



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Çelikhane cürufunun yol temel ve alttemel malzemesi olarak kullanılması

Utilization of steel slag as road base and subbase material

Yazar(lar) (Author(s)): Hüseyin KARADAĞ¹, Seyhan FIRAT², Nihat Sinan IŞIK³

ORCID¹: :0000-0002-0120-4342

ORCID²: 0000-0003-3649-0999

ORCID³: 0000-0002-5104-9504

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Karadağ H., Fırat S. ve Işık N.S., “Çelikhane cürufunun yol temel ve alttemel malzemesi olarak kullanılması”, *Politeknik Dergisi*, 23(3): 799-812, (2020).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.612190

Çelikhane Cürufunun Yol Temel ve Alttemel Malzemesi Olarak Kullanılması

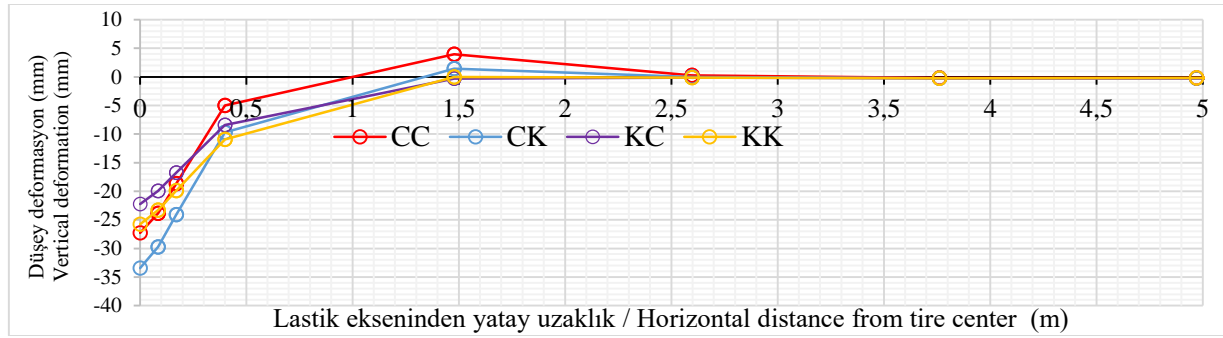
Utilization of Steel Slag as Road Base and Subbase Material

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Çelikhane Cürufunun yol inşaatında kullanılması (Utilization of steel slag in road construction)
- ❖ Esnek yol üst yapısı (Flexible highway pavement)
- ❖ Çelikhane cürufunun mühendislik özellikleri (Engineering properties of steel slag)
- ❖ Yol üst yapısının dinamik analizi (Dynamic analysis of highway pavement)

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada çelikhane cürufunun yol üst yapısında kullanılabilirliği sonlu elemanlar analizi ile değerlendirilmektedir. / In this study, utilization of steel slag in flexible pavement is evaluated by using finite element analyses.



Şekil. Asfalt yüzeyinde oluşan düşey deformasyonlar /Figure. Rutting on the asphalt surface

Amaç (Aim)

Çelikhane cürufunun yol üst yapısında kullanılabilirliğini değerlendirmek / To evaluate the steel slag utilization in road construction.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Çalışma kapsamında çelikhane cürufunun yol temel ve alttemelinde kullanılabilirliği sonlu elemanlar analizi ile değerlendirilmiştir. Toplam dört farklı yol kesiti dinamik olarak analiz edilmiştir. Çelikhane cürufunun deformasyon davranışı kırmataş ile karşılaştırılmıştır. / In this study, the utilization of steel slag in road base and subbase layers are evaluated by using finite element method. Four different road cross-section are analysed dynamically. Deformation behaviour of steel slag is compared to crushed stone.

Özgünlük (Originality)

Yol üst yapısının dinamik analizi, çelikhane cürufunun tekrarlı trafik yükleri altındaki deformasyon davranışı / Dynamic analysis of road pavement, deformation behaviour of steel slag under repetitive traffic loads

Bulgular (Findings)

Dört kesit analiz edilmiştir. Çelikhane cürufunun doğal agrega yerine yol granüler tabakalarında kullanılabileceği belirlenmiştir. En efektif sonuç alttemel tabakasında kullanılması durumunda elde edilmiştir. / Four different road cross-section are analysed. The results show that the steel slag can be used in unbound layers. The best result is obtained when steel slag used as subbase layer.

Sonuç (Conclusion)

Yol granüler tabakalarında çelikhane cürufunun doğal agrega yerine kullanılabileceği belirlenmiştir / The results show that the steel slag can be used in unbound layers of road instead of natural aggregate.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Çelikhane Cürufunun Yol Temel ve Alttemel Malzemesi Olarak Kullanılması

Araştırma Makalesi / Research Article

Hüseyin KARADAĞ^{1*}, Seyhan FIRAT², Nihat Sinan IŞIK²

¹Aile Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı, Türkiye

²Teknoloji Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 28.08.2019 ; Kabul/Accepted : 24.10.2019)

ÖZ

Endüstriyel üretim sonucu oluşan atıkların geri kazanımı veya farklı sektörlerde kullanılmak suretiyle değerlendirilmesi doğal kaynakların korunması adına günümüz teknolojileri için önemli bir konu olmuştur. 2014 yılı verilerine göre Türkiye’de çelikhane cürufunun ancak %41’i geri dönüştürülmektedir. Geri kalan çelikhane cürufu bertaraf edilmekte veya düzensiz depolanmaktadır. Bu çalışmada çelikhane cürufunun yol üst yapısında temel ve alttemel malzemesi olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında kontrol kesiti olarak kırmataş temel ve kırmataş alttemelden oluşan yol kesiti analiz edilmiştir. Çelikhane cürufu ise temel ve alttemelde olmak üzere birlikte ve ayrı ayrı kullanılmıştır. Toplam dört farklı yol kesitinin 400 kPa yük altında, 20.111 tekrarlı yükleme yapılarak iki boyutlu sonlu elemanlar metodu ile aksisimetrik analizleri gerçekleştirilmiştir. Cüruf dinamik kayma modülünü elde etmek için rezonant kolon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucu yol temel ve alttemel tabakalarında çelikhane cürufunun doğal agrega yerine kullanılabileceği belirlenmiştir. Cürufun alttemelde kullanıldığı KC kesiti ise düşey deformasyonlar açısından en iyi sonucu vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Çelikhane cürufu, sonlu elemanlar, temel, alttemel.

Utilization of Steel Slag as Road Base and Subbase Material

ABSTRACT

One of the important topic for the current technologies is to protect the natural resources by using industrial waste materials that are produced during industrial manufacturing. According to 2014’ statistics, only 41% of steel slag is recycled in Turkey. The remaining amount of steel slag produced in Turkey was disposed or stored in wild life. In this study, the utilization of steel slag in road base and subbase layers are evaluated by using finite element method. Deformation behaviour of steel slag is compared to crushed stone. Four different road cross-section are analysed by using axisymmetric finite element method. Analyses are carried out under 400 kPa wheel pressure for 20.111 cyclic loads. Steel slag deformation parameter was obtained by carrying out resonant column tests. The results show that the steel slag can be used in road base and subbase layers instead of natural aggregate. The minimum vertical deformation was obtained in the KC cross-section where the steel slag is used in the subbase layer.

Keywords: Steel slag, finite element, base, subbase.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

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

Doğal kaynakların tüketilerek gelecek nesillerin yaşamının tehlikeye sokulmasıyla karşı karşıya kalınmıştır. Teknolojik gelişmelere paralel olarak artan arz ihtiyacının sınırlı doğal kaynaklardan karşılanması zorunluluğu, ekonomik anlamda sürdürülebilir uluslararası rekabetçi bir ulusal sektör yaratmak ve gelecek nesillere yaşanabilir bir dünya bırakmak için

çevresel faktörler dikkate alındığında, endüstriyel üretim sonucu atıkların geri kazanımı veya farklı sektörlerde kullanılmak suretiyle değerlendirilmesi günümüz teknolojileri için önemli bir konu olmuştur.

Doğal kaynakların ve enerjinin verimli kullanılmasını gerektiren endüstriyel süreçler arasındaki simbiyotik ilişki, sürdürülebilir endüstriyel faaliyetlerin başlıca yollarındandır. Bu bağlamda, hammadde kullanmak yerine bazı endüstriyel işlemlerin yan ürünleri girdi olarak diğer bazı endüstriyel işlemlerde kullanılmaktadır [1]. Böylece doğal kaynaklar korunarak, enerji ihtiyacı azaltılmış ve gelecek nesillere daha iyi bir çevre bırakılmış olacaktır.

Dünya genelinde agrega üretimi % 58’lik pay ile tüm maden üretimi içinde birinci sıradadır. Avrupa’da ortalama agrega kullanımı 7 ton/kişi iken, bu rakam ülkemizde 4 ton/kişi civarındadır [2]. Karayolu inşaatı alt yapısında en çok kullanılan malzeme büyük çoğunluğu

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : karatagh@hotmail.com

taş ocakları ve dere yataklarındaki doğal kaynaklardan elde edilen agregadır.

Çelik üretiminde, yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufu bazik oksijen cürufu (BOF) ve elektrik ark fırın cürufu (EAF) yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Entegre üretim yapan tesislerde bir ton çelik üretiminde yaklaşık 100–150 kg (% 10–15) çelikhane cürufu oluşmaktadır [3, 4]. Dünya genelinde yılda elli milyon ton çelikhane cürufu üretilmektedir [5]. Türkiye genelinde, 2014 yılında 5.4 milyon ton civarında çelikhane cürufu, açığa çıkmıştır [6]. Çelikhane cürufunun dünyadaki başlıca kullanım sahaları; asfalt agregası, dolgu malzemesi, çimento katkısı, zemin iyileştirme, demiryolu balastı, yol üstü yapı temeli, riprap malzemesinin yanı sıra çevre ve tarım alanındaki uygulamalardır [4, 7-10].

Bazik oksijen fırını (BOF) çelikhane cürufu genel olarak silt boyutundan çakıl boyutuna değişen dane boyutuna sahip iyi derecelenmiş bir malzemedir. Büyük ölçekli kesme kutusu deney sonuçlarına göre kritik içsel sürtünme açısı ve pik sürtünme açısı 43°'nin üstündedir. Elektrik ark fırın (EAF) cürufu kritik sürtünme açısı ise 40°'nin üstündedir [11].

Çelikhane cürufunun önemli bir bölümü inşaat mühendisliği alanında kullanılmaktadır. İnşaat mühendisliği alanındaki çelikhane cürufu kullanımını çimento ve beton sanayi, yol uygulamaları ile geoteknik uygulamalar olmak üzere üç başlığa ayrılabilir [11]. Çelikhane cürufunun yol yapımında kullanılması 1979 yılından beri Japon Endüstri Standardında yer almakta ve bu tarihten beri nakliye maliyetleri açısından ekonomik olan yerlerde yol temel ve sıcak asfalt karışımlarında kullanılmaktadır [4, 12].

Fırat vd., yaptıkları çalışmada kaolin kili, uçucu kül, çelikhane cürufu ve kireci belli oranlarda karıştırarak, optimum su muhtevasında hazırlayıp sıkıştırdıkları numunelere yapılan kompaksiyon, serbest basınç ve CBR deneylerinde karışım oranına bağlı olarak kompaksiyon, serbest basınç ve CBR değerlerinde önemli artış olduğunu gözlemlemişlerdir [13]. Yol altyapısında zemin iyileştirme malzemesi olarak kullanılması ile ilgili yapılan çalışmada ise çelikhane cürufunun yol alt tabakalarında kullanılabilirliği ve böylece atık olarak ortaya çıkan bu malzemenin değerlendirilerek ekonomiye katkı sağlayabileceği değerlendirilmiştir.

Çelikhane cürufu yol uygulamalarında hem bağlayıcı tabakalarda hem de bağlayıcısız granüle tabakalarda temel ve alttemel malzemesi olarak kullanılmıştır [11]. Marn ve kum gibi doğal agregaya değişen oranlarda çelikhane cürufu katılmasıyla oluşan karışımlarında %45'e varan CBR değerleri elde edilmiştir [14]. Yapılan çalışmalar elektrik ark fırın (EAF) cürufu esneklik modülünün doğal agregaya göre oldukça yüksek olduğunu göstermiştir. Düşük trafik hacmine sahip yollarda temel malzemesi olarak kullanıldığında yol maliyetini önemli ölçüde azaltmaktadır [15]. Çimento ile aktive edilmiş çelikhane cürufu doğal zemin karışımlarının yol tabanında kullanılması durumunda,

temel tabakasının daha ince seçilebilmesine olanak vermesine ve yol yapım maliyetini düşürebileceği görülmüştür [16].

Behiry deneysel ve numerik çalışmasında kireç taşına belli oranlarda çelikhane cürufu katılmasının CBR, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve rezilient modül değerlerinde artışlar sağladığını gözlemlemiştir. Optimum oran %70 çelikhane cürufu ve %30 kireç taşı karışım oranında elde edilmiştir. Çelikhane cürufu ilavesi tekerlek izi ve yükten 60 cm mesafeye kadar deformasyon değerlerinde azalma sağlamıştır [17].

Sas vd., yol yapımında alternatif malzeme olarak kullanılması amacıyla çelikhane cürufunun kimyasal ve geoteknik özelliklerinin belirlenmesi için yaptıkları çalışma kapsamında CBR deneyi, plaka yükleme deneyi ve kimyasal analizler gerçekleştirmişlerdir. Kimyasal testler çelikhane cürufu kimyasal bileşiminin yol uygulamaları için tehdit oluşturmayacağı yönünde sonuçlanmıştır. Laboratuvar ve saha deneyi sonuçlarından elde edilen CBR ve esneklik modülü (Mr) değerleri ise çelikhane cürufunun orta trafikteki yollarda alttemel ve yüzey kaplaması tabakalarında kullanılabilirliğini göstermiştir [18]. Sıcak asfalt karışımlarında daha yüksek optimum bitüm oranına rağmen doğal agrega ile karşılaştırıldığında çelikhane cürufu yüksek esneklik modülü ve düşük tekerlek izi değerleri nedeniyle sürdürülebilir esnek yol üst yapıları için alternatif bir malzemedir [19, 20]. Bir başka çalışmada, Asi vd.'nin çalışmasında çelikhane cürufunun kimyasal ve toksidik analizlerinin, malzemenin karayolu yapımında güvenle kullanılabilirliğini göstermiştir [21].

Ereğli demir çelik fabrikası cürufunun asfalt betonunda agrega olarak kullanılması için yapılan çalışmada marshall stabilite, indirekt çekme, rijitlik modülü, statik yüklemeli sünme sertliği deneyleri yapılmış ve çelikhane cürufunun bitümlü sıcak karışımlarının performansını kapsamlı olarak düzelttiği görülmüştür. Stabilite değerleri, indirekt çekme rijitlik modülü, statik yüklemeli sünme sertliği modülü sonuçları açısından doğal agregaya göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir [22].

Çelikhane cürufunun yol üst yapısında kullanılması ile ilgili yapılan çalışmalarda çelikhane cürufu karışımlarının aşınma ve taş mastik asfalt (TMA) tabakasında kullanılması durumunda kalıcı deformasyona direncinin doğal agregaya oranla % 35,1 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Akma ve stabilite değerleri açısından Karayolları Teknik Şartnamesi (KTS 2013) içinde kaldığı belirlenmiştir [23, 24]. Çelikhane cürufu, hava tesirlerine karşı dayanıklılık, aşınma ve yassılık indeksi açısından da Karayolları Teknik Şartnamesinin temel ve alttemel ile ilgili sınır değerleri içinde kalmaktadır [23, 25-29].

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

hesaplanmasını mümkün kılan sayısal yöntemler diğer bilimsel konularda olduğu gibi yol üstyapısının tasarımında da kullanılagelmiştir.

Bu çalışmada yol yapısı performansa dayalı deneysel yöntemler yerine yol alt ve üst yapılarının malzeme bünye modellerini dikkate alan, malzemelerde oluşan gerilmelere ve bu gerilmelerin trafik yükleri altındaki değişimini de hesaba katan deformasyon odaklı sayısal analizler yapılmıştır. Bu analizler için gerekli olan cüruf dinamik parametreleri ise rezonant kolon deneyleri ile elde edilmiştir. Bir adet kontrol kesiti ve cürufun farklı tabaklarda kullandığı üç farklı kesit analiz edilmiştir. Analizler sonuçları cüruf malzemesinin granüle temel ve alttemel tabaklarında tekrarlı trafik yükleri altında dinamik performans açısından doğal agrega yerine kullanılabilirliğini göstermiştir. Kesit analizlerine göre çelik cürufu alttemel malzemesi olarak kullanıldığında en iyi performansı göstermiştir.

2. MATERYAL (MATERIAL)

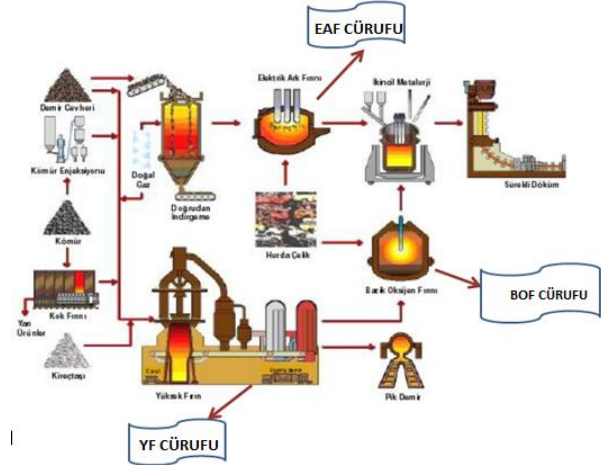
2.1. Çelikhane cürufu (Steel Slag)

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

Yüksek Fırın Cürufu dünyada olduğu gibi Türkiye’de de çimento sanayi, hazır beton gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. KGM bünyesinde “Elektrik Ark Fırını İle Çelik Üretiminde Elde Edilen Cürufun Yol Yapımında Kullanımı, Performansı ve Mevzuat Altyapısının Oluşturulması” isimli proje tamamlanmıştır. İzmir Büyükşehir Belediyesi bünyesinde elektrik ark fırını (EAF) cürufunun karayolu alt temel tabakasında kullanılması ile ilgili uygulama çalışmaları yapılmaktadır. Ancak çelik üretiminde bazık oksijen

fırınından (BOF) elde edilen çelikhane cürufu ile ilgili kullanım ve çalışmalar ülkemizde henüz istenen seviyede değildir.

Entegre üretim yapan tesislerde akım şeması ve ortaya çıkan cüruf atıklar Şekil 1’de görülmektedir. Yüksek fırından ergimiş halde elde edilen sıvı pik demir çelik üretim sürecine katılmak üzere bazık oksijen fırınına aktarılır. Burada safsızlıkları giderilerek çelik halini alırken, atık malzeme olarak Çelik (BOF) Cürufu oluşur.



Şekil 1. Çelik üretim aşamaları ve cüruf oluşumu (Steel production process and slag formation) [3]

Çelikhane cürufunun parke, bordür, yağmur oluğu, hazır beton ürünleri, granüle ürünler, raspa kumu, asansör ve beyaz eşya denge ağırlığı, asfalt agregası, alt ve üst temel malzemeleri ve muhtelif ebatlarda dolgu malzemesi olarak geri kazanımı yapılmaktadır. Geri kazanıma gönderilemeyen çelikhane cürufu, yeterli alanı bulunan kuruluşlar tarafından, tesis içerisinde geçici depolanmakta, alanı uygun olmayan tesisler tarafından ise, düzenli depolama alanında bertaraf edilmektedir. Çizelge 1’de 2014 yılında Türkiye’de üretilen çelikhane cürufunun kullanım miktarları ve geri kazanım miktarları yer almaktadır.

Çizelge 1. Çelikhane cürufunun üretim-geri kazanım miktarları (Production and recycling amounts of steel slag in Turkey) [6]

İl	Çelikhane Cürufu	Atık/Bertaraf	Geri Kazanım	Geri Kazanım (%)
Kocaeli	874.327,00	494.117,00	380.210,00	%43,50
Bursa	35.500,00	7.500,00	28.000,00	%78,90
Tekirdağ	132.000,00	47.000,00	85.000,00	%64,40
Çanakkale	459.343,00	50.529,00	408.814,00	%89,00
Bilecik	8.400,00	4.000,00	4.400,00	%52,40
İzmir	490.580,00	182.907,00	307.673,00	%62,70
Zonguldak	449.848,00	261.327,00	188.521,00	%41,90
Karabük	266.760,00	0,00	243.540,00	%91,30
Samsun	150.206,00	150.206,00	0,00	%0,00
Osmaniye	619.819,00	608.745,00	11.074,00	%1,80
Hatay	1.131.695,00	901.155,00	230.540,00	%20,40

Yol inşaatlarında kullanılan agregaların maliyetindeki en önemli unsur nakliye maliyetleridir. Ancak endüstriyel atıkların kullanılmasının ekonomik açıdan doğal agregaya göre avantaj ve dezavantajı değerlendirildiğinde tek başına edinim ve nakliye bedellerinin hesaplanması yetersiz bir değerlendirme olacaktır. Çünkü bu atıkların bertaraf edilmesi veya depolanması için katlanılacak maliyetlerin de değerlendirilmesi gerekmektedir. Doğal kaynaklardan tasarruf sağlanarak gelecek nesillere de kullanabilecekleri doğal kaynaklar bırakılması suretiyle sürdürülebilir bir endüstri ve sürdürülebilir bir çevre politikası sağlanması da büyük resimde görülmesi gereken diğer faktörlerdir. Sürdürülebilirlik; çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik olmak üzere üçlü sacayağı olan bir yapıdır [30].

2.2. Çelikhane cürufunun Kimyasal Özellikleri (Chemical Properties of Steel Slag)

Çelikhane sıvı pik demir içindeki istenmeyen elementlerin oksitlenme yoluyla giderilmesi için sıcak metal ve hurdaya yardımcı hammadde olarak yanmış kireç (CaO), kireçtaşı (CaCO₃), dolomit [CaMg(CO₃)₂] gibi cüruf yapıcı malzemeleri ilave edilir [31]. Çelikhane cürufunda bulunan başlıca bileşikler; CaO, MgO, MnO, SiO₂, Al₂O₃, FeO ve Fe'dir.

Çizelge 2 ve Çizelge 3'de çelik üretim sürecinde kullanılan yöntemle bağlı olarak ortaya çıkan bazik oksijen fırın (BOF) cürufu ve elektrik ark fırın (EAF) cürufunun literatürdeki verilere göre kimyasal bileşimi görülmektedir [32].

Çizelge 2. BOF cürufu kimyasal bileşimi (Chemical composition of BOF slag) [32]

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

Çizelge 3. EAO cürufu kimyasal bileşimi (Chemical composition of EAF slag) [32]

Referans	Oksit kompozisyonu (%)									
	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	Serbest CaO
Yi vd	30-50	10-18	11-20	8-13	5-6	8-22	5-10	2-5	-	-
Pasetto ve Baldo	29,60	9,30	13,02	3,65	-	32,84	5,09	-	0,35	-
Wang vd	35-60	2-9	9-20	5-15	-	15-30	3-10	1-2	-	-
Lekakh vd	32,10	8,60	19,4	9,4	-	-	6,8	-	0,4	-
Tsakiridis vd	35,70	6,25	17,53	6,45	26-36	-	2,5	-	0,76	-
Nicolae	40,78	4,23	17,81	8,53	3,97	9,25	9,79	0,74	-	-
Tossavainen vd	45,50	3,70	32,20	5,2	1	3,3	2	-	-	-
Tossavainen vd	38,80	6,70	14,10	3,9	20,3	5,6	5	-	-	-
Manso vd	23,90	7,40	15,30	5,1	-	-	4,5	-	-	-
Manso vd	23-32	3,50-7,00	8,15	4,8-6,6	11-40	7-35	2,50-4,5	-	-	0,45
Shi	35-60	2-9	9-20	5-15	-	15-30	3-8	0,01-0,25	-	0-4

Çizelgelerden de görüldüğü gibi kimyasal içerik benzer olmakla birlikte yüzde ağırlık oranları araştırmacıya ve

üretim biçimine (BOF, EAF) göre kısmen değişmektedir. Kimyasal içeriği belirleyen başlıca faktörler; üretim

biçimi, saflaştırma amacıyla üretime giren cüruf yapıcı malzeme, kullanılan hurda çelik olarak sayılabilir. FHWA'nın FHWA-RD-97-148 numaralı yayınına göre

üretim tarzından bağımsız olarak çelikhane cürufunun tipik kimyasal bileşimi Çizelge 4'de ki gibidir [33].

Çizelge 4. Çelikhane cürufunun Kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of steel slag)

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

Yukarıda da belirtildiği gibi her bir bileşik geniş bir aralık göstermektedir. Çelikhane cürufunun yaklaşık %90'ı CaO, MgO, SiO₂ ve FeO, oksitlerinden oluşmaktadır. Hacim stabilitesi açısından cürufun yol yapımında kullanılmasına etki eden en önemli faktör CaO, MgO oksitleridir [18, 34]. Bu nedenle yol yapımında kullanılacak cürufun kimyasal içerikleri mutlaka belirlenmelidir. Arazideki şartlara göre kimyasal analiz değerlendirilmeli ve hangi arazi ve iklim koşullarında kullanılacağına ilişkin teknik değerlendirme mutlaka yapılmalıdır. Özellikle şişme potansiyeli açısından CaO, MgO oksitlerinin değerlendirilerek gerekirse yaşlandırma prosesinden sonra kullanılmalıdır. Yapılan araştırmalar MgO oksidinin hidratasyon hızının daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Bu yönüyle cüruftaki MgO oksidinin şişme potansiyeli ve test süreleri ön plana çıkmaktadır. %10 kadar C sınıfı uçucu kül ilavesi hem BOF hem de EAF cürufularının şişme potansiyelini önemli ölçüde sınırladığı gibi

mukavemet özelliklerini de arttırdığı ortaya konulmuştur [11].

2.3. Çelikhane cürufu Fiziksel Özellikleri (Physical Properties of Steel Slag)

Yol üst yapısında kullanılan granüle malzemeler tekrarlı trafik yükleri ve belli iklim koşullarına maruz kalırlar. Hem trafik yüklerinden kaynaklı dış yüklere hem de iklim koşullarından kaynaklı ısınma-soğuma, donma-çözülme gibi etkilere karşı yeterli mukavemeti göstermek zorundadır. Bunun için yol üst yapısında kullanılan granüle malzemelerin hacim stabilitesi, aşınma dayanımı, hava tesirlerine dayanıklılık, su emme vb. özellikler açısından belirli değerlere sahip olması gerekmektedir. Çizelge 5'te karayolunda kullanılan granüle malzemelerin sahip olması gereken fiziksel özellikler açısından çelikhane cürufunun FHWA tarafından belirlenmiş temel fiziksel özellikleri yer almaktadır [33]

Çizelge 5. Çelikhane cürufunun genel özellikleri (General properties of steel slag) [35]

Çelikhane cürufunun fiziksel özellikleri	Değer
Los Angeles Aşınma (ASTM C131), %	20 - 25
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi (ASTM C88), %	<12
İçsel sürtünme açısı	40° - 50°
Kalifornia Taşıma Oranı (CBR), % en büyük boyut 19mm)**	300'e kadar
Sertlik (Moh skalası)*	6 - 7
*Dolomit sertliği 3-4	

Yapılan literatür taramalarında çelikhane cürufunun fiziksel özellikleri açısından doğal agrega ile benzer mukavemet ve özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Çelikhane cürufunun fiziksel özellikleri için belirlenen

bazı değerler Karayolları Teknik Şartnamesindeki değerlerle karşılaştırmalı olarak Çizelge 6'da yer almaktadır.

Çizelge 6. Çelikhane cürufu fiziksel özellikleri (Physical properties of steel slag)

Test	Granit	Çelikhane cürufu [32]	ASA [7]	KTŞ [36]		BSK [37]
				Alttemel	Temel	Aşınma
Los Angeles aşınma %	9,80	9,80	12-18	≤45	≤35	≤30
Yassılık indeksi %	19,00	4,00		≤30	≤25	≤30
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık %	5,20	ND	<4	≤25	≤20	≤16
Parlaklık/cilalama değeri %	52,70	56,60	58-63			≤50
Su emme %	0,51	1,20	1-4	≤3,50	≤3,00	≤2,00
Soyulma deneyi %		>95				≤50

Çizelge 5 ve Çizelge 6 birlikte değerlendirildiğinde çelikhane cürufunun aşınma, hava tesirlerine karşı

dayanıklılık, su emme, gibi fiziksel özellikler açısından Karayolları Teknik Şartnamesi için belirlenen değerleri

sağladığı, temel ve alttemel malzemesi olarak kullanılabilirliğini göstermektedir.

2.4. Çelikhane cürufu Mekanik Özellikleri (Mechanical Properties of Steel Slag)

FHWA tarafından desteklenen Joint Transportation Research Programı çerçevesinde çelikhane cürufunun zemin uygulamalarında kullanılması amacıyla hazırlanan 2009/32 sayılı raporda çelikhane cürufunun; özgül

ağırlığının 3.29-3.34 aralığında, optimum su içeriğinin %4-%8, kuru birim hacim ağırlığının 19.5-21.8 kN/m³, %90 rölatif kompaksiyon numunesi üzerinde 100 kPa hücre basıncında yapılan konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli deney verilerine göre kritik içsel sürtünme açısının da 45° olduğu görülmüştür [11]. Çizelge 7’de farklı araştırmacılar tarafından belirlenmiş çelikhane cürufunun içsel sürtünme açısı değerleri yer almaktadır.

Çizelge 7. Çelikhane cürufunun mekanik özellikleri (Mechanical properties of steel slag)

Çelikhane cürufunun Mekanik Özellikleri	FHWA [33]	Perzi& Yıldırım [11]	Moghaddam (2011) [38]	Noureddin& McDaniel [39]
İçsel sürtünme açısı	40°- 50°	40°-50°	46°-57°	40°-50°
Kalifornia taşıma Oranı (CBR), en büyük boyut 19mm	%300’e kadar		26	% 300’e kadar

Çelikhane cürufu doğal agregaya göre oldukça yüksek kesme dayanımına sahiptir. Bunun başlıca nedeni pürüzlü doku, köşeli dane yüzeyi ve çok farklı çapa sahip danelerin varlığı sayılabilir [11]. CBR değerleri ise

%300’e kadar çıkmaktadır. Çizelgede 8’de Yonar tarafından yapılan çalışmada çelikhane cürufu değerleri ve KTŞ 2013 limitleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir [23].

Çizelge 8. CBR sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri (CBR results of steel slag and limits of technical specification) [23]

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

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

2.5. Çelikhane cürufu Kullanım Alanları (Utilization of Steel Slag)

Almanya’da 1998 yılında üretilen çelik cürufuların yaklaşık %97’si yüksek trafikli yollarda kaplama tabakası, temel, alttemel yol yapımı, su yapılarında anroşman ve diğer toprak işlerinde kullanılmıştır. Uzun

süredir devam eden başarılı deneyime bağlı olarak, çelik cüruf ürünleri Avrupa Atık Listesi ve Avrupa Birliği Atık Düzenlemesinden kaldırılmıştır [5]. Yüksek Fırın Cürufu dünyada olduğu gibi Türkiye’de de çimento sanayi, hazır beton gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Ancak entegre tesislerden elde edilen çelikhane cürufu ile ilgili kullanım ve çalışmalar ülkemizde sınırlıdır [40, 41]. ABD’de 2003-2009 yılları arasında çelikhane cürufunun kullanıldığı alanlar Çizelge 9 görülmektedir [10].

Çizelge 9. ABD’de çelikhane cürufunun kullanımı (Steel slag utilization in USA) (2003-2009)

Kullanıldığı Alanlar	Çelikhane cürufu Kullanımı, %						
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Beton Asfalt	17,00	12,90	15,60	12,10	14,40	10,90	8,20
Yol üstyapı temeli	46,40	63,50	53,00	51,00	51,30	60,30	59,90
Dolgu	11,00	9,60	10,50	17,90	13,30	10,80	12,70

Çizelge 9 (Devam). ABD’de çelikhane cürufunun kullanımı (Steel slag utilization in USA) (2003-2009)

Klinker Hammaddesi	5,40	5,50	6,90	6,90	6,70	5,00	2,20
Balast, çatı malzemesi, mineral yünü v.b	2,50	2,90	2,30	0,80	2,30	0,50	0,50
Diğer belirtilmeyen alanlar	17,60	5,60	11,70	11,30	12,00	12,50	16,50
Toplam	99,90	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Dünyadaki uygulamalar açısından çelikhane cürufu birçok inşaat mühendisliği uygulamasında kullanılan bir malzemedir. Avrupa'da üretilen çelikhane cürufunun yalnızca % 13'ü nihai depolamaya gitmektedir. Avustralya'daki başlıca kullanım alanları ise yüzey kaplama, asfalt agregası, temel ve alttemel malzemesi, dolgu malzemesi, drenaj, kuşlama vb. uygulamalardır [8].

Yüksek fırın cürufu ile karşılaştırıldığında bazik oksijen fırın (BOF) cürufunun kullanımı Türkiye'de henüz yetersiz seviyededir ve bu durum Erdemir gibi bazı büyük çelik üreticilerini cüruf depolama sorunuyla karşı karşıya kalmalarına neden olmaktadır. Türkiye Demir Çelik Üreticileri Derneği verilerine göre, Türkiye'de üretilen çelikhane cürufunun sadece %40'ı geri dönüşüm malzemesi olarak kullanılmaktadır (bkz. Çizelge 1) [6].

3. ESNEK YOL ÜST YAPISI (FLEXIBLE PAVEMENT)

Yol gövdesi altyapı ve üst yapı olmak üzere iki kısımdan oluşur. Altyapı yarma ve dolgulardan oluşmaktadır. Üst yapı ise, trafik yüklerini zeminine dağıtan, kaplama, temel ve alttemel tabakalarından oluşan tabakalı bir sistemdir. Bir üst yapı yapılmadan önce altyapı, üst yapıya istenen destek sağlayacak şekilde, şartnamelere uygun olarak hazırlanır. Üst yapının performansı taban zemininin fiziksel özellikleri ve durumu ile doğrudan ilintilidir. Yol üst yapısı, trafik yüklerinin ve doğal şartların etkisi altındadır. Trafik yükleri, taşıtların hareketleri sırasında radyal çekme ve basınç gerilmeleri ile düşey basınç gerilmeleri oluşturur. Deformasyonların şiddeti ve mertebesi, dingil yüklerinin büyüklüğü ve tekrar sayısı ile doğrudan orantılıdır [42, 43].



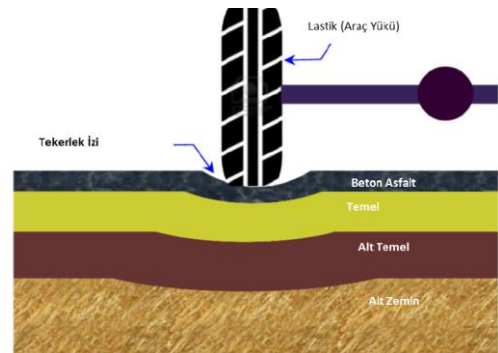
Şekil 2. Yolda oluşan tekerlek izi (Rutting in flexible pavement) [45, 46]

Yol üst yapı şartnamelerinde, elastik teoriyi esas alan esneklik modülü değeri dikkate alınarak üst yapılar projelendirilmektedir. Bu yöntemde malzemelerin doğrudan mukavemeti yerine tekrar eden yükler altında elastik modülü/resilient modül tayin edilmektedir. Üst yapı malzemeleri normal olarak elastik değildir ve her yük tekrarından sonra bir miktar plastik (kalıcı) deformasyon gösterirler. Bununla beraber, eğer trafik yükü malzemenin mukavemetine nazaran küçük ise,

Karayolu üst yapılarını üç temel kategoride toplamak mümkündür. Bunlar kullanılan üst yapı kaplama malzemesine bağlı olarak; asfalt kaplamalı esnek üst yapılar, beton kaplamalı rijit üst yapılar, kaplama tabakası olarak asfalt ve beton tabakasının birlikte kullanıldığı kompozit üst yapılarıdır. Bir esnek yol üst yapısı tipik olarak 2,5-25 cm kalınlığında asfalt karışım veya beton asfalt kaplama tabakası, 10-30 cm temel tabakası ve 10-50 cm kalınlığında alttemelden oluşur. Alt temel ise fiziksel/mechanik özellikleri iyileştirilmiş doğal zemin üzerinde yer alır. Her bir katmanın kalınlığı doğal zemin, iklim koşulları, kullanılan malzemelerin mühendislik özellikleri, dingil yükü ve tekrar sayısı ile yol proje ömrü gibi etkenlere bağlıdır [44].

Tüm dünyada ve ülkemizde yol üst yapılarının performans odaklı dizaynında, ASSHTO tarafından 1960'lı yıllarda geliştirilen ampirik yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemde performansı etkileyen faktörler; iklim şartları, kullanılan granüle malzemenin fiziksel özellikleri ile göreceli mekanik özelliklerinin esas alındığı CBR değerleri, bitümlü malzemenin stabilite değerlerini ölçmeye yönelik Marshall deneyi verileri, yeraltı suyunun durumu, alt taban malzemesinin indeks özellikleri ile diğer çevre şartları göz önüne alınarak değerlendirilmiştir. Kullanılan temel performans göstergeleri ise tekerlek izi değerleri ve çevre şartları ile dingil yükleri altında kaplama ve diğer üst yapı tabakalarında meydana gelen kırılmalar esas alınmıştır [45].

Esnek yol üst yapıları için en temel sorunlardan birincisi, dinamik trafik yükü kaynaklı, temel ve alttemel tabakalarında meydana gelen deformasyonların sebep olduğu tekerlek izidir (Şekil 2). Diğerleri ise yüzey çatlaklarıdır[46].



belirli miktarda yük tekrarından sonra malzeme elastik davranış göstermeye başlar [42].

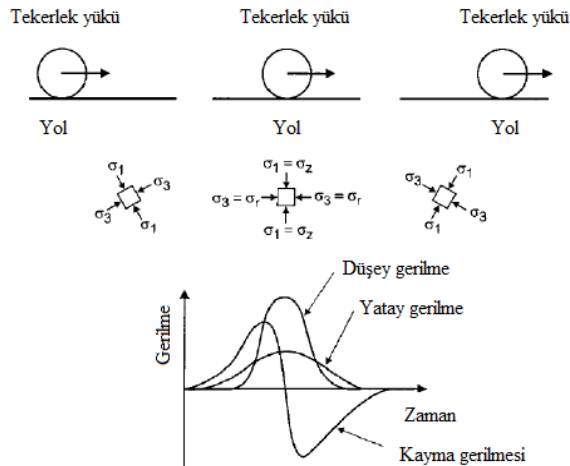
Doğrusal elastik davranan malzemelerde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Hooke Yasası gereği doğrusal kabul edilmektedir. Gerilme şekil değiştirme oranı doğrusal elastik aralıkta sabit olup malzemenin Young modülü (Elastik modül) olarak tanımlanır. Ancak doğadaki birçok malzemede olduğu gibi yolda kullanılan bağlayıcısız granüle malzemelerde oluşan deformasyonlar elastik ve plastik olmak üzere iki

kısımdan oluşmaktadır. Elastik deformasyonlar yük etkisi kalktıktan sonra geri döndürülebilir tersinir deformasyonlardır. Plastik deformasyonlar ise yük etkisi kalksa bile malzemede oluşan kalıcı deformasyonlardır.

3.1. Yol Üstyapısında Deformasyonlar (Deformations of Road Superstructure)

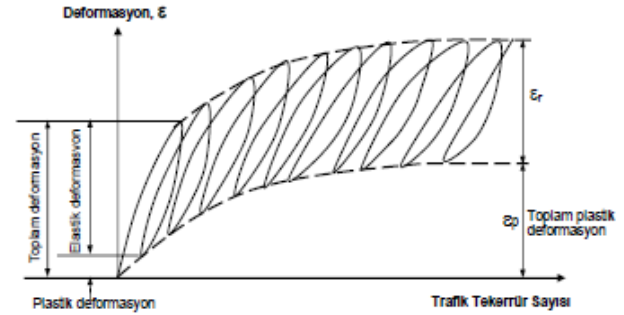
Yol yüzeyinde oluşan deformasyonlar; asfalt tabakası, granüle temel ve alttemel tabakaları ile doğal veya iyileştirilmiş zemin tabakalarında oluşan deformasyonların toplamıdır. Bu tabakalarda oluşan plastik deformasyonların toplamı asfalt tabakasının yüzeyine tekerlek izi olarak yansır.

Dinamik ve değişken tekerlek yükleri altında olan yol üst yapılarında oluşan yatay ve düşey gerilmeler ile kayma gerilmelerinin yönü ve büyüklüğü Şekil 3'te görüldüğü gibi sürekli değişir [47, 48]. Şekil 3'te granüle tabakada; düşey gerilmenin yatay gerilmeye daha düşük olduğu bölgede tekerlek geçişi sırasında yanıl genişleme oluşmakta, düşey gerilmenin yatay gerilmeye büyük olduğu bölgede ise basınç oluşmaktadır. Farklı dingil yükleri sırasında zeminde oluşan gerilme izleri sürekli değişkenlik göstermekte ve buda yolda en sık rastlanan iki durum olan tekerlek izi ve malzeme yorulmasından kaynaklı çatlakları tetiklemektedir [49]. Yolda oluşan hasarların doğru tahmini, ancak arazide oluşan yüklenme durumu ve gerçeğe en yakın malzeme bünye modeli ile mümkün olacaktır.



Şekil 3. Tekerek yükü altında oluşan gerilmeler (Stress distribution under a wheel) [48]

Granüle malzemelerde tekrarlı basınç gerilmelerinden oluşan deformasyonlar Şekil 4'te görüldüğü üzere elastik ve plastik olmak üzere iki bileşenden oluşur [42]. Elastik veya başka bir ifade ile rezilient deformasyonlar geri döndürülebilir deformasyonlar olup yük etkisi kalktığında deformasyonlar da ortadan kalkar. Plastik deformasyonlar ise yük etkisi kalksa bile deformasyonlar kalıcıdır ve geri döndürülemezdir.



Şekil 4. Tekrarlı yükler altında oluşan şekil değiştirmeler (Deformations under repetitive wheel load) [42]

Yüklemeye oluşan elastik deformasyon yük etkisi kalktıktan sonra tekrar sıfırlanır. Bu şekilde her bir yük tekrarı zamanla asfalt tabakasında yorulmaya neden olur ve sonuçta asfalt tabakasında çatlama ve kırılmalara neden olur. Tekrarlı trafik yükleri altında oluşan plastik deformasyonlar ise zamanla asfalt yüzeyinde tekerlek izi olarak adlandırılan çökmelere neden olur [46]

4. YÖNTEM (METHOD)

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

Esnek yol üstyapısının analiz ve dizaynı önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere; yol testlerine dayalı ampirik dizayn, limit kayma dayanımına dayalı analiz, belli bir deformasyon seviyesi ile sınırlandırılmış limit deformasyon metodu, yol testleri veya performansına dayalı regresyon metodu, mekanistik-ampirik metod olarak sıralanabilir [44].

Günümüzde kullanılan yol analiz metodlarının çoğu ampirik veya yarı ampirik yöntemlerdir. Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Ofisi (AASHTO) tarafından 1960'lı yıllardan itibaren geliştirilen ampirik yöntemler günümüze kadar dünyadaki pek çok ülkede küçük değişiklikler ile kullanılmaktaydı. Federal Karayolu İdaresi'nin (FHWA) sponsorluğunda 2004 yılında tamamlanan I-37A proje numaralı Ulusal İşbirliği Otoyol Araştırması Programı, Mekanik-Ampirik Karayolu Tasarımının (MEPDG) ilkelerini belirleyerek ampirik dizayndan mekanistik-ampirik dizayna geçişin başlangıcını oluşturmuştur [50].

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

Granüle malzemeler ve diğer zeminler belli bir birim deformasyon limitinden sonra lineer olmayan davranış sergilerler. Zeminlerin deformasyon modülleri zemindeki gerilme seviyesine bağlı olarak değişir. Ayrıca birçok araştırmacı, depremler ve benzeri tekrarlı dinamik yükler altındaki zeminlerin küçük gerinim seviyelerindeki deformasyon modüllerini geleneksel test yöntemlerinden elde edilen deformasyon modüllerine göre daha yüksek elde etmiştir.

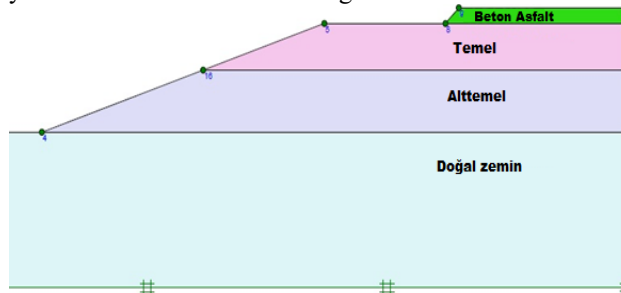
Günümüzde mevcut birçok bilgisayar programı yol esnek yol üstyapısının maruz kaldığı yükleri ve bu yükler altındaki deformasyon karakteristiklerini hesaplayabilecek kapasite ve özelliktedir. Dinamik yüklerin bilgisayar ortamında simülasyonu, yol yapısının farklı gerilme seviyelerindeki deformasyon karakteristikleri,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

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

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

4.1. 2D Fiziksel ve Sayısal Model (2D Physical and Numerical Model)

Geleneksel esnek yol üstyapıları sıcak asfalt karışımından oluşan koruyucu üst tabaka (HMA) ve bu üst tabakayı destekleyen granüle temel ve alttemelden oluşan çok tabakalı sistemlerdir (Şekil 5). Bu üst yapı yeterli taşıma gücüne sahip bir zemin tabakası üzerine inşa edilir. Zemin mukavemetinin yeterli olması veya trafik yüklerinin düşük olması durumunda temel ve alttemel tabakası birleştirilerek tek tabaka halinde de olabilmektedir. HMA tabakasının temel amacı yol üstyapısını olumsuz dış faktörlerden korumak; yeterli drenaj, gürültü kontrolü, yeterli sürtünme sağlayarak gerekli sürüş konforu sağlamak; esnek tepki sayesinde yolun uzun ömürlü olmasını sağlamaktır.



Şekil 5. Tipik yol üst yapısı kesiti (Conventional road cross-section)

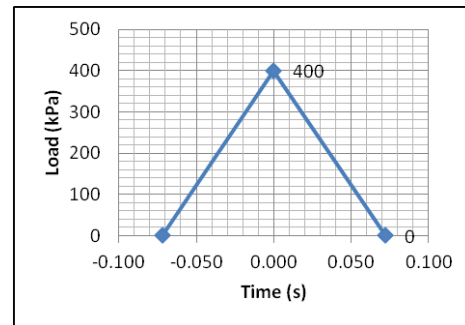
Yol üstyapısının herhangi bir noktasındaki gerilmenin aracın hızına ve elastik teoriden de bileneceği üzere noktanın derinliğine ve bağlı olacaktır. Basınç dağılımı ise haversine fonksiyon şeklindedir [44, 51]. Basitleştirilmiş yöntemle göre gerilme yoğunluğunun zamana göre dağılım fonksiyonu Eşitlik 1'de verilmiştir [44].

$$L(t) = q \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi t}{d} \right) \quad (1)$$

Yukarıdaki eşitlikte yer alan d basınç darbesinin süresi olup aracın hızına (s) ve lastik temas yarıçapına (a) bağlı olup Eşitlik 2'deki gibi ifade edilebilir. Eşitlikteki q ise $t=0$ anındaki maksimum yük yoğunluğudur ve haversine dağılıma göre $t=0$ anında önce ve sonra zamana bağlı olarak azalacaktır.

$$d = \frac{12a}{s} \quad (2)$$

Sayısal modelde haversin yükün temsil edilmesi için her yükleme adımı için en az altı alt adım gereklidir. Ancak dinlenme süresi olmayan üçgen yük darbesi için sadece iki alt adım yeterlidir. Daha düşük depolama kapasitesine ihtiyaç duyulduğundan ve daha az alt adım gerektirmesi nedeniyle hesaplama süresinin düşürülmesine fırsat verdiği için haversine yük yerine üçgen yük tercih edilmiştir. Şekil 6'da 400 kPa büyüklüğünde ve 0,144 saniyelik yükleme süresine sahip üçgen yük atımı görülmektedir.



Şekil 6. 400 kPa üçgen yük atımı (Triangular load distribution for 400 kPa)

Literatürdeki birçok çalışmada beton asfalt doğrusal elastik malzeme olarak modellenmiştir. Ancak Wang ve Al-Qadi; asfalt betonunun agrega, hava ve su içermesi nedeniyle zemin malzemesine benzer bir kompozisyona sahip olduğunu, ortalama sıcaklıklarda hem granüle özellikleri ve kohezif özellikleri olan Mohr-Coulomb malzeme modeli olarak modellenebileceğini belirtmişlerdir [52]. Analizlerde beton asfalt Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir. Tan vd. göre asfalt betonunun içsel sürtünme açısı sıcaklıktan bağımsız olarak kullanılan agregalar arasındaki kenetlenme ve taneler arası sürtünmenin bir fonksiyonu iken kohezyon değeri kullanılan bitümün özelliklerine bağlı olup sıcaklık ile değişen değerlere sahiptir [53]. J. R. Mattos vd., asfalt betonu için yaptıkları üç eksenli deneylerde geleneksel bitüm ile hazırlanmış numuneler üzerinde 25 C° sıcaklıkta yapılan deneylerde

içsel sürtünme açısı 46° ve yaklaşık 500 kPa kohezyon değerlerini elde etmişlerdir [54].

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

Kesit, iki boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak analiz edilmiştir. Analizler aksisimetrik yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Model boyutları, "R" yükleme yarıçapı olmak üzere 200Rx200R alınmıştır.

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

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

Kayma modülü, eşik kayma birim deformasyon ve sekant kayma modülleri sırasıyla aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

$$G_0 = G_0^{\text{ref}} \left(\frac{c' \cos \phi - \sigma_3' \sin \phi}{c' \cos \phi + p^{\text{ref}} \sin \phi} \right)^m \quad (3)$$

$$\gamma_{0.7} = \frac{1}{9G_0} \left[2c' (1 + 2 \cos \phi') + \sigma_1' (1 + k_0) \sin 2\phi' \right] \quad (4)$$

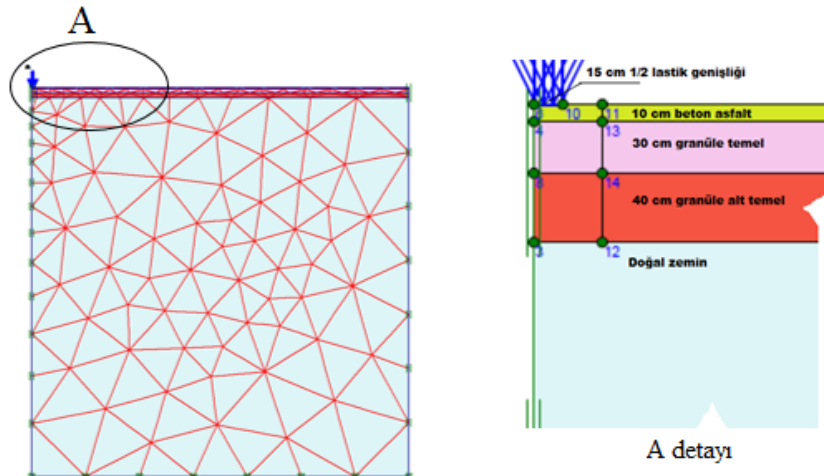
$$G_s = \frac{G_0}{1 + 0.385 \frac{\gamma}{\gamma_{0.7}}} \quad (5)$$

Burada; $G_{0\text{ref}}$ malzemenin 100 kPa referans basınç altında küçük birim deformasyonlardaki kayma gerilmesi, P_{ref} 100 kPa referans basınç, m gerilmeye bağlı rijitlik parametresi ve $\gamma_{0.7}$ ise 0,7 G_0 değerine karşılık gelen birim deformasyondur.

5. ANALİZLER (ANALYSES)

Çalışma kapsamında asfalt kaplama tabakasının kalınlığı 10 cm alınmıştır. Granüle temel ve alttemel tabakalarının kalınlığı ise sırasıyla 30 cm ve 40 cm alınmıştır. Taşıyıcı doğal zemin ise kil alınmıştır. Kesit, iki boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak, Plaxis programı ile analiz edilmiştir. Analizler aksisimetrik gerçekleştirilmiştir. Model tabanında ve kenarlarında, dinamik yüklerden kaynaklı olası yansımalar nedeniyle oluşacak ilave yük ve deformasyonları engellemek için sayısal modelin sınırları teker basıncı noktasından yeterince uzak olacak şekilde seçilmiştir. Model boyutları, "R" yükleme yarıçapı olmak üzere 200Rx200R alınmıştır. Bu boyutlar literatürde tavsiye edilen ölçüler ile uyumludur. Duncan (1968), makul sonuçlar için aksisimetrik modelin genişliğinin 12R ve derinliğinin 50R alınmasını önermiştir [55]. Kim, yapmış olduğu parametrik çalışmada 20RX140R boyutlarının seçilmesi durumunda model sınırlarının analiz sonuçlarına etkisinin ihmal edilebileceğini göstermiştir [56].

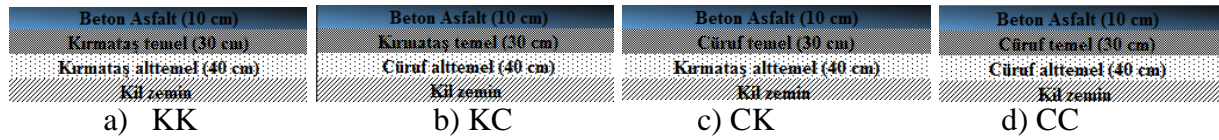
Tek lastik basıncı temas çapı 300 mm olarak modellenmiştir. Ancak iki boyutlu aksisimetrik analiz gerçekleştirildiği için hareketli yayılı yükün genişliği 150 mm alınmıştır. Temas basıncı 400 kPa olarak ve üçgen yük dağılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Model tabanında sabit, yanlarda ise yükleme yönünde serbest hareket edecek şekilde kayar mesnet kullanılmıştır. Model boyutları yatayda 30 m ve düşeyde ise 60 m seçilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Aksisimetrik model (Axisymmetric model)

Analizlerde cüruf malzemesinin temel ya da alttemel tabakalarının hangisinde kullanılmasının en iyi sonucu vereceğini bulmak amacıyla dört farklı kesit analiz edilmiştir (Şekil 8). Cüruf sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla birinci kesitte kırmataş temel ve kırmataş alttemelden (KK) oluşan kesit analiz edilmiştir. Analiz

edilen kesitler kırmataş temel-kırmataş alttemel (KK), kırmataş temel-cüruf alttemel (KC), cüruf temel-kırmataş alttemel (CK) ve cüruf temel-cüruf alttemelden oluşmaktadır. Kesitlerdeki asfalt kaplama tabakası ve kil zemin aynı seçilmiştir.



Şekil 8. Çalışmada kullanılan kesitler (Analyzed road cross-sections)

Çizelge 10’da analizlerde kullanılan malzemelere ait parametreler yer almaktadır. Asfalt betonu Mohr-Coloumb (MC); temel, alttemel ve doğal zemin ise HSsmall malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir. Kireçtaşı parametreleri, mekanistik-ampirik yol tasarımının temel tabakası için rezilient modül tayini araştırma programı kapsamında kireç taşı üzerinde yapılmış olan rezonant kolon deneylerindeki değerlerden alınmıştır [57]. Cüruf maksimum kayma modülü için bu

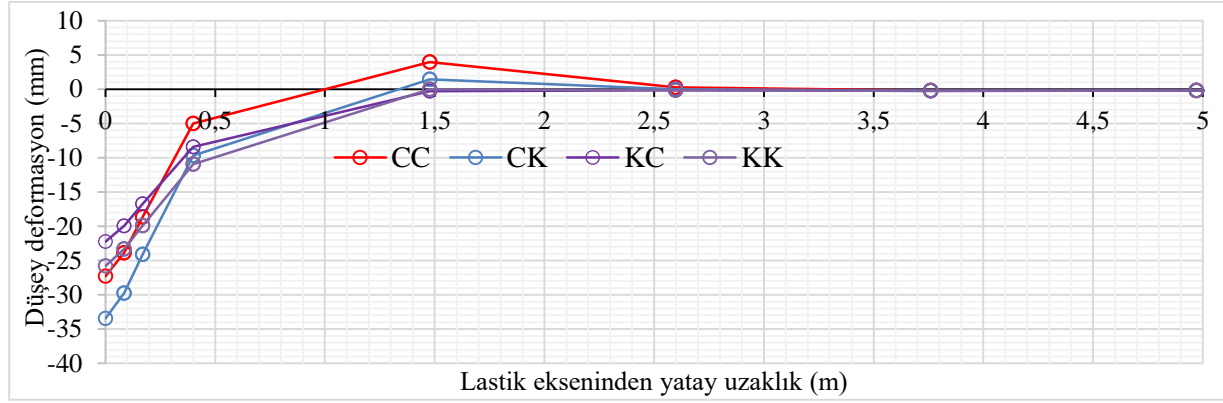
çalışma kapsamında farklı hücre basınçlarında rezonant kolon deneyleri yapılarak çevre basıncına bağlı maksimum kayma modülü değerleri tespit edilmiştir. Çizelge 10’da yer alan cüruf deformasyon parametreleri temel ve alttemel tabakalarında oluşan çevre basıncı esas alınarak rezonant kolon deneylerinden elde edilen değerlerdir. Dayanım parametreleri ise literatürdeki verilerden alınmıştır.

Çizelge 10. Analizlerde kullanılan malzemelere ait parametreler (Parameters of materials)

Malzeme Parametreleri	Beton Asfalt	Florida Kireç taşı Temel	Florida Kireç taşı Alttemel	Katı kil	Erdemir cüruf Temel	Erdemir cüruf Alttemel
Model	MC	HSsmall	HSsmall	HSsmall	HSsmall	HSsmall
E(MPa)	4500					
E_{50}^{ref} (MPa)		165	115	24	160	124
E_{ur}^{ref} (MPa)		495	345	72	485	372
G_0^{ref} (MPa)		185	128	55	180	138
γ_0		5×10^{-6}	5×10^{-6}	4.07×10^{-4}	2.18×10^{-4}	2.18×10^{-4}
ν	0,30	0,35	0,35	0,20	0,35	0,35
Kalınlık (m)	0,1	0,30	0,40	10,0	0,30	0,40
γ (kN/m ³)	24,00	21,33	20,77	18,00	23,11	22,47
C (kN/m ²)	500	40	40	100	47	45
ϕ (°)	46	40	35	10	47	45

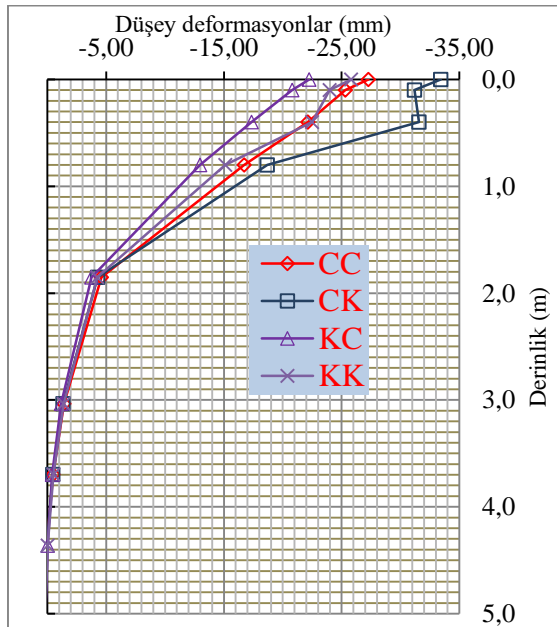
400 kPa lastik basıncı altında ve 20111 yükmeden sonra analiz edilen dört kesitte asfalt yüzeyinde oluşan deformasyonlar aşağıdaki Şekil 9’da yer almaktadır. Yatay eksen boyunca asfalt yüzeyinde oluşan deformasyonların grafikleri aynı eğilimdedir. Bütün kesitlerde maksimum oturma lastik orta noktasında oluşurken maksimum kabarmalar lastik orta noktasından itibaren 1,5 metre mesafede oluşmaktadır. Kabarmalar 1,5 metreden sonra azalmakta ve lastik orta noktasından itibaren yaklaşık 2,5 metrede sıfırlanmaktadır. Maksimum kabarma miktarı cüruf temel ve cüruf alttemelden (CC) oluşan kesitte meydana gelmekte ve kabarma miktarı 4 mm seviyesindedir. Maksimum oturma miktarı ise cüruf temel ve kırmataş alttemelden (CK) oluşan kesitte meydana gelmekte ve oturmalar 33 mm mertebesinde. Tekrarlı yükleme altında en iyi

performansı ise kırmataş temel ve cüruf alttemelden (KC) oluşan kesiti göstermektedir. Bu kesitte kabarma hemen hemen hiç oluşmazken oturmalar 22 mm seviyesindedir. Çizelge 10’daki verilere göre temel tabakası için kireçtaşı ve alttemel tabakası için ise cüruf malzemesinin maksimum kayma deformasyon modülü değerinin daha yüksek olduğu görülecektir. Buda diğer faktörler faktörler aynı olduğunda granüle temel ve alttemel tabakalarında kayma modülü yüksek malzeme kullanılması durumunda tekrarlı trafik yükleri altında daha iyi bir performans elde edildiğini göstermektedir. CC ve KK kesitleri karşılaştırıldığında ise oturmalar aynı seviyede oluşurken CC kesitindeki kabarmalar KK kesitine göre daha fazladır.



Şekil 9. Asfalt yüzeyinde oluşan düşey deformasyonlar (Rutting on the asphalt surface)

Kesitlerde lastiğin tam altında derinlikle değişen düşey deformasyonlar ise Şekil 10'da yer almaktadır. Derinlik boyunca oluşan düşey deformasyonlarda yatay deformasyonlarda olduğu gibi benzer eğilimler ancak değişen büyüklüklerde dir. Maksimum düşey deformasyonlar asfalt yüzeyinden başlayarak azalmakta ve bütün kesitler için yaklaşık 4 metre derinlikte önemsiz mertebelere düşmektedir. Yaklaşık 2,0 metre derinlikte oluşan düşey deformasyonlar bütün kesitler için aynı seviyededir. Bu da seçilen kesitin etkisinin 2,0 metreden sonra önemli oranda azaldığını göstermektedir. CK kesitinde 10 cm ile 40 cm derinliği arasında birikimli düşey deformasyonlarda görülen küçük düşüşün tabakaların dinamik yük altında farklı titreşim özelliklerinden kaynaklanması muhtemeldir.



Şekil 10. Lastik orta noktasında derinlikle değişen düşey deformasyonlar (Vertical deformations through depth at the midpoint of the Wheel)

6. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Çalışmada çelikhane cürufunun yol temel ve alttemel malzemesi olarak kullanılması için dört farklı yol kesiti sonlu elemanlar yöntemiyle ve aksisimetrik analiz gerçekleştirilerek araştırılmıştır. Kontrol amaçlı kırma taş temel ve alttemelden oluşan yol üst yapısı kesiti (KK) ile çelikhane cürufunun yol temel ve alttemel tabakalarında kullanılmasıyla oluşturulan üç farklı yol kesiti (KC, CK, CC) analiz edilmiştir.

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

Analiz edilen dört kesit karşılaştırıldığında tekrarlı yüklemeye altında en iyi performansı ise kırma taş temel ve cüruf alttemelden (KC) oluşan kesit vermiştir. Bu kesitte kabarma hemen hemen hiç oluşmazken oturmalar 22 mm seviyesindedir. Bu da çelikhane cürufu için en faydalı kullanımın alttemel tabakasında olduğunu göstermektedir. Kırma taş temel ve alttemelden oluşan yol kesiti (KK) için maksimum oturma 27 mm olarak gerçekleşmiştir. KK kesiti ile karşılaştırıldığında, KC kesitinde oturmalar %18 mertebesinde daha az elde edilmiştir. Çelikhane cürufu temel ve alttemelde birlikte kullanıldığında oluşan oturmalar ise KK kesiti ile aynıdır. Bu sonuçlar çelikhane cürufunun doğal agrega yerine yol üst yapısında kullanılabileceğini göstermektedir. Sadece alttemel tabakasında çelikhane cürufu kullanıldığında tekrarlı trafik yükleri altında hem yol performansı artmakta hem de doğal kaynaklardan tasarruf sağlanarak doğal kaynaklar korunmuş olacaktır. Ayrıca doğal kaynaklardan elde edilecek agrega için harcanacak olan enerjiden tasarruf sağlanarak küresel ısınmanın oluşması da belli miktarda engellenmiş olacaktır.

Çalışmada çelikhane cürufunun dayanım ve rijitlik parametreleri kullanılarak ve dinamik analiz gerçekleştirilmek suretiyle analiz yapılmış ve sonuçlar

doğal agrega ile karşılaştırılmıştır. Malzeme rijitlik ve dayanım parametrelerinin yanında yol performansını etkileyen diğer faktörler nem, yeraltı suyu, donma çözülme ve diğer iklim koşullarıdır. İlerideki çalışmalarda iklim faktörleri de göz önüne alınarak çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Karatag, H., S. Fırat, and N.S. Işık., "Assessment of performance of steel slag used in road base by finite element analysis" *13th International Congress on Advances in Civil Engineering*, Çeşme-İzmir, 83870-83877, (2018).
- [2] Özgür Öztürk, M.Ç., Mesut Erkan, "Türkiye agrega sektör raporu", *Hazır Beton*, Kasım-Aralık:52-56, (2007).
- [3] Bilen, M., "Çelikhane curuflarından liç-karbonatlaştırma prosesi ile kalsiyum karbonat kazanılması", *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (2010).
- [4] Horii, K.; Kato, T., Sugahara, K., Tsutsumi, N., Kitano, Y., "Overview of iron/steel slag application and development of new utilization technologies" *Nippon Steel and Sumitomo Metal Technical Report*, 109: 5-11, (2015).
- [5] Motz, H. and J., Geiseler, "Products of steel slags an opportunity to save natural resources", *Waste Management*, 21(3):285-293, (2001).
- [6] TÇÜD, "Demir Çelik Cüruf Raporu" *ÇŞB*, Ankara, (2015).
- [7] ASA, "A guide to the use of iron and steel slag in roads", *Australasian Slag Association Inc.*, NSW, (2002).
- [8] Euroslag, "Position paper on the status of ferrous slag", *The European Slag Association*, Duisburg, (2012).
- [9] İnternet: National Slag Association (NSA), "Common uses for slag", <http://www.nationalslag.org/common-uses-slag>, (2015).
- [10] İnternet: U.S. Geological Survey (USGS), "Iron and steel slag statistics and information", http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_&_steel_slag/index.html#contacts, (2015).
- [11] Yildirim, I.Z., Prezzi, M., "Use of steel slag in subgrade applications" Final Report, INDOT Office of Research and Development, *FHWA/IN/JTRP-2009/32-SPR-3129*, Indiana, (2009).
- [12] Yoshida, N., Sugita, T., Miyahara, T. and Hirotsu, E., "Influence of hydraulicity on resilient modulus and poisson's ratio of hydraulic, graded iron and steel slag base-course material", *Advances in Transportation Geotechnics*, Nottingham, 779-784, (2008).
- [13] Fırat S., K., J.,N.Vural, İ. ve Yılmaz, G., "Increasing compaction properties of road subbase fill using waste materials of steel slag and fly ash", *International Conference and Exhibition on the Application of Efficient and Renewable Energy Technologies in Low Cost Buildings and Construction (RENEWBUILD)*, Ankara, (2013).
- [14] Aiban, S.A., "Utilization of steel slag aggregate for road bases", *Journal of Testing and Evaluation*, 34(1): 65-75, (2005).
- [15] Rohde, L., et al., "Electric arc furnace steel slag: base material for low-volume roads", *Transportation Research Record*, 1819 (1): 201-207, (2003).
- [16] Mymrin V.A., Ponte H.A., Ponte M.J.J.S., Maul, A.M., "Structure formation of slag-soil construction materials", *Materials and Structures*, 38(1): p. 107-113, (2005).
- [17] Behiry, A.E.A.M., "Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as subbase material in flexible pavement", *Ain Shams Engineering Journal*, 4(1): 43-53, (2013).
- [18] Sas, W., Gluchowski, A.,Radziemska, M., Dzięcioł, J., Szymański, A., "Environmental and geotechnical assessment of the steel slags as a material for road structure", *Materials*, 8(8):4857-4875, (2015).
- [19] Hainin, M.R., Yusoff, N., Sabri, F., Aziz, A., Hameed A., Reshi, W., "Steel slag as an aggregate replacement in Malaysian hot mix asphalt", *ISRN Civil Engineering*, Article ID 459016: 1-5, (2012).
- [20] Hainin M.R., Rusbintardjo G., Aziz A., Hamim A. , Yusoff N., "Laboratory evaluation on steel slag as aggregate replacement in stone mastic asphalt mixtures", *Jurnal Teknologi*, 65(2):13-19, (2013).
- [21] Asi, I., Qasrawi, H., Shalabi F., Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2007. 34(8): p. 902-911.
- [22] Alataş, T., E. Somunkıran, P. Ahmedzade, "Ereğli demir çelik fabrikası cürufunun asfalt betonunda agrega olarak kullanılması", *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der.*, 18(2): p. 225-234, (2006).
- [23] Yonar, F., "Elektrik ark ocağı çelikhane cürufunun karayolu esnek üstyapı tabakalarında kullanımının ve karışım performansının araştırılması", *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2017).
- [24] Özüğurlu, B., "Karayolu esnek üstyapı binder tabakasında elektrik ark ocağı cürufunun yapay agrega olarak kullanımının incelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2015).
- [25] Hasançebioglu, Ö., "Elektrik ark ocağı cürufunun yapay agrega olarak karayolu inşaatı dolgu ve granüler tabakalarında kullanılabilirliğinin incelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2014).
- [26] Sönmez, B., Baş, E., Günay, E., Kara, M., "Erdemir çelikhane curuflarının asfalt betonu agregası ve demiryolu balast malzemesi olarak kullanılması imkanları", *II. International Iron and Steel Symposium*, Zonguldak, (2003).
- [27] Gür, S., Parlak, F., Şişman, E., Tombuloğlu, T., Sadık, A. S., Özdoğan, M. S., Erbay, Ş., "Çelikhane cürufunun beton yollarda temel malzemesi olarak kullanılması", *Geoteknik Sempozyumu*, Çukurova Üniversitesi, Adana, (2013).
- [28] Mutlugeldi, C., "Elektrik ark fırını cürufunun karayolu esnek üstyapı bitümlü temel tabakasında agrega olarak değerlendirilmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2015).
- [29] Somunkıran, E.T., "Ereğli demir çelik fabrikası cürufunun asfalt betonunda agrega olarak kullanılması", *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2005).

- [30] İnternet: National Slag Association (NSA), "SLAG-A green product", <http://www.nationalslag.org/sites/nationalslag/files/documents/SLAG-A%20Green%20Product.pdf>.
- [31] Altan, E., "Çelikhane curufu içerisindeki hurdaların değerlendirilmesi", *I. Ulusal Demir-Çelik Sempozyumu ve Sergisi*, Zonguldak, (2001).
- [32] Oluwasolaa, E.A., Hainina, M.R., Aziza, M.M.A., "Characteristics and utilization of steel slag in road construction", *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 70 (7): 117–123, (2014).
- [33] FHWA, "User guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction: steel slug", *Federal Highway Administration*, (2012).
- [34] Das, B., Mohanty, J.K., Reddy, P.S.R., Ansari, M.I., "Characterisation and beneficiation studies of charge chrome slag", *Scandinavian journal of metallurgy*, 26(4): 153-157, (1997).
- [35] Zheng, L., Hai-Lin, Y., Wan-ping, W., Ping, C., "Dynamic stress and deformation of a layered road structure under vehicle traffic loads: experimental measurements and numerical calculations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 39:100-112, (2012).
- [36] KGM, "yol alt yapısı, sanat yapıları, köprü ve tüneller, üst yapı ve çeşitli işler", *Karayolu Teknik Şartnamesi (KTS)*, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, (2013).
- [37] KGM, "bitümlü karışımlar laboratuvar çalışmaları", *KGM, Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı*, Ankara, (2012).
- [38] Moghaddam, M.K.M., "Elektrik ark fırını (eaf) cürufu katkısının zeminlerin mühendislik özellikleri üzerine etkisi", *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2011).
- [39] Noureldin, A.S., McDaniel, R.S., "Evaluation of surface mixtures of steel slag and asphalt", *Transportation Research Record*, 1269:133-149, (1990).
- [40] Yılmaz, A., M. Karaşahin, "Mechanical properties of ferrochromium slag in granular layers of flexible pavements", *Materials and Structures*, 43(3): 309-317, (2010).
- [41] Yılmaz, A., İ. Süttaş, "Ferrokrom cürufunun yol temel malzemesi olarak kullanımı", *İMO Teknik Dergi*, 19 (93): 4455-4470, (2008).
- [42] Güngör, A.G., Sağlık, A., "Karayolları esnek üstyapılar projelendirme rehberi", K.T.A.D.B.Ü.Ş. Müdürlüğü, KGM, Ankara, (2008).
- [43] Olsson, J., Zeng, L.F., Wiberg, N.E., "Finite element analysis of road rutting", *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS)*, Barcelona, 11-14, (2000).
- [44] Huang, Y.H., "Pavement analysis and design" 2th ed., *Pearson Prentice Hall*, NJ, (2004).
- [45] Haas, R., "Reinventing the (pavement management) wheel", *5th Annual Conference on Managing Pavements*, Seattle, (2001).
- [46] Rahman, M.S., "Characterising the deformation behaviour of unbound granular materials in pavement structures", *Ph.D. Thesis*, KTH Royal Institute of Technology, Division of Highway and Railway Engineering, Department of Civil and Architectural [Engineering], (2015).
- [47] Seyhan, Ü., Tutumluer, E., "Characterization of unisotropic granular layer behavior in flexible pavements", FAA Center of Excellence for Airport Technology, *Federal Aviation Administration, Report No.18*, Washington DC, (2002).
- [48] Seyhan, U., "Characterization of unisotropic granular layer behavior in flexible pavements", *Ph.D. Thesis*, University of Illinois, (2002).
- [49] Lekarp, F., Isacsson, U., Dawson, A., "State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates", *Journal of Transportation Engineering*, 126(1): 66-75, (2000).
- [50] NCHRP, "Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures: calibration of permanent deformation models for flexible pavements", *National Research Council*, Washington DC, (2004).
- [51] Barksdale, R.D., "Compressive stress pulse times in flexible pavements for use in dynamic testing", *Highway Research Record*, 345(4):32-44, (1971).
- [52] Wang, H., Al-Qadi, I.L., "Near-surface pavement failure under multiaxial stress state in thick asphalt pavement", *Transportation Research Record*, 2154(1): p. 91-99, (2010).
- [53] Tan, S., Low, B., Fwa, T., "Behavior of asphalt concrete mixtures in triaxial compression", *Journal of Testing and Evaluation*, 22(3): (195-203), (1994).
- [54] Mattos, J.R., Nunez, W.P., Ceratti, J.A., Zingano, A., Fedrigo, W., "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, (2016).
- [55] Duncan, J.M., Monismith, C.L., Wilson, E.L.; "Finite element analysis of pavements", *Highway Research Record*, 228:18-33, (1968).
- [56] Kim, M., "Three-dimensional finite element analysis of flexible pavements considering nonlinear pavement foundation behavior", *Ph.D. Thesis*, University of Illinois Urbana, Illinois, (2007).
- [57] Hiltunen, D.R., R. Roque, A. Ayithi, "Base Course Resilient Modulus for the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide" University of Florida, *Department of Civil and Coastal Engineering*, Florida, (2011)