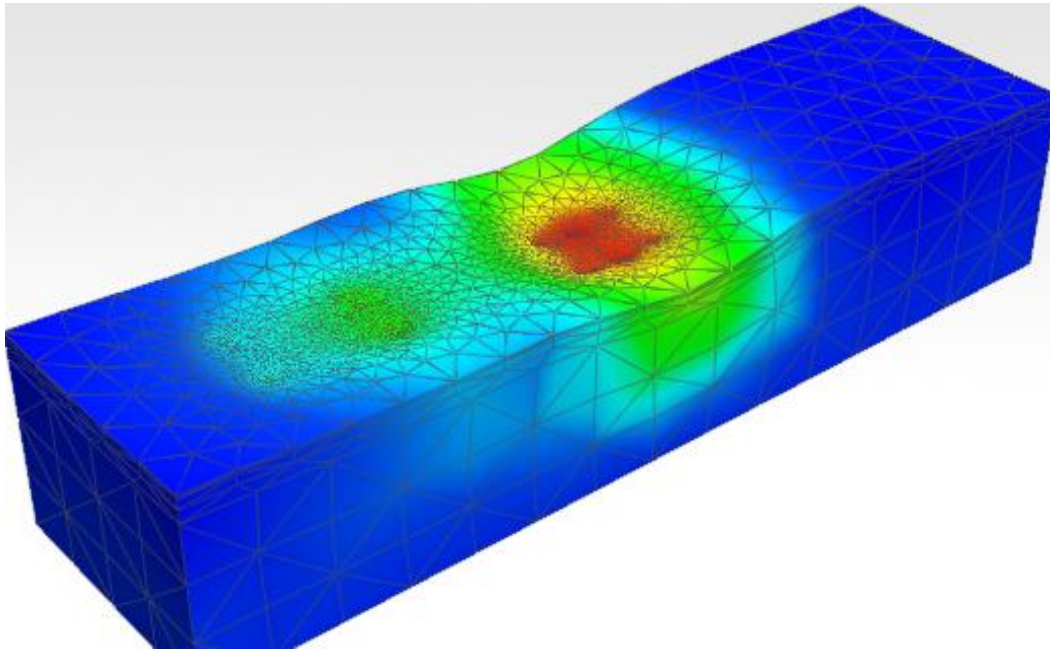
4.4. Doğal Zemin Mukavemet Parametrelerinin Yolun Performansına Etkisi

Doğal zeminin mukavemet parametrelerinin kesitlerdeki toplam düşey deformasyona olan etkisini belirlemek amacıyla KK, CC, CK ve KC kesitlerinde statik analiz yapılmıştır. Çizelge 4.9’da yumuşak ve katı kilden oluşan doğal zemin parametrelerinin değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.9. Doğal kil zemin malzeme parametreleri

Malzeme	Katı Kil	Yumuşak Kil
Elastisite Modülü (MPa)	-	-
ν (Poisson oranı)	0,2	0,45
γ (Birim hacim ağırlık) kN/m ³	18	16,5
c (Kohezyon) kN/m ²	100	50
ϕ° (İçsel sürtünme açısı)	10	0
E_{50}^{ref} (MPa)	24	5
E_{ur}^{ref} (MPa)	72	15
G_0^{ref} (MPa)	55	25

700 kPa tekerlek yükü altında yapılan statik analiz sonucunda meydana gelen düşey deformasyon görüntüsü Şekil 4.15’de verilmiştir. Tüm kesitlerde benzer görüntü meydana gelmiştir. Ancak doğal zeminin durumuna bağlı olarak özellikle düşey deformasyon değerleri birbirinden farklı hesaplanmıştır. Toplam düşey deformasyon, toplam gerilme ve birim şekil değiştirme değerlerindeki değişim tablosu Çizelge 4.10’da verilmiştir.

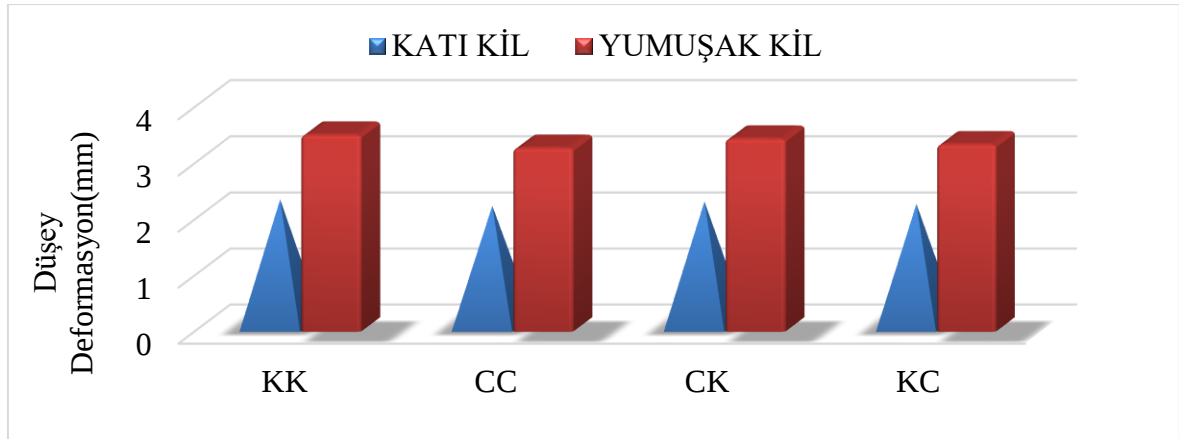


Şekil 4.15. KK kesiti statik analiz düşey deformasyon görüntüsü

Çizelge 4.10. Doğal zemin özelliklerine bağlı $\varepsilon_p^{\max}$, σ_{zz} ve T_z değerleri

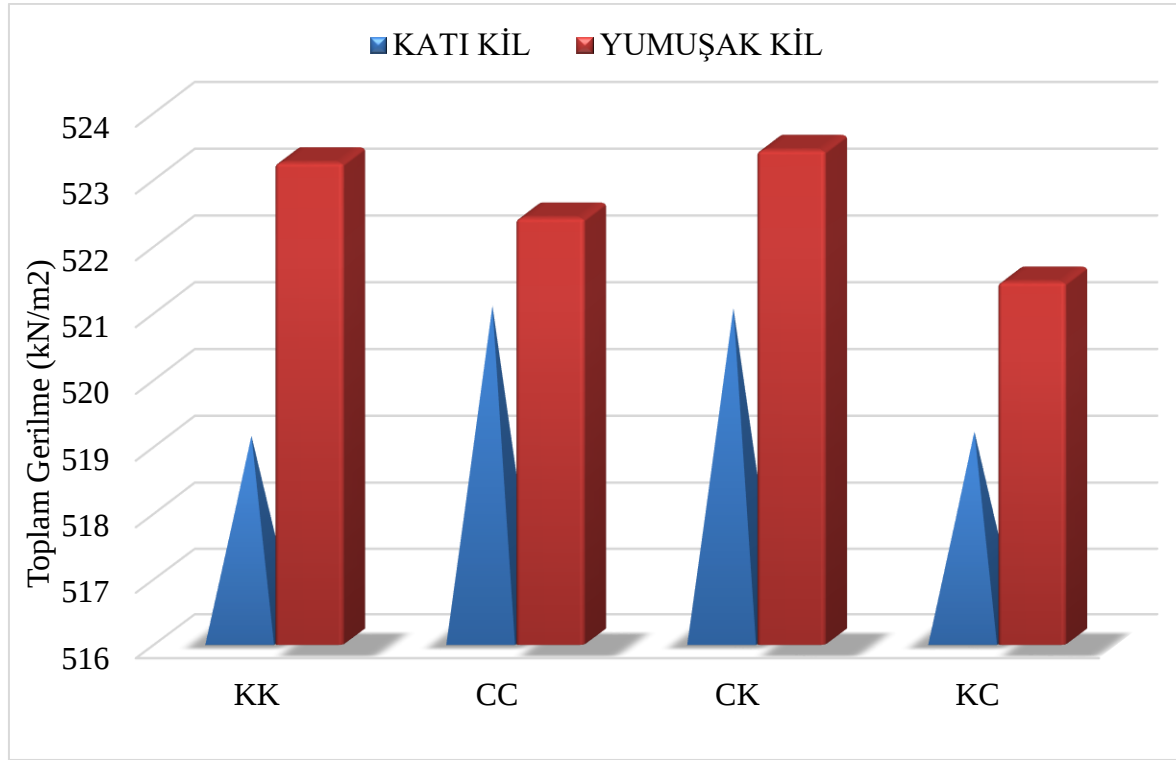
		KK	CC	CK	KC
$\varepsilon_p^{\max}$ (E^{-4}) (Toplam Plastik Şekil değiştirme)	Katı Kil	8,6	5,65	5,76	8,54
	Yumuşak Kil	8,99	5,85	6,0	8,76
σ_{zz} (kN/ m ²) (Toplam düşey gerilme)	Katı Kil	519,037	520,984	520,948	519,101
	Yumuşak Kil	523,257	522,429	523,443	521,47
T_z (mm) (Toplam Düşey Deformasyon)	Katı Kil	2,228	2,113	2,191	2,148
	Yumuşak Kil	3,511	3,276	3,44	3,339

Sonuçlar değerlendirildiğinde zayıf zemin üzerine inşa edilen yol tasarımlarında daha fazla düşey oturmaların meydana gelebileceğini söylemek mümkündür. Şekil 4.16’da doğal zemin türüne bağlı kesitlerdeki düşey deformasyon değişimleri sunulmuştur. Tüm kesitlerde daha sağlam bir doğal zemin üzerinde olmaları durumunda düşey deformasyon değerlerinde %50’den fazla bir azalma meydana gelmiştir. Kil zeminlerdeki ana tehlikelerden birisi şüphesiz oturmalar. Yumuşak kilden oluşan doğal zemindeki drenajsız kayma mukavemeti değeri katı kile göre daha düşüktür. Bu nedenle yumuşak kilde yüklemelere bağlı olarak oturmalar karşı göstereceği direnç azalmaktadır. Özellikle drenajsız koşullarda yumuşak kilin nem içeriğinin ve şişme potansiyelinin de olumsuz etkileriyle doğal zeminin taşıyıcı kapasitesinin niteliğinin bozulması da oturmaların artmasında etkilidir. Çünkü killi zeminlerin içeriğinde nemin varlığı dayanımlarının azalmasına yol açmaktadır.



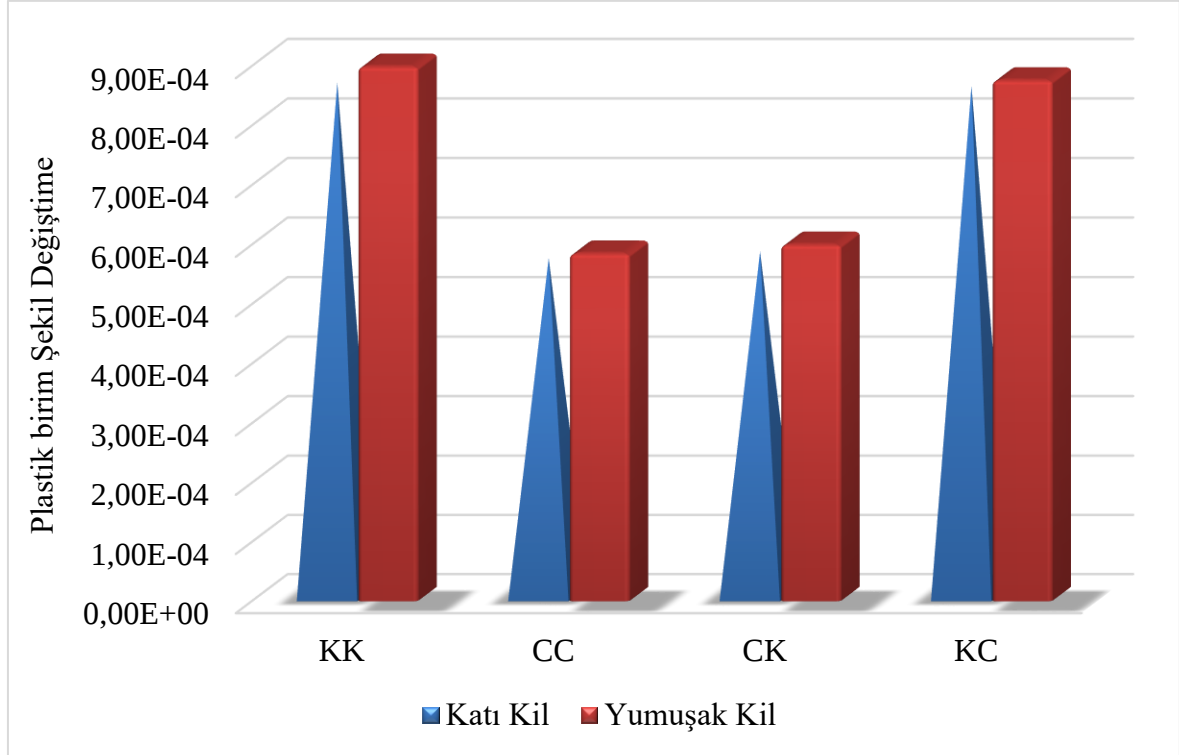
Şekil 4.16. Kesitlerdeki doğal zemin türüne bağlı düşey deformasyon değişimi

CC kesitinde doğal zemin türüne bağlı olarak değerlendirildiğinde düşey deformasyon ve plastik şekil değiştirme değerlerinin diğer kesitlere kıyasla en düşük değere sahip olduğu görülmüştür. Zayıf zeminlere inşa edilen tüm kesitlerde toplam gerilme ve plastik şekil değiştirmelerde artış söz konusu olmuştur. Çizelge 4.10’da bu değişimlere ait değerler sunulmuş olup değişimlerini gösteren sütun grafikleri Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.17. Kesitlerdeki doğal zemin türüne bağlı toplam gerilme değişimi

Şekil 4.17’de verilen toplam gerilme değişiminde zayıf zemin üzerinde tasarlanan modelde toplam gerilmelerde artış meydana gelmiştir. Söz konusu artışın en fazla meydana geldiği kesit KK kesiti olurken, en az artış ise CC kesitinde meydana gelmiştir. Kireç taşıdan oluşan granüler tabakaların, çelik cürufli kesitlere kıyasla doğal zeminin mukavemet parametrelerinden daha fazla etkilendiği söylenilebilir. Çünkü kireçtaşı agregaların sahip olduğu rijitlik parametrelerinin çelik cürufundan daha düşük olması bu durumu etkileyen faktörler arasında sayılabilir. Zayıf zeminlerde de çelik cürufli kesitlerin yolun stabilitesine olan olumlu katkısı görülmektedir. Tüm bunlara ek olarak zayıf zeminlerde, toplam düşey gerilmelerdeki artışla birlikte yol yapısındaki deformasyonların da artması söz konusu olacaktır.



Şekil 4.18. Kesitlerdeki doğal zemin türüne bağlı plastik şekil değiştirme değişimi

Doğal zemin türünün kesitlerdeki toplam plastik şekil değiştirme üzerindeki etkisinin çok fazla olmadığı Şekil 4.18’de görülmektedir. Çünkü araç yükleri ilk olarak kaplama tabakası tarafından karşılanmaktadır. Alt tabakalara doğru yük dağıtılarak iletilmektedir. Bu nedenle tekerlek yükü dolayısıyla meydana gelen şekil değiştirmelere özellikle kaplama tabakasında rastlamak mümkündür. Buradan hareketle şekil değiştirmeler üzerinde doğal zeminin etkisine rastlanılmamıştır.

Sonuç olarak bu analiz çerçevesinde değerlendirildiğinde, doğal zeminin mukavemet parametrelerinin düşey deformasyonlara olan etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca sistemin toplam düşey gerilmesinin zayıf zeminlerde daha fazla hesaplanması basınç birim şekil değiştirmelerinin neden olacağı düşey oturmalar, tekerlek izine karşı tasarımların uzun vadede daha kaliteli bir servis ömrü sağlaması açısından güçlü zeminlere inşa edilmesi önemlidir.

4.5. Zayıf Zeminlerde Temel ve Alttemel Tabaka Kalınlıklarının Etkisi

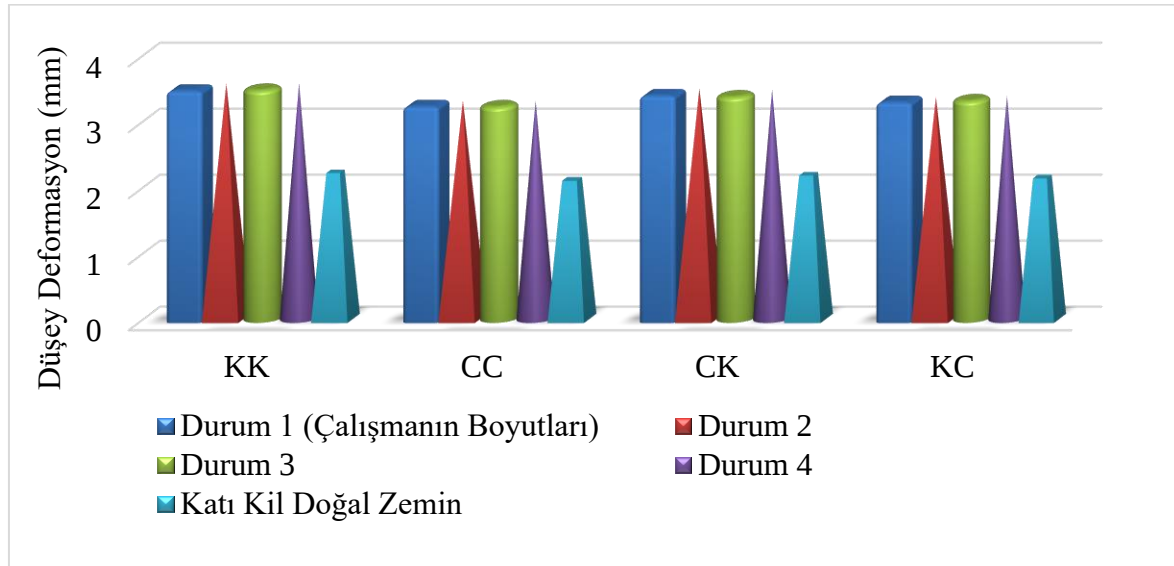
Tabaka kalınlığının yolun performansına olan etkisinin değerlendirilmesi amacıyla zayıf zemin üzerine inşa edilen temel ve alttemel tabakalarının kalınlıkları değiştirilerek statik analizleri yapılmıştır. Maximum normal gerilme, toplam birim şekil değiştirme ve düşey

deformasyon gibi kritik değerler incelenmiştir. Çizelge 4.11’de sayısal analizi yapılan tabaka kalınlık değişimleri verilmiştir.

Çizelge 4.11. Sayısal analizi yapılan tabaka kalınlıkları

Tabaka	Tabaka İsmi	Kalınlıklar (cm)			
		Durum 1 (Çalışma Boyutları)	Durum 2	Durum 3	Durum 4
1	Kaplama	10	10	10	10
2	Temel	30	30	40	40
3	Alttemel	40	50	40	50
4	Doğal Zemin	500	500	500	500

Yapılan statik analizlerde tabaka kalınlıklarının değişimine bağlı düşey deformasyon, toplam düşey gerilme değişimi ve tasarımın toplam birim şekil değiştirme değerleri dikkate alınarak Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de verilen grafikler meydana gelmiştir. Şekil 4.19’da çalışmada referans alınan boyutla diğer senaryoların, katı kil zemindeki değerleri ile kıyaslanmıştır.

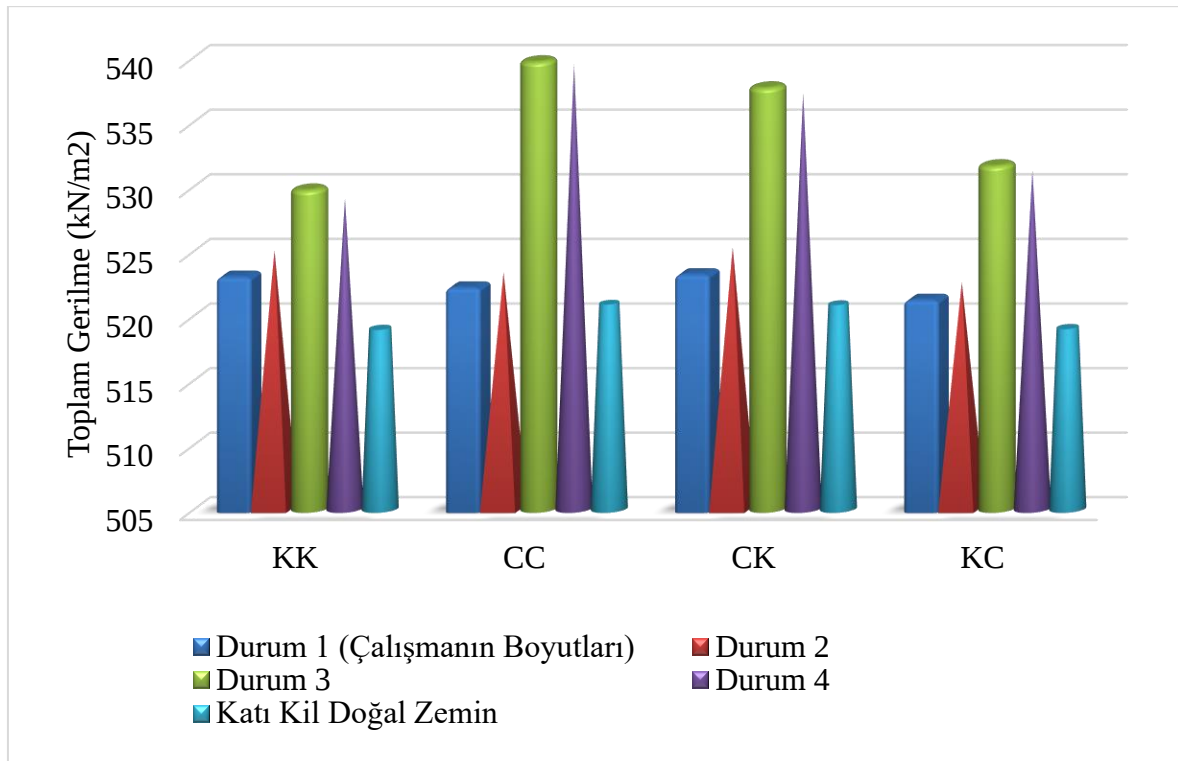


Şekil 4.19. Tabaka kalınlığına bağlı düşey deformasyon değişimi

Toplam düşey deformasyon değerleri, tabaka kalınlıkları değişiminden çok fazla etkilenmemiştir. Yumuşak kilin kullanılması durumunda oturma değerinin daha fazla meydana geldiği önceki bölümde tespit hesap edilmiştir. Ancak tabaka kalınlıklarının düşey

oturmalar üzerinde etkisinin değerlendirilmesi anlamında, zayıf zemin üzerinde yer alan üst yapı elemanlarından temel ve alttemel tabakaların kalınlıklarının artırılması ile düşey oturmada beklenen iyileşme meydana gelmemiştir. Tabaka kalınlıklarında KGM, Karayolu Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne göre (2008) belirlenen alt ve üst sınır limitlerini çok fazla aşmayacak kalınlık senaryolarında hesaplanan deformasyon değerlerindeki değişimin düşük oranlarda meydana gelmesinde yükleme türünün etkili olduğu ifade edilebilir. Malzemelerin zamana bağlı doğrusal olmayan davranışlarının etkisiyle küçük birim şekil değiştirmelerde elastik davranırken artan yüklemelere bağlı olarak gelişen kalıcı deformasyonların etkisi daha net gözlemlenebilmektedir.

Şekil 4.20'de çalışmada referans alınan boyutla diğer senaryoların, sağlam zemindeki toplam düşey gerilme değerleri ile kıyaslanmıştır.

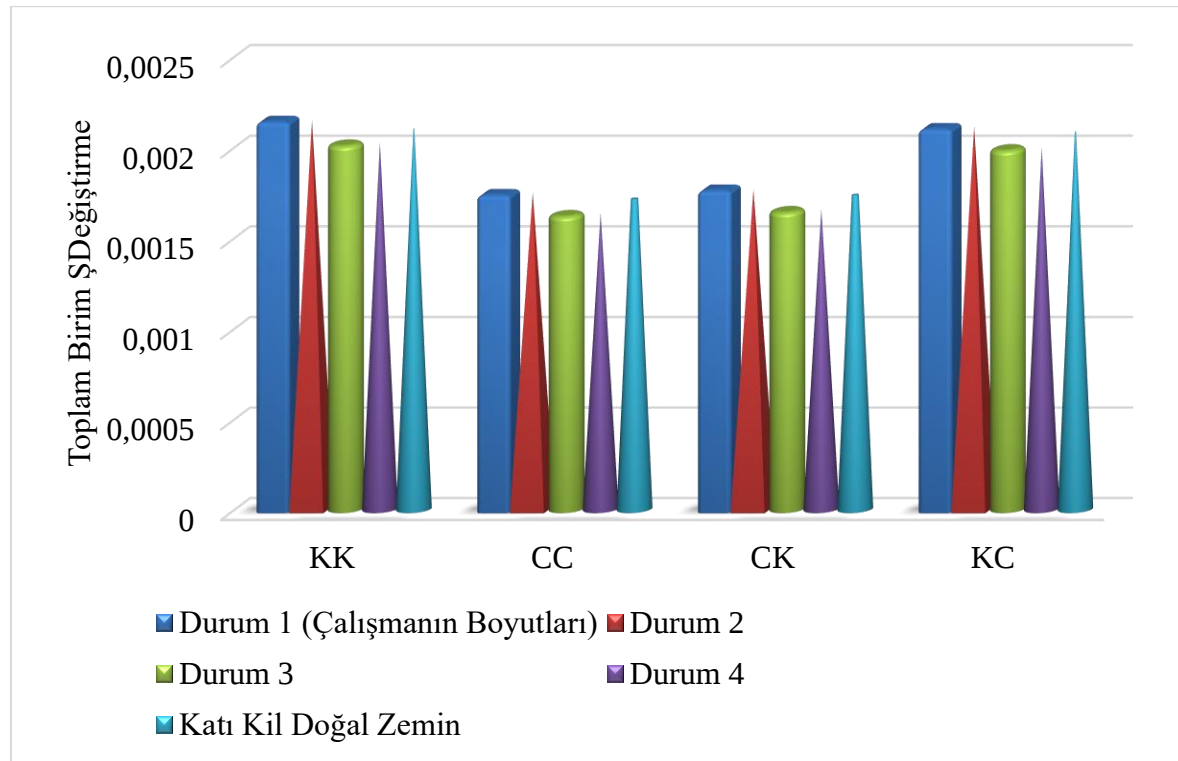


Şekil 4.20. Tabaka kalınlığına bağlı toplam gerilme değişimi

Toplam düşey gerilmelerin değişimi açısından bakıldığında, en düşük değerlere tüm kesitlerde temel tabakası kalınlığının 30 cm olduğu Durum 1 ve Durum 2 senaryolarında ulaşılmıştır. Temel tabakasının kalınlığının referans duruma göre (Durum 1) artırılması, tasarımdaki düşey gerilmelerin artışına yol açtığı yapılan statik analiz çerçevesinde belirlenmiştir. Temel tabakası kalınlığının, toplam düşey gerilme değeri üzerinde en fazla

etkiye sahip olduğu görülmektedir. Kesitlerdeki düşey gerilme değerleri, CC ve KC kesitlerinde daha düşük çıkmıştır. Cürufun temel ya da alttemelde kullanılması durumunda, temel tabakası kalınlığının artırılması halinde toplam düşey gerilmelerin çok daha fazla arttığı da görülmektedir. Bu nedenle temel/alttemelin çelik cürufu ile daha stabil hale getirildiği durumda tabaka kalınlığının artırılması ile sisteme ek bir yük oluşturduğu söylenebilir. Yalnızca doğal agrega kullanılan KK kesitinde, tabakalardaki boyut değişiminden daha düşük oranlarda etkilendiği görülmüştür. Durum 2 boyutları dikkate alınarak yapılan tasarımlarda sistemi etkileyen toplam düşey gerilmenin, güçlü zemindeki tasarım ile benzer olduğu söylenilebilir.

Şekil 4.21’de çalışmada referans alınan boyutla diğer senaryoların, sağlam zemindeki toplam birim şekil değiştirme değerleri ile kıyaslanmıştır.



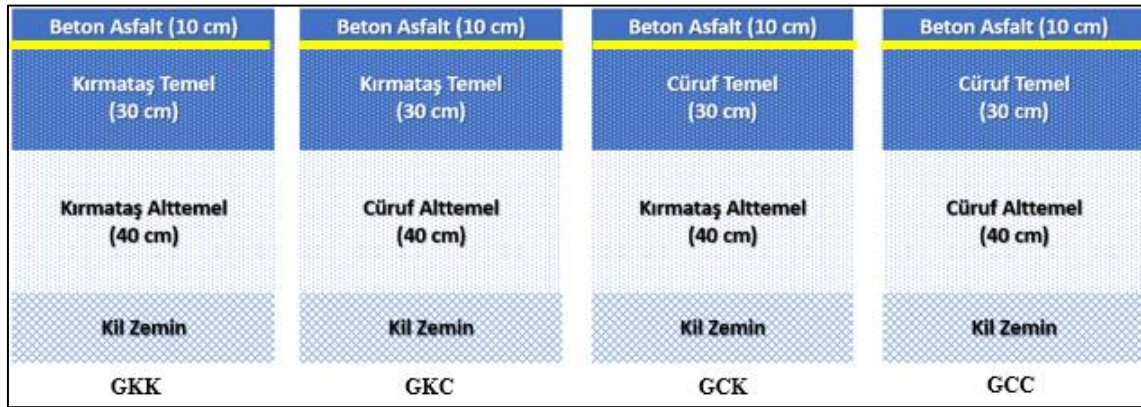
Şekil 4.21. Tabaka kalınlığına bağlı birim şekil değiştirme değişimi

Temel ve alttemel tabakası kalınlıklarının tasarımın toplam birim şekil değiştirme davranışına yönelik yapılan çıkarımda, alttemel tabakası kalınlığının referans çalışmaya göre 10 cm artırılmasıyla, güçlü bir zeminde meydana gelen şekil değiştirmelerden bir miktar daha düşük birim şekil değiştirmeler Durum 2 ve Durum 4 senaryolarında meydana gelmiştir.

Toplam deformasyon ve birim şekil değiştirmeler açısından, zayıf zeminlerde CC kesitinin kullanımının avantajlı olduğunu söylemek mümkündür. Bu çalışma özelinde değerlendirildiğinde temel tabakası kalınlığının artırılması tasarımın toplam gerilmesini etkilerken, alttemel tabakası kalınlığının ise toplam birim şekil değiştirmelerde etkili olduğu belirlenmiştir.

4.6. Yol Tabakalarında Tek Sıra Geogrid Kullanarak Yapılan Farklı Yükleme Değerlerine Ait Statik Analizler

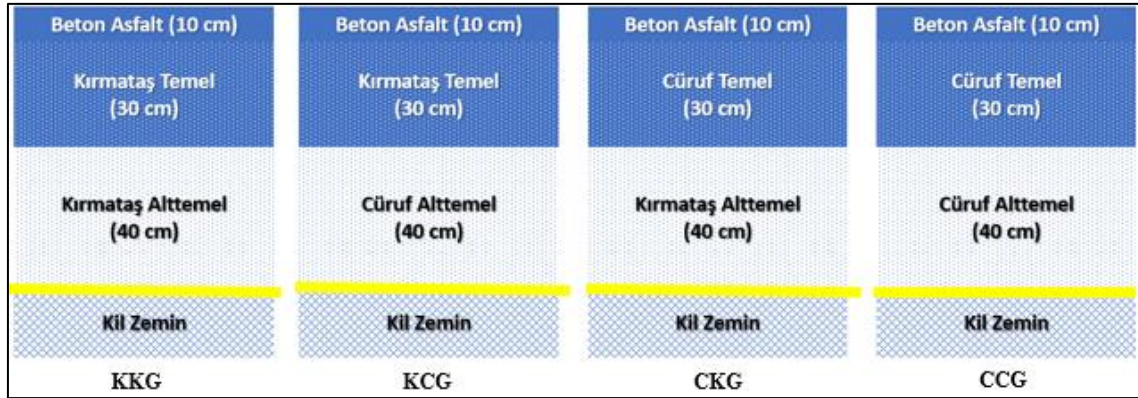
Tek sıra geogrid yerleşimi durumunda kaplama tabakası altı (Şekil 4.22), temel tabakası altı (Şekil 4.23) ve alttemel altında (Şekil 4.24) olmak üzere üç farklı yerleşim planı dahilinde statik analizler yapılmıştır. Kesitlerde tabakaların aralarında gösterilen sarı çizgiler geogridin konumunu ifade etmektedir. Ayrıca kesitlerin isimlerinin yanına geogridin konumuna bağlı olarak “G” harfi eklenmiştir.



Şekil 4.22. Kaplama tabakası altı geogrid yerleşim konumu kesit gösterimi

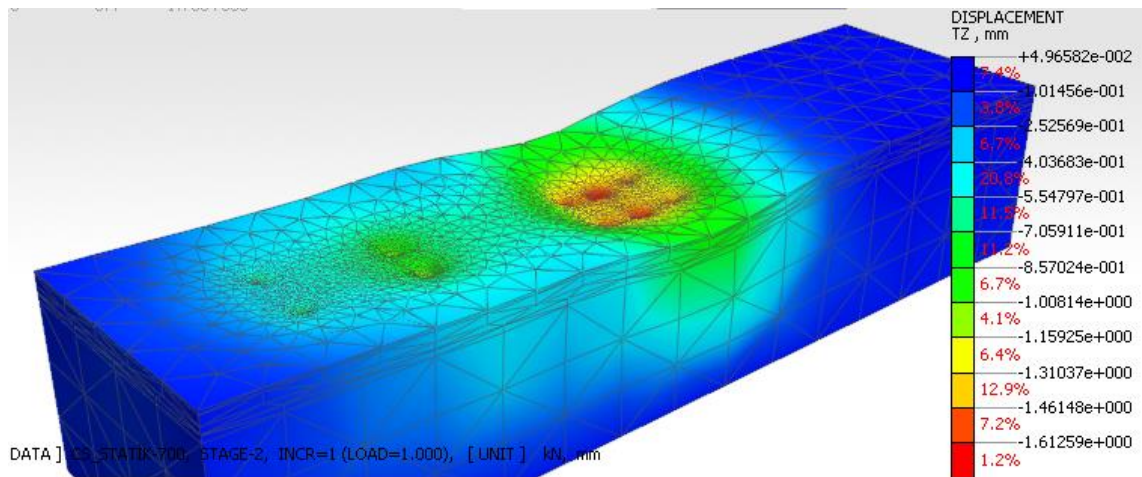


Şekil 4.23. Temel tabakası altı geogrid yerleşim konumu kesit gösterimi



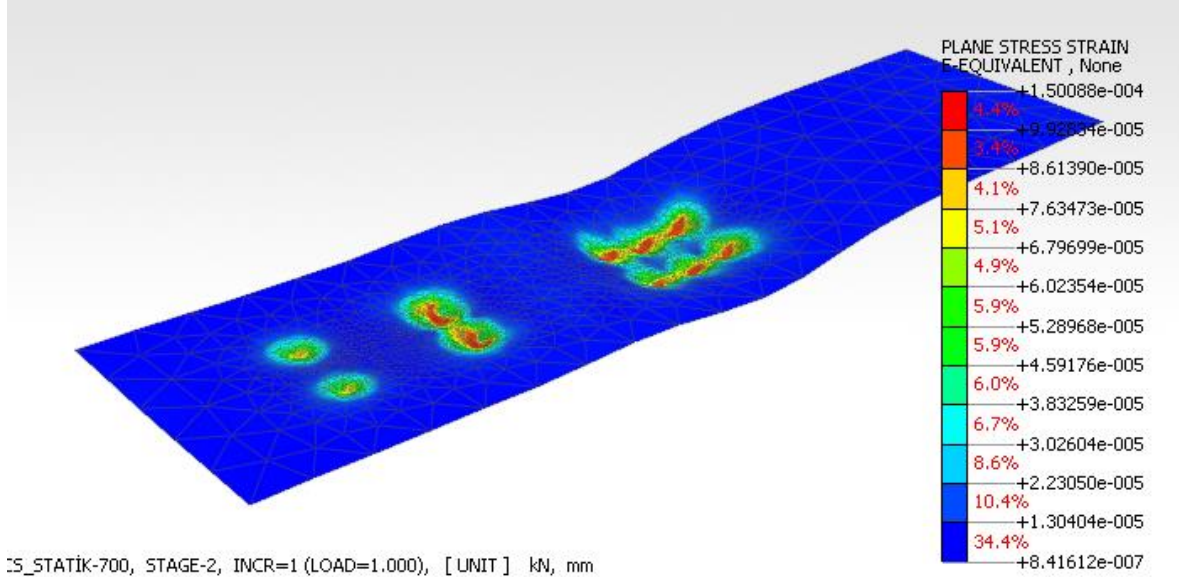
Şekil 4.24. Alttemel tabakası altı geogrid yerleşim konumu kesit gösterimi

700 kPa-3 500 kPa tekerlek yükü altında statik analiz sonucuna dayalı deformasyon değerleri hesaplanmıştır. Şekil 4.25’de KC kesitine ait 700 kPa tekerlek yükü altındaki deformasyon görüntüsü verilmiştir.



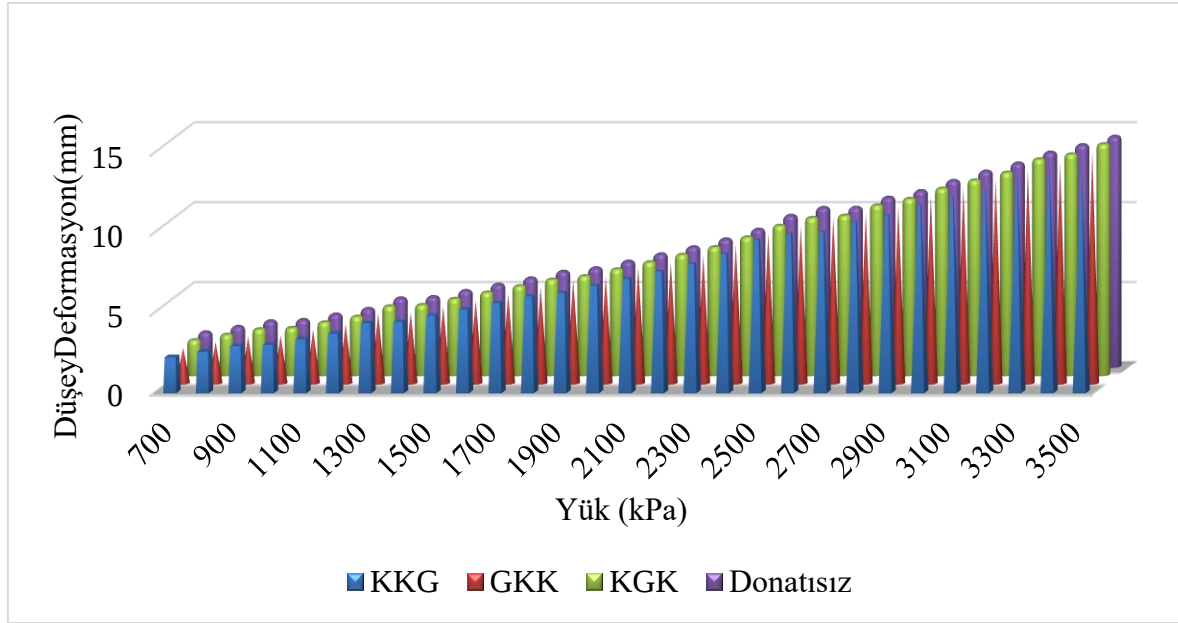
Şekil 4.25. KC kesiti kaplama tabakası altı geogrid yerleşimi deformasyon görüntüsü

Tek sıra geogrid kullanılması sonucunda yapılan sayısal analizlerde üretici tarafından paylaşılan birim deformasyon ve taşıyabileceği yük değerleri aşılmamıştır. Şekil 4.26’da tekerlek yüküne en yakın konumda kaplama tabakası altında bulunan geogrid tabakasının birim deformasyon görüntüsü verilmiştir.



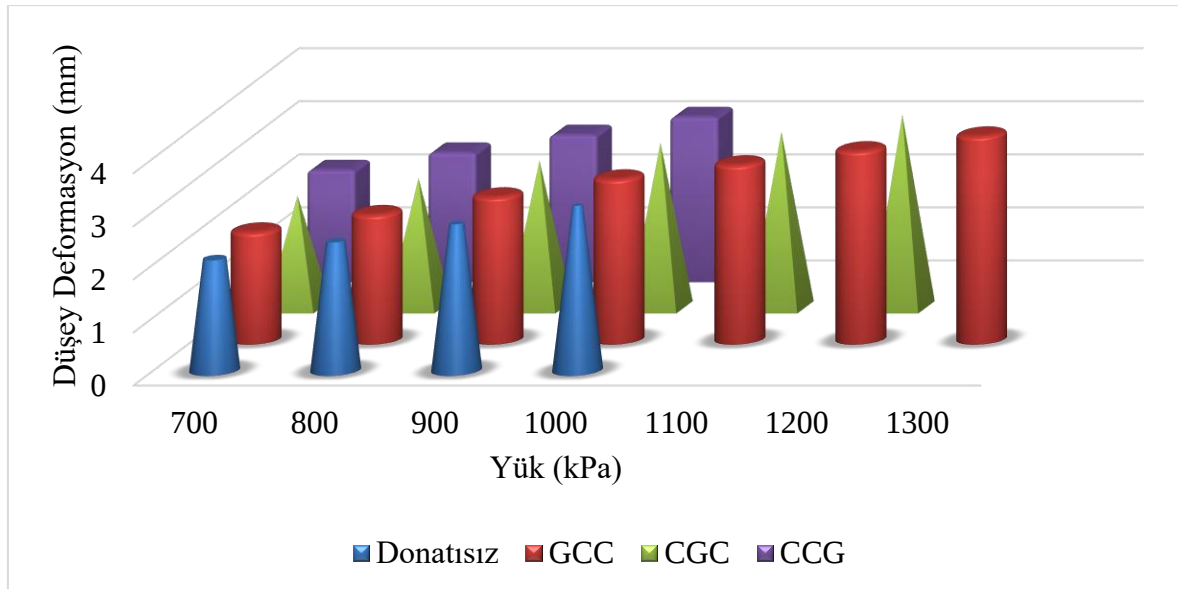
Şekil 4.26. Kaplama altı geogrid tabakası birim deformasyon görüntüsü

KK, CC, CK ve KC kesitlerinde 700-3 500 kPa arasındaki uygulanan temas basıncı sonucunda geogrid yerleşim konumlarına göre yük-düşey deformasyon değişimi incelenmiştir. Her bir kesit için ayrı olarak incelenen yük-deformasyon değişim grafiklerinden ilki KK (Şekil 4.27) kesitine aittir. CC, CK ve KC kesitleri için donatı konumuna bağlı düşey deformasyon değişim eğrileri Şekil 4.28- Şekil 4.30 verilmiştir. Yük sayısındaki artışa bağlı olarak deformasyon değerlerinde de artış meydana gelmiştir. Donatılı ve donatısız kesitlerdeki düşey deformasyon değerleri arasındaki fark oldukça düşüktür. Yazılımda donatının tanımlanmasında sürekli kabuk levha elemanının kullanılması nedeniyle geogridin en önemli fonksiyonlarından biri olan kenetlenme etkisi tasarıma tam olarak yansıtılamamaktadır. Oturmalar azalmaların gözlemlenebilmesi için bu mekanizmasının çalışması önemlidir. Ancak yapılan sayısal analizlerde donatı varlığının düşey deformasyona olan etkisinin yanında emniyetli taşıma yüküne katkısı değerlendirilmiştir.



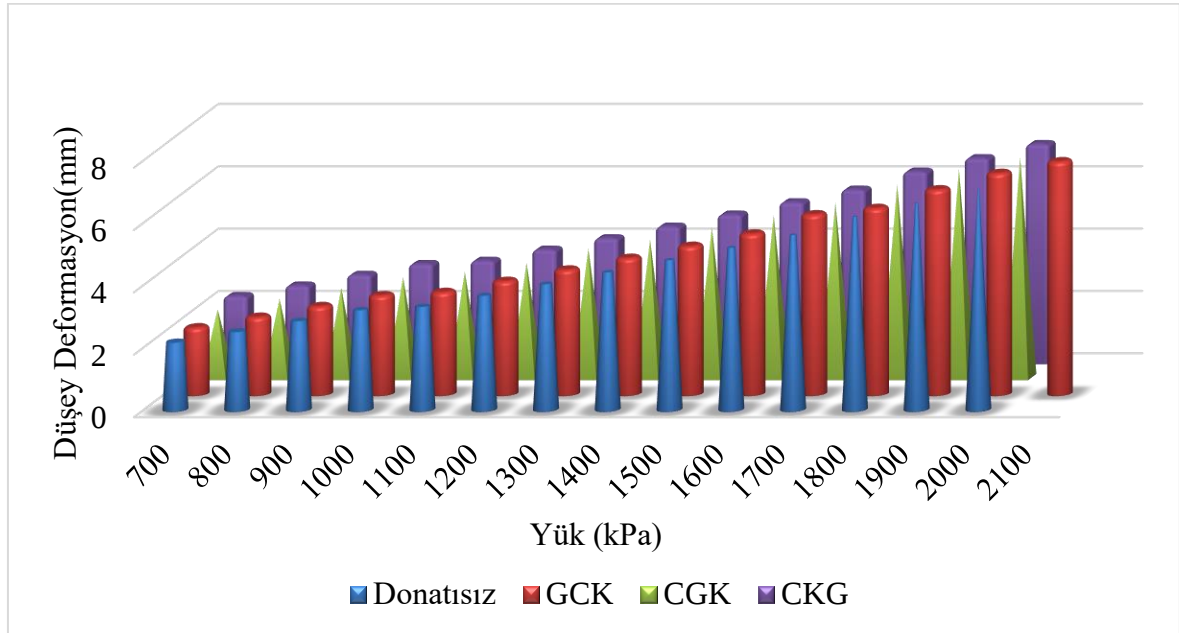
Şekil 4.27. KK kesiti tek sıra donatı konumuna bağlı yük-düşey deformasyon değişim grafiği

Şekil 4.27’de kaplama, temel ve alttemel tabakaları altında KK kesitinde meydana gelen düşey deformasyon değerlerindeki değişim eğrisi verilmiştir. KK kesiti 700-3 500 kPa aralığında yük değerlerinin tamamını emniyetli bir şekilde taşımıştır. En yüksek deformasyon değeri 14,48 mm olarak 3 500 kPa’lık statik yükleme durumunda meydana gelmiştir. En düşük ve en yüksek deformasyon değerleri arasındaki fark 0,02 mm olarak hesaplanmıştır.



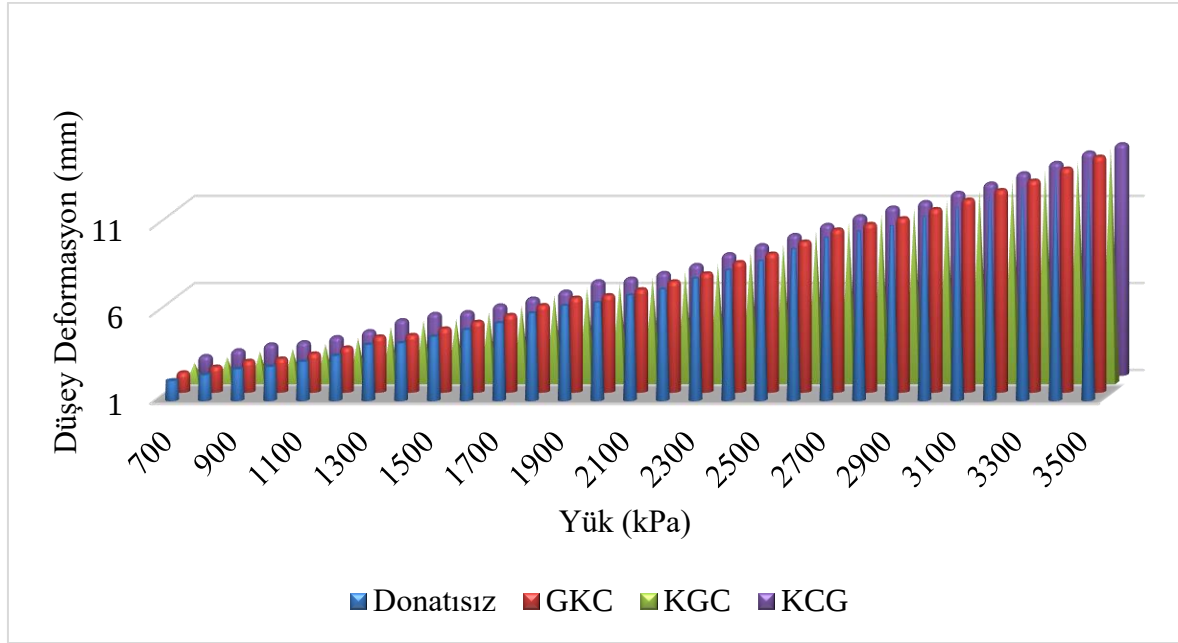
Şekil 4.28. CC kesiti tek sıra donatı konumuna bağlı yük-düşey deformasyon değişim grafiği

Şekil 4.28’de kaplama, temel ve alttemel tabakaları altında CC kesitinde meydana gelen düşey deformasyon değerlerindeki değişim eğrisi verilmiştir. CC kesitinde en fazla 1 300 kPa’lık yükleme yapılabilmektedir ve düşey deformasyon değeri 3,92 mm olarak hesaplanmıştır. Kaplama tabakası altında ve temel tabakası altındaki konumlarda donatı kullanılması durumundaki taşıyabileceği emniyetli yük değerinde artış meydana gelmiştir. Granüler tabakalar arasında yerleştirilen donatılar agregaların kenetlenmesini sağlayarak malzemelerin yanal hareketinin engellenmesine yardımcı olur. Bu sayede yolun stabilitesinin artmasına yol açarak donatılı durumda emniyetli taşıma yükünün artmasında etkili olmaktadır.



Şekil 4.29. CK kesiti tek sıra donatı konumuna bağlı yük-düşey deformasyon değişim grafiği

Şekil 4.29’da kaplama, temel ve alttemel tabakaları altında CK kesitinde meydana gelen düşey deformasyon değerlerindeki değişim eğrisi verilmiştir. CK kesitinde en fazla 2 100 kPa’lık yükleme yapılabilmektedir ve düşey deformasyon değeri 7,51 mm olarak hesaplanmıştır. Kaplama tabakası altında donatı kullanılması durumundaki taşıyabileceği emniyetli yük değerinde artış meydana gelmiştir. Doğal agrega ile çelik cürufu kombinasyonundan oluşan kesitin aynı zamanda farklı geometrik şekillerin de bütünlüğünü içererek daha az boşluklu bir yapının oluşturulmasını sağlayarak emniyetli taşıma yükündeki artışı sağlaması mümkündür. Aynı zamanda tekerlek yüklerine etkisine en fazla kaplama tabakasında rastlanmaktadır. Bu nedenle kaplama tabakası altındaki donatı konumunda da kaplama tabakası desteklenerek yüklemelere karşı direnç geliştirilmiştir.



Şekil 4.30. KC kesiti tek sıra donatı konumuna bağlı yük-düşey deformasyon değişim grafiği

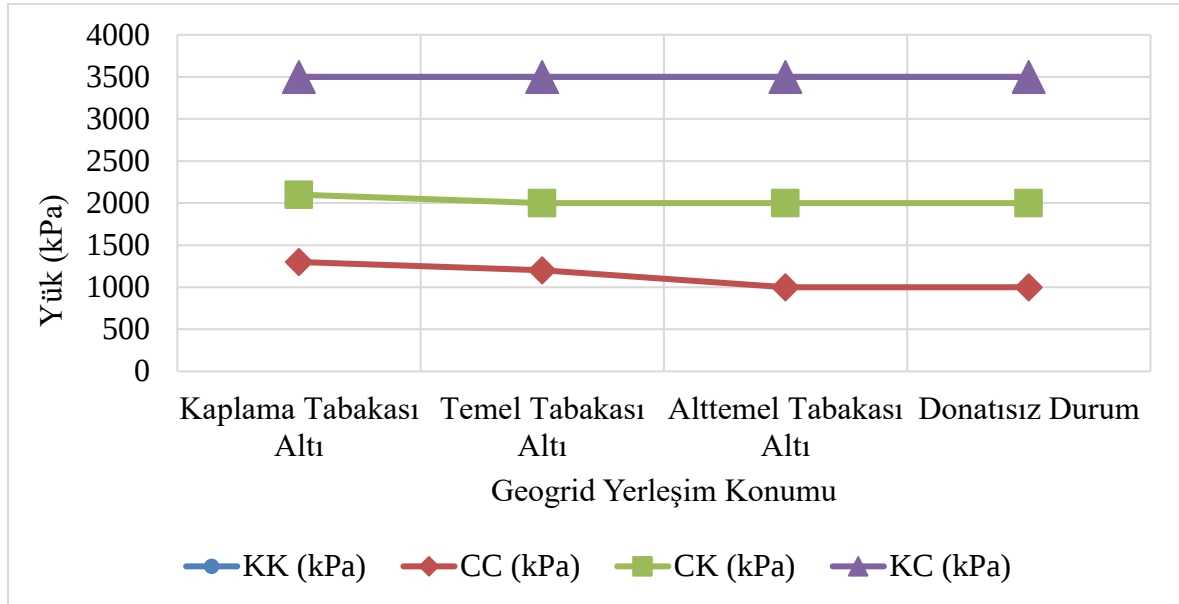
Şekil 4.30'da kaplama, temel ve alttemel tabakaları altında KC kesitinde meydana gelen düşey deformasyon değerlerindeki değişim eğrisi verilmiştir. Tıpkı KK kesitinde olduğu gibi KC kesiti de 700-3 500 kPa aralığında yük değerlerinin tamamını emniyetli bir şekilde taşımıştır. En yüksek deformasyon değeri 14,53 mm olarak 3 500 kPa'lık statik yükleme durumunda meydana gelmiştir. En düşük ve en yüksek deformasyon değerleri arasındaki fark 0,2 mm olarak hesaplanmıştır. Statik yükleme koşullarındaki davranışları açısından yapılan değerlendirmelerde CK kesitinde de bahsi geçtiği üzere doğal agrega ve çelik çürufunun oluşturduğu kombinasyonda granüler malzemeler sahip olduğu geometrik farklılıkların oluşturduğu yapıdan daha az boşluklu birleşimin meydana gelmesi etkili olmaktadır. Çünkü boşlukların tekerlek yüklemeleri dolayısıyla oturmaları yol açmasının yanında çeşitli çevresel faktörler etkisiyle de bünyesinde nem barındırması yolun mukavemetini olumsuz etkilemektedir.

Tüm kesitlerin emniyetle taşıyabileceği yük sınırına kadar yüklemeleri yapılmıştır. KK ve KC kesitleri 700-3500 aralığındaki yükleri tüm geogrid konumlarında güvenle taşımıştır. Ancak CK ve CC kesitlerinde donatı konumuna bağlı olarak emniyetle taşıdığı yük değeri değişmiştir. Emniyetli taşıma yükü ise, belirtilen tekerlek yükleme basınçları altında yapılan statik analizlerde tasarımın yenilme sınırına kadar yüklenecek sistemin göçtüğü noktadaki yük değeridir. Taşıyabileceği maksimum yük değerine ulaşılmasının ardından sistem yenilmiştir.

Çizelge 4.12. Tek sıra geogrid yerleşim konumuna bağlı emniyetli taşıma yükü değerleri

	Kesitler			
Geogrid Yerleşim Konumu	KK (kPa)	CC (kPa)	CK (kPa)	KC (kPa)
Kaplama Tabakası Altı	3 500	1 300	2 100	3 500
Temel Tabakası Altı	3 500	1 200	2 000	3 500
Alttemel Tabakası Altı	3 500	1 000	2 000	3 500
Donatısız Durum	3 500	1 000	2 000	3 500

Çizelge 4.12’de her bir kesit için hesaplanan emniyetli taşıma yükü değerleri verilmiştir. Geogrid donatı konumunun etkisi değerlendirilmiştir. Bu değerlere bağlı üç farklı geogrid yerleşim durumuna göre emniyetli taşıma yükü değişim eğrisi ise Şekil 4.31’de verilmiştir.



Şekil 4.31. Tek sıra geogrid yerleşim konumuna bağlı emniyetli taşıma yükü değişim eğrisi

Çizelge 4.12’ ye göre oluşturulan Şekil 4.31’e göre KC ve KK kesitlerinde emniyetli taşıma yükü değerlerinin aynı olduğu belirlenmiştir. Temel tabakasında doğal agrega kullanılan kesitlerde, herhangi bir iyileştirme olmaksızın tüm yükleme değerlerinde sistem güvenli bir şekilde yükü taşımıştır. Ancak tek sıra geogrid donatı kullanılması durumunda CK kesitinde kaplama tabakası altında, CC kesitinde ise hem kaplama hem de temel tabakası altında emniyetli taşıma yükü değeri artmıştır. Granüler malzemelerin sahip olduğu boşluklu yapı, donatının sağlayacağı kenetlenme etkisinin sayesinde taneleri birbirlerine yaklaştırarak

tasarımın mukavemetinin artmasına yardımcı olacaktır. Böylece yol daha yüksek taşıma yüklerine karşı dayanıklı hale gelerek göçme sınırına kadar olan limit artmaktadır. Alttemel tabakası altına yerleştirilen tek sıra donatının etkisine rastlanılmamıştır. Doğal zemin ince daneli bir malzeme olup alttemeldeki granüler malzeme ile karışmasını engelleyecek nitelikte bir geosentetik seçimi ile istenilen etki görülebilir. Aynı zamanda yine önceki bölümlerde bahsi geçtiği üzere tekerlek yükleri etkisine yüzeye yakın tabakalarda daha fazla rastlamak mümkündür. Bununla birlikte donatısız ve donatılı tüm konumlar arasındaki deformasyon değerleri birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiş olup emniyetli taşıma yüküne olan etkisi değerlendirilmiştir. Çünkü sonlu elemanlar yazılımlarının, geogrid etkisinin tam olarak modellenmesinde yetersiz kalması da düşey deformasyon etkisinin belirlenememesinde önemli bir husustur. En fazla yüklemelerin yapıldığı KC ve KK kesitlerindeki ulaşılan deformasyon değerleri, izin verilebilir oturma seviyelerinin çok altında kalmıştır. Belirlenen bu sonuçlar dışında tek sıra geogrid kullanımının yolun emniyetli taşıma yüküne olan önemli bir katkısı belirlenememiştir.

4.7. Yol Tabakalarında İki Sıra Geogrid Kullanarak Yapılan Farklı Yükleme Değerlerine Ait Statik Analizler

Kaplama ve temel tabakası altı (Şekil 4.32) ile temel ve alttemel tabakası altı (Şekil 4.33) geogrid yerleşim konumları için sayısal analiz yapılmıştır.

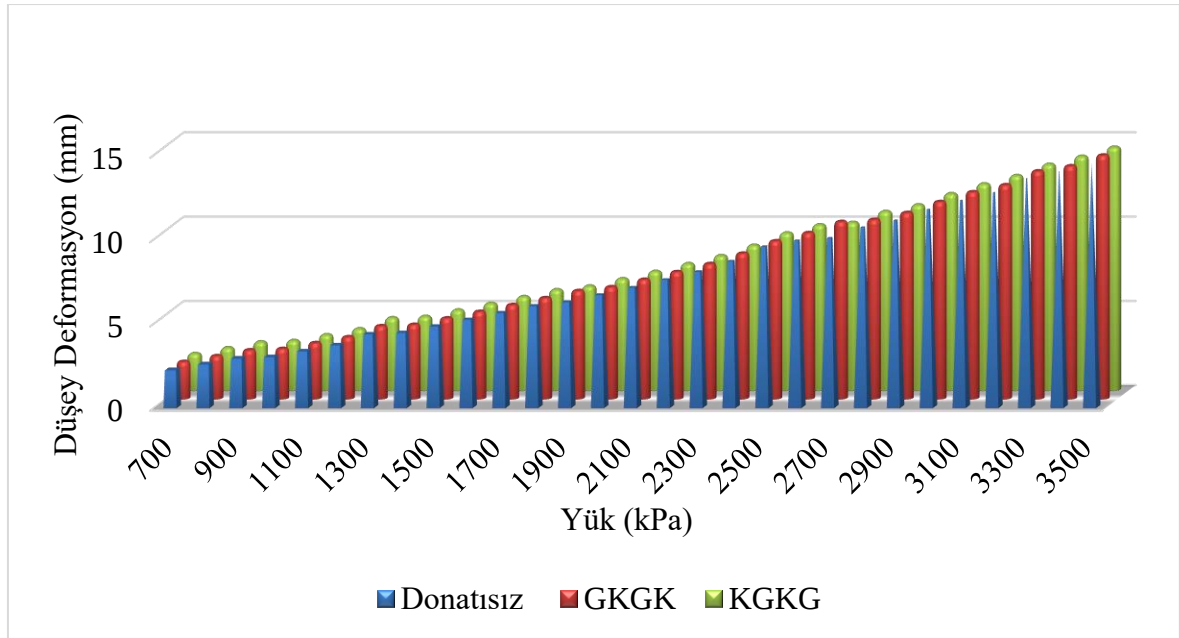


Şekil 4.32. Kaplama ve temel tabakası altı geogrid yerleşim konumu kesit gösterimi



Şekil 4.33. Temel ve alttemel tabakası altı geogrid yerleşim konumu kesit gösterimi

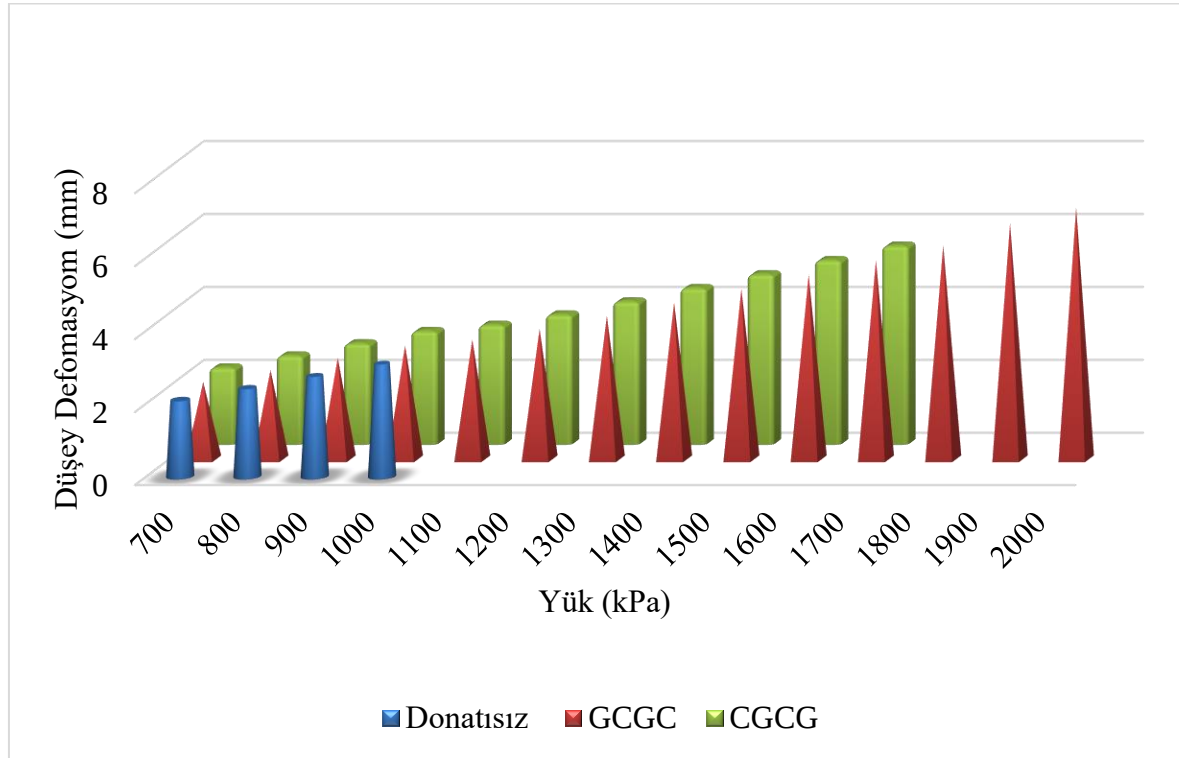
700- 3500 kPa arasındaki tekerlek temas basıncı değerleri altında yapılan statik analizler yapılmıştır. Tek sıra geogrid yerleşim konumunda olduğu gibi, incelenen her bir kesit için yük-deformasyon değerleri hesap edilmiştir. Bu değerlere ait grafikler Şekil 4.34- Şekil 4.37 arasında verilmiştir. Tüm kesitlerde tek sıra geogrid yerleşiminde olduğu gibi bir deformasyon görüntüsü meydana gelmiştir. Birim deformasyon değerleri ve taşıyabileceği en yüksek yük değeri üretici tarafından paylaşılan değerlerin altında kalmıştır.



Şekil 4.34. KK kesiti iki sıra donatı konumuna bağlı yük-düşey deformasyon değişim grafiği

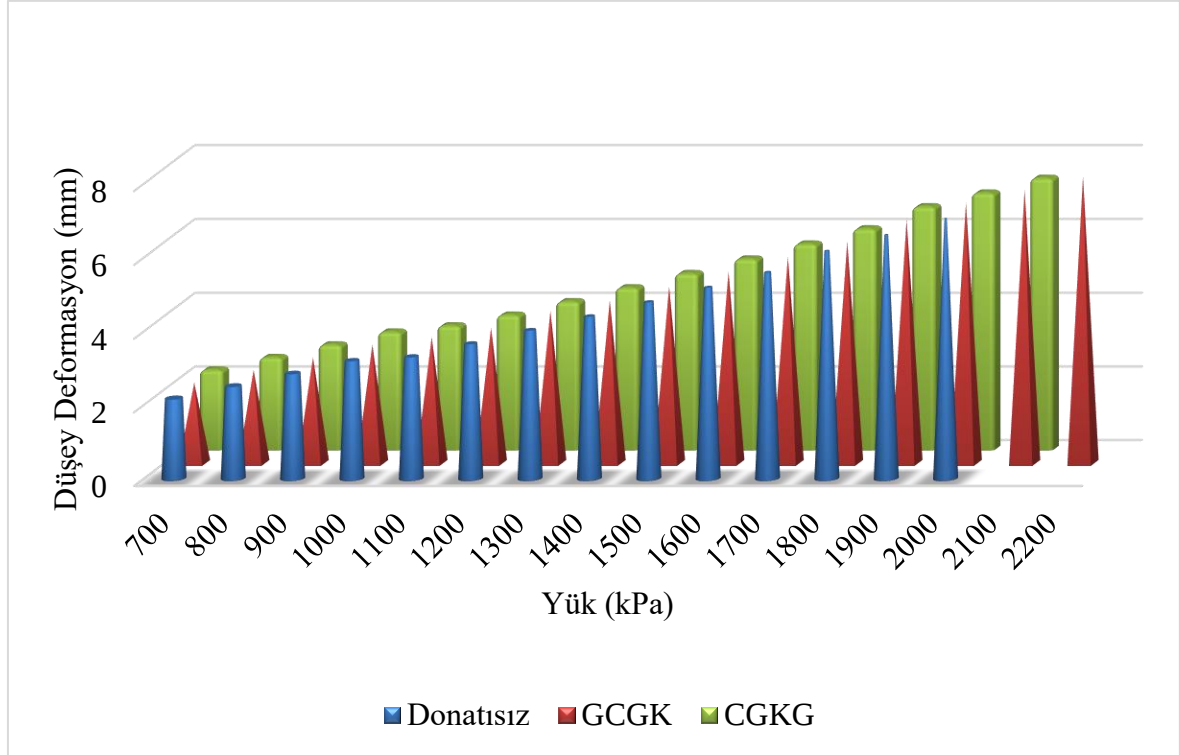
Şekil 4.34'de kaplama-temel tabakası altında ve temel-alttemel tabakaları altında KK kesitinde meydana gelen düşey deformasyon değerlerindeki değişim eğrisi verilmiştir. KK kesiti 700-3 500 kPa aralığında yük değerlerinin tamamını emniyetli bir şekilde taşımıştır.

En yüksek deformasyon değeri 14,46 mm olarak 3 500 kPa'lık statik yükleme durumunda meydana gelmiştir. En düşük ve en yüksek deformasyon değerleri arasındaki fark 0,02 mm olarak hesaplanmıştır.



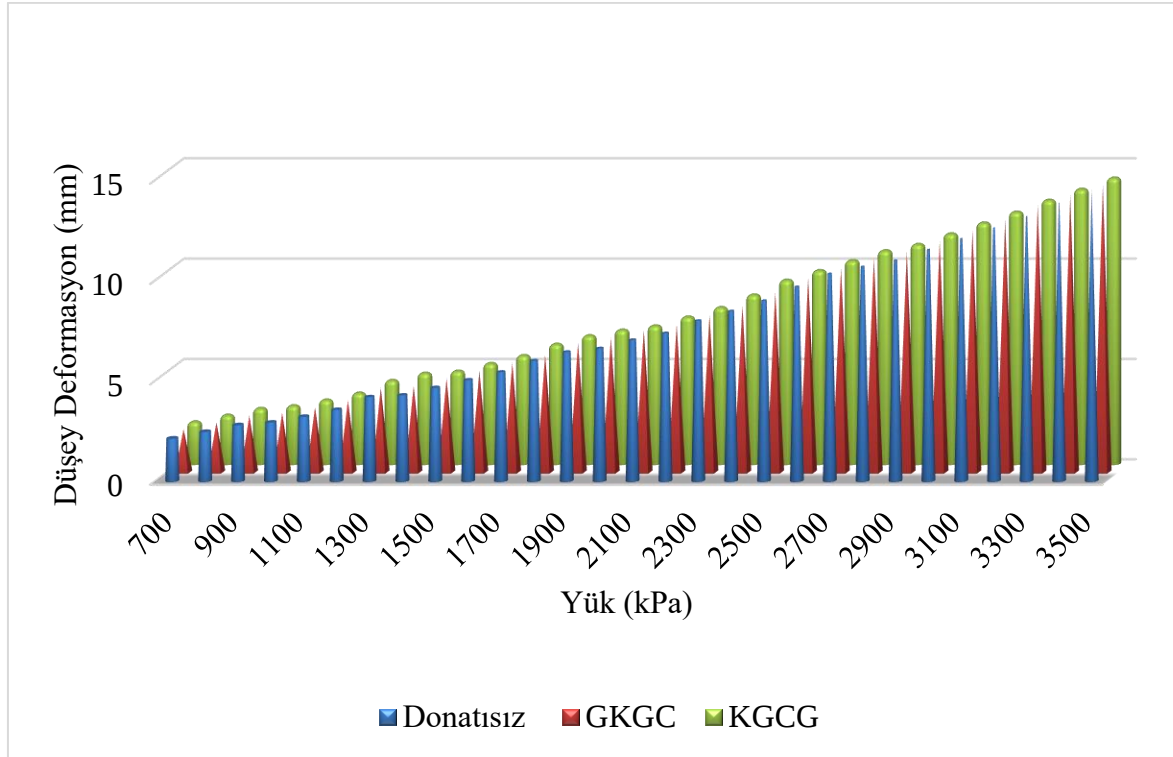
Şekil 4.35. CC kesiti iki sıra donatı konumuna bağlı yük- düşey deformasyon değişim grafiği

Şekil 4.35’de kaplama-temel ve temel-alttemel tabakaları altında CC kesitinde meydana gelen düşey deformasyon değerlerindeki değişim eğrisi verilmiştir. CC kesitinde en fazla 2 000 kPa’lık yükleme yapılabilmektedir ve düşey deformasyon değeri 6,98 mm olarak hesaplanmıştır. Kaplama-temel tabakası altında ve temel-alttemel tabakası altındaki konumlarda donatı kullanılması durumundaki taşıyabileceği emniyetli yük değerinde donatısız duruma göre artış meydana gelmiştir. Tekerlek yükünün etkisinin en fazla yüzeye yakın tabakalarda görülmesi nedeniyle, üst katmanlarda yapılan iyileştirme emniyetli taşıma yükünün artışı daha etkili olduğu görülmüştür.



Şekil 4.36. CK kesiti iki sıra donatı konumuna bağlı yük- düşey deformasyon değişim grafiği

Şekil 4.36’da kaplama-temel ve temel-alttemel tabakaları altında CK kesitinde meydana gelen düşey deformasyon değerlerindeki değişim eğrisi verilmiştir. CK kesitinde en fazla 2200 kPa’lık yükleme yapılabilmiştir ve düşey deformasyon değeri 7,78 mm olarak hesaplanmıştır. Donatısız durumla kıyaslandığında en fazla artış oranı %10 ile yine yüzeye yakın donatı kullanılması durumunda meydana gelmiştir. Önceki bölümde de değerlendirildiği üzere doğal agrega ile çelik cürufu kombinasyonundan oluşan kesitin daha az boşluklu bir yapının oluşturulmasını sağlayarak emniyetli taşıma yükündeki artışı sağlaması mümkündür.



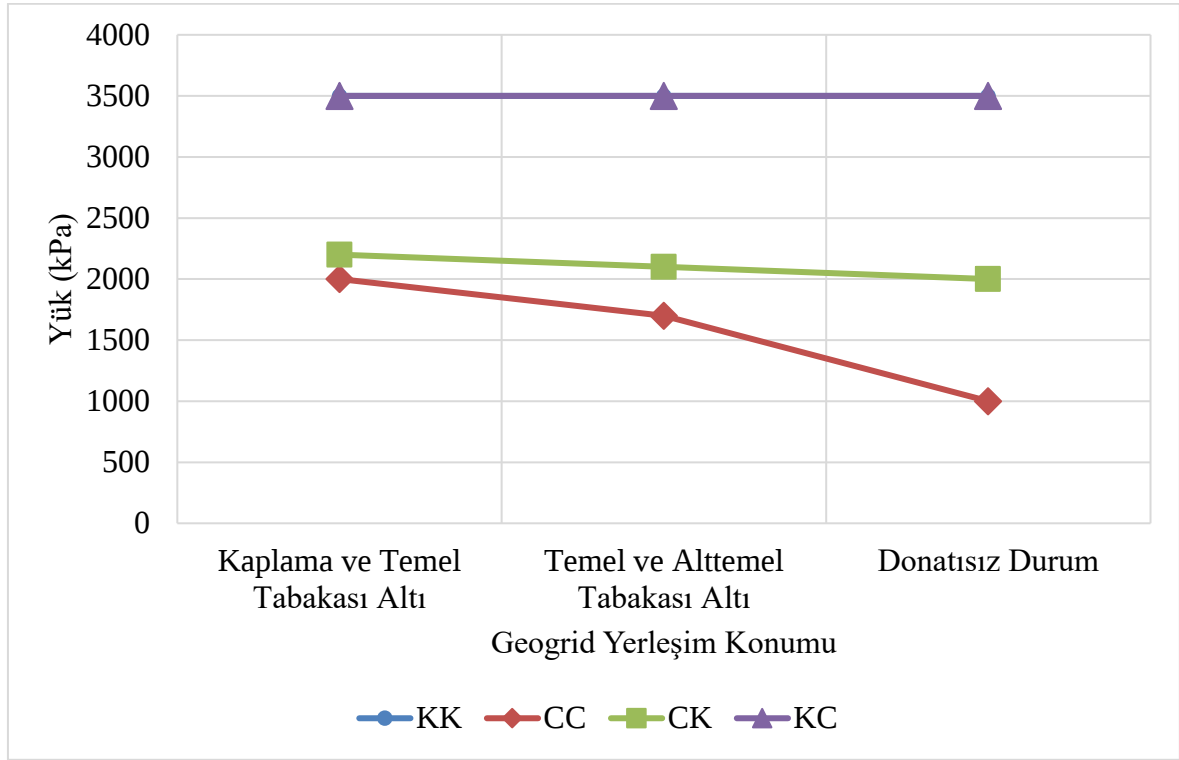
Şekil 4.37. KC kesiti iki sıra donatı konumuna bağlı yük- düşey deformasyon değişim grafiği

Şekil 4.37’de kaplama, temel ve alttemel tabakaları altında KC kesitinde meydana gelen düşey deformasyon değerlerindeki değişim eğrisi verilmiştir. Tıpkı KK kesitinde olduğu gibi KC kesiti de 700-3 500 kPa aralığında yük değerlerinin tamamını emniyetli bir şekilde taşımıştır. Tek sıra donatı kullanımı durumunda olduğu gibi en yüksek deformasyon değeri 14,53 mm olarak 3 500 kPa’lık statik yükleme durumunda meydana gelmiştir. En düşük ve en yüksek deformasyon değerleri arasındaki fark 0,2 mm olarak hesaplanmıştır. Statik yükleme koşullarındaki davranışları açısından yapılan değerlendirmelerde CK kesitinde de bahsi geçtiği üzere doğal agrega ve çelik cürufunun oluşturduğu kombinasyonda granüler malzemeler sahip olduğu geometrik farklılıkların oluşturduğu yapıdan daha az boşluklu birleşimin meydana gelmesi etkili olmaktadır. Çünkü boşlukların tekerlek yüklemeleri dolayısıyla oturmalaraya yol açmasının yanında çeşitli çevresel faktörler etkisiyle de bünyesinde nem barındırması yolun mukavemetini olumsuz etkilemektedir.

İki sıra donatı kullanımında, KK ve KC kesitleri belirlenen aralıktaki tüm yükleri güvenle taşımıştır. CC ve CK kesitlerinin donatısız durumda emniyetle taşıyabilecekleri yük değeri sınırlı kalmıştır. Çizelge 4.13 hesaplanan emniyetli taşıma yükü değerleri verilmiştir. İki farklı geogrid yerleşim konumuna bağlı göre emniyetli taşıma yükü değişim eğrisi ise Şekil 4.38’de sunulmuştur.

Çizelge 4.13. İki sıra geogrid yerleşim konumuna bağlı emniyetli taşıma yükü değerleri

	Kesitler			
Geogrid Yerleşim Konumu	KK (kPa)	CC (kPa)	CK (kPa)	KC (kPa)
Kaplama ve Temel Tabakası Altı	3 500	2 000	2 200	3 500
Temel ve Alttemel Tabakası Altı	3 500	1 700	2 100	3 500
Donatısız Durum	3 500	1 000	2 000	3 500



Şekil 4.38. İki sıra geogrid yerleşim konumuna bağlı emniyetli taşıma yükü değişim eğrisi

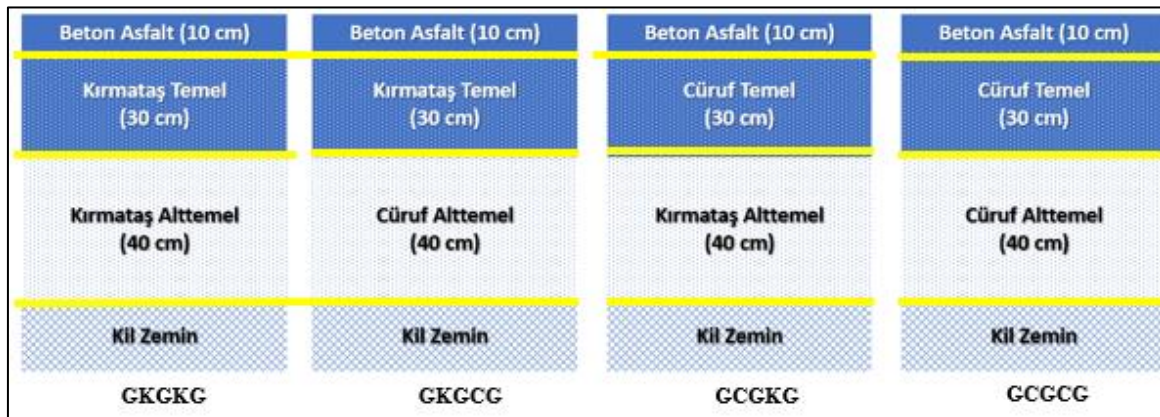
KK ve KC kesitlerinde donatı yerleşim konumunun düşey deformasyona olan bir etkisi tespit edilmemiştir. CC kesitinde ise donatısız durumla kıyaslandığında, kaplama ve temel tabakası altında donatı yerleşim konumuna bağlı olarak emniyetli taşıma yükü değeri iki kat artmıştır. Temel tabakası ve alttemel tabakası altındaki konumda %70 bir artış meydana gelmiştir. İki sıra donatı kullanımı etkisiyle tabakalardaki kenetlenmenin artmış olması bu oranlar üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Emniyetli taşıma yüklerine kadar hesaplanan düşey deformasyon değerleri de yine izin verilebilir oturma sınırları içerisinde kalmıştır. Yükteki artışla orantılı bir şekilde deformasyon değerleri de artış göstermiştir. CK kesiti açısından

çift donatı kullanımı değerlendirildiğinde, yaklaşık %10 oranında emniyetli taşıma yükünde artış meydana gelmiştir. İki sıra geogrid kullanılmasıyla birlikte CC ve CK kesitlerinde, emniyetli taşıma yükünde tek sıra kullanımına kıyasla artış olmuştur. Yük-oturma eğrilerinin eğimleri her bir kesit için tüm donatı konumlarında yaklaşık olarak aynı çıkmıştır.

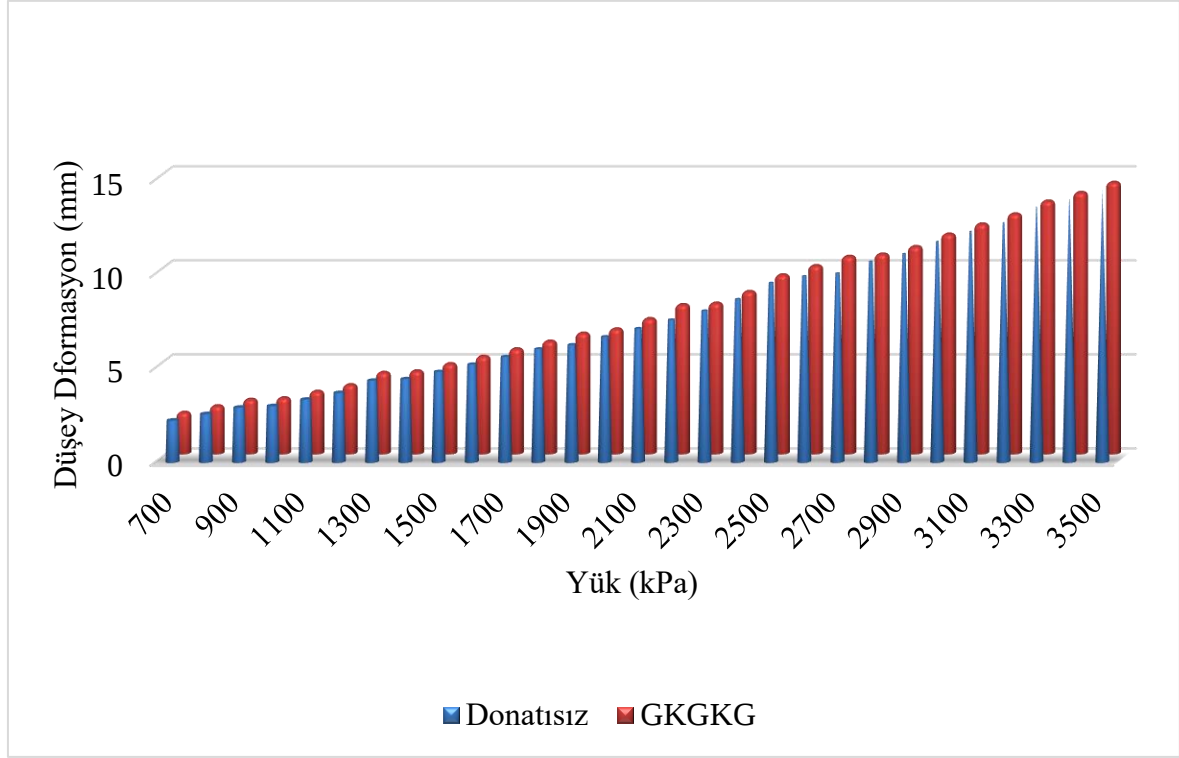
CC ve CK kesitlerinde, yüzeye yakın kullanılan donatı yerleşim konumlarında, emniyetli taşıma yükü değerlerinde artış meydana gelmiştir. Donatılı katman sayısının artmasıyla, donatılar arasında kalan tabakanın kenetlenmesinin artırılması ile daha sağlam, hareket edebilme yeteneği sınırlandırılmış bir sistem oluşturulmaktadır. Bu sayede düşey deformasyon değerlerinde bir miktar azalma meydana gelirken stabilitede meydana gelen artış emniyetli taşıma yükü değişiminde daha net görülmektedir.

4.8. Yol Tabakalarında Üç Sıra Geogrid Kullanarak Yapılan Farklı Yükleme Değerlerine Ait Statik Analizler

Üç sıra geogrid donatı kaplama, temel ve alttemel tabakası altına (Şekil 4.39) yerleştirilerek 700 kPa-3500 kPa arasındaki tekerlek temas basıncı değerleri altında statik analizleri yapılmıştır. KK, CC, CK ve KC kesitleri için donatı konumuna bağlı düşey deformasyon değişim eğrileri Şekil 4.40- Şekil 4.43 verilmiştir.

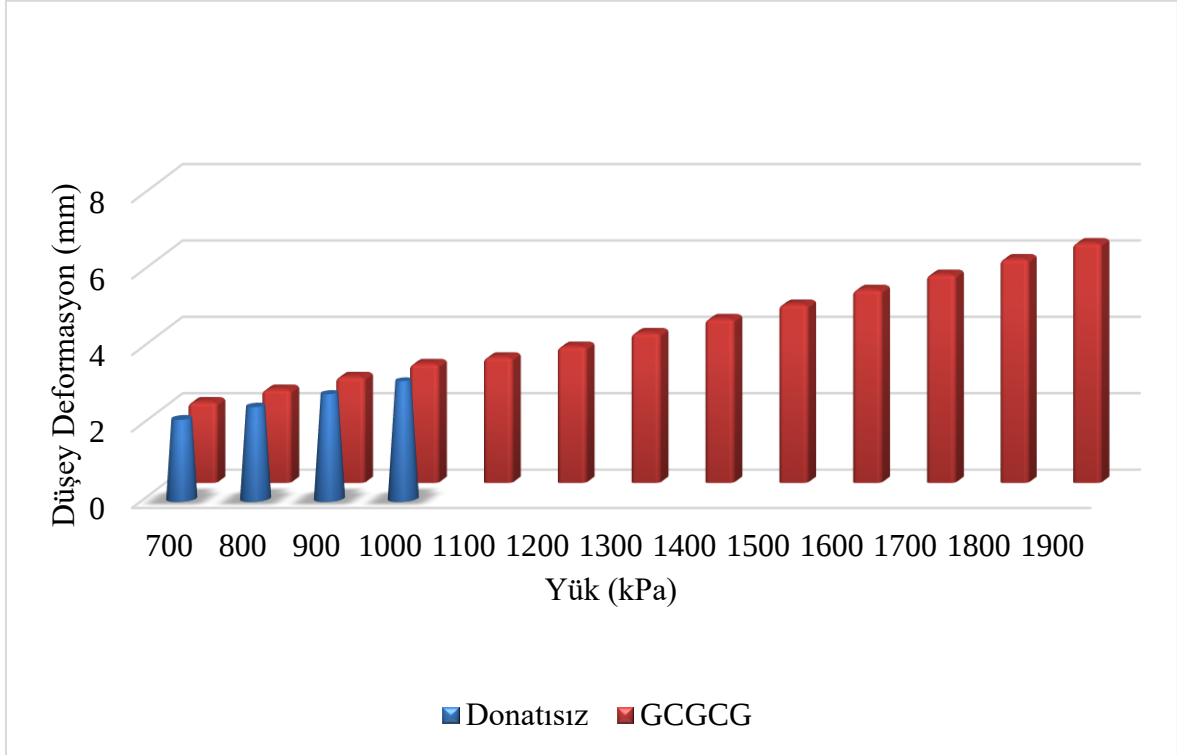


Şekil 4.39. Kaplama, temel ve alttemel tabakası altı geogrid yerleşim konumu kesit gösterimi



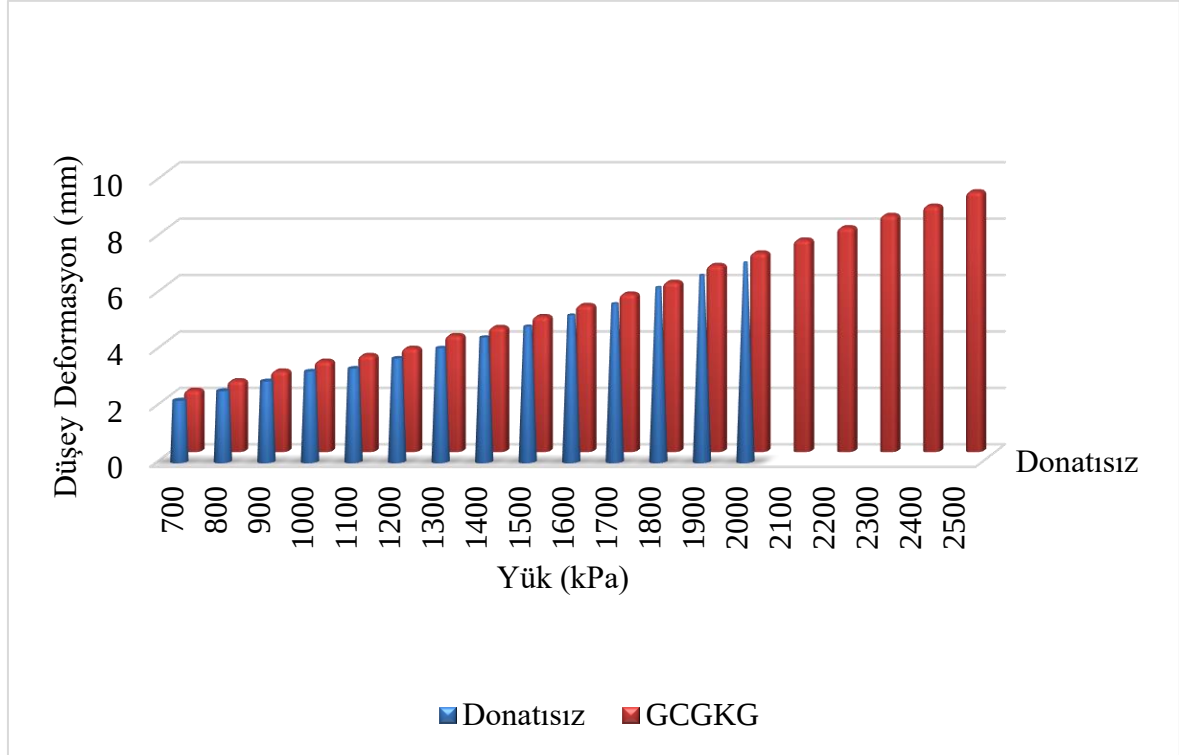
Şekil 4.40. KK kesiti üç sıra donatı konumuna bağlı yük-düşey deformasyon değişim grafiği

Şekil 4.40'da kaplama-temel-alttemel tabakası altında KK kesitinde meydana gelen düşey deformasyon değerlerindeki değişim eğrisi verilmiştir. KK kesiti 700-3 500 kPa aralığında yük değerlerinin tamamını emniyetli bir şekilde taşımıştır. En yüksek deformasyon değeri 14,45 mm olarak 3 500 kPa'lık statik yükleme durumunda meydana gelmiştir.



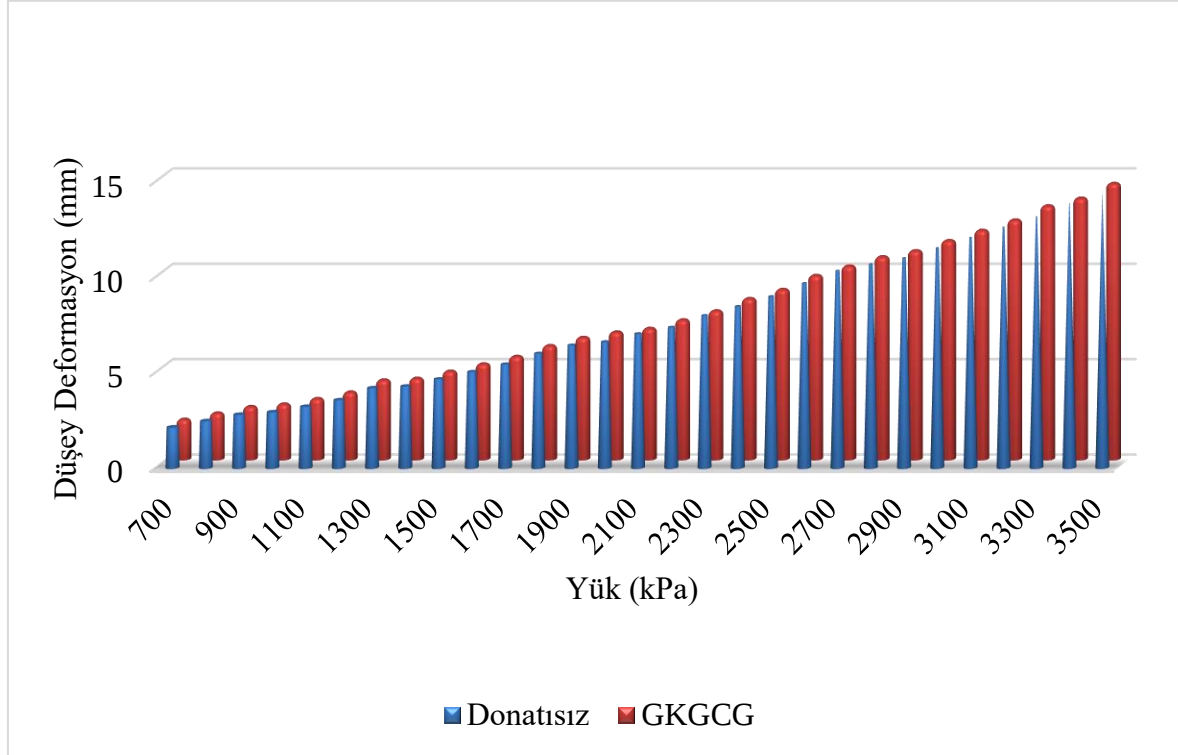
Şekil 4.41. CC kesiti üç sıra donatı konumuna bağlı yük-düşey deformasyon değişim grafiği

Şekil 4.41’de kaplama-temel-alttemel tabakaları altında CC kesitinde meydana gelen düşey deformasyon değerlerindeki değişim eğrisi verilmiştir. CC kesitinde en fazla 1 000 kPa’lık yükleme yapılabilmektedir ve düşey deformasyon değeri 6,27 mm olarak hesaplanmıştır. İki sıra donatı kullanımında meydana gelen düşey deformasyon değerinden 0,3 mm daha düşük çıkmıştır. Taşıyabileceği emniyetli yük değerinde donatısız duruma göre artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.42. CK kesiti üç sıra donatı konumuna bağlı yük-düşey deformasyon değişim grafiği

Şekil 4.42’de kaplama-temel-alttemel tabakaları altında CK kesitinde meydana gelen düşey deformasyon değerlerindeki değişim eğrisi verilmiştir. CK kesitinde en fazla 2 500 kPa’lık yükleme yapılabilmektedir ve düşey deformasyon değeri 9,22 mm olarak hesaplanmıştır. Donatısız durumla kıyaslandığında %25 oranında emniyetli taşıma yükü değerinde artış meydana gelmiştir. Önceki bölümde de değerlendirildiği üzere doğal agrega ile çelik cürufu kombinasyonundan oluşan kesitin daha az boşluklu bir yapının oluşturulmasını sağlayarak emniyetli taşıma yükündeki artışı sağlaması mümkündür.



Şekil 4.43. KC kesiti üç sıra donatı konumuna bağlı yük-düşey deformasyon değişim grafiği

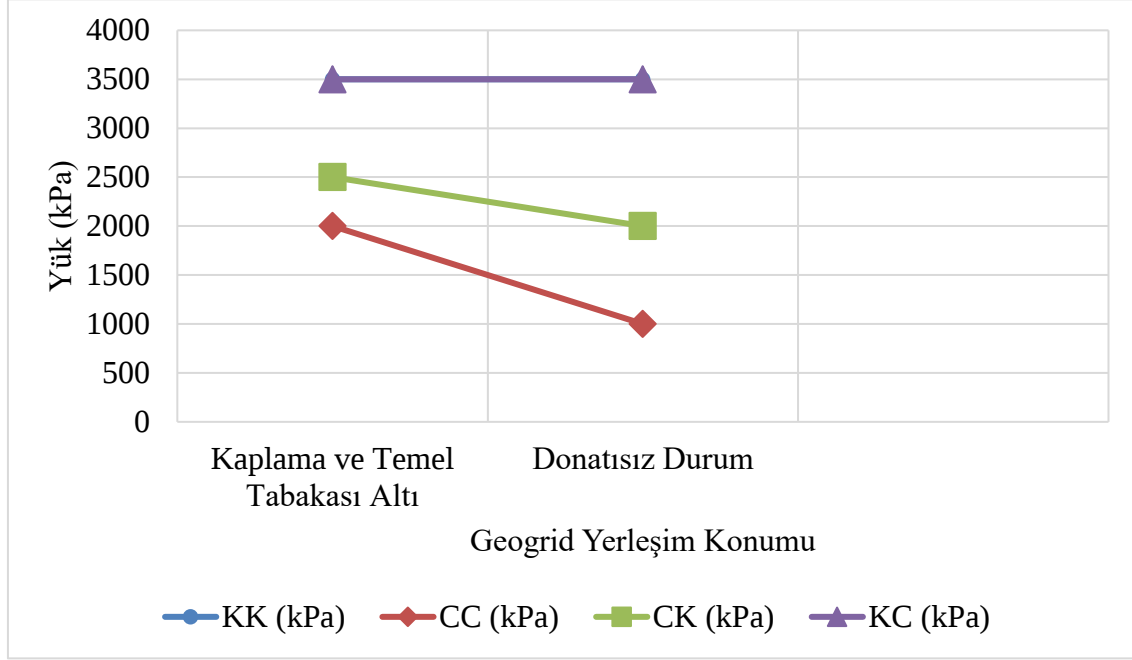
Şekil 4.43’de kaplama-temel-alttemel tabakaları altında KC kesitinde meydana gelen düşey deformasyon değerlerindeki değişim eğrisi verilmiştir. Tıpkı KK kesitinde olduğu gibi ve tüm konumlarda olduğu gibi KC kesiti de 700-3 500 kPa aralığında yük değerlerinin tamamını emniyetli bir şekilde taşımıştır. En yüksek deformasyon değeri 14,53 mm olarak 3 500 kPa’lık statik yükleme durumunda meydana gelmiştir.

KK ve KC kesitlerinde davranış tüm geogrid konumları ve sayılarındaki davranış ile aynı eğilimdedir. CK ve CC kesitlerinin emniyetli taşıma yüklerindeki değişim Çizelge 4.14’de verilmiştir.

Çizelge 4.14. Üç sıra geogrid yerleşim konumuna bağlı emniyetli taşıma yükü değerleri

Geogrid Yerleşim Konumu	Kesitler			
	KK (kPa)	CC (kPa)	CK (kPa)	KC (kPa)
Kaplama ve Temel Tabakası Altı	3 500	2 000	2 500	3 500
Donatısız Durum	3 500	1 000	2 000	3 500

Çizelgede 4.14’de verilen değerlere bağlı olarak Şekil 4.44’de geogrid donatı yerleşim konumundaki emniyetli taşıma yükü eğrisi verilmiştir.



Şekil 4.44. Üç sıra geogrid yerleşim konumuna emniyetli taşıma yükü değişim eğrisi

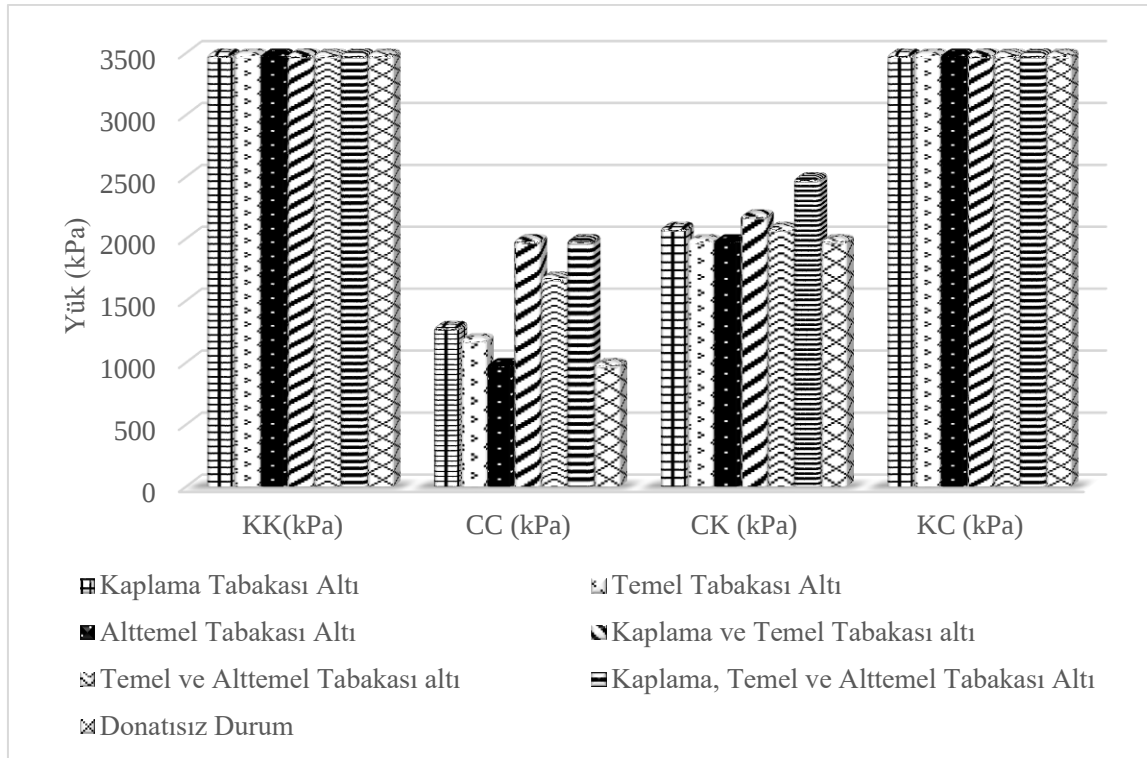
KK ve KC kesitlerinde donatı yerleşim konumunun düşey deformasyona olan bir etkisi tespit edilmemiştir. CC kesitinde ise donatısız durumla kıyaslandığında kaplama, temel ve alttemel tabakası altında donatı yerleşim konumuna bağlı olarak emniyetli taşıma yükü değeri iki kat artmıştır. Emniyetli taşıma yüklerine kadar hesaplanan düşey deformasyon değerleri de yine izin verilebilir oturma sınırları içerisinde kalmıştır. Yükteki artışla orantılı bir şekilde deformasyon değerleri de artış göstermiştir. CK kesiti açısından üç sıra donatı kullanımı değerlendirildiğinde, yaklaşık %25 oranında emniyetli taşıma yükünde artış meydana gelmiştir.

Geogrid donatılı katman sayısının artmasıyla birlikte donatısız durumdaki emniyetli taşıma yükü değerleri özellikle CK kesitinde daha fazla artış göstermiştir. CC kesitinde iki ve üç sıra yüzeye yakın konumdaki donatı kullanımı durumundaki taşıma yükü oranının aynı olduğu görülmüştür.

Tüm donatılı ve donatısız durumlarda, belirlenen tekerlek yükleme basınçlarını KK ve KC kesiti başarılı bir şekilde taşımıştır. Yük-oturma eğrilerinin eğimleri her bir kesit için tüm donatı konumlarında yaklaşık olarak aynı çıkmıştır. Tüm kesitlerde donatı kullanımının

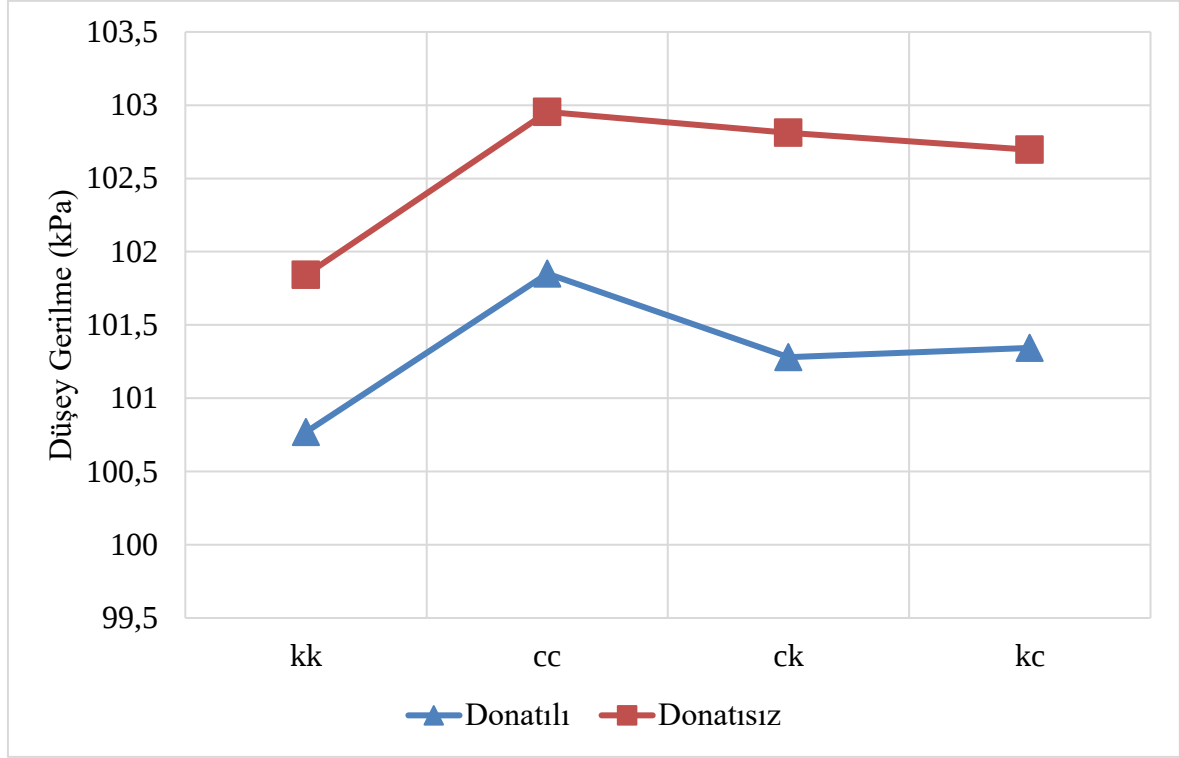
statik analizlerde düşey deformasyona etkisinin çok fazla olmadığı belirlenmiştir. Donatılı kesitlerin donatısız kesitlere kıyasla, yüzey deformasyonlarının artış hızı daha yavaş meydana gelmektedir.

KK, CC, CK ve KC kesitlerinde emniyetli taşıma yüklerinde, donatı konumlarına bağlı meydana gelen değişimler Şekil 4.45’de gösterilmiştir.



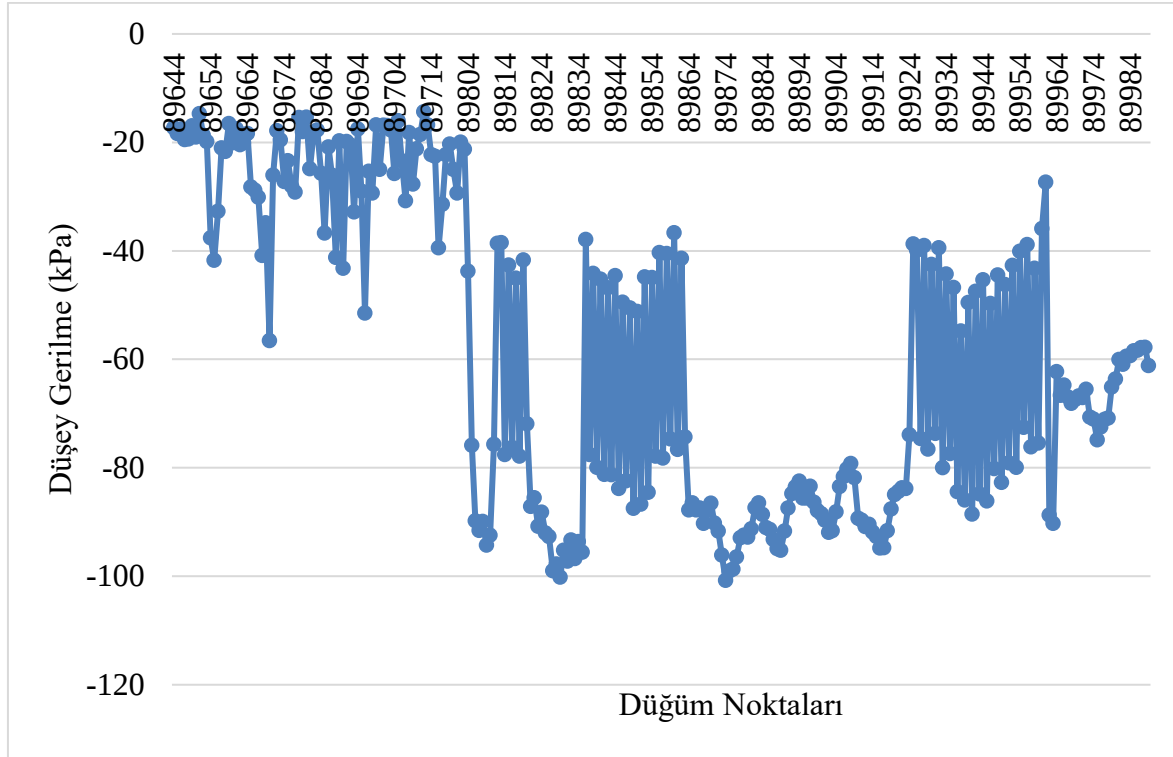
Şekil 4.45. Kesitlerin donatı konumuna bağlı emniyetli taşıma yükü değişimi

CC kesitinde iki sıra ve üç sıra kullanımında meydana gelen iyileşme miktarının aynı olduğu görülmektedir. CK kesitinde ise taşıma yükündeki artış en fazla üç sıra donatı kullanımında meydana gelmiştir. Çelik cürufplarının keskin köşeli geometrik özellikleri dolayısıyla doğal agrega ile sağlayacağı kombinasyon hem donatı kullanılması durumunda hem de donatısız koşullarda açık bir şekilde görülmektedir. Bununla birlikte donatının sağlayacağı kenetlenme etkisiyle kayma direncinin artması da etkilidir. Ayrıca geogrid donatı tekerlek yüklerinin aktarılmasında yükün daha geniş bir alana yayılarak yükün paylaştırılmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte geogridlerin oluşturduğu ızgaralara yapı tabakaların sertleşmesini ve tekerlek yükünün daha geniş bir alana dağıttığı düşünülmektedir. Böylece üst yapının güçlenmesi mümkündür.



Şekil 4.46. Doğal zemine aktarılan düşey gerilme

Şekil 4.46’da doğal zemine aktarılan düşey gerilme değerleri verilmiştir. Donatılı kesitlerde doğal zemine aktarılan düşey gerilmeler bir miktar azalmıştır. Buradan hareketle doğal zemine aktarılan gerilmelerin azalması ile katmanlarda meydana gelen bozulmaların yavaşlaması mümkün olmaktadır. Ayrıca Şekil 4.47’de ise doğal zemin tabakasında düşey gerilmelerin değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.46’da tüm kesitler için yer alan gerilme değeri tabaka boyunca yayılım gösteren gerilme değerleri içerisindeki maksimum değere sahip olmaktadır.



Şekil 4.47. Doğal zemin tabakasında düşey gerilme yayılımı

Çalışmanın bu bölümünde dinamik ve statik yükler etkisi altındaki doğal agrega ve çelik cürufu kullanılan kesitlerin, farklı değişkenlere bağlı olarak gösterdiği tepkisel davranışlarını belirlemeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Yolun tabaka kalınlığı değişiminin, doğal zeminin mukavemet parametrelerinin etkisi ve geogrid donatı sayısı ile donatı konumuna bağlı emniyetli taşıma yükünde meydana gelen iyileşme tespit edilmiştir. Sayısal analizlere yönelik yapılan çıkarımlara ve nedenlerine yönelik detaylara bölüm bünyelerinde yer verilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yollarda yaygın olarak meydana gelen deformasyonlar ile buna yönelik yapılan tahminlerin niteliği ve niceliği hayati bir öneme sahiptir. Bu nedenle gelişen teknoloji sayesinde ampirik-mekanistik yaklaşımların kullanıldığı yazılımların kolay ulaşılabilir olması daha fazla kullanımına ve yol tasarımlarının gerçeğine en yakın şekilde modellenip gerekli sayısal verilerin hesaplanabilmesine olanak sağlamıştır.

Bununla birlikte inşaat yıkım atıkları, geri dönüştürülmüş beton agregalar, atık lastikler, uçucu kül ve cüruf gibi dünya çapında devasa miktarlarda bulunan endüstriyel atık malzemelerin yönetimi ve bertarafı zorlu bir iştir. İnşaat mühendisliği uygulamaları sayesinde bu atıkların büyük bir hacmi yeniden kullanılabilir. Atıkların yol üst yapı tasarımlarında asfalt karışımları için yeni agregalar olarak potansiyel ve verimli kullanımlarını gösteren, yol kaplama malzemeleri olarak bu atıkların çeşitli uygulamalarına ilişkin mevcut araştırmalar sunulmaktadır.

Bu bölümde çelik cürufu ile geogrid kullanımı üzerine gerçekleştirilen nümerik çalışmanın kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesinin yanında çalışma kapsamının genel özetini ve gelecekteki çalışmalar için öneriler sunulmuştur. Karayolunun tasarımı, yapımı, kullanıma açılmasından itibaren sık karşılaşılan deformasyon türleri, bu deformasyona en fazla sebep olan ağır taşıtların analitik modeldeki tasarımından bahsedilmiştir.

Ağır taşıtların neden olduğu yol bozulmalarının yönetilmesinde kaliteli agregaların kullanılması önemli bir araçtır. Yolun inşasında kullanılacak granüler malzemenin gradasyonu, minerolojik içeriği gerilme seviyelerindeki davranışı etkilemektedir. Artan taşıt trafiği nedeniyle özellikle tekerlek izi, oturmalar gibi deformasyonlara karşı direnç geliştirecek malzemelerin seçimi gereklidir. Çelik cürufunun sahip olduğu yüksek mekanik ve fiziksel özellikleri sayesinde yüksek sınıf malzeme kategorisindeki gereksinimleri karşılayacak niteliktedir.

Çelik cürufu ve geogridlerin kullanımının değerlendirilmesi amacıyla dinamik ve statik sayısal analizler yapılmıştır. Donatısız ve geosentetik donatılı yol üst yapısının yapısal performansını analiz etmek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sayısal analizleri yapılan 3D yol modeli 4 216 düğüm noktasına, toplamda 16 905 elemana sahiptir.

KK, CC, CK ve KC olmak üzere dört kesitin tekrarlı taşıt yükleri altında meydana gelen düşey oturma değerleri incelenmiştir. Tekerlek yükleme alanları üzerine uygulanan konsantre lastik yükleri tanımlanan yükleme adımlarında kademeli bir şekilde uygulanmıştır. Çok sayıda döngüsel yük uygulanması nedeniyle işlemciye düşen yük artmış ve analiz süresi uzamıştır. Bu nedenle daha fazla depolama alanı da gerekmiştir. Granüler katmanların davranışını tanımlamak için küçük birim şekil değiştirme değerlerinde pekleşen zemin bünye modeli, kaplama tabakası için ise Mohr-Coulomb malzeme bünye modelleri kullanılmıştır. Bu sayede granüler malzemelerin doğrusal olmayan davranışlarının hesaba katılması mümkün olmuştur. Dinamik analizler ve uygulanan istatistiksel yöntemler sonucundaki çıkarımlardan aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

- Sayısal analiz sonucu hesaplanan ve tahmin edilen deformasyon değerlerinin tamamında en düşük deformasyon değerleri CC kesitinde meydana gelmiştir. Çelik cürufunun sahip olduğu yüksek rijitlik parametrelerinin etkisiyle temel ve alttemel tabakalarında kullanılması ile sağlam bir kombinasyonun meydana geldiği görülmüştür.
- Yazılımda modellenen tekerlek yükleme alanındaki deformasyon değerleri lastik kenarlarındaki bölgede lastik merkezine kıyasla daha fazla deformasyon meydana gelmiştir. Çünkü lastik şişirme basıncı etkisini lastik merkezinde gösterirken, yük değişiminin etkisi lastik kenarlarında görülmektedir. Bu nedenle sabit lastik şişirme basıncında, yükleme değişiminin etkisi lastik kenarlarındaki dağılımı etkilemektedir.
- Tekerlek yükleme alanından uzaklaştıkça deformasyon değerleri azalmıştır.
- İleri aşama yükleme adımlarının tahmininde oluşturulan regresyon modeli başarılı sonuç vermiştir ve tüm kesitler için R^2 değerlerinin en düşüğü %84 olarak hesaplanmıştır.
- Tahmin edilen yükleme adımları arasındaki deformasyon değerlerinin değişim hızının en yavaş olduğu kesitler CC ve KC olmuştur.
- Deformasyon değerleri arasında farkın en fazla olduğu iki kesit KK ile CC olmuştur.
- Sayısal analizler ve tahmin edilen sonuçlara göre alttemel tabakasında çelik cürufu kullanıldığında deformasyon değerlerine etkisi bakımından başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Kireçtaşı ve çelik cürufu agregalarının temel için tanımlanan rijitlik parametrelerinin birbirine çok yakın olması nedeniyle meydana gelen deformasyonlarda temel tabakasının malzeme türünden çok alttemel tabakasının türü bu sayısal analizde etkili olmuştur. Bu nedenle alttemel tabakasında çelik cürufu kullanılan kesitlerde daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

- Dört kesitteki deformasyon kontür dağılımları birbirine benzer şekilde olmuştur.
- Farklı akslar açısından değerlendirildiğinde aynı lastik şişirme basıncı ve lastik aks yükü için arka akstaki lastiklerde, ön aksa göre daha yüksek bir düşey deformasyon sergilemektedir. Bunun nedeni ağır taşıtlarda arka dingil yükünün ön dingilden daha fazla olmasıdır.
- Zayıf zemin üzerine inşa edilen yolların, tabaka kalınlıklarını artırarak ya da çeşitli iyileştirme yöntemleri kullanılarak üst yapının rehabilite edilmesi yerine imkanlar çerçevesinde doğal zeminin mukavemet parametrelerinin iyi olduğu, güçlü bir zeminde olması yolun ömrü açısından daha etkili olduğu söylenilebilir.
- Yapılan 2D ve 3D sayısal analizlerden görüldüğü üzere çelik cürufu kullanılan kesitlerde düşey deformasyon değerlerinde doğal agregaya kıyasla düşey deformasyon değerleri azalmıştır. Çelik cürufu agrega olarak kullanımının yaygınlaştırılması maliyet, geri dönüşüm sürecine katkı olan katkısı ve yol yapısına kazandıracak olumlu faktörler nedeniyle tavsiye edilmektedir.
- Dinamik analizlerde ilk yükleme adımlarında meydana gelen düşey deformasyon değerleri daha düşüktür. Ancak adım sayısının artmasıyla birlikte deformasyonlar da hızla artmıştır. Üst yapı kaplama tabakasında kullanılan malzemenin davranışına göre ilk etapta bir miktar elastik deformasyona uğramaktadır. Sonraki yüklemelerde ise ilk durumuna dönmeye çalışmaktadır. Elastik sınırın aşılmasından sonra malzeme yükleme adımlarındaki artışın devam etmesiyle kalıcı plastik deformasyonlar meydana gelmektedir.

Yapılan çalışmalar göstermiştir ki çelik cürufu kullanılarak imal edilen kesitlerde, doğal agrega kullanılarak üretilen konvansiyonel karışımların kullanıldığı kesitlere göre daha düşük düşey deformasyona sahip olmaktadır. Temel ve alttemel tabakalarında çelik cürufunun kullanımı ile ilgili yapılan sayısal analizlerde cüruf yeterli mekanik performans göstermiştir. Özellikle alttemel tabakasında çelik cürufunun kullanımı ile yolun mekanik performansında yaşanan gelişmeler yapılan nümerik analizler sayesinde de görülmüştür.

Çelik cürufunun sahip olduğu yüksek yoğunluğu, pürüzlülüğü ve parçalanmaya karşı direnci nedeniyle geleneksel agregaların yerine kullanılabilir. Çelik cürufunun agrega olarak kullanılabilirliği diğer agregalarla kıyaslandığında mühendislik özelliklerinin yanında, ekonomik ve çevresel artıları nedeniyle alternatif ve sürdürülebilir agrega tedarikinde taş

ocaklarının yerine çelik cürufunun kullanımının tercih edilmesinin yaygınlaşması arzu edilmektedir.

Karayolu tasarımlarının yük taşıma kapasitelerinin ve servis ömrünün artırılmasının yanında yapılan çeşitli iyileştirme-güçlendirme çalışmalarında son zamanlarda geosentetik donatıların kullanımı yaygın bir şekilde kabul görmektedir. Buna yönelik yapılan çok sayıda deneysel ve kuramsal çalışmalar bulunmaktadır. Geosentetik donatı türlerinden biri olan geogridler alternatiflerine kıyasla granüler tabakalarda sağlayacağı kenetlenme nedeniyle ara yüzeyde geliştirdiği kayma direnci sayesinde tercih edilmektedir.

Tez çalışmasında çelik cürufunun agrega olarak kullanımının değerlendirilmesinin yanında esnek üstyapı sistemlerinde geogrid donatı takviyesi ve takviye katman sayısı ile konumunun yolun taşıma gücüne olan katkısını, potansiyel faydalarını araştırmak maksadıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak statik analizleri yapılmıştır. Tüm bu etkileri belirlemek maksadıyla için 700 kPa- 3 500 kPa aralığındaki lastik temas basınçları tekerlek yükleme alanlarına düzgün dağılım şeklinde uygulanmıştır.

Hem tek katmanlı hem de iki ve üç sıra olmak üzere çok katmanlı geogrid donatılı kesitlerin altı farklı donatı yerleşim konumu için statik analizleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucundaki çıkarımlar aşağıda özetlenmiştir:

- Tüm 700 kPa-3 500 kPa aralığındaki tekerlek temas basıncı değerleri için yapılan statik analizlerde oluşan çekme gerilmeleri ve birim deformasyon değerleri üretici tarafından beyan edilen değerlerin altında kalmıştır.
- Üç farklı geogrid yerleşim durumu için yapılan sayısal analiz sonuçları değerlendirildiğinde oturma değerleri yük artışıyla birlikte artış göstermiştir.
- Statik analizlerde geogrid donatı kullanımının düşey deformasyona etkisinden çok emniyetli taşıma yüküne olan pozitif etkisi görülmüştür.
- Donatılı ve donatısız kesitler için oturma değerleri arasında anlamlı bir fark tespit edilememiştir. Ancak en başarılı sonuçların üç sıra donatı kullanımı sonucunda olduğunu söylemek mümkündür.
- CC kesitinde, donatının kaplama ve temel tabakası altında kullanımı ile kaplama, temel ve alttemel tabakası altında kullanılması durumunda emniyetli taşıma yükü iki kat artışı

belirlenmiştir. Her iki durumda da aynı sonucun elde edilmesi nedeniyle iki sıra kullanılarak hem maliyet hem de iş gücünden tasarruf sağlanabilir.

- Donatı kullanımı sayesinde, tekerlek yükü ile oluşan gerilmelerin doğal zemine azaltılarak aktarılmasının mümkün olması nedeniyle yapısal bozulmalar en aza indirgenebilir.
- Tek bir geogrid tabakası yerleştirildiğinde sınırlı faydalar öngörülmektedir. Ayrıca, iki veya daha fazla geosentetik tabakasının kullanılmasının, tek bir geosentetik tabakasına göre daha fazla güçlendirme faydası sağlayabileceği gösterilmiştir. Donatı kullanımının granüler tabakalardaki katman sayısının artması, kenetlenme etkisinin daha fazla harekete geçmesini sağlayarak emniyetli taşıma yükündeki artış meydana gelmiştir.
- Kaplama tabakasının altına geogrid katmanının yerleştirilmesi kaplamanın daha iyi performans göstermesine yardımcı olabilirken, alt zemin ile temel katmanları arasındaki arayüze bir geosentetik stabilizasyon katmanının yerleştirilmesi yapısal stabiliteyi sağlayabilir.

Buradan hareketle karayolları gibi bazı inşaat mühendisliği uygulamalarında geosentetik kullanımı yaygınlaşmalıdır. Özellikle karayollarında kullanılan geogrid takviyeler araç yüklerine karşı yolu servis ömrü boyunca desteklemektedir.

Ancak yazılımda geogridin modellenmesinde “sürekli kabuk levha elemanı” tanımlanmaktadır. Dolayısıyla yazılım geogridli tabakayı her iki yönde sürekli bir levhaymış gibi kabul etmektedir. Oysaki pratikte geogridler arasında boşluklar bulunmakta olup bu boşluklar arasında kalan zemin tanecikleri birbirine kenetlenmektedir. Bu etki yazılımda dikkate alınmayarak hesaplamalar yapılmaktadır. Geogridin kenetleme davranışı yazılıma yansıtılamaması sebebi ile hesaplanan düşey oturma değerlerinin düşük çıkması olağandır. Bu da çalışmanın eksik yönlerinden bir tanesi olarak değerlendirilmektedir. Ancak pratikte geogrid donatı kullanılması durumunda olumlu gelişmelerle karşılaşmıştır.

Gezegenimizin sağlığı ve sağlam, sürdürülebilir dayanıklı tasarım uygulamalarına yönelik yapılan yenilikçi çalışmaların uzmanlar tarafından araştırılıp uygulanması önemlidir. Yapılan sayısal simülasyonlar ile katmanlar halinde inşa edilmiş yolların, lastik yükleri altında birbiriyle temas halindeki tabakaların arayüzeylerindeki davranış ve

performanslarının değerlendirilmesinde sonlu eleman modellemesinin ne denli avantajlı olduğu da görülmüştür.

Servis ömrü boyunca araç yüklerine maruz kalan yolun trafik yüklerinin desteklenmesi ve oluşacak aşırı yük konsantrasyonlarının dağıtılmasında geogrid kullanımı önem arz etmektedir. Tez çalışmasının bulgularına dayanarak çelik cürufu ile geogridin birlikte kullanıldığı deneysel ve kuramsal çalışmaların hız kazanması oldukça değerlidir.

Mevcut tez çalışmasından yapılan çıkarımlar ışığında gelecekte yapılacak olan çalışmaların odaklanması gereken konulara yönelik öneriler ise;

- Çelik cürufu kullanılmasının etkisini belirlemek amacıyla yapılan nümerik çalışmaların sonlu elemanlar analizine dayandığı göz önünde bulundurulduğunda sonuçların saha ölçümleriyle de doğrulanması ve saha performansının belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılabilir.
- Çalışma kapsamında yapılan analizlerde yalnızca tekerlekler aracılığıyla aktarılan düşey yükler dolayısıyla meydana gelen etkiler değerlendirilmiş olup sonraki çalışmalarda yatay sürtünme kuvvetleri, fren uygulamasından kaynaklanan yatay kuvvetler dikkate alınarak hesaplamalar yapılabilir. Gelecek çalışmalarda sismik yüklerin etkisi de değerlendirilebilir.
- Drenaj koşullarının değiştirilerek nem durumunun, sıcaklık ve iklimsel faktörlerin etkisi dikkate alınarak sayısal analizler yapılabilir.
- Geogridlerin aynı yerleşim konumunda ancak farklı çekme modülü ve rijitlik değerlerinin kalıcı deformasyonlara ve yolun performansına olan etkisinin belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılabilir.
- Geogrid katman sayısına bağlı olarak güçlendirme kapasitesinin harekete geçmesinde yük döngü sayısının etkisi değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

- Abu-Farsakh, M. Y., and Chen, Q. (2011). Evaluation of geogrid base reinforcement in flexible pavement using cyclic plate load testing. *International Journal of Pavement Engineering*, 12(3), 275-288.
- Adu-Osei, A. (2000). Characterization of unbound granular layers in flexible pavements. ICAR. Texas, 1-158.
- Alimohammadi, H., Schaefer, V. R., Zheng, J., and Li, H. (2021). Performance evaluation of geosynthetic reinforced flexible pavement: a review of full-scale field studies. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14(1), 30-42.
- 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.
- Al-Khateeb, L. A., Saoud, A., and Al-Msouti, M. F. (2011). Rutting prediction of flexible pavements using finite element modeling. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 5(2), 173-190.
- Alpan, I. (1970). The geotechnical properties of soils. *Earth-Science Reviews*, 6(1), 5-49.
- Al-Qadi, I. L., Loulizi, A., Janajreh, I., and Freeman, T. E. (2002). Pavement response to dual tires and new wide-base tires at same tire pressure. *Transportation Research Record*, 1806(1), 38-47.
- Al-Qadi, I. L., and Wang, H. (2009). Evaluation of pavement damage due to new tire designs. FHWA. Urbana-Champaign, 1-74.
- Alzabeebee, S., Chapman, D. N., and Faramarzi, A. (2018). A comparative study of the response of buried pipes under static and moving loads. *Transportation Geotechnics*, 15, 39-46.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). Guide for Design of Pavement Structures. AASHTO. Washington D.C., 12-102.
- Arvelo, J. (2005). *Adapting the modified Cam Clay constitutive model to the computational analysis of dense granular soils*. Yüksek Lisans Tezi, University of Central Florida, ABD, 33-142.
- Arvin, M. R., and Tamiz, M. (2018). Elasto-plastic finite element evaluation of flexible pavements based on shakedown concept. *International Journal of Transportation Engineering*, 5(3), 243-260.

- Atkinson, J. H. ve Sallfors, G. (1991). *Experimental determination of stress-strain-time characteristics in laboratory and-in-situ tests*. 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, İtalya, 915-956.
- Ayithi, A., and Hiltunen, D. R. (2017). *Base Course Resilient Modulus for the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*. Geotechnical Frontiers 2017, Florida, 263-271.
- Bagampadde, U., Wahhab, H. A. A., and Aiban, S. A. (1999). Optimization of steel slag aggregates for bituminous mixes in Saudi Arabia. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(1), 30-35.
- Bahadır, A.A (2022). *Yumuşak zeminlerde kazı kaynaklı deformasyonları tahmin etmek için istatistiksel değerlendirme ve basitleştirilmiş yaklaşım*. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 59-280.
- Bakhshi, B., and Arabani, M. (2018). Numerical evaluation of rutting in rubberized asphalt mixture using finite element modeling based on experimental viscoelastic properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(6), 04018088.
- Barksdale, R. D. (1971). Compressive stress pulse times in flexible pavements for use in dynamic testing. *Highway Research Record*, 345(4), 32-44.
- Behnood, A., and Ameri, M. (2012). Experimental investigation of stone matrix asphalt mixtures containing steel slag. *Scientia Iranica*, 19(5), 1214-1219.
- Benz, T., (2007). *Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences*. Doktora Tezi. University Stuttgart, Germany.
- Berg, R. R., Samtani, N. C., and Christopher, B. R. (2009). Design of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes. *FHWA*, United States, 1-332.
- Beshears, S. A., and Tutumluer, E. (2013). Research pays off: Reclaimed asphalt pavement with steel slag aggregate: Successful use in Illinois pavements. *TR News*, 288, 46-47.
- Birat, J. P. (2012). Sustainability footprint of steelmaking byproducts. *Ironmaking & Steelmaking*, 39(4), 270-277.
- Bodhinayake, B. C. (2008). *A study on nonlinear behaviour of subgrades under cyclic loading for the development of a design chart for flexible pavements*. Doktora Tezi, University of Wollongong, Avustralya, 1-237.
- Brief, P. P. (2017). PBL Netherlands Environmental Assessment Agency: The Hague. *The Netherlands*.

- Brinkgreve, R. B. (Yamamuro, J. A., Kaliakin, V.N.). (2005) *Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application*. Virginia: American Society of Civil Engineers (ASCE), 69-98.
- Brinkgreve, R. B. J., Swolfs, W. M., and Engine, E. (2008). *PLAXIS 3D Foundation Version*. (2. Baskı), Netherlands: Delft University of Technology, 10-588.
- Brito, L. A. T. (2011). *Design methods for low volume roads*. Doktora Tezi, University of Nottingham, UK.
- Buonsanti, M., and Leonardi, G. (2012). A Finite element model to evaluate airport flexible pavements response under impact. *Applied Mechanics and Materials*, 138, 257-262.
- Byun, Y. H., Han, W., Tutumluer, E., and Lee, J. S. (2016). Elastic wave characterization of controlled low-strength material using embedded piezoelectric transducers. *Construction and Building Materials*, 127, 210-219.
- Carvalho, S. Z., Vernilli, F., Almeida, B., Demarco, M., and Silva, S. N. (2017). The recycling effect of BOF slag in the portland cement properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 216-220.
- Casey, D. B., Collop, A. C., Airey, G. D., and Grenfell, J. R. (2012). *The effects non-uniform contact pressure distribution has on surface distress of flexible pavements using a finite element method*. 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, Dordrecht, 347-357.
- Chen, W., Wei, J., Xu, X., Zhang, X., Han, W., Yan, X., and Lu, Z. (2021). Study on the optimum steel slag content of sma-13 asphalt mixes based on road performance. *Coatings*, 11(12), 1436.
- Cho, S. D., An, J. H. ve Lee, K. W. (2001). Evaluation of installation damage of HDPE geogrids, *KICT*, South Korea.
- Cho, Y. H., McCullough, B. F., and Weissmann, J. (1996). Considerations on finite-element method application in pavement structural analysis. *Transportation Research Record*, 1539(1), 96-101.
- Christopher, B. R., Schwartz, C. W., Boudreaux, R., and Berg, R. R. (2006). Geotechnical aspects of pavements, *FHWA*. United States, 1-27.
- Clayton, C. R. I. (2011). Stiffness at small strain: research and practice. *Géotechnique*, 61(1), 5-37.
- Cocurullo, A., Airey, G. D., Collop, A. C., and Sangiorgi, C. (2008). Indirect tensile versus two-point bending fatigue testing. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, 161(4), 207-220.

- Dayioglu, A. Y., Aydilek, A. H., and Cetin, B. (2014). Preventing swelling and decreasing alkalinity of steel slags used in highway infrastructures. *Transportation Research Record*, 2401(1), 52-57.
- De Beer, M., and Fisher, C. (1997). Contact stresses of pneumatic tires measured with the Vehicle-Road Surface Pressure Transducer Array (VRSPTA) system for the University of California at Berkeley (UCB) and the Nevada Automotive Test Center, NATC. ABD, 4-15.
- Deus, A. C. F., Büll, L. T., Guppy, C. N., Santos, S. D. M. C., and Moreira, L. L. Q. (2020). Effects of lime and steel slag application on soil fertility and soybean yield under a no till-system. *Soil and Tillage Research*, 196, 104422.
- Deus, A. C. F., de Almeida Bertani, R. M., Meirelles, G. C., Soares, A. D. A. V. L., Moreira, L. L. Q., Büll, L. T., and Fernandes, D. M. (2018). The comprehensive utilization of steel slag in agricultural soils. *Recovery and Utilization of Metallurgical Solid Waste*, 1-10.
- Diaz-Piloneta, M., Terrados-Cristos, M., Álvarez-Cabal, J. V., and Vergara-González, E. (2021). Comprehensive analysis of steel slag as aggregate for road construction: experimental testing and environmental impact assessment. *Materials*, 14(13), 3587.
- Duncan, J. M., Monismith, C. L., and Wilson, E. L. (1968). Finite element analysis of pavements. *Highway Research Record*, 228, 18-33.
- Duncan, J. M., and Chang, C. Y. (1970). Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(5), 1629-1653.
- Ebgeo, D. (Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen), (2010). Empfehlungen für Planung und Bemessung von Bewehrungen mit Geokunststoffen. *HRSG*, Berlin, 1-327.
- Elias, V., (2000). Corrosion/Degradation of Soil Reinforcements for Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes. *FHWA*. ABD, 1-94.
- Elseifi, M. (2003). *Performance quantification of interlayer systems in flexible pavements using finite element analysis, instrument response, and non destructive testing*, Diktora Tezi, Virginia Tech, ABD.
- Elseifi, M. A., Al-Qadi, I. L., and Yoo, P. J. (2006). Viscoelastic modeling and field validation of flexible pavements. *Journal of Engineering Mechanics*, 132(2), 172-178.
- Etxeberria, M., Gonzalez-Corominas, A., and Pardo, P. (2016). Influence of seawater and blast furnace cement employment on recycled aggregate concretes' properties. *Construction and Building Materials*, 115, 496-505.

- Fang, H., Haddock, J. E., White, T. D., and Hand, A. J. (2004). On the characterization of flexible pavement rutting using creep model-based finite element analysis. *Finite Elements in Analysis and Design*, 41(1), 49-73.
- Firat, S., Dikmen, S., Yılmaz, G., and Khatib, J. M. (2020). Characteristics of Engineered waste materials used for road subbase layers. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(9), 2643-2656.
- Flintsch, G. W., Diefenderfer, B. K., and Nunez, O. (2008). Composite pavement systems: Synthesis of design and construction practices. *FHWA/VTRC*. ABD, 125.
- Gabr, M. A., and Hunter, T. J. (1994). Stress-strain analysis of geogrid-supported liners over subsurface cavities. *Geotechnical & Geological Engineering*, 12, 65-86.
- Gaetano, E. A. (2010). *The response of flexible pavement systems to local deterioration of the base layer*. Yüksek Lisans Tezi, McGill University, Kanada.
- Gao, D., Wang, F. P., Wang, Y. T., and Zeng, Y. N. (2020). Sustainable utilization of steel slag from traditional industry and agriculture to catalysis. *Sustainability*, 12(21), 9295.
- Gao, L. S., Dan, H. C., and Li, L. (2019). Response analysis of asphalt pavement under dynamic loadings: Loading equivalence. *Mathematical Problems in Engineering*, 7020298.
- Gao, W., Zhou, W., Lyu, X., Liu, X., Su, H., Li, C., and Wang, H. (2023). Comprehensive utilization of steel slag: A review. *Powder Technology*, 118449.
- Ghadimi, B., Nikraz, H., and Rosano, M. (2016). Dynamic simulation of a flexible pavement layers considering shakedown effects and soil-asphalt interaction. *Transportation Geotechnics*, 7, 40-58.
- Ghafoori, N., and Sharbaf, M. (2016). Use of geogrid for strengthening and reducing the roadway structural sections. *NDOT*. ABD, 1-101.
- Gokhale, S. V. (2001). *Simplified Protocol for Triaxial Testing of Hot Mix Asphalt Concrete*. Yüksek Lisans Tezi. Pennsylvania State University, ABD.
- Graziani, A., Pasquini, E., Ferrotti, G., Virgili, A., and Canestrari, F. (2014). Structural response of grid-reinforced bituminous pavements. *Materials and Structures*, 47(8), 1391-1408.
- Guo, J., Bao, Y., and Wang, M. (2018). Steel slag in China: Treatment, recycling, and management. *Waste Management*, 78, 318-330.
- Hajj, E. Y., Siddharthan, R. V., Sebaaly, P. E., and Weitzel, D. (2007). Hot-mix asphalt mixtures for Nevada's intersections. *Transportation Research Record*, 2001(1), 73-83.

- Hamim, A., Yusoff, N. I. M., Ceylan, H., Rosyidi, S. A. P., and El-Shafie, A. (2018). Comparative study on using static and dynamic finite element models to develop FWD measurement on flexible pavement structures. *Construction and Building Materials*, 176, 583-592.
- Hardin, B. O., and Richart Jr, F. E. (1963). Elastic wave velocities in granular soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 89(1), 33-65.
- Helwany, S., Dyer, J., and Leidy, J. (1998). Finite-element analyses of flexible pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 124(5), 491-499.
- Howard, I. L., and Warren, K. A. (2009). Finite-element modeling of instrumented flexible pavements under stationary transient loading. *Journal of Transportation Engineering*, 135(2), 53-61.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design*. (2. Baskı). Saddle River, NJ: Pearson Education, 401-409.
- Humbert, P. S., and Castro-Gomes, J. (2019). CO2 activated steel slag-based materials: A review. *Journal of Cleaner Production*, 208, 448-457.
- Hussain, A., and Hussaini, S. K. K. (2022). Use of steel slag as railway ballast: A review. *Transportation Geotechnics*, 100779.
- İnternet: Adfors (2023). URL: www.adfors.com/road-reinforcement/glasgridr, Son Erişim Tarihi: 26.06.2023.
- İnternet: ADFORS, Saint Gobain, Paving Reinforcement Selection Guide. URL: <https://www.adfors.com/road-reinforcement/glasgridr>, Son Erişim Tarihi: 11.07.2023.
- İnternet: Baselok (2022).URL: https://baselok.com/wp-content/downloads/GeoGrid/BRO_GEOGRID.pdf, Son Erişim Tarihi: 25.06.2022.
- İnternet: Baselok (2023). URL: www.baselok.com/wp-content/uploads/2021/11/BX3030.pdf, Son Erişim Tarihi: 26.06.2023.
- İnternet: Baselok, Geogrid BX3030 Product Properties. URL: <https://baselok.com/wp-content/uploads/2021/11/BX3030.pdf>, Son Erişim Tarihi: 18.09.2023.
- İnternet: Brief, P. P. (2017). PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. URL: <https://www.pbl.nl/en>, Son Erişim Tarihi: 26.09.2021
- İnternet: Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2018). URL: <https://csb.gov.tr>, Son Erişim Tarihi: 14.03.2021.
- İnternet: Dünya Çelik Birliği, (2023). URL: worldsteel.org, Son Erişim Tarihi: 04.08.2023.

İnternet: Euroslag (2022).URL: <https://www.euroslag.com/products/properties>, Son Erişim Tarihi: 15.08.2022.

İnternet: Federal Highway Administration. (2023). 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: 26.10.2023.

İnternet: FHWA. (2012). Federal Highway Administration Research and Technology. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/toc.cfm>, Son Erişim Tarihi: 17.05.2023.

İnternet: Fibertex (2023). URL: https://www.fibertex.com/sites/fibertex.com/files/202201/Secugrid%20R6%20Long_term_design_strength.pdf, Son Erişim Tarihi: 13.05.2023.

İnternet: Midas User Manuel, (2020). URL: https://manual.midasuser.com/en_common, Son Erişim Tarihi: 11.03.2021.

İnternet: Naue (2023). URL: www.naue.com/info-center/downloads/specifications/adresinden, Son Erişim Tarihi: 26.06.2023.

İnternet: Naue GmbH & Co., Geosynthetics Specifications. URL: <https://www.naue.com/info-center/downloads/specifications>, Son Erişim Tarihi: 10.07.2023.

İnternet: NAUE GmbH & Co., Secugrid - Long-term Design Strength of Secugrid PET Geogrids. URL: https://www.fibertex.com/sites/fibertex.com/files/2022-01/Secugrid%20R6%20Long_term_design_strength.pdf, Son Erişim Tarihi: 08.06.2023.

İnternet: PLAXİS. (2023) Material Models Manual. URL: https://communities.bentley.com/cfs-file/__key/communityserver-wikis-components-files/00-00-00-0558/PLAXIS_5F00_3D_5F00_2023.1_5F00_3D_5F00_3_5F00_Material-Models-Manual.pdf, Son Erişim Tarihi: 26.09.2023

İnternet: Resmî Gazete, (2012). URL: www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/11/20121108-7.htm, Son Erişim Tarihi: 04.08.2021.

İnternet: Tenax (2023a).URL: www.tenax.net/en/geosynthetics/technical-competence-center/functions-of-geosynthetics, Son Erişim Tarihi: 26.04.2023.

İnternet: Tenax (2023b). URL: www.tenax.net/wp-content/uploads/2017/11/Data-Sheet-TENAX-LBO-440-Americas-Market.pdf, Son Erişim Tarihi: 26.06.2023.

İnternet: Tenax (2023c). URL: www.tenax.net/wp-content/uploads/2017/11/Data-Sheet-TENAX-LBO-330-Americas-Market.pdf, Son Erişim Tarihi: 26.06.2023.

İnternet: Tenax Co., LBO 330 Biaxial Geogrid Product Properties. URL: <https://www.tenax.net/wp-content/uploads/2017/11/Data-Sheet-TENAX-LBO-330-Americas-Market.pdf>, Son Erişim Tarihi: 28.08.2023.

İnternet: Tenax Co., LBO 440 Biaxial Geogrid Product Properties. URL: <https://www.tenax.net/wp-content/uploads/2017/11/Data-Sheet-TENAX-LBO-440-Americas-Market.pdf>, Son Erişim Tarihi: 11.10.2023.

İnternet: Tensar (2022). URL: <https://www.geofabrics.co/sites/default/files/Tensar-Asphalt-Pavements-Brochure.pdf>, Son Erişim Tarihi: 19.09.2022.

İnternet: Tensar (2023). URL: [www.tensar.co.uk/getattachment/3fb176ee-59e4-4e11-8f12-01ea63c06f8a/TN_SSspec-\(1\).pdf](http://www.tensar.co.uk/getattachment/3fb176ee-59e4-4e11-8f12-01ea63c06f8a/TN_SSspec-(1).pdf), Son Erişim Tarihi: 26.06.2023.

İnternet: Tensar, (2022). Tensar International Corporation. URL: <https://www.tensar.info.tr/Market-Sector/Roads-and-Highways>, Son Erişim Tarihi: 17.05.2022.

İnternet: Tensar, GlasGrid 8550 Asphalt Reinforcement System Specification Sheet. URL: https://www.tensarcorp.com/getattachment/07a22ccf-0f7e-4661-9f08-7768b7c7f4de/GG_MPDS_8550.pdf, Son Erişim Tarihi: 18.08.2023.

İnternet: Tensar, Product Specification - Biaxial Geogrid BXSQ3030. URL: https://www.tensarcorp.com/getattachment/4f7f925c-27d9-4019-9b39-92a12dea4eba/SQ3030_MPDS_1-23.pdf, Son Erişim Tarihi: 28.10.2023.

İnternet: Tensar, Tensar technical note SS Geogrids Product Specifications. URL: [https://www.tensar.co.uk/getattachment/3fb176ee-59e4-4e11-8f12-01ea63c06f8a/TN_SSspec-\(1\).pdf](https://www.tensar.co.uk/getattachment/3fb176ee-59e4-4e11-8f12-01ea63c06f8a/TN_SSspec-(1).pdf), Son Erişim Tarihi: 21.07.2023.

İnternet: Tensarcorp (2023a). URL: www.tensarcorp.com/getattachment/07a22ccf-0f7e-4661-9f08-7768b7c7f4de/GG_MPDS_8550.pdf, Son Erişim Tarihi: 26.06.2023.

İnternet: Tensarcorp (2023b). URL: www.tensarcorp.com/getattachment/4f7f925c-27d9-4019-9b39-92a12dea4eba/SQ3030_MPDS_1-23.pdf, Son Erişim Tarihi: 26.06.2023.

İnternet: TÜİK (2023a). *Türkiye İstatistik Kurumu Çevre İstatistikleri*, URL: <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Cevre-ve-Enerji-103>, Son Erişim Tarihi: 01.09.2023

İnternet: TÜİK (2023b). *Türkiye İstatistik Kurumu Motorlu Kara Taşıtları*, URL: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Temmuz-2023-49428>, Son Erişim Tarihi: 14.08.2023

Jaky, J. (1944). The coefficient of earth pressure at rest. *Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers*, 355-358.

- Janbu, N. (1985). Soil models in offshore engineering. *Géotechnique*, 35(3), 241-281.
- Jiang, Y., Ling, T. C., Shi, C., and Pan, S. Y. (2018). Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete-A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 187-197.
- John, N. W. M. (1987). *Geotextiles*. London: Blackie Academic & Professional, 1-356.
- Karadağ, H. (2020). *Yol Temel ve Alttemel Tabakalarında Kullanılan Çelikhane Cürufunun Dinamik Performansının Sonlu Elemanlar Analizi ile Değerlendirilmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 103-133.
- Karadağ, H., Fırat, S., Işık, N. S., and Yılmaz, G. (2022). Determination of permanent deformation of flexible pavements using finite element model. *Grđevinar*, 74(6), 471-480.
- Karaoğlan, H. (2014). *Frictional Behavior Between Geosynthetic Reinforcement and Facing Blocks*. Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 22.
- Karatag, H., Fırat, S., and Işık, N. (2020). Utilization of steel slag as road base and subbase material. *Journal of Polytechnic*, 23(3), 799-812.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2013). Karayolu Teknik Şartnamesi (yol alt yapısı, sanat yapıları, köprü ve tüneller, üst yapı ve çeşitli işler). KGM. Ankara, 401-419.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2022a). 2022 Faaliyet Raporu. KGM. Ankara, 56-60.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2022b). *Karayolları Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberi*. KGM. Ankara, 20-159.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2022b). Karayollarında Ağır Taşıt Trafığının ve Yük Taşımacılığının Özellikleri ve Eğilimleri (2015-2020). KGM. Ankara, 24-124
- Kempfert, H. G., and Gebreselassie, B. (2006). *Excavations and foundations in soft soils*. Berlin: Springer Science & Business Media, 11-576.
- Khajehvand, M., Rassafi, A. A., and Mirbaha, B. (2021). Modeling traffic noise level near at-grade junctions: Roundabouts, T and cross intersections. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 93, 102752.
- Khalid, M. S. (2013). *Dynamic analysis of an upstream tailings dam*. Yüksek Lisans Tezi, Luleå University of Technology, İsveç.
- Khing, K.H, Das, B.M., Puri, V.K., Cook, E.E. and Yen, S.C. (1993). The bearing capacity of a strip foundation on geogrid-reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 12(99), 351-361.

- Kibert, C. J. (2018). Policy Instruments for a Sustainable Built Environment. *Florida State University Journal of Land Use and Environmental Law*, 17(2), 373-394.
- Kim, M. (2007). *Three-dimensional finite element analysis of flexible pavements considering nonlinear pavement foundation behavior*. Doktora Tezi, University of Illinois at Urbana-Champaign, ABD.
- Kim, M., Tutumluer, E., and Kwon, J. (2009). Nonlinear pavement foundation modeling for three-dimensional finite-element analysis of flexible pavements. *International Journal of Geomechanics*, 9(5), 195-208.
- Koerner, R. M. (2005). *Designing with geosynthetics*. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall, 250-300.
- Komastu, T., H. Kikuta, Y. Tuji, and E. Muramatsu. (1998). Durability assessment of geogrid reinforced asphalt concrete. *Geotextiles and Geomembranes*, 16, 257-271.
- Kondner, R. L. (1963). Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 89(1), 115-143.
- Kuo, C. M., and Huang, C. W. (2006). Three-dimensional pavement analysis with nonlinear subgrade materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(4), 537-544.
- Kwon, J., and Tutumluer, E. (2009). Geogrid base reinforcement with aggregate interlock and modeling of associated stiffness enhancement in mechanistic pavement analysis. *Transportation Research Record*, 2116(1), 85-95.
- Lade, P. V. (2002). Instability, shear banding, and failure in granular materials. *International Journal of Solids and Structures*, 39(13-14), 3337-3357.
- Lee, S. Q., and Lauter, K. A. (2000). Using pavement management system concepts to determine the cost and impact of utility trenching on an urban road network. *Transportation Research Record*, 1699(1), 33-41.
- Lees, A. (2016). *Geotechnical finite element analysis: a practical guide*. London: ICE publishing, 1-243.
- Leng, J., and Gabr, M. A. (2002). Characteristics of geogrid-reinforced aggregate under cyclic load. *Transportation Research Record*, 1786(1), 29-35.
- Leng, Z., Ozer, H., Al-Qadi, I. L., and Carpenter, S. H. (2008). Interface bonding between hot-mix asphalt and various Portland cement concrete surfaces: laboratory assessment. *Transportation Research Record*, 2057(1), 46-53.
- Leonardi, G., and Suraci, F. (2022). A 3D-FE model for the rutting prediction in geogrid reinforced flexible pavements. *Sustainability*, 14(6), 3695.

- Li, L., Ling, T. C., and Pan, S. Y. (2022). Environmental benefit assessment of steel slag utilization and carbonation: A systematic review. *Science of The Total Environment*, 806, 150280.
- Liu, Q., and Wang, M. (2023). Numerical investigation of water migration in a closed unsaturated expansive clay system. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(6), 202.
- Luxán, M. P. D., Sotolongo, R., Dorrego, F., and Herrero, E. (2000). Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace. *Cement and Concrete Research*, 30(4), 517-519.
- Maghool, F., Arulrajah, A., Mirzababaei, M., Suksiripattanapong, C., and Horpibulsuk, S. (2020). Interface shear strength properties of geogrid-reinforced steel slags using a large-scale direct shear testing apparatus. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(5), 625-633.
- Mäkelä, M., Watkins, G., Pöykiö, R., Nurmesniemi, H., and Dahl, O. (2012). Utilization of steel, pulp and paper industry solid residues in forest soil amendment: Relevant physicochemical properties and heavy metal availability. *Journal of Hazardous Materials*, 207, 21-27.
- Mandal, J. N., and Gupta, P. (1994). Stability of geocell-reinforced soil. *Construction and building materials*, 8(1), 55-62.
- Martins, A. C. P., De Carvalho, J. M. F., Costa, L. C. B., Andrade, H. D., de Melo, T. V., Ribeiro, J. C. L., ... ve Peixoto, R. A. F. (2021). Steel slags in cement-based composites: An ultimate review on characterization, applications, and performance. *Construction and Building Materials*, 291, 123265.
- Mattos, J. R., Núñez, W. P., Ceratti, J. A., Zíngano, A., and 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, Prague, Czech Republic, 1-9.
- Mercado-Borrayo, B. M., González-Chávez, J. L., Ramírez-Zamora, R. M., and Schouwenaars, R. (2018). Valorization of metallurgical slag for the treatment of water pollution: an emerging technology for resource conservation and re-utilization. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 4, 50-67.
- Moayed, H., Kazemian, S., Prasad, A., and Huat, B. B. (2009). Effect of geogrid reinforcement location in paved road improvement. *EJGE*, 14, 1-11.
- Moazami, D., and Muniandy, R. (2018). Determination of relative damage of asphalt pavement from reduced tire contact area. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(6), 553-563.

- Moreno-Navarro, F., and Rubio-Gámez, M. C. (2016). A review of fatigue damage in bituminous mixtures: Understanding the phenomenon from a new perspective. *Construction and Building Materials*, 113, 927-938.
- Murphy, T. R. (2023). *Integrating Steel Slag Aggregates into Asphalt Paving by Harmonizing Availability, Quality, Economics, and the Environment*. Doktora Tezi, Mississippi State University, ABD.
- Nair, A. M., and Latha, G. M. (2016). Repeated load tests on geosynthetic reinforced unpaved road sections. *Geomechanics and Geoengineering*, 11(2), 95-103.
- Naveen, L., Kumar, M. B., Kumar, P., Sravani, N., Rakesh, U., Akhil, J., and Teja, M. D. (2022), Study on Usage of Waste Plastic in Bitumen Mixes in Cold Climate Areas, *Journal of Engineering Sciences*, 13(8), 609-614.
- Nazzal, M. D., Abu-Farsakh, M. Y., and Mohammad, L. N. (2010). Implementation of a critical state two-surface model to evaluate the response of geosynthetic reinforced pavements. *International Journal of Geomechanics*, 10(5), 202-212.
- Obrzud, R. F. (2010). On the use of the Hardening Soil Small Strain model in geotechnical practice. *Numerics in Geotechnics and Structures*, 16, 1-17.
- Önalp, A., and Arel, E. (2013). *Geoteknik Bilgisi I Zeminler ve Mekaniği Çözümlü Problemlerle*. (4. Baskı). İstanbul: Birsen Yayınevi, 461.
- Özsoy, M., and Firat, S. (Baskıda). Çelik Cürufu ile Yapılan Yol Katmanlarının Sayısal Analizleri. *Politeknik Dergisi*.
- Özsoy, V. S., and Örkücü, H. H. (2016). Estimating the parameters of nonlinear regression models through particle swarm optimization. *Gazi University Journal of Science*, 29(1), 187-199.
- Pandey, S., Rao, K. R., and Tiwari, D. (2012). *Effect of geogrid reinforcement on critical responses of bituminous pavements*. ARRB Conference, Australia, 17.
- Park, D. W., Fernando, E., and Leidy, J. (2005). Evaluation of predicted pavement response with measured tire contact stresses. *Transportation Research Record*, 1919(1), 160-170.
- Patel, A., Singh, V., and Shanker, R. (2022). FEM based parametric analysis for investigating wheel base characteristics and axle configurations on flexural stresses in rigid pavements. *Materials Today: Proceedings*, 65(2), 1280-1289.
- Perkins, S. W., Ismeik, M., and Fogelsong, M. L. (1999). *Influence of geosynthetic placement position on the performance of reinforced flexible pavement systems*. Geosynthetics '99: Specifying Geosynthetics and Developing Design Details, Boston, USA, 253-264.

- Qiao, Y. (2015). *Flexible pavements and climate change: impact of climate change on the performance, maintenance, and life-cycle costs of flexible pavements*. Doktora Tezi, University of Nottingham, UK, 1-175.
- Rahman, A., Ai, C., Xin, C., Gao, X., and Lu, Y. (2017). State-of-the-art review of interface bond testing devices for pavement layers: toward the standardization procedure. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 31(2), 109-126.
- Ranadive, M. S., and Tapase, A. (2016). Pavement performance evaluation for different combinations of temperature conditions and bituminous mixes. *Innovative Infrastructure Solutions*, 1, 40.
- Ratkowsky, D.A., Nonlinear regression modeling: a unified practical approach. Statistics: Textbooks and Monographs, Marcel Dekker, New York, (1983).
- Resmî Gazete, (2012). Araçların Yüklenmesine İlişkin Ölçü ve Usuller ile Tartı ve Boyut Ölçüm Toleransları Hakkında Yönetmelik, Resmî Gazete Sayısı: 28461
- Reuter, M., Xiao, Y., and Boin U. (2004). *Recycling and environmental issues of metallurgical slags and salt fluxes*. VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts, South Africa, 15.
- Richart, F. E., Hall, J. R., and Woods, R. D. (1970). Vibrations of soils and foundations. *Transport and Road Research Laboratory (TRRL)*, ABD, 1-432.
- Roscoe, K. H., Schofield, A., and Wroth, A. P. (1958). On the yielding of soils. *Geotechnique*, 8(1), 22-53.
- Roscoe, K., and Burland, J. B. (1968). On the generalized stress-strain behaviour of wet clay, *TRIS*. UK. 535-609.
- Saad, B., Mitri, H., and Poorooshab, H. (2005). Three-dimensional dynamic analysis of flexible conventional pavement foundation. *Journal of Transportation Engineering*, 131(6), 460-469.
- Saad, B., Mitri, H., and Poorooshab, H. (2006). 3D FE analysis of flexible pavement with geosynthetic reinforcement. *Journal of Transportation Engineering*, 132(5), 402-415.
- Saltan, M., and Fındık, F. S. (2008). Stabilization of subbase layer materials with waste pumice in flexible pavement. *Building and Environment*, 43(4), 415-421.
- Sarımurat, S. (2021). *Çelik Cürufu ile İmal Edilen Taş Kolonların Sayısal Analizi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 6-191.
- Schwerdt, S., Mirschel, D., Hildebrandt, T., Wilke, M., and Schneider, P. (2021). Substitute building materials in geogrid-reinforced soil structures. *Sustainability*, 13(22), 12519.

- Seber, G. A. F., and Wild, C. J., (1989). *Nonlinear Regression*. New York: Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, 23-156.
- Shen, D. H., Wu, C. M., and Du, J. C. (2009). Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 23(1), 453-461.
- Shen, H., Forssberg, E., and Nordström, U. (2004). Physicochemical and mineralogical properties of stainless-steel slags oriented to metal recovery. *Resources, Conservation and Recycling*, 40(3), 245-271.
- Shi, C. (2004). Steel slag-its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(3), 230-236.
- Shiri, A. (2022). *A Practical Approach for the Application of Simple and Advanced Soil Constitutive Models by the Use of the Interrelation of Their Parameters*, Doktora Tezi, Tennessee Technological University, ABD.
- Shukla, S. K. (2006). Geosynthetic at subgrade level in paved roadways—design practice and installation. *Civil Engineering and Construction Review*, New Delhi, India, 19(3), 78-84.
- Shukla, S. K. (2017). *An introduction to geosynthetic engineering*. Hollanda: CRC Press, 1-443.
- Shukla, S. K., and Yin, J. H. (2006). *Fundamentals of geosynthetic engineering-Chapter 4*. (1. Baskı). London: Taylor & Francis Group, 66.
- Singh, S. K., Vashistha, P., Chandra, R., and Rai, A. K. (2021). Study on leaching of electric arc furnace (EAF) slag for its sustainable applications as construction material. *Process Safety and Environmental Protection*, 148, 1315-1326.
- Sinha, A. K., Chandra, S., and Kumar, P. (2014). Finite element analysis of flexible pavement with different subbase materials. *Indian Highways*, 42(2), 57-66.
- Tarefder, R. A., and Ahmed, M. U. (2014). Modeling of the FWD deflection basin to evaluate airport pavements. *International Journal of Geomechanics*, 14(2), 205-213.
- TÇÜD, (2015). Demir Çelik Cüruf Raporu. ÇŞB, Ankara, 25.
- Theyse, H. L., De Beer, M., and Rust, F. C. (1996). Overview of South African mechanistic pavement design method. *Transportation Research Record*, 1539(1), 6-17.
- Ti, K. S., Huat, B. B., Noorzaei, J., Jaafar, M. S., and Sew, G. S. (2009). A review of basic soil constitutive models for geotechnical application. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 14, 1-18.

- TOBB, (2022). Türkiye Demir ve Demir Dışı Metaller Meclisi Raporu 2020, TOBB Yayınları, 170.
- Tutumluer, E., Little, D. N., and Kim, S. H. (2003). Validated model for predicting field performance of aggregate base courses. *Transportation Research Record*, 1837(1), 41-49.
- Uzan, J. (2004). Permanent deformation in flexible pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 130(1), 6-13.
- Vallejo, L. E., Lobo-Guerrero, S., and Hammer, K. (2006). Degradation of a granular base under a flexible pavement: DEM simulation. *International Journal of Geomechanics*, 6(6), 435-439.
- Van Vuuren, D. J. (1974). Tyre pressure and its effect on pavement design and performance. *Civil Engineering Siviele Ingenieurswese*, 1974(8), 267-272.
- Vardanega, P. J., and Bolton, M. D. (2013). Stiffness of clays and silts: Normalizing shear modulus and shear strain. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(9), 1575-1589.
- Vilaplana, A. S. D. G., Ferreira, V. J., López-Sabirón, A. M., Aranda-Usón, A., Lausín-González, C., Berganza-Conde, C., and Ferreira, G. (2015). Utilization of Ladle Furnace slag from a steelwork for laboratory scale production of Portland cement. *Construction and Building Materials*, 94, 837-843.
- Von Quintus, H. L. (1994). Performance prediction models in the Superpave mix design system, *SHRP*, Washington, 1-79.
- Von Soos, P., and Bohac, J. (2002). Properties of soils and rocks and their laboratory determination. *Geotechnical Engineering Handbook*, 1, 119-206.
- Wang, H., and Al-Qadi, I. L. (2010). Near-surface pavement failure under multiaxial stress state in thick asphalt pavement. *Transportation Research Record*, 2154(1), 91-99.
- Wang, L., Li, J., Tao, Y., and Wang, Q. (2019). Compressive characteristics of geogrid-reinforced steel slag. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 304(4), 042002.
- Wang, Z., (2016). *Discrete element modeling of geogrid reinforced soil*, Doktora Tezi, Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen und Institut für Grundbau, Alanya, 1-142.
- Webster, S. L. (1991). Geogrid Reinforced Base Course for Flexible Pavements for Light Aircraft: Literature Review and Test Section Design, *Federal Aviation Administration*, 1-40.

- Weissman, S. L. (1999). Influence of tire-pavement contact stress distribution on development of distress mechanisms in pavements. *Transportation Research Record*, 1655(1), 161-167.
- Wen, H., Wu, S., and Bhusal, S. (2016). Performance evaluation of asphalt mixes containing steel slag aggregate as a measure to resist studded tire wear. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(5), 04015191.
- Wichtmann, T., and Triantafyllidis, T. (2009). Influence of the grain-size distribution curve of quartz sand on the small strain shear modulus G_{max} . *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(10), 1404-1418.
- Wu, Z., and Chen, X. (2011). Prediction of permanent deformation of pavement base and subgrade materials under accelerated loading. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 4(4), 231.
- Xia, K., and Yang, Y. (2012). Three-dimensional finite element modeling of tire/ground interaction. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 36(4), 498-516.
- Yadav, P.M.G., Bharath, S., Kumar, M.M., Reddy, M.N., and Reddy, G.C. (2018). Usage of geogrids in flexible pavement design. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 7(4), 144-153.
- Yang, X., Han, J., Pokharel, S. K., Manandhar, C., Parsons, R. L., Leshchinsky, D., and Halahmi, I. (2012). Accelerated pavement testing of unpaved roads with geocell-reinforced sand bases. *Geotextiles and Geomembranes*, 32, 95-103.
- Yi, T. (2008). *Performance evaluation of steel slag as natural aggregates replacement in asphaltic concrete*. Yüksek Lisans Tezi, Universiti Sains Malaysia, Malezya.
- Yıldırım, İ. Z. (2022). Türkiye’de Çıkan Endüstriyel Yan Ürünlerin Dolgu Özellikleri Üzerine DeneySEL Bir İnceleme. *Teknik Dergi*, 33(6), 12789-12815.
- Yıldırım, I. Z., and Prezzi, M. (2009). Use of steel slag in subgrade applications. *JTRP Technical Reports*, West Lafayette Indiana, 14-256.
- Yıldırım, I. Z., and Prezzi, M. (2011). Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Advances in Civil Engineering*, 2011, 463638.
- Yıldırım, I. Z., and Prezzi, M. (2015). Geotechnical properties of fresh and aged basic oxygen furnace steel slag. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(12), 04015046.
- Yoder, E. J., and Witczak, M. W. (1991). *Principles of pavement design*. ABD: John Wiley & Sons, 3-691.

- Yoo, P. J., Al-Qadi, I. L., Elseifi, M. A., and Janajreh, I. (2006). Flexible pavement responses to different loading amplitudes considering layer interface condition and lateral shear forces. *The International Journal of Pavement Engineering*, 7(1), 73-86.
- Yoo, P. J., and Al-Qadi, I. L. (2007). Effect of transient dynamic loading on flexible pavements. *Transportation Research Record*, 1990(1), 129-140.
- Zhang, G., Zheng, Y., and Kang, H. (2013). Effect of loading condition and temperature on dynamic properties of asphalt mixtures. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, 28(2), 309-313.
- Zhao, J., and Wang, H. (2021). Dynamic pavement response analysis under wide-base tyre considering vehicle-tyre-pavement interaction. *Road Materials and Pavement Design*, 1-17.



Gazili olmak ayrıcalıktır