

POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)
URL: http://dergipark.org.tr/politeknik

CLARIVATE ANALYTICS
EMERGING SOURCES CITATION INDEX
INDEXED

Çelik cürufu ile yapılan yol altyapısı katmanlarının sayısal analizleri

Numerical analysis of road infrastructure layers made with steel slag

***Yazar(lar) (Author(s))**: Mürüvet ÖZSOY[1], Seyhan FIRAT[2]*

ORCID[1]: 0000-0001-8854-3306

ORCID[2]: 0000-0003-3649-0999

ERKEN GÖRÜNÜM

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article): Özsoy M., ve Fırat S., "Çelik cürufu ile yapılan yol altyapısı katmanlarının sayısal analizleri", ***Politeknik Dergisi***, *(*): *, (*).

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

DOI: **10.2339/politeknik.1199022**

Çelik Cürufu ile Yapılan Yol Katmanlarının Sayısal Analizleri

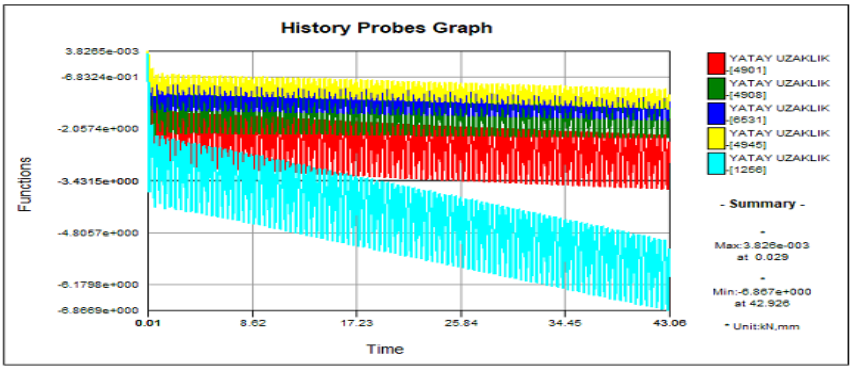
Numerical Analysis of Road Layers Made with Steel Slag

Önemli noktalar (Highlights)

- *Çelik cürufunun yol altyapısı tabakalarında kullanılması etkilerinin incelenmesi / Investigation analysis of the effects of using steel slag in road infrastructure layers*
- *Tekrarlı trafik yükleri / Repetitive traffic loads*
- *Dinamik analiz / Dynamic analysis*
- *Sonlu elemanlar metodu / Finite element method*

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada çelik cürufun temel ya da alttemel tabakalarında kullanılmasının etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal analizler ile incelenmiştir. / In this study, the effect of using steel slag on the foundation or sub-base layers was investigated by numerical analysis using the finite element method.



Şekil. Kaplama yüzeyi yatay uzaklık zamana bağlı deformasyon değişimi

Amaç (Aim)

Ham çelik üretimi sonucunda yan ürün olarak oluşan çelik cürufun yol temel ve alttemel tabakasında kullanılmasının tekrarlı yükler altındaki davranışını incelemek ve en iyi performans elde edilen yol katmanlarını belirlemek amaçlanmıştır. / In this study, it was aimed to examine the behavior of the steel slag, which is formed as a by-product of crude steel production, in the road foundation and sub-base layer under cyclic loads and to determine the road layers with the best performance.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yol kesitlerindeki oluşan deformasyon değerleri hesaplanmıştır. / The deformation values in the road sections were calculated using the finite element method.

Özgünlük (Originality)

Çelik cürufunun tekrarlı trafik yükleri altındaki deformasyon davranışına etkisi incelenmiştir. The effect of steel slag on the deformation behavior under cyclic traffic loads was investigated.

Bulgular (Findings)

Çelik cürufun sahip olduğu yüksek mekanik özellikleri sayesinde yol katmanlarında granüler malzeme olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir. / It has been determined that steel slag can be used as a granular material in road layers thanks to its high mechanical properties.

Sonuç (Conclusion)

Çelik cürufunun hem alttemel hem de temel tabakasında kullanımı dayanıklılık ve geoteknik açıdan kullanımının uygun olduğu görülmektedir. / It is seen that the use of steel slag in both the sub-base and foundation layer is suitable for durability and geotechnical use.

Etik Standartların Beyanı (*Declaration of Ethical Standards*)

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

Çelik Cürufu ile Yapılan Yol Katmanlarının Sayısal Analizleri

Araştırma Makalesi / Research Article

Mürüvet ÖZSOY[1*], Seyhan FIRAT[2]

[1]İnşaat Bölümü, Aksaray Üniversitesi, Türkiye
[2] İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 03.11.2022 ; Kabul/Accepted : 10.11.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 29.11.2022)

ÖZ

Yol yapısında tekrarlı yüklere bağlı olarak tekerlek izi, yüzeysel veya derin çatlak olusumu gibi deformasyonların artması sonucunda kaplamanın servis ömrü azalmakta böylece bakım maliyetleri artmaktadır. Hem kaynak kıtlığı hem de atıkların bertaraf edilmesi amacıyla doğal agrega yerine demir-çelik üretiminin yan ürünü olan çelik cürufu kullanımı oldukça yaygınlaşmaktadır. Çelik cürufu mevsimsel yaşanan bazı değişikliklere ve yorulma davranışına karşı gösterdiği direnç dolayısıyla kullanımının, mekanik ve çevre koşulları açısından faydalı olacağı için yol üst yapı tasarımında temel, alt zemin, çimento kaplama vb. tabakalarda doğal agregaların ikamesi olarak kullanımı tercih edilmektedir. Bu sayede hem doğal kaynakların kullanımı azalacak hem de sürekli olarak artan atık cürufların kullanımı ile doğaya vereceği zarar en aza indirilmiş olacaktır. Bu çalışmada, çelik cürufun temel ya da alttemel tabakalarında kullanılmasının etkisi sonlu elemanlar yöntemiyle dinamik analizler yapılarak araştırılmıştır. 400 kPa değerinde tekrarlı tekerlek yükleri altında yapılan sayısal analizler sonucunda alttemel tabakasında çelik cüruf malzeme kullanımı sonucunda elde eldilen düşey deformasyon değerleri literatürde yer alan diğer bir malzeme olan kireç taşı içerikli agreganın kullanımındaki deformasyon değerlerinden daha düşük elde edilmiştir. Bulgular ilk 50 yükleme adımında minimum deformasyon değerleri sırasıyla CC ve KC kesitlerinde meydana geldiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar, tekrarlı trafik yükleri, dinamik analiz.

Numerical Analysis of Road Layers Made with Steel Slag

ABSTRACT

Repeated loads in the road structure decrease the service life of the pavement and increase the maintenance costs with the increase in deformations such as rutting and superficial or deep crack formation. The use of steel slag, which is a by-product of iron-steel production, instead of natural aggregate, is becoming very common for both resource scarcity and waste disposal. Since the use of steel slag will be beneficial in terms of mechanical and environmental conditions due to its resistance to some seasonal changes and fatigue behavior, it is preferred to be used as a substitute for natural aggregates in layers such as foundation, sub-floor, cement coating, etc in the road superstructure design. In this way, both the use of natural resources will be reduced and the damage to nature will be minimized by the use of waste slag, which is constantly increasing. In this study, the effect of using steel slag on the foundation or sub-base layers was investigated by performing dynamic analyses with the finite element method. As a result of numerical analyzes carried out under repeated wheel loads of 400 kPa, the vertical deformation values obtained as a result of the use of steel slag material in the subbase layer were lower than the deformation values in the use of limestone-containing aggregate, which is another material in the literature. The findings show that the minimum deformation values in the first 50 loading steps occur in the CC and KC sections, respectively.

Keywords: Finite elements, repetitive traffic loads, dynamic analysis.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yollar, toplumların gelişmesinde hatta medeniyetlerin oluşmasında geçmişten günümüze önemli bir paya sahip olmuştur.Bir ürün ya da hizmetin aktarılması amacıyla kullanılan yollar sayesinde sosyal ve ekonomik ağlar kurulmaktadır. Bu ağların kurulmasında en yaygın ulaşım türlerinden biri olan karayolu önemli bir role sahiptir.

Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de karayolu ulaşımında esnek kaplamalar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kaplama yapısı çevresel faktörlerin yanında trafik özelliklerindeki değişimle birlikte araç yüklerine, lastik basınçlarna ve trafik hacmine de maruz

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : munluozsoy@aksaray.edu.tr

ERKEN GÖRÜNÜM

kalmaktadır. Bu tür değişimler yol yapısında tekrarlı yüklere bağlı olarak tekerlek izi, yüzseysel veya derin çatlak oluşumu gibi deformasyonlara neden olmaktadır. Esnek üstyapılar, ağır ve düşük hızlı trafik yüklerinin geçişi ve zamanla çeşitli çevresel koşullara maruz kalması nedeniyle tekerlek izi hasarına maruz kalmakta ve bu durum üstyapı bakım otoritelerinin temel endişesi olarak kabul edilmektedir [1].

Meydana gelen bu deformasyonların artması sonucunda kaplamanın servis ömrü azalmakta böylece bakım maliyetlerinin artışına neden olmaktadır. Yolların servis ömrünü artırmanın yanında bu süre zarfında bakım ve onarım ihtiyacının azalmasına yönelik olarak malzeme özelliklerinin trafik yükü, standart eksenel yük (ESAL) değişkenlerinin de doğru seçilmesi oldukça önemlidir. Ayrıca tabakaların mukavemetleri ve kalınlıkları, karışım dizaynı, trafik yükündeki değişim gibi tasarımda dikkat edilmesi gereken diğer unsurlar da bulunmaktadır. Üst yapı tasarımında yol yapısının genel davranışını etkileyecek değişkenlerin göz önünde bulundurularak tasarımı yapılmalıdır. Bu noktada yol yapısı tasarımında kullanılan malzemenin mekanik ve kimyasal özellikleri oldukça önemlidir. Ayrıca yol yapım endüstrisi, sürekli olarak artan trafik hacmi ve yol yapısı üzerindeki trafik yükü nedeniyle beklenilen servis ömrünü tamamlamak için yüksek performanslı üstyapının inşa edilmesi ve malzeme seçiminin bu amaca uygun yapılması gerekmektedir. Hava ve yol koşulları göz önünde bulundurulduğunda yüksek performans sağlayacak içerikte doğru malzeme seçimi sayesinde asfalt kaplamanın ömrü uzayacak böylece bakım ve rehabilite maliyetleri de azalacaktır.

Bu amaçla esnek üstyapıda tercih edilen agregelar üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Örneğin kireçtaşı kökenli agregaların bünyesinde bulunan farklı minerallar dolayısıyla ufalanabilir nitelikte olduğu performans ve kalite açısından tercih edilebilir agregalara ulaşım konusunda ise kaynak problemleri yaşandığı belirtilmiştir. Kireçtaşı içerikli agregaların ezilme mukavemetinin düşüklüğü nedeniyle trafik akışı sonrası meydana gelecek olan aşınmalara karşı da dayanıksız bir yapıda olduğu ve yüksek kayma direncine sahip olmasını istediğimiz kullanım alanlarında tercih edilmesinin uygun olmadığı belirtilmiştir [2].

Malzeme temini konusunda sınırlı kaynakların varlığı ve ve bu kaynakların verimli bir şekilde kullanılması aynı zamanda da maliyet açısından değerendirilmesi önemlidir. Bu yüzden hem malzeme kaynaklarının doğru kullanımı açısından hem de stabiliteye katkı sağlaması açısından çelik cürufu kullanımı oldukça önemlidir. Çelik cüruf, çelik üretimi sonucunda elde edilen yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Çelik cürufunun özellikle yapısal malzeme olarak kullanımı doğal kaynakların kullanım ihtiyacını azaltmakta bununla birlikte atık madde olarak ortaya çıkan yan ürünün depolanma problemine çözüm olmaktadır. Çelik cürufu, malzemeye yüksek yoğunluk ve sertlik veren ve onu yol yapımı için uygun bir yapay agrega kaynağı yapan oldukça önemli miktarda serbest demir içermektedir [3]. Ayrıca, agrega olarak çelik cürufu kullanılan yol karışımlarının daha iyi tekerlek izi direnci ve mekanik stabilite sağladığını göstermiştir. Bu da yol için daha kalıcı bir aşınma seyrini göstermiştir [4]. Çelik cürufunun mukavemeti ve durabilitesinin yüksek olmasından dolayı bağlayıcısız temel ve alttemel tabakalarında ve yüzey tabakasında agrega olarak tercih edilmesi doğru bir seçim olarak görünmektedir.

Günümüzde çelik cürufunun farklı alanlara kullanımına yönelik çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin çelik cüruflu portland çimentosu hazırlanarak oluşturulan betonun basınç dayanımının beklenilen değerlerin üzerinde olduğu saptanmıştır [5]. Başka bir çalışmada ise tekrarlı trafik yüküne maruz kalan yol üst yapısının yol temel ve alttemel tabakasında çelik cürufu kullanılması durumunda meydana gelebilecek olan değişimin belirlenmesi için sonlu elemanlar yöntemiyle dinamik ve statik analizleri yapılmıştır. Yapılan bu çalışma sonucunda cürufun doğal agregalar yerine kullanılabileği aynı zamanda alttemel tabakasında kullanılan cürufun tekrarlı yükler altında düşey deformasyon açısından en iyi davranışı gösterdiği belirtilmiştir [6]. Çelik cüruflu iri agrega içeren karışımların rijitlik modülü değerlerinin, tüm test sıcaklıklarında kireçtaşı iri agrega içeren karışımlardan daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Sünme rijitliği açısından, çelik cüruf karışımlarının değerleri, kontrol karışımlarından önemli ölçüde daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çelik cüruf iri agregalı karışımların daha yüksek sünme rijitliği, tekerlek izi direncinin daha iyi olduğunu göstermiştir [7].

Tüm Dünyada olduğu gibi ülkemizde de atıkların geri dönüştürülmesi, verimli ve doğaya zarar vermeyecek şekilde bertarafı çevre sağlığı ve dünyanın geleceği açısından oldukça önemlidir. Kısıtlı olan doğal kaynakların bilinçsizce kullanımı, atık dönüşüm sistemlerinin oluşturulmaması birçok sorunun ortaya çıkmasına neden olacaktır. Gelecek nesillere daha yaşanılabilir bir çevre, dünya bırakmak tüm insanlığın asli görevidir. Bu çalışma kapsamında ham çelik üretimi sonucunda yan ürün olarak oluşan çelik cürufunun yol temel ve alttemel tabakasında kullanılmasının tekrarlı yükler altındaki davranışını belirlemek amacıyla sonlu elemanlar yönteminden faydalanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Çelik cürufunun agrega olarak kullanılabilir nitelikte olması sonucunda hem doğal kaynakların kullanımı azalacak olup bununla birlikte sürekli olarak artan atık cürufların kullanımı sayesinde doğaya vereceği zarar en aza indirgenecek aynı zamanda cürufun sahip olduğu yüksek mekanik özellikler sayesinde yol davranışına katkı sağlayacaktır.

2. MATERYAL

2.1 Çelikhane Cürufu

İnsan veya endüstriyel faaliyetler gibi çeşitli faktörler sonucunda ortaya çıkan ve sonrasında kalıcı olarak herhangi bir değeri olmayan malzemeye atık adı verilmektedir. Çevre sağlığı ve doğal yaşamın devamlılığı açısından yaygın olarak karşılaşılan

ERKEN GÖRÜNÜM

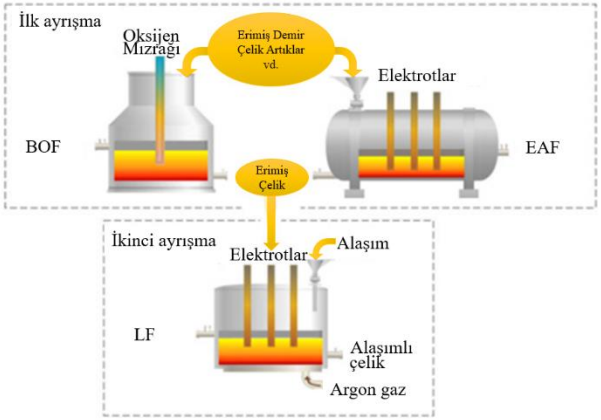
atıklardan olan kauçuk, cam, metaller, plastik ve tarımsal atıkların bertarafı ve geri kazanımı oldukça önemlidir. Son yıllarda demir-çelik sanayisi üretiminin atık maddesi olarak ortaya çıkan çelik cürufu büyük miktarlar olarak ifade edilmektedir. Küresel bazda çelik endüstrisindeki hızlı gelişme sonucu çelik cürufunun oluşması kaçınılmaz bir durumdur. Bu yüzden çelik cürufunun atık malzeme olarak yeniden yaşam döngüsüne katılması, doğaya ve insan sağlığına zarar vermeyecek, çelik cürufunun bünyesinde barındırdığı ağır metallerin sızıntı, yanma gibi çeşitli yollarla tarım arazileri, nehirler gibi insan sağlığını tehdit edecek alanlara ulaşmadan etkin bir şekilde geri dönüşüm yolculuğunun tamamlanması gerekmektedir.

Çelik cürufu sert, yoğun, aşınmaya dayanıklı ve koyu renkli bir malzemedir. Çelik cürufu, erimiş çeliğin çelik üretim fırınındaki çeşitli atık malzemelerden ayrılması sırasında ortaya çıkan yan üründür. Bazik oksijen fırını (BOF) cürufu, elektrik ark fırını (EAF) cürufu ve pota fırını (LF) cürufu, çelik üretim süreçlerinde üretilen üç ana çelik cüruf türü bulunmaktadır. BOF cürufu ve EAF cürufu, çeliğin ilk rafine edilmesi sırasında (Şekil 1) üretilir [8]. BOF ve EAF'den üretilen cüruf birbirlerine benzerdir. Yapısında temel olarak kalsiyum, silika ve demir oksitler bulunmaktadır [5]. LF cürufu, çelik pota içinde kükürtten arındırıldığında ikincil bir metalurji sürecinden geçen BOF ve EAF'den erimiş çeliğin daha fazla rafine edilmesinden sonraki yan üründür [9]. Çizelge 1'de çüruf türüne göre kimyasal bileşenleri verilmiştir.

Çizelge 1. Çeşitli Çelik Cürufu türlerinin kimyasal bileşimi (Chemical composition of various types of Steel Slag)[10]

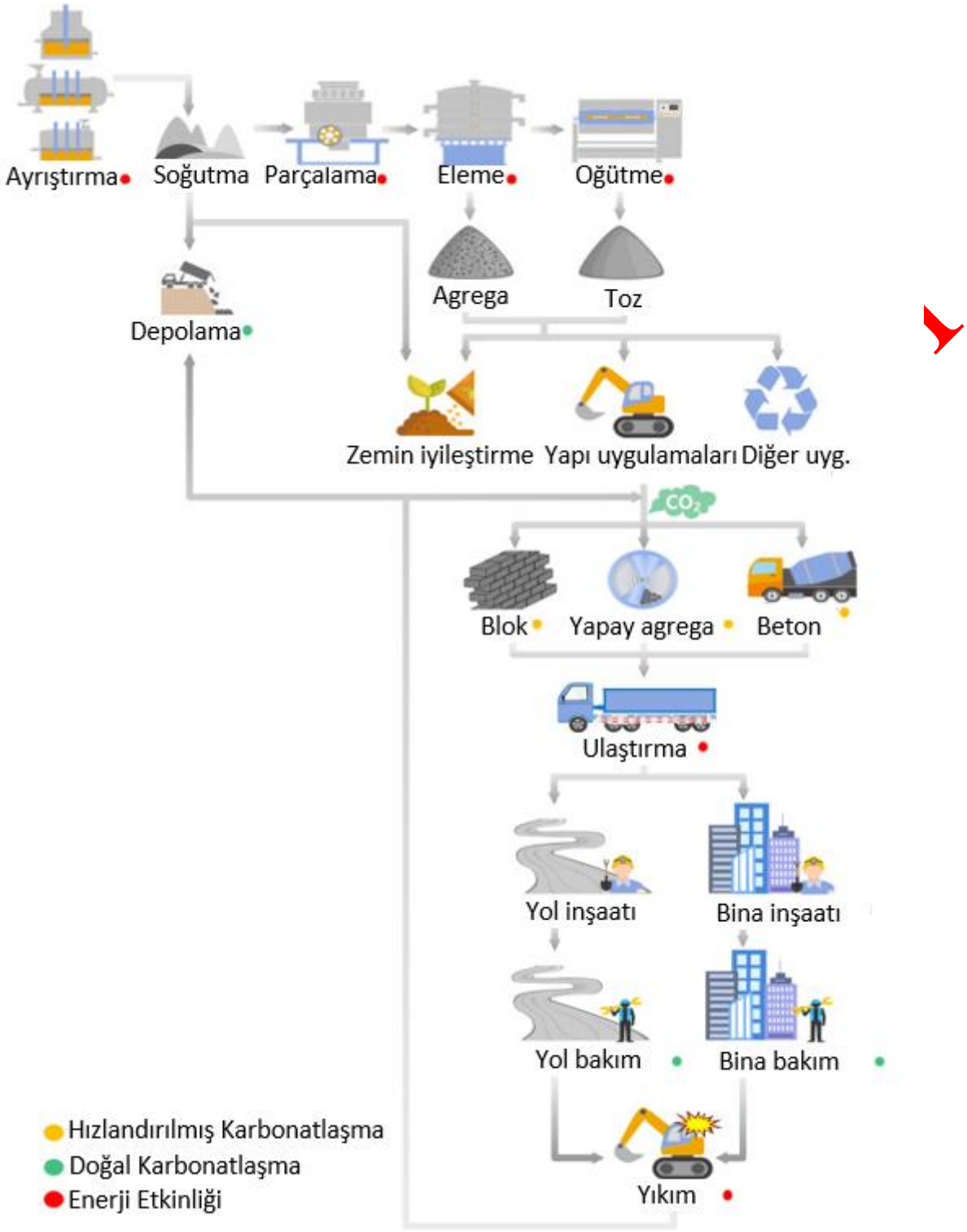
Referanslar	Tip	Mineralojik Evreler
Gahan vd.	EAF	$CaFe_2O_4$, $Ca_2MgO_2AlFeO_6SiO_2O_5$, Ca_2SiO_4, FeO
Gahan vd.	BOF	$Ca_2Fe_2O_5$, $Ca_XMn_{(1-X)}O$, FeO
Tsakiridis vd	EAF	$CaSiO_4$, $4CaO.Al_2.Al_2O_3.Fe_2O_3$, $Ca_2Al(AlSiO_7)$, Ca_3SiO_5, $2CaO.Al_2O_3SiO_2$, FeO, Fe_3O_4, MgO, SiO_2
Tossavainen vd	EAF	$Ca_3Mg(SiO_4)_2$, β-Ca_2SiO_4, (Mg, Mn) (Cr, Al)$_2O_4$, (Fe, Mg, Mn)O), $Ca_2(AL, Fe)_2O_5$
Tossavainen vd	BOF	B-Ca_2SiO_4, FeO-MnO-MgO, MgO
Nicolae	BOF	$2CaO.Al_2O_3.SiO_2$, Fe_2O_3, CaO, FeO
Nicolae	EAF	MnO_2, MnO, Fe_2SiO_4, Fe_7SiO_{10}
Reddy vd	BOF	$2CaO.Fe_2O_3$, $2CaO.P_2O_5$, 2CaO, SiO_2, CaO
Belhadj vd	BOF	C_2S, C_2F, $Ca(OH)_2$, CaO, $(Fe_{(1-x)}O$, $CaCO_3$, MgO, SiO_2, Fe_3O_4
Qian vd	EAF	ϒ-Ca_2SiO_4, CMS_2, CFMS, FeO-MnO-MgO

Farklı çelik cürufu türlerinde değişen bu kimyasal içerikler, çelik üretiminde kullanılan hammaddenin dozuna yine Şekil 1'de verilen çelik üretimi sırasında kullanılan fırının tipine bağlı olarak değişmektedir. Çelik cürufu bünyesinde bulunan demiroksit (FeO) miktarının cürufun mukavemeti üzerinde etkisi bulunmaktadır. Şekil 2'de çelik cürufunun üretim süreci, geri dönüşümü ve atık olarak bertarafı için genel bir görsel verilmiştir. Şekil 2'ye göre çelik cürufları öncelikle çelik üretim fabrikalarında kırma, manyetik ayırma ve eleme yoluyla ilk işleme adımı yapılmaktadır. En etkili performans sağlayacak şekilde kullanılması önem arz etmektedir. Türkiye Demir ve Demir Dışı Metaller Meclisi Raporunda [11] ülkemizdeki EAO ve BOF'na ait ham çelik kapasitesi (milyon ton) 2010-2020 yılları arasındaki değişimi Çizelge 2'de verilmiştir. 2020 yılında 2019'a kıyasla ham çelik üretiminde bir artış meydana gelmiştir. 2021 yılı Dünya Çelik Birliği verilerine göre ise ham çelik üretimi EAO %71.6 iken, BOF değeri %28.4 olarak verilmiştir [12]. 2020 yılında yaşanan küresel sağlık sorunları nedeniyle ülkeler bazında alınan spesifik tedbirlere rağmen çeşitli rakamlarda değişiklikler meydana gelmiştir.



Şekil 1. Üç tip çelik cürufu üretiminin şematik gösterimi(Schematic representation of the production of three types of steel slag) [8]

ERKEN GÖRÜNÜM



Şekil 2. Çelik cürufu üretim ve bertaraf yollarının şematik gösterimi (Schematic representation of steel slag production and disposal route) [8]

Çizelge 2. Ham Çelik Kapasitesi (milyon ton) (Crude Steel Capacity (million tons)) [13]

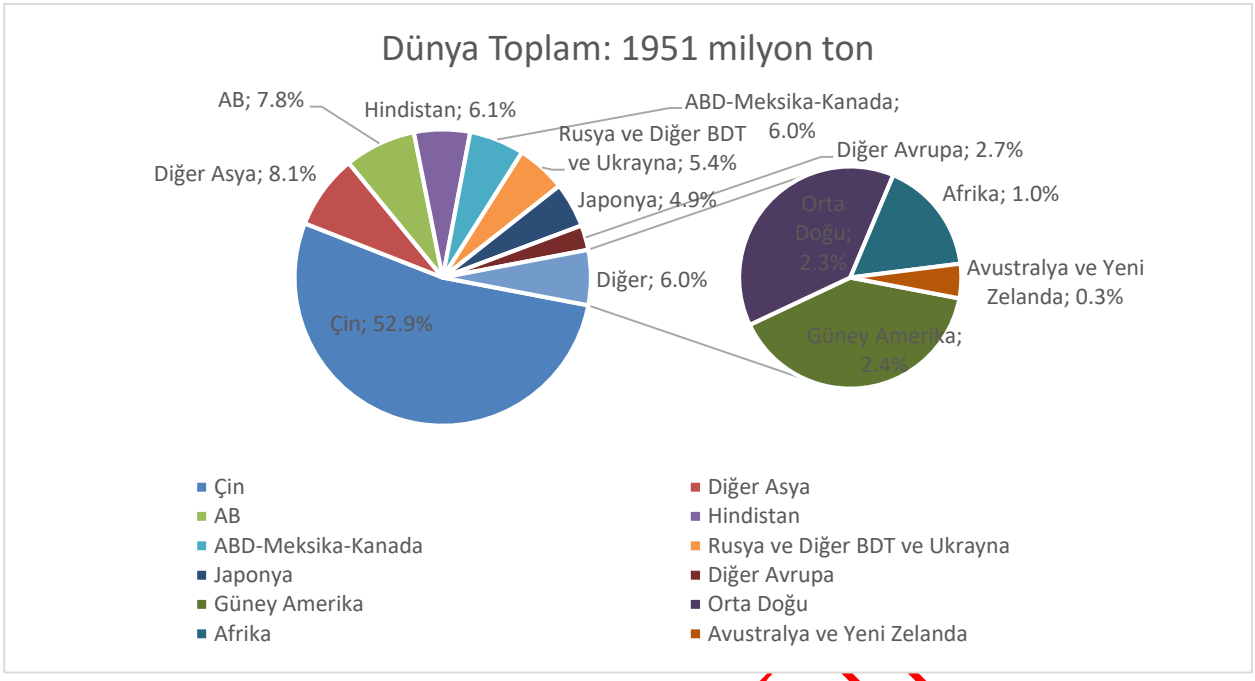
	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	% değişim 20/19	% pay
EAO	33.4	38.7	39.2	38.9	39.5	38.3	39.8	4.0	74.7
BOF	9.4	11.7	12.3	12.3	12.4	12.4	13.5	8.9	25.3
Toplam	42.7	50.4	51.5	51.2	51.9	50.7	53.3	5.2	100.0

Türkiye ise 40.4 milyon ton ile yedinci sırada yer almaktadır. Günümüzde, örneğin Avrupa'da oluşan çelik cürufun yaklaşık %77'si, yeşil çimento üretmek için ikame malzeme olarak veya bloklar ve agregalar gibi inşaat malzemeleri olarak kullanılmaktadır [14, 15]. Şekil 3'de 2021 yılında ülke bazında üretilen ve kullanılan ham çelik yüzdesi verilmiştir.

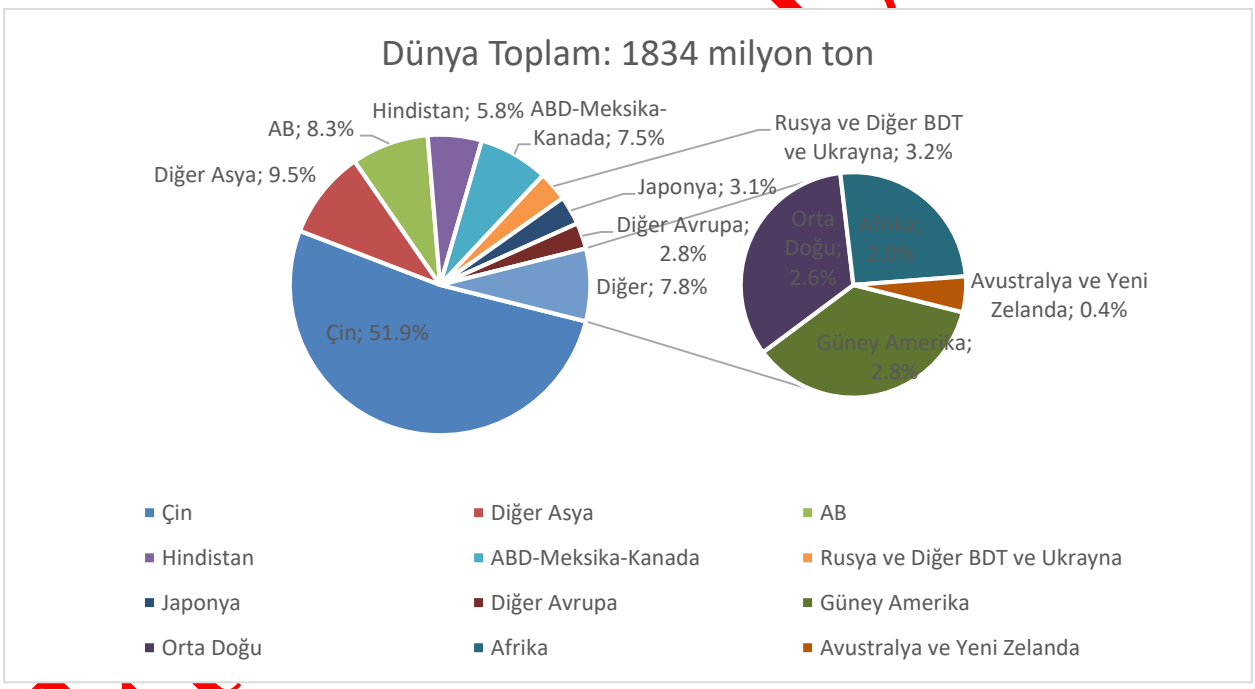
Küresel olarak çelik cüruf üretimindeki hızlı artış nedeniyle ürünün kullanımı ya da bertarafı konusunda hızlı ve nitelikli geri dönüşüm süreçleri önemli olmaktadır. Bu amaçla çelik cürufu kullanımı inşaat, kimya ve tarım alanlarında başarıyla kullanılmıştır. Başlangıçta çelik cürufu atık malzeme ve katı atık sahası (landfill) amacıyla rehabilite edilmiştir. Ancak bu durum toprak kaynaklarını tüketmekle kalmayıp, aynı zamanda yüksek alkali sızıntı suları nedeniyle doğal çevreyi ve insan sağlığını da ciddi şekilde etkilemiştir [16]. Bununla birlikte dünya çapında sürekli artan trafik hacimleri, üstyapıdaki servis ömrünün sağlıklı devam etmesi açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle yüksek trafik hacmine sahip karayollarında malzeme üretimi ve yol yapım aşamaları önemli hale gelmiştir [17]. Çelik cürufu, yol yapısında kullanılan diğer agrega türleriyle kıyaslandığında bünyesinde daha yüksek CaO ve FeO barındırmaktadır. Demir sayesinde cüruf malzeme yüksek yoğunluk ve sertliğe sahiptir. Çelik cüruf agregalarının soyulmaya karşı dirençlerinin, yol kaplama malzemesi olarak doğal granitten daha üstün olduğunu gösterir. Çelik cürufunun bitümle üstün bir yapışma potansiyeli bulunmakta ve aynı zamanda nem hasarını da en aza indirmektedir [18].

Çelik cürufu kullanımı sonucu çevresel performansının değerlendirilmesi açısından yapılan çalışmalarda özellikle yaşam döngüsü üzerinde durulmuştur. Çelik cürufu doğal agregaların ikamesi olarak büyük ölçüde kaplama betonu ve/veya blokta kullanıldığını yapılan bir çok deneysel çalışmalar ve sayısal analizler ile gösterilmiştir. Ayrıca çelik cürufu kullanımının çevresel faydalarının yanında, çoğunlukla kullanılan fazla miktarda çimento sarfiyatında da azalma meydana gelmiştir [8]. Çelik cürufunun zemin stabilizasyonunda kullanılması sayesinde mukavemetin ve dayanıklılığın arttığı bununla birlikte zemindeki genleşmeyi azalttığı yapılan çalışmalarda ifade edilmiştir [19, 20]. Çelik cürufu ana malzemenin yanında tamamlayıcı bir çimentolu malzeme olarak çimentonun yerini alabilir. Bununla birlikte karbonatlaşma işlemi sayesinde tek başına bağlayıcı nitelikte malzeme olarak kullanılabilmektedir. Günümüzde yapılan deneysel ve teorik çalışmalar incelendiğinde çelik cürufunun bağlayıcı malzeme kullanımı niteliğinden çok sahip olduğu pürüzlü yüzeysel yapısı, yüksek yoğunluğa sahip olması ve parçalanmaya karşı direnci sayesinde agrega kullanımı olarak tercih edilmesi oldukça yaygındır. Kaplama tabakasında asfalt-cüruf karışımının yüksek aderansı sayesinde mukavemeti artırarak, çatlamanın oluşumunu yavaşlatmaktadır [21].

ERKEN GÖRÜNÜM



(a)



(b)

Şekil 3. 2021 yılı küresel ham çelik üretimi (a) ve görünen çelik kullanımı (b) (bitmiş çelik ürünler) değişimi dairesel grafiği (Circular graph of change in global crude steel production and apparent steel use (finished steel products) for 2021)[12].

3. ESNEK KAPLAMA MODELİ

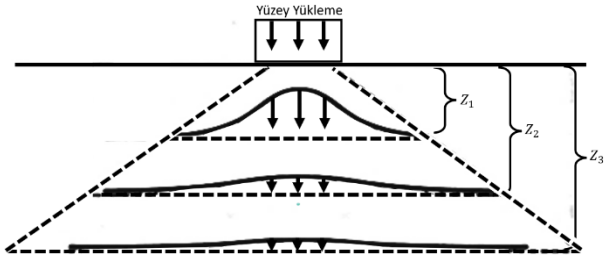
Esnek kaplama yapıları, birden fazla katman sayısı, malzeme ve sınır koşullarına sahip karmaşık mühendislik yapıları olarak bilinmektedir. Bu yapılardan biri olan yol yapısı araç yükleri dolayısıyla oluşan gerilmelerin daha geniş bir alana yayılmasını sağlamak amacıyla tabakalar halinde inşa edilmekte ve tabakalar sayesinde yükün zemine aktarımı kabul edilebilir yani zeminde herhangi bir kayma ya da bozulmanın olmayacağı seviyelerde gerilme aktarımını sağlar. Gerçek koşullarda, esnek üstyapı yapısı, hareketli yükler ile yüklerin içinden geçtiği zamana bağlı özellikler (viskoelastik) gösterir.

Ağır araç yükleri, lastik basıncı, hız, asfalt karışımının tipi ve özellikleri, kalınlığı ve çevresel koşullar (yüksek sıcaklık), esnek kaplamanın davranışını ve tekerlek izi performansını doğrudan etkiler [22-25].

Esnek ve rijit olmak üzere iki tip üst yapı sistemi bulunmaktadır. İki sistem arasındaki fark kullanılan malzeminin içeriğinden kaynaklanmaktadır. Rijit kaplamada beton malzeme tercih edilirken esnek kaplamada asfalt içerikli malzemeler kullanılmaktadır. Asfalt malzemelerin davranışında visko-elastik özelliğe sahip olması nedeniyle sıcaklık ve yükleme durumu oldukça önemlidir.

3.1 Yol üst yapısında meydana gelen deformasyonlar

Esnek üstyapıda tekerlek yükü ilk olarak aşınma tabakası ile karşılanmaktadır. En üst katmana gelen yük alt katmanlara en son ise alt zemine iletilir (Şekil 4). Katmanlı esnek kaplamalar, tasarımı yapılırken servis ömrü, trafik hacmi ve alt zeminin dayanımı dikkate alınması gerekir.



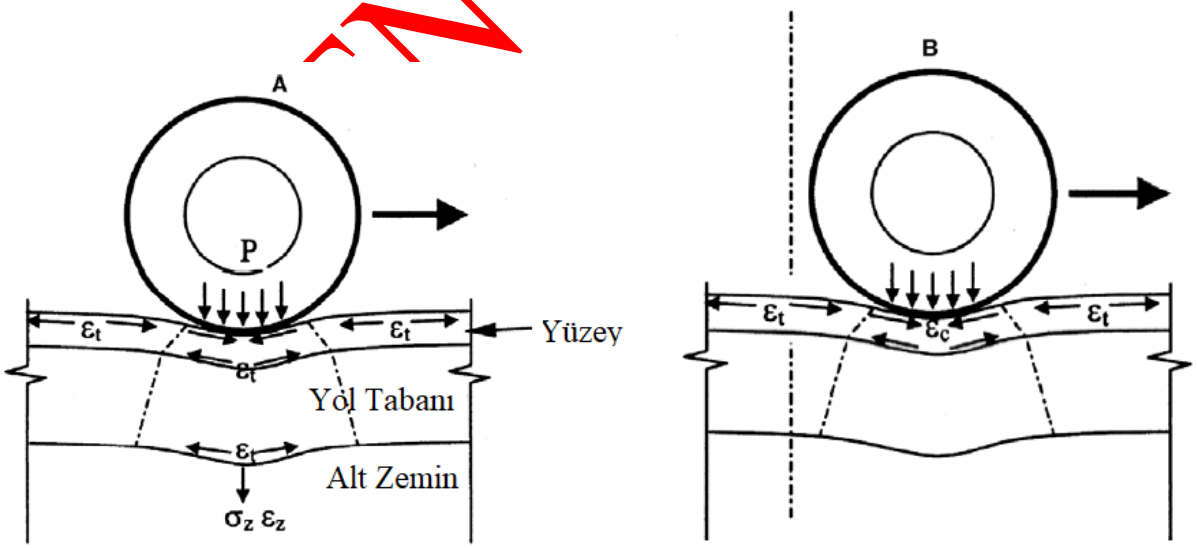
Şekil 4. Derinlikle yük kaynaklı gerilmelerin değişimi (Variation of load-induced stresses with depth) [26]

Standart yol yapısı aşınma, temel, alttemel tabakası ve alt zemin tabakası olmak üzere dört ana tabakadan oluşmaktadır. Yol yapısındaki tüm kalınlık tıpkı temel tabakasında kullanılan yüksek kaliteli malzemeler gibi tercih edilmelidir.

Tabakalarda kullanılan malzemenin mekanik ve kimyasal özellikleri malzeme davranışı üzerinde büyük bir öneme sahiptir. Kaplama katmanlarının kalınlık ve malzeme kalitesi gibi yapısal özellikleri, trafik yükleri ve çevresel değişkenlerin tümü, tekerlek izinin genişliğini ve derinliğini etkiler [4]. Doğru olmayan malzeme seçimi sonucunda tekerlek izi gibi deformasyonların meydana gelmesi kaçınılmazdır. Yükün yeniden uygulanması yorulma süreci boyunca, malzemenin rijitliği azalmaktadır ve belirli bir yük tekrarı sayısından sonra gerilme değeri göçme zarfına ulaşır ve hasar meydana gelir. Trafik yükü altında üstyapı yüzeyinde meydana gelen kalıcı deformasyon, yol performansını etkileyen ana üstyapı problemlerinden biridir [27].

Tekerlek izi ise tekrarlayan trafik yükleri sonucunda tüm üst yapı katmanlarında kalıcı deformasyonların birikmesi ile oluşmaktadır. Aşırı tekerlek izinin varlığı yapısal bozulamalara neden olmaktadır. Sonuç olarak tekerlek izi sadece kaplamanın ömrünü kısaltmakla kalmaz, aynı zamanda otoyol güvenliğini de riske atar [28]. Yol yapısına etki eden yükler ve çevre koşulları dolayısıyla kaplama tabakasında zamanla bozulma beklenir. Biriken ve belli bir değere ulaşan bu deformasyon sonucunda üst yapı servis ömrünü tamamlamaktadır. Hareket halindeki bir aracın gerilme durumu Şekil 5'de gösterildiği gibi idealleştirilmektedir. Hareket halindeki bir aracın tekerlek yükleri kaplamanın alt ve üst kısımlarında basınçtan çekmeye hızlı bir şekilde değişir ve tekrarlı çekme birim şekil değiştirme dolayısıyla yorulma çatlakları meydana gelir. Esnek kaplama yol dizaynında bu bilgiler göz önünde bulundurularak performans tahmini yapılırken asfalt tabakası altındaki birim şekil değiştirme değeri oldukça önemlidir. Ayrıca yine kaplama tabakası ve alt zemin üzerindeki toplam düşey birim şekil değiştirme tekerlek izine neden olmaktadır.

ÖNİZLEME
YAYIN İÇİN GÖRÜNÜM



Şekil 5. Trafik akışı sırasında üniform P yükü altında kaplamanın tepkisi; ardışık tekerlek konumları A ve B, kaplamada çekme (ε_t) ve basınç (ε_c) birim şekil değiştirmelerine neden olan periyodik yüklemeyi ve altzemindeki basınç gerilmesi (ϑ_z) ve birim şekil değiştirmeyi (ε_z) gösterir. (Response of a flexible pavement during trafficking by uniform load P; successive wheel positions A and B depict cyclic loading that results in Tensile (ε_t) and compressive (ε_c) strains in pavement, and compressive stress (ϑ_z) and strain (ε_z) on subgrade) [29,30].

4. YÖNTEM (METHOD)

Esnek üstyapı tepkisini belirlemek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlar analitik yöntemler, Çok Katmanlı Elastik Teori (MLET), Sonlu Elemanlar Metodu (FEM), Ayrık Elemanlar Modelleme (DEM), Sınır Elemanlar Metodu (BEM) ve hibrit yöntemler olarak literatürde yer almaktadır. Daha basit çok katmanlı elastik teorisi kullanılarak ele alınamayan farklı üstyapı problemleri, Sonlu Elemanlar (FE) teknikleri kullanılarak başarılı bir şekilde simüle edilebilir [31].

Sonlu elemanlar metodu kompozit bir şekilde inşaa edilen kaplama malzemesinin doğrusal olmayan davranışını tespit etmek amacıyla kullanılan yöntemlerden biridir [32]. Bu yöntemler arasında, üstyapı ve asfalt malzemesinin performansını analiz etmek için önemli ölçüde FEM kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan 3 tip model uygulaması bulunmaktadır. Bunlar; düzlem deformasyon, eksenel simetrik ve üç boyutlu (3D) modellerdir.

Sonlu eleman simülasyonunun doğruluğu, geometrik boyut (iki boyutlu veya üç boyutlu), varsayılan malzeme davranışı (doğrusal, doğrusal olmayan, elastik veya plastik), sınır koşulları (silindirler, kenetlenmiş veya sonsuz elemanlar) ve yükleme koşulları (statik veya dinamik) aracılığıyla ayarlanabilir [33].

Sonlu elemanlar yöntemi sayesinde malzemelerin gerilmeleri ile elastik, plastik, viskoz ve viskoelastik şekil değiştirmeler arasındaki doğrusal olmayan bağlantıyı dikkate alarak hesaplamalarına devam etmektedir. Aynı zamanda elastik olmayan malzeme özelliklerine sahip yapılarda ve sürekli değişken haldeki koşullarda bile dinamik yüklere maruz kalan yol yapılarına ait sayısal verilerin hesaplanmasında tercih edilen güçlü bir yöntemdir.

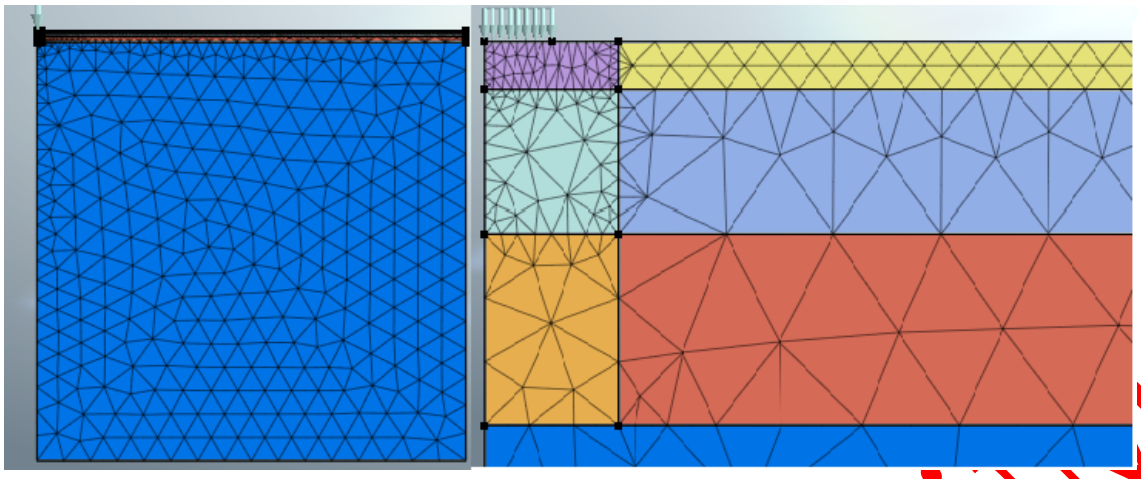
FEM ve diğer sayısal simülasyonlar, üstyapıda meydana gelecek olan değişimlerin tespit edilmesinde etkili bununla birlikte verimli bir yoldur. Hem akademik hem de endüstriyel sayısal simülasyonlarda en yaygın kullanılan teknik haline gelmiştir [34]. Analitik çözümler sayesinde yüklemeye maruz kalan elastik tabakalı kaplama sistemlerinin davranışını belirlemek mümkündür.

5. ANALİZLER (ANALYSES)

Dinamik yüklemeler sonucunda üstyapı sistemlerinde meydana gelebilecek olan etkilerin sayısal analizleri gerçeğe yakın sonuçlar verme konusunda başarılıdır. Üstyapı modellerinde yapılan sayısal simüslasyonlar sayesinde yol yapısında trafik yükü, donma-çözünme döngüsü, sıcaklık gibi etkenler sonucunda meydana gelecek olan mekanik tepkileri değerlendirmek mümkün olmaktadır. Dinamik analizlerde model sınır koşulları, üstyapı katmanları arasındaki etkileşim, yükleme genliği fonksiyonu ve yükleme döngüsü ve yükleme döngüsüne bağlı herhangi bir malzemedeki değişim göz önünde bulundurulmalıdır. Farklı koşullar altında meydana gelen deformasyonları hesaplamak amacıyla dinamik sonlu eleman modeli oluşturulmuştur.

Sayısal analizi yapılan model Şekil 6'da verilmiştir. Analizi yapılan üst yapı bölümü kaplama tabakası, granüler temel ve alttemel tabakası ile killi alt zemin tabakasından oluşmaktadır. Karadağ vd. [6] çalışması ile uyumlu bir biçimde kaplama tabakası kalınlığı 10 cm, temel ve alttemel tabaka kalınları sırasıyla 30 cm ve 40 cm olarak modellenmiştir. Model boyutları yükleme yarıçapı "R" olmak üzere 200Rx200R olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Malzeme parametreleri Çizelge 3'de verilmiştir. Asfalt tabakası için Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılırken, temel, alttemel tabakalarında Hardening Soil Small Stiffness malzeme modeli kullanılmıştır. Granüler malzemeler kendilerine has belirli bir sınır limit değeri sonrasında doğrusal olmayan davranış sergiler. Sayısal analizler için seçilen malzeme modellerinde bu husus dikkate alınmıştır. Ayrıca elastisite modülü, Poisson oranı ve malzemelerin yoğunluğu modelleme yapılan tabakayı karakterize etmek acısından önemli verilerdir. Jooster [35], tez çalışmasında Mohr-Coulomb kullarak ağır taşıt yükleri altındaki göçne potansiyelini hesaplamıştır. Saad, Mitri ve Poorooshasb [36], yaptıkları çalışmada kaplama tabakası için Viskoelastik malzeme modeli seçiminin daha gerçekçi bir yaklaşım olduğunu belirtmesine rağmen sayısal analiz için daha fazla zamana ihtiyaç olmasının yanında malzeme parametlerinin belirlenmesinde karmaşık laboratuvar olanakları gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Basitleştirmek amacıyla bazı araştırmacılar tarafından lineer-elastik olarak modellenmiştir [31, 36, 37]. Ancak alt zemin katmanlarının doğrusal davranış sergilemediği bir gerçektir. Wang ve Al-Qadi [38], agrega, hava ve su gibi malzemelerin kombinasyonu ile oluşan asfalt betonunun temelde bu içeriklere sahip olması nedeniyle zemin özelliklerine benzetilmiştir. Bu nedenle sayısal analizlerde asfalt için seçilecek olan malzeme modelinin Mohr-Coulomb olabileceği belirtilmiştir.

ERKEN GÖRÜNÜM



Şekil 6. Sayısal analizi yapılan 2D eksenel simetrik model (2D axisymmetric model with numerical analysis)

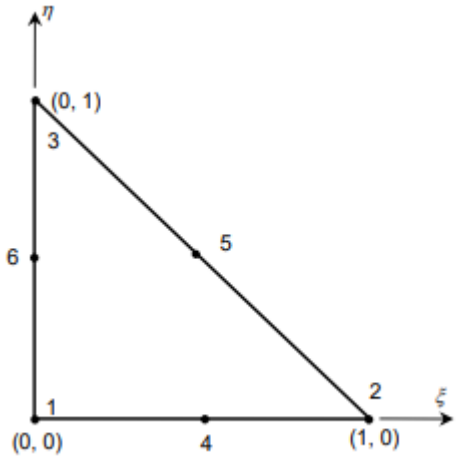
Çizelge 3. Analizlerde kullanılan malzeme parametreleri (Material parameters used in analyzes)

Malzeme Parametreleri	Asfalt	Florida Newberry Kireç taşı Temel	Florida Newberry Kireç taşı Alttemel	Katı kil	Erdemir çelikhanecüruf Temel	Erdemir çelikhane 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		$5x10^{-6}$	$5x10^{-6}$	$4,07x10^{-4}$	$2,18x10^{-4}$	$2,18x10^{-4}$
ν	0,3	0,35	0,35	0,2	0,35	0.48
Kalınlık (m)	0,1	0,3	0,4	10	0,3	0,4
γ (kN/m^3)	24	21,33	20,77	18	23,11	22,47
c (kN/m^2)	525	40	40	100	47	45
Φ (°)	27	40	35	10	47	45

Rashidi ve Haeri [39], Mohr-coulomb modelinin çeşitli geoteknik mühendislik problemlerine olan çözüm potansiyeli ve basitliği dolayısıyla kullanıldığını belirtmişlerdir. Huang vd. [40], asfalt karışımları üzerinde sıcaklığın etkisini incelemek üç eksenli testler yapmışlardır. Bunun sonucunda 0.6 MPa sıkıştırma basıncı aştında 525 kPa kohezyon değeri ve 27.47° içsel sürtünme açısı değeri elde edilmiştir. Ayrıca tekrarlı trafik yükleri altında malzeme öncelikle belirli bir deformasyon seviyesine ulaştıktan sonra yükün kalkmasıyla birlikte birim şekil değiştirme seviyesinin artmasıyla bu deformasyonların bir kısmı kalıcı bir hal almaktadır. Ancak düşük gerilme seviyelerinde elastik davranış görülmektedir. Temel ve alttemel tabakalarında, bu davranış gözönünde bulundurularak pekleşen zemin modeli (Hardening Soil Small Stiffness) seçilmiştir.

Elemanın ağ boyutu sayısal analizin doğruluğu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Daha sıkı ağ kullanımı sonucunda analiz süreleri uzayacaktır. Bu yüzden bu çalışmada modelin FEM ağının oluşturulmasında Şekil 7'de gösterilen şekil fonksiyonuna sahip 6 düğümlü üçgen eleman ile ağ sistemi oluşturulmuştur. Doğrudan tekerlek yükü altında daha sık bir ağ sistemi ve hesaplama süresini azaltmak amacıyla yükleme bölgesinden uzak bölgelerde daha seyrek ağlar kullanılmıştır. Modelin ağ sisteminde model sınırlarına yakın bölgelerde de yine daha sık ağ elamanları kullanılmıştır.

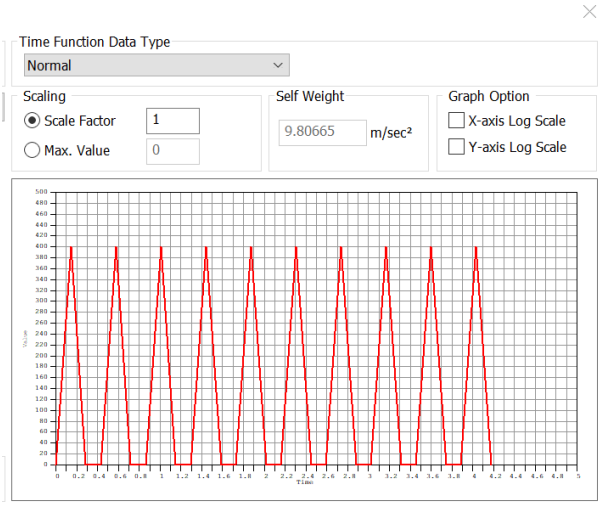
İNCELEMEYE GÖRÜNÜM



Şekil 7. 2D Sonlu elemanlar için düğüm konumu ve doğal koordinat sistemi (Node position and natural coordinate system for 2D Finite elements)

Sınır koşulları modelin analizler sonucunda vereceği yanıtı doğru tahmin edilmesinde büyük bir etkiye sahiptir. Yol üst yapı modellerinde düşey yönde (-y) harekete izin verilirken yatay yönler için (-,+x) bu hareket sınırlandırılmaktadır. Sınır koşullarının doğru bir şekilde atanması sayesinde model sınırlarında oluşabilecek düzensiz yük ve gerilme konsantrasyonlarını engellemek mümkün olabilmektedir. Sarımurat vd. [41], çalışmalarında sonlu elemanlar analizlerinde sınır koşullarının doğru olarak tanımlanmasının öneminden bahsetmişlerdir.

Yükleme durumunda, tekerlek yükü en fazla gerilmeyi doğrudan kaplama yüzeyi üzerinde uygularken, yükleme konumundan uzaklaştıkça gerilme değeri azalır. Lastiklerden gelen yükleme darbeleri ayrıca üçgen, yamuk, sinüzoidal veya Haversine [36,42-44,10] gerilme darbesinin zaman aralığında değişen fonksiyonu olacak şekilde simüle edilebilir. Ancak haversine yük fonksiyonu kullanıldığı takdirde yüklemelerde daha fazla alt adım gerekli olmaktadır. Bunun sonucu olarak, yükleme dalga formu ya sinüzodial ya da üçgen bir şekle sahip olduğu varsayımı yapılır. Hem zaman hem de veri kapasitesi dolayısıyla üçgen yükleme prensibi daha avantajlı olmaktadır. Şekil 8'de 10 yükleme adımı için tanımlanan üçgen yükleme eğrisi verilmiştir. Roldan-Oliden ve Calvo-Jurado [45], çalışmalarında üstyapının en fazla dingil yükünü ileten kısım olup ve altyapı ömrünün araç yükleri aracılığıyla kısaltması sonucunda günlük geçen araç yükünün ortalama yoğunluğunun önemli olduğu belirtilmiştir.

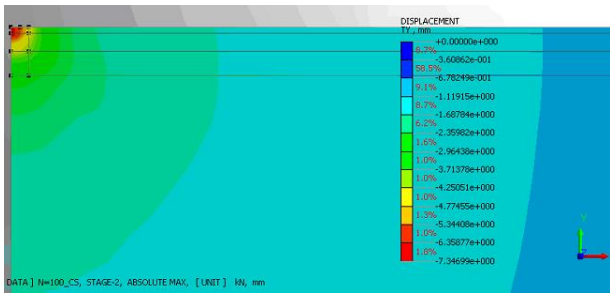


Şekil 8. Üçgen yükleme grafiği (Triangle loading chart)

Yükleme 0,144 s'de meydana gelmiş ve bir dinlenme süresi 0.288 saniyeye yayılmıştır. Sonlu elemanlar simülasyonunda tek lastik için eksenel simetrik modelde yükleme yarıçapı değeri 0.15 m olarak belirlenmiştir. Sayısal analiz süresince lastiğin yüzeye uyguladığı basınç 400 kPa olarak kabul edilmiş ve belirlenen yükleme bölgesinde üniform bir şekilde dağılmıştır.

Yapılan bu çalışmada çelik cürufu kullanımının temel veya altemel tabakalarının hangisinde daha etkin sonuçlar vereceğini belirlemek amacıyla 4 farklı kesit modeli tanımlanmıştır. İlk olarak genel itibariyle çelik cürufu kullanımın etkisini kıyaslayabilmek açısından KK kesiti tanımlanmıştır. Bu kesitte temel ve alttemel tabakalarında kireç taşı içerikli kırmataş malzeme parametreleri tanımlanmış ve model bünyesinde bulunan katmana malzeme ataması yapılmıştır. Devam eden kesitler ise kırmataş temel ve cüruf alt temel (KC), cüruf temel ve kırmataş alttemel (CK), cüruf temel ve cüruf alttemel (CC) şeklinde tanımlanmıştır.

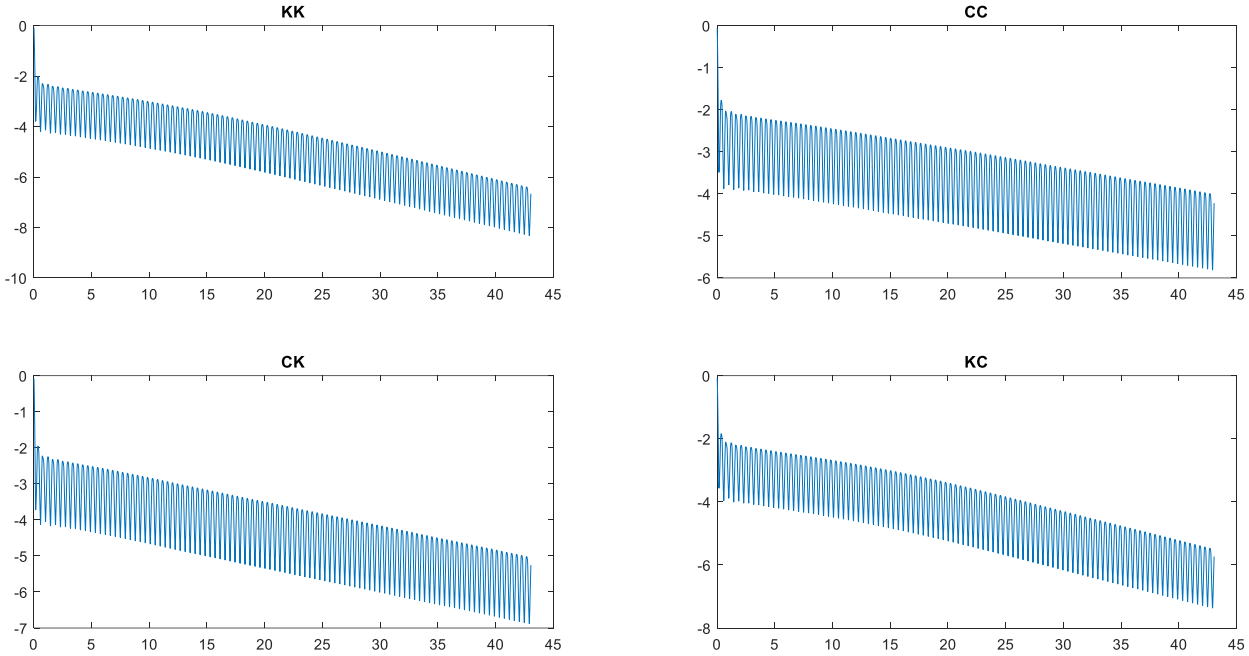
400 kPa basınç yükü altında model kesitlerinde Şekil 9'da verilen düşey deformasyon görüntüsü verilmiştir.



Şekil 9. CK kesiti düşey deformasyon görüntüsü(CK section vertical deformation image)

ÜRETİLGÖRÜLÜ

Modelin sınırlarında düşey deformasyon görüntüsü kontur dağılımına bakıldığında model boyutlarının başlangıç koşullarının doğru seçildiğini göstermektedir. En fazla düşey deformasyon değeri tekerlek yükü altında asfalt tabakasında meydana gelmiştir. Şekil 10'da 4 kesit için lastik ortasında meydana gelen düşey deformasyonların zamana bağlı değişim eğrileri verilmiştir. Düşey deformasyon değerleri herbir kesit için farklı değerlere sahip olsa da zamana bağlı olarak sürekli bir artış meydana gelmiştir.



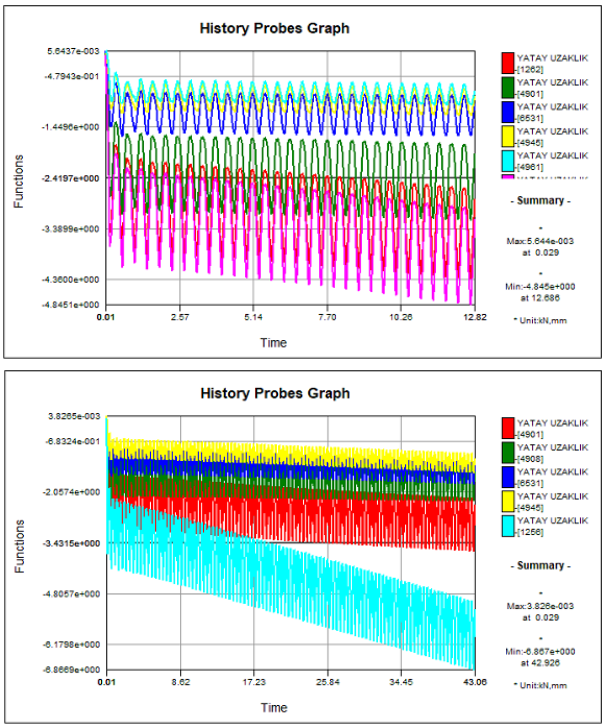
Şekil 10. Dört kesit için düşey deformasyon-zaman eğrileri (Vertical deformation-time curves for four sections)

Lastik ekseninden 0.2 m, 0.45 m, 1m ve 2 m yatay uzaklıklarda kaplama tabakasında meydana gelen zamana bağlı düşey deformasyon değişim grafiği (N=30 ve N=100 için) Şekil 11'de verilmiştir. Buna göre lastik ekseninden uzaklaştıkça kaplama yüzeyindeki deformasyon değerinde azalma meydana gelmekte olup model sınırına yaklaştıkça sıfır olmaktadır.

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan sayısal analizler sonucunda çelik cüruf agregaları gösterdiği davranış nedeniyle esnek ya da beton kaplamalı yollarda kısmi ya da tamamı doğal agregalar yerine kullanılması uygun olacaktır. Bu sayede doğal kaynakların kullanımı yerine çelik cürufu tercih edilmesi durumunda doğal çevrede biriken çelik cürufu yığınının azalması beklenmektedir.

Bu çalışmada çelik cürufunun temel veya alttemelde ya da her iki tabakada da kullanımı sonucundaki düşey deformasyon gibi performans parametrelerinin değişimi incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle çelik cürufu kullanımı sonucunda 4 farklı kesit için düşey deformasyon değerleri dinamik yüklemeye dayalı sayısal analiz sonucunda elde edilmiştir. Öncelikle tüm kesitler için benzer deformasyon görüntüleri elde



Şekil 11. Kaplama yüzeyi yatay uzaklık zamana bağlı deformasyon değişimi (Horizontal distance of pavement surface time dependent deformation change)

BEKLENGUL

edilmiştir. Tekrarlı yükler altında en fazla deformasyon değeri KK (temel ve alttemel kireçtaşı) kestinde meydana gelmiştir. Alttemel tabakasında kireçtaşı agregaların kullanılması durumundaki deformasyon değerleri çelik cürufa kıyasla daha yüksektir. Lastik ekseninden yatayda uzaklaştıkça asfalt tabakasındaki düşey deformasyon değeri giderek azalmıştır ve model sınırında sıfıra yaklaşmıştır. Lastik merkezinden itibaren düşey eksende yani derinlikle deformasyon değişiminde de aynı davranışın hakim olduğunu söylemek mümkündür. İlk 50 yükleme adımında minumum deformasyon değerleri sırasıyla CC ve KC kesitlerinde meydana gelmiştir. Yüz yükleme adımı için KK kesitinde 8.32 mm oturma değeri meydana gelirken CC kesitinde bu değer 5.81 mm olarak hesaplanmıştır.

Sayısal analizler sonucu hesaplanan plastik deformasyon değerleri yükleme sayısının artışı ile birlikte artmaya devam ettiği gözlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda çelik cürufu hem alttemel hem de temel tabakasında kullanımı dayanıklılık ve geoteknik açıdan kullanımı uygun olduğu görülmektedir. Sonraki çalışmalarda farklı mevsimsel özellikler dikkate alınarak bununla birlikte farklı tekerlek yükü değerleri ve modelleri kullanarak çalışmalar yapmak mümkündür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Araştırmanın yürütülmesinde HPCC (High Performance Computing Cluster) desteği sağlayan Aksaray Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Mürüvet Özsoy: Kavram, Metodoloji, Yazılım, Analiz, Doğrulama, Görselleştirme, Yazma.
Seyhan Fırat: İnceleme, Düzenleme, Kontrol, Denetim.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST**)**

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Bai F., Yang X., and Zeng G., "A stochastic viscoelastic–viscoplastic constitutive model and its application to crumb rubber modified asphalt mixtures", **Materials & Design**, 89: 802–809, (2016).

[2] Helwany S., Dyer J., and Leidy J., "Finite-Element Analyses of Flexible Pavements", ***Journal of Transportation Engineering***, 124(5): 491-499, (1998).

[3] Lazizi A., Trouzine H., Asroun A., and Belabdelouhab F., "Numerical Simulation of Tire Reinforced Sand behind Retaining Wall Under Earthquake Excitation", ***Engineering, Technology & Applied Science Research***, 4(2), 605–611, (2014).

[4] Huang Y.H., "Pavement Analysis and Design", ***Pearson/Prentice Hall,*** 2nd ed. Upper Saddle River, USA, (2003).

[5] Carvalho S. Z., Vernilli F., Almeida B., Demarco M., and Silva S. N., "The recycling effect of BOF slag in the portland cement properties", ***Resources, Conservation and Recycling***, 127, 216-220, (2017).

[6] Karadağ H., Fırat S., and Işık N. S., "Çelikhane cürufunun yol temel ve alttemel malzemesi olarak kullanılması", ***Politeknik Dergisi***, 23(3), 799-812, (2020).

[7] Ahmedzade P., and Sengoz B. "Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete", ***Journal of Hazardous Materials***, 165(1-3), 300-305, (2009).

[8] Li L., Ling T. C., and Pan S. Y., "Environmental benefit assessment of steel slag utilization and carbonation: A systematic review", ***Science of The Total Environment***, 806, 150280, (2022).

[9] Rađenović A., Malina J., and Sofilić T., "Characterization of ladle furnace slag from carbon steel production as a potential adsorbent", ***Advances in Materials Science and Engineering***, 198240, (2013).

[10] Oluwasola E. A., Hainin M. R., and Aziz M. M. A., "Characteristics and utilization of steel slag in road construction", ***Jurnal Teknologi***, 70(7), (2014).

[11] TOBB, "Türkiye Demir ve Demir Dişi Metaller Meclisi Raporu 2020", ***TOBB Yayınları,*** 2021/21, 978-605-137-711-7, (2021).

[12] AISBL W.S.A, "2022 World Steel in Figures", ***World Steel Association***, Avenue de Tervueren 270, Brussels, Belgium, (2022).

[13] Türkiye Çelik Üreticileri Derneği, "Türkiye Çelik Üreticileri Derneği Basın Bülteni", ***Turkish Steel Producers Association***, (2020).

[14] Jianga Y., Ling T. C., Shia C., & Pan S. Y., "Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete-A review". ***Resources, Conservation and Recycling***, 136, 187-197, (2018).

[15] Ren P., Ling T. C., & Mo K. H., "Recent advances in artificial aggregate production", ***Journal of Cleaner Production***, 291, 125215, (2021).

[16] Birat J. P. "Sustainability footprint of steelmaking byproducts", ***Ironmaking & Steelmaking***, 39(4), 270-277, (2012).

[17] Harvey J., Lea J., Kim C., Coleri E., Zaabar I., Louhghalam A., Chatti K., Buscheck J., Butt A., "Simulation of cumulative annual impact of pavement structural response on vehicle fuel economy for California test sections". ***UC Davis: University of California Pavement Research Center,*** (2016).

[18] Behiry A. E. A. E. M., "Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as subbase material in flexible pavement", ***Ain Shams Engineering Journal***, 4(1), 43-53, (2013).

ERKEN GÖRÜNÜM

[19] Henríquez P. A., Aponte D., Ibáñez-Insa J., and Bizinotto M. B. "Ladle furnace slag as a partial replacement of Portland cement", ***Construction and Building Materials***, 289, 123106, (2021).

[20] Poh H. Y., Ghataora G. S., & Ghazireh N., "Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines", ***Journal of Materials in Civil Engineering***, 18(2), 229-240, (2006).

[21] Kavussi A., Jalili Qazizadeh M., and Hassani A., "Fatigue behavior analysis of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag", ***Journal of Rehabilitation in Civil Engineering***, 3(1), 74-86, (2015).

[22] Saevarsdottir T., and Erlingsson, S. "Modelling of responses and rutting profile of a flexible pavement structure in a heavy vehicle simulator test", ***Road Materials and Pavement Design***, 16(1), 1-18, (2015).

[23] Al-Humeidawi B., "Experimental characterization of rutting performance of HMA designed with aggregate gradations according to Superpave and Marshall methods", ***World Journal of Engineering and Technology***, 4(3), 477-487, (2016).

[24] Moghaddam T. B., Karim M. R., and Abdelaziz M., "A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes", ***Scientific Research and Essays***, 6(4), 670-682, (2011).

[25] Moghaddam T. B., Soltani M., and Karim M. R., "Experimental characterization of rutting performance of polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures under static and dynamic loads", ***Construction and Building Materials***, 65, 487-494, (2014).

[26] Christopher B.R., Schwartz C., Boudreau R., "FHWA NHI-05-037 geotechnical aspects of pavements reference manual", ***US Department of Transportation, Federal Highway Administration***, Washington, DC, (2006).

[27] Karadag H., Fırat S., Işık N.S., Yılmaz G., "Determination of permanent deformation of flexible pavements using finite element model", ***Građevinar***, 74(6), 471-480, (2022).

[28] Zhu T., Ma T., Huang X., and Wang S., "Evaluating the rutting resistance of asphalt mixtures using a simplified triaxial repeated load test", ***Construction and Building***

[29] O'mahony M. J., Ueberschaer A., Owende P. M. O., and Ward S. M., "Bearing capacity of forest access roads built on peat soils", ***Journal of Terramechanics***, 37(3), 127-138, (2000).

[30] Owende P. M., Hartman A. M., Ward S. M., Gilchrist M. D., and O'Mahony M. J., "Minimizing distress on flexible pavements using variable tire pressure", ***Journal of Transportation Engineering***, 127(3), 254-262, (2001).

[31] Asim M., Ahmad M., Alam M., Ullah S., Iqbal M. J., and Ali S., "Prediction of Rutting in Flexible Pavements using Finite Element Method", ***Civil Engineering Journal***, 7(8), 1310-1326, (2021).

[32] Mo L., Shu D., Li X., Huurman M., and Wu S., "Experimental investigation of bituminous plug expansion joint materials containing high content of crumb rubber powder and granules", ***Materials & Design***, 37, 137-143, (2012).

[33] Ghadimi B., Nikraz H., and Rosano M., "Dynamic simulation of a flexible pavement layers considering shakedown effects and soil-asphalt interaction",

[34] Ameri M., and Behnood A., "Laboratory studies to investigate the properties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates", ***Construction and Building Materials***, 26(1), 475-480, (2012).

[35] Jooster F. J., "Modeling Flexible Pavement Response Under Super Heavy Vehicles", ***PhD dissertation***. Texas A&M University, College Station, (1995).

[36] Saad B., Mitri H., Poorooshasb H., "Three-dimensional dynamic analysis of flexible conventional pavement foundation", ***Journal of Transportation Engineering,*** 131(6), 460-469, (2005).

[37] Kim M., Tutumluer E., Kwon J., "Nonlinear pavement foundation modeling for three-dimensional finite-element analysis of flexible pavements", ***International Journal of Geomechanics***, 9(5), 195-208, (2009).

[38] Wang H., and Al-Qadi I. L., "Near-surface pavement failure under multiaxial stress state in thick asphalt pavement", ***Transportation Research Record***, 2154(1), 91-99, (2010).

[39] Rashidi M., Haeri S. M., "Evaluation of behaviors of earth and rockfill dams during construction and initial impounding using instrumentation data and numerical modeling", ***Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering***, 9(4), 709-725, (2017).

[40] Huang T., Qi S., Liu H., Yu H., Li S., "Shear properties of asphalt mixtures under triaxial compression", ***Applied Sciences***, 9(7), 1489, (2019).

[41] Sartmurat S., Tasan H. E., Işık N.S., and Fırat S., "Taş Kolon Performanslarının Hipoplastik Model ile Analizi", ***Politeknik Dergisi***, 24 (3), 997-1007, (2021).

[42] Zaghloul S. M., and White T., "Use of a three-dimensional, dynamic finite element program for analysis of flexible pavement", ***Transportation Research Record***, 1388, (1993).

[43] Al-Qadi I. L., Wang H., and Tutumluer E., "Dynamic analysis of thin asphalt pavements by using cross-anisotropic stress-dependent properties for granular layer", ***Transportation Research Record***, 2154(1), 156-163, (2010).

[44] Ghadimi B., Nega A., and Nikraz H., "Simulation of shakedown behavior in pavement's granular layer", ***International Journal of Engineering and Technology (IJET)***, 7(4), 198-203, (2015).

[45] Roldan-Oliden P., and Calvo-Jurado C., "Influence of traffic and road surface materials on elastic behavior of layered pavements", ***Politeknik Dergisi***, 25(2), 855-860, (2022).

PREPRINT