

ARAŞTIRMA MAKALESİ

## Çelik Cürufu Kullanılan Yol Katmanlarında Geosentetik Tabaka Konumunun Etkisinin Belirlenmesi

### *Determination of the Effect of the Position of Geosynthetic Layers on Road Layers using Steel Slag*

Mürüvet Özsoy<sup>1\*</sup>, Seyhan Fırat<sup>2</sup>, Nihat Sinan Işık<sup>2</sup>, Berna Unutmaz<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Aksaray Üniversitesi, İnşaat Bölümü, Aksaray, Türkiye.

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye.

<sup>3</sup> Hacettepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Geliş / Received: 04.10.2023

Kabul / Accepted: 30.10.2023

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author) Mürüvet Özsoy [munluozsoy@aksaray.edu.tr](mailto:munluozsoy@aksaray.edu.tr)

**ÖZ:** En önemli ulaşım ağlarından biri olan karayollarında sürekli taşıt trafiğine bağlı olarak yol yüzeyinde yorulma çatlakları, tekerlek izleri gibi yapısal deformasyonlarla karşılaşmaktadır. Bozulmaların meydana geldiği tasarımlarda bakım ve onarım çalışmalarının yanı sıra yolun tümüyle yeniden inşası da gerekebilmektedir. Birçok ülkede karayolları için gerekli olan agregaların kullanımı hem doğal kaynakların azalması hem de kaynağa uzak olması nedeniyle zorlaşmaktadır. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda atık malzemelerin geri dönüşüme katkısının artırılması ve malzeme temininin sağlanması açısından çelik cürufu da yol agregası olarak kullanılmaktadır. Bu amaçla çelik cürufunun yolun granüler katmanlarında kullanımı sayesinde hem yol yapısının stabilite kazanması hem de doğal kaynaklarının verimli kullanımı mümkün olmaktadır. Bu çalışmada temel ve/veya alt temel tabakalarında çelik cürufu ve doğal agrega kullanılarak oluşturulan dört farklı kombinasyondaki kesitler için sayısal analizler yapılmıştır. Ayrıca geosentetik donatı yerleştirilen tabaka sayısı etkisinin belirlenmesi amacıyla üç farklı yerleşim durumu için statik analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, çelik cürufu ile oluşturulmuş kesitlerde literatür ile uyumlu olacak bir şekilde alt temel tabakasında çelik cürufu kullanılması halinde düşey deformasyona etkisinin başarılı bir şekilde yansıtıldığı görülmüştür. İki sıra geogrid donatı kullanılması durumunda deformasyon değerinde tek sıra kullanımına kıyasla daha fazla azalma meydana geldiği de elde edilen önemli bulgulardan biridir.

**Anahtar Kelimeler:** Statik analiz, çelik cürufu, geogrid, deformasyon, donatı konumu.

**ABSTRACT:** On highways, one of the most important transportation networks, structural deformations such as fatigue cracks and ruts are encountered on the road surface due to constant vehicle traffic. In designs where deterioration occurs, complete reconstruction of the road may be required, as well as maintenance and repair work. In many countries, the use of aggregates required for highways becomes difficult. Considering this situation, steel slag is also used as road aggregate to increase the contribution of waste materials to recycling and to provide material supply. Use of steel slag in the granular layers of the road both increases the stability of the road structure and provides an efficient use of natural resources. In this study, numerical analyses were performed for the sections in four different combinations created by using steel slag and natural aggregate in the foundation and/or sub-base layers. In addition, static analyses were carried out for three different settlement situations to determine the effect of the number of layers in which geosynthetic reinforcement was placed. The results of the analyses showed that the vertical deformation effect was successfully reflected in the case of using steel slag in the lower foundation layer, in accordance with the literature, in the sections formed with steel slag. It is also one of the important findings that in the case of using two rows of geogrid reinforcement, there is a greater decrease in the deformation value compared to the use of a single row.

**Keywords:** Static analysis, steel slag, geogrid, deformation, position of reinforcement.

## 1. GİRİŞ

İnsanlığın başlangıcından günümüze kadar olan süreçte insanların seyahat etmesi ve ekonomik olarak gelişmenin devam etmesi için ulaşım temel bir ihtiyaç halini almıştır. Bu amaçla yapılan ulaşım yolları yüzyılı aşkın süredir tasarlanmış ve inşa edilmiştir.

Karayolları, tüm Dünya’da olduğu gibi ülkemizde yük ve yolcu taşımacılığında yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Karayolları teknik açıdan değerlendirildiğinde çok katmanlı olarak tasarlanmaktadır. Genel anlamda yüzey tabakası bitümlü karışımların tercih edildiği esnek üstyapı sistemleri granüler temel ve alttemel tabakalarından oluşmaktadır.

Nüfus artışıyla birlikte farklı ulaşım türlerine olan ihtiyacın artmasının yanında tasarımlarda kullanılacak malzeme özelliklerinin artan taşıt trafiği ve diğer etkili faktörlere karşı nitelikli bir performans göstermesi de beklenmektedir. Özellikle inşaat sektöründe yaşanan ekonomik ve teknolojik gelişmeler dolayısıyla doğal kaynaklar, aşırı ve bilinçsiz kullanıma maruz kalmıştır. Bunun bir sonucu olarak yeni inşa edilecek tasarımlarda kullanılacak malzemelerin azalan doğal kaynakların daha etkili ve verimli kullanımına yönelik çabaların artması da gerekli olmuştur. Özellikle inşaat sektöründe sürdürülebilir malzemelerin kullanımı döngüsel bir ekonomi sisteminin varlığına katkı sağlamaktadır [1].

Yol üstyapılarında doğal agrega yerine kısmen ya da tamamen çelik cürufunun, inşaat yıkım atıklarının ve geri dönüştürülmüş beton agregaların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Atık malzemelerin kullanımı ile atık depolama alanlarının ve devasa atık dağlarındaki birikmenin en aza indirilmesi mümkün olmaktadır [2]-[4]. Biriken atıklar kısa vadede zemin ve su kirliliğine neden olurken uzun vadede küresel ısınma gibi tüm dünyayı etkisi altına alan felaketleri de beraberinde getirmektedir.

Çelik cürufu çelik üretiminin sonucunda ortaya çıkan yan ürün olarak en çok tercih edilen malzemelerden olup doğal agregaların yerini alma konusunda büyük bir potansiyele sahip olduğu için yeşil bir kaynak olarak kabul edilmektedir [5]-[7]. Bununla birlikte çeşitli inşaat mühendisliği

uygulamaları ve yol katmanları inşaatında çelik cürufu yaygın olarak kullanılmaktadır [8]. İnşaat mühendisliği ve diğer malzeme disiplinleri tarafından çelik cürufu kullanımının incelenmesi sonucunda harmanlanmış çimento üretimi için bir hammadde, asfalt karışımlarının üretimi için agregalar veya bir yol kaplaması temeli ya da alt temel tabakaları için granüler malzeme gibi geniş alanlarda kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır [9]-[10]. Yapılan çok sayıdaki araştırmaya göre çelik cürufunun sahip olduğu köşeli şekli ve pürüzlü yüzey dokusu ile mekanik kitlelemenin yanında yüksek özgül ağırlığının yüksek kayma direnci sağlaması, daha iyi stabilite, yüksek sıcaklıkta deformasyonlara karşı ve düşük sıcaklıkta ise çatlama direnci sağladığı ifade edilmiştir [11]-[13]. Ayrıca doğal agregaların kullanıldığı yüzeyler zamanla cilalanmaya maruz kalırken çelik cürufu agregaların sahip olduğu özellikler sayesinde cilalanmaya karşı sürtünme direncini korumaktadır. Bununla birlikte literatürde çelik cürufu kullanmanın hem çevre açısından olumlu etkilere sahip olduğu hem de maliyet tasarrufu sağladığı belirtilmektedir [14].

Yolların servis ömrü boyunca beklenen performansı göstermesinde özellikle yol tabakalarında kullanılan granüler malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerinin önemli olduğunu söylemek mümkündür. Ancak servis ömrü süresince yol üstyapısı tekrarlı trafik yükleri ve doğal koşulların etkisine doğrudan maruz kalmaktadır [15]. Bu nedenle geosentetikler ile güçlendirilerek/rehabilite edilerek servis ömrünün ve taşıma kapasitesinin artırılmasının yanında çevresel faktörlere dayanıklı bir tasarım oluşturmak mümkündür. Geosentetikler, zemin malzemesine sürtünme, yapışma, kenetlenme veya hapsedme yoluyla bağlanarak zemin kütlelerinin stabilitesini artırır. Polimerik malzemelerden üretilen geogridler yollar, duvarlar, şevler ve bina temelleri gibi çoğu uygulamalarda tercih edilen bir yapı malzemesidir. Önceki yıllarda gerilme kuvvetlerini bir veya iki yönde taşımak amacıyla kare ve dikdörtgen açıklıklı üretimleri bulunurken son yıllarda üçgen açıklıklı olanların üretimleri yaygınlaşmaktadır. Geogridler, agrega malzemesinin uygulanan tekerlek yükü altında yanal olarak hareket etmesini önler taban katmanında yerel güçlenmeyi ve sertliği artırır.

Yapılan bu çalışmada çelik cürufalarının agrega olarak kullanılması halinde tekrarlı trafik yükleri altındaki yol performansına olan etkisinin yanında geogridlerin kullanımı ile ilgili verilen kısa bilgi sonrasında sayısal analizler yardımıyla çevresel ve teknik açıdan kullanımları değerlendirilmiştir. Son olarak bu amaçla yapılan çalışmalar mevcut ve gelecekteki gelişmenin sağlanması açısından faydalı olmaktadır.

## 2. MATERYAL VE METOT

Çelik cürufu çelik üretim sonucunda yan ürün olarak ortaya çıkan sentetik bir agrega türüdür. Üretilen çelik ve fırın tipine bağlı olarak Bazik Oksijen Fırını (BOF) cürufu Şekil 1’de, Elektrik Ark Fırını (EAF) cürufu Şekil 2’de ve Pota Fırını (LF) Şekil 3’de gösterilen temelde üç türü bulunmaktadır.



Şekil 1: BOF cürufu [16].

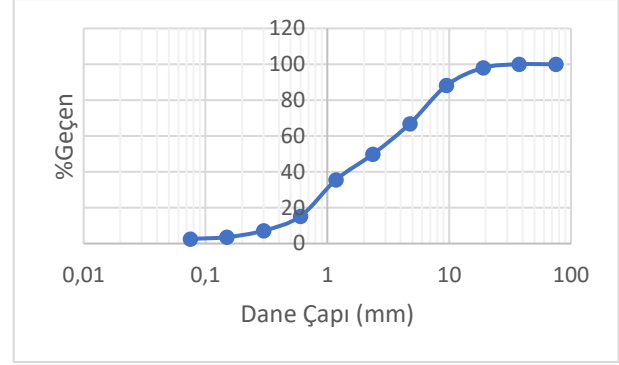


Şekil 2: EAF cürufu [17].



Şekil 3: LF cürufu [18].

Çalışma kapsamında kullanılan EAF cürufuna ait yapılan elek analizi sonucunda oluşturulan granülometri eğrisinden hareketle temel ve alttemel tabakaları için Karayolları Teknik Şartname limitlerini sağladığı ifade edilmiştir [23]. Şekil 4’de elek analizine ait granülometri eğrisi verilmiştir.



Şekil 4: EAF cürufu [23].

BOF, EAF ve LF cürufalarının içeriğinde öncelikle CaO, MgO, SiO<sub>2</sub> ve FeO bulunmaktadır. Bu oksitlerin oranları ve diğer küçük bileşenlerin konsantrasyonu oldukça değişkendir ve ham maddelere, üretilen çeliğin türüne, fırın koşullarına vb. bağlı olarak aynı zamanda üretim sürecindeki partiden partiye değişiklik gösterir [10]. Tablo 1’de EAF ve BOF cürufalarının kimyasal içerik aralığı verilmiştir.

**Tablo 1:** Çelik cürufunun tipik kimyasal bileşim aralığı [10].

Kimyasal Bileşenler (%)	BOF Cürufu	EAF Cürufu
FeO	10-35	15-30
MnO	2-15	3-10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.2-3.0	0.1-2.0
SiO <sub>2</sub>	8-20	9-20
CaO	30-55	35-60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1-6	2-9
MgO	5-15	5-15
TiO <sub>2</sub>	0.4-2	

Çelik cürufunun kimyasal içeriğinde bulunan FeO sayesinde mukavemeti artmaktadır. Bu nedenle daha yüksek demir içeriğine sahip çelik cürufunun daha yüksek yoğunluk ve aşınmaya karşı direnç göstermesi beklenmektedir [19]. Buna ek olarak içerikte bulunan kireç ve serbest MgO çelik cürufunun hacimsel davranışında etkili olan element bileşimleridir.

Mohr-Coulomb malzeme bünye modeline sahip asfalt tabakası ve Hardening Soil (small strain

stiffness) malzeme modeline sahip granüler tabakalar için elastisite modülü (E),  $\nu$  (poisson oranı),  $\gamma$  (birim hacim ağırlık), c (kohezyon)

değerlerine ait sayısal analizler için gerekli parametreler Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2:** Granüler malzeme parametreleri.

Malzeme Parametreleri	Asfalt	Kireç taşı Temel	Kireç taşı Alttemel	Katı kil	Çelikhane cüruf Temel	Çelikhane cüruf Alttemel
	Model	MC	HSsmall	HSsmall	HSsmall	HSsmall
E(MPa)	4500					
$\nu$	0.3	0.35	0.35	0.2	0.35	0.35
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	24	21.33	20.77	18	23.11	22.47
c (kN/m <sup>2</sup> )	525	40	35	100	47	45

Geogridler, farklı bir imalat süreciyle (ekstrüde ve zımbalanmış-çekilmiş, örgü veya kaynak) polimerik malzemelerden (çoğunlukla yüksek yoğunluklu polietilen, polipropilen veya polyester) üretilirler [20]. Geogridler, agrega malzemesinin uygulanan tekerlek yükü altında yanal olarak hareket etmesini önler taban katmanında yerel güçlenmeyi ve sertliği artırır. Yapılan bu çalışmada ekstrüde geogridler kullanılmıştır. Tablo 3’de geogrid malzeme parametreleri verilmiştir.

**Tablo 3:** Geogrid sayısal analiz için malzeme parametreleri.

Özellik	Birim	Değer
Ağırlık	g/m <sup>2</sup>	740
Elastisite modülü	GPa	0.39
Çekme gerilmesi	MPa	9
Kopma anında uzama	%	6

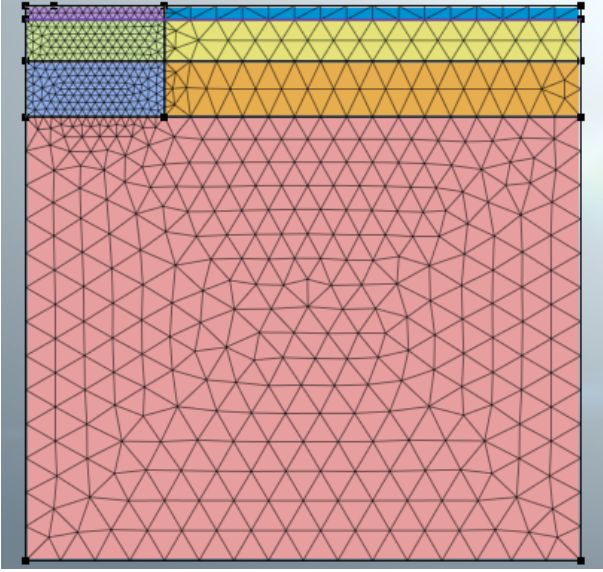
Günümüzde 2000’li yıllar öncesine kıyasla kişisel bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte Sonlu Elemanlar Metodu (FEM, Finite Element Method) sayesinde esnek kaplama sistemlerinin gerçeğe en yakın sayısal analizlerini FEM ile yapmak mümkündür. Gerilmelerin, şekil değiştirmelerin ve bozulmaların belirlenmesinde doğrusal olmayan malzeme davranışının simüle edilmesinde yaygın olarak FEM kullanılmaktadır. Sayısal analizler temelde statik ve dinamik olarak yaygın iki türü sıkça tercih edilmektedir. Dinamik ve statik yük koşulları altında yapılan analiz sonuçlarının karşılaştırılması neticesinde kaplama sisteminin düşey yüzey deformasyonunun statik analiz sonuçlarıyla kıyaslandığında %50 daha az olduğu bunun nedeninin ise olarak dinamik analizlerde atalet kuvvetleri, enerji tüketen kuvvetler ve iç kuvvetlerin, dışarıdan uygulanan kuvvetleri absorbe etmesi olduğu ifade edilmiştir. Statik analiz

sonuçlarının ise yalnızca iç kuvvetler etkisiyle, dış kuvvetleri sönmemesi dolayısıyla daha yüksek deformasyon değerlerinin hesaplanmasına yol açacağı belirtilmiştir [26]. Ayrıca yapılan bazı çalışmalarda statik ve dinamik analiz sonuçları arasındaki eğilimin benzer olduğu ifade edilmiştir [27]-[28].

Çalışma kapsamında güçlendirilmiş ve çelik cürufu kullanılarak modellenmiş yol üst yapı katmanlarının tepkisinin belirlenmesinde bu yöntem kullanılarak statik analizi yapılmıştır.

### 3. SAYISAL MODELLEME VE ANALİZ

Sayısal analiz için Şekil 5’de gösterilen 2D eksenel simetrik sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Modelin sonlu elemanlar ağ sisteminin oluşturulmasında 6 düğümlü üçgen elemanlar tercih edilmiştir. Tekerlek yükleme bölgelerinde daha sık ağ sistemi kullanırken yükleme bölgesinden uzaklaştıkça hem depolama alanı bakımından hem de optimum sürede sayısal analizin tamamlanması açısından ağ boyutları büyütülmüştür. Modelin yan sınırlarında düşey yönde harekete izin verilirken model alt sınırlarında hem yatay hem de düşey yönde hareketi sınırlandırılmıştır. Şekil 6’da verilen kesitler üzerinde belirtilen konumlardaki geogridlerin yazılımda tanımlanması aşaması ilk olarak malzeme bünye modelinin seçimi ve bu model için gerekli parametrelerin atanması ile başlanmaktadır. Yine belirtilen konumlardaki geogridler ve model geometrisinden faydalanılarak 1D mesh sistemi oluşturulup bu sisteme geogrid için atanan özelliklerin seçimi ile donatı tanımlaması yapılmaktadır.

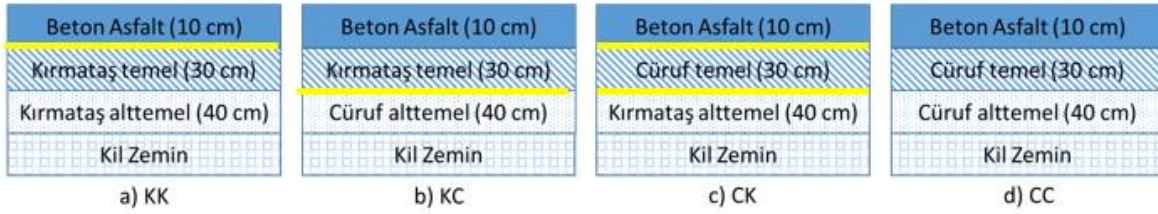


Şekil 5: 2D sonlu elemanlar modeli.

Yol tabakalarında meydana gelen deformasyonların en önemli nedenlerinden biri şüphesiz trafik yükleridir. Model boyutlarının seçimine yönelik yapılan çalışmalarda aksel simetrik modellerde genişlik ve derinliğinin 12R×50R boyutlarında ya da 20R×140R model boyutlarının analiz sonuçlarına olan etkisinin ihmal

edilebilecek nitelikte olduğu belirtilmiştir [24,25]. Sayısal analizi yapılması için oluşturulan iki boyutlu sonlu elemanlar model boyutlarının seçiminde 300 mm lastik genişliğine sahip taşıt için aksel simetrik model olması nedeniyle tek lastik sayısal verileri düşünülerek simüle edilmiştir. Araç tekerlekleri vasıtasıyla aktarılan aksel yükün uygulanmasında R yükleme yarıçapı 0,15 m alınmıştır. Tekerlek yükleme bölgesinde literatürde olduğu gibi düzgün dağılmış 400 kPa değerinde temas basıncı uygulanmıştır [20]. Sayısal analizi yapılması için oluşturulan iki boyutlu sonlu elemanlar model boyutlarının

Granüler tabakalarda Hardening Soil Small Stiffness asfalt tabakasında ise Mohr-Coulomb malzeme modeli seçilmiştir. Şekil 6'da tanımlandığı şekilde KK, CK, KC ve CC olmak üzere dört farklı kesit için sayısal analizler yapılmıştır. Ayrıca bu kesitler üzerinde geogrid donatı konumları da gösterilmiştir. Tüm kesitlerde kaplama tabakası altında, temel tabakası altında ve kaplama ile temel tabakası geogrid donatı kullanılması sonucunda sayısal analizler yapılmıştır.



Şekil 6: Sayısal analizi yapılan kesitler.

#### 4. BULGULAR

400 kPa tekerlek yükü altında hem donatılı hem de donatısız kesitler için yapılan sayısal analizler sonucunda Şekil 7'de verilen donatısız KC kesitine ait deformasyon görüntüsü elde edilmiştir. Çalışma kapsamında donatı yerleşim konumları kaplama tabakası altı, temel ile alttemel tabakaları arası ve belirtilen konumlarının her ikisinin birlikte kullanıldığı üç durum için nümerik analizler yapılmıştır. Aksel simetrik olarak modellenen sonlu elemanlar modelinde en fazla deformasyon değeri sayısal analizler sonucunda tekerlek ekseninde (Şekil 8) meydana gelmiştir. Tekerlek

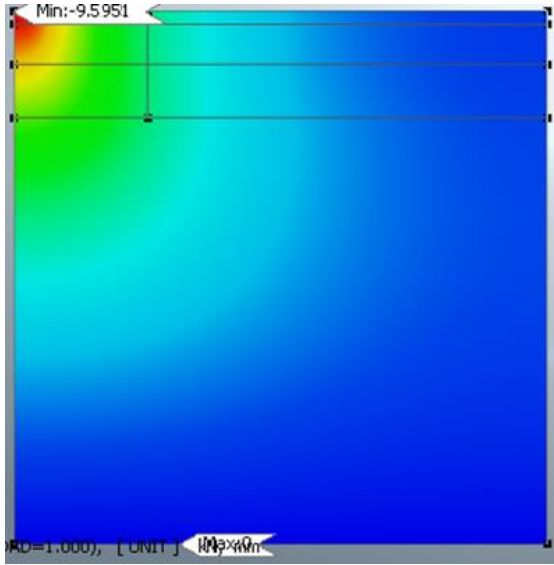
ekseninden uzaklaştıkça düşey deformasyon etkisi azalmıştır.

Tablo 4'de donatılı ve donatısız kesitlerde tekerlek yükleme bölgesinde meydana gelen en yüksek deformasyon değerleri verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde donatısız kesitler içerisinde en düşük deformasyonlar cürufun temel/alttemel tabakalarında kullanıldığı durumunda meydana gelmiştir.

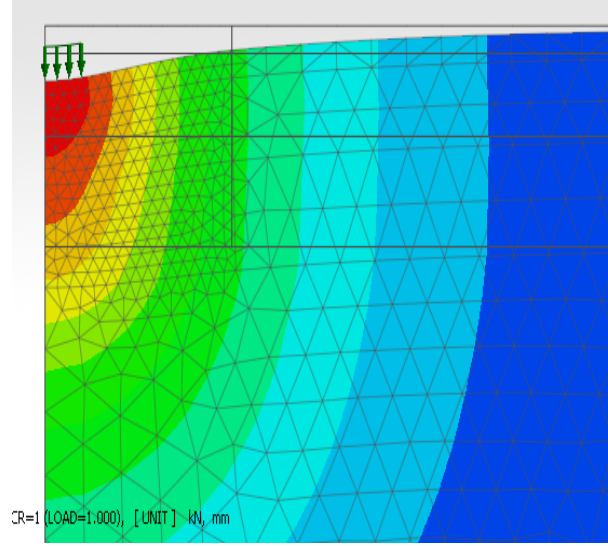
Donatılı kesitler için yapılan değerlendirmede ise tek sıra geogrid kullanılması halinde en iyi performans kaplama tabakası altında kullanımı ile sağlanmıştır. Buradan hareketle trafik yüklerinden en çok etkilenen kaplama tabakası olması nedeniyle



geogrid donatı etkisini göstermiştir. Ancak iki tabaka geogrid kullanılması durumunda tüm durumlara kıyasla en düşük deformasyon değerleriyle karşılaşılmıştır.



Şekil 7: KC kesiti deformasyon görüntüsü.



Şekil 8: Tekerlek yükü etkisi.

Tablo 4: Donatılı ve donatısız kesitlerde düşey deformasyon değerleri.

	Yük değeri	KK (mm)	CC (mm)	CK (mm)	KC (mm)
Donatısız	400 kPa	9.64	9.396	9.52	9.496
Kaplama tabakası altı	400 kPa	8.42	8.37	8.40	8.38
Temel ve Alttemel tabakası arasında	400 kPa	8.88	8.66	8.68	8.85
İki tabaka güçlendirme	400 kPa	8.07	8.03	8.02	8.08

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan nümerik analizler sonucunda yol üstyapı tabakalarında çelik cürufu ve geosentetik kullanımı sayesinde fonksiyonel, mekanik ve çevresel açıdan avantajlar sağlandığını söylemek mümkündür. Öncelikle çelik cürufunun kullanımına yönelik yapılan sayısal analiz sonuçları değerlendirildiğinde en düşük deformasyon değerleriyle cürufun alttemel tabakasında kullanıldığı kesitlerde karşılaşılmıştır. Geoteknik açıdan değerlendirildiğinde uygun malzeme niteliğinde olduğu yapılan çalışmalarda da desteklenmiştir [21]. Özetle çelik cürufunun kullanılmasına yönelik yapılacak en net yorum doğal agregaların yerine çelik cürufu kullanımının daha çok tercih edilmesi sayesinde yol üstyapısının mekanik performansının iyileşmesinin yanında geri dönüşüm sürecine de katkı sağlanacaktır. Bu durum sürdürülebilir bir çevre ve ekonomik sistem

açısından olumlu bir gelişme olacaktır. Geogrid kullanımına yönelik yapılan değerlendirmede ise kaplama tabakası altında kullanılan geogridler ile aksel olarak etki eden tekerlek yükünün tabakada daha geniş bir alana yayılması ile meydana gelecek olan deformasyonların daha düşük seviyede kalması mümkündür. Ayrıca geogridlerin sahip olduğu yüksek çekme dayanımı sayesinde yol tabakalarında tekrarlı trafik yükleri nedeniyle oluşan çekme gerilmelerinin neden olduğu yorulma ve tekerlek izi gibi bozulmalar en düşük seviyeye indirgenebilmektedir. Genellikle donatılı tabakanın en uygun konumu temel tabakasının kalınlığına ve trafik yüklerinin büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir [22]. Çift sıra geogrid kullanımında ise en düşük deformasyon değerleri ile karşılaşılmıştır. Buradan hareketle iki geogrid tabakası arasında kalan bölgede mekanik bir kilitleme sağlanarak yol üst yapısı daha dayanıklı bir hale gelmiştir.

**Yazar Katkısı:** Mürüvet Özsoy, kavram, metodoloji, sayısal modelin oluşturulması, bulguların elde edilmesi, görselleştirme ve orijinal ilk taslak hazırlama, Seyhan Fırat inceleme, düzenleme ve denetleme, Nihat Sinan Işık, inceleme ve düzenleme, Berna Unutmaz, inceleme ve düzenleme kısımlarına katkı sağlamıştır.

**Teşekkür:** Yazarlar, yorum ve önerileri için hakemlere teşekkür eder.

**Çıkar Çatışması:** Yazarlar, bu makalede rapor edilen çalışmayı etkileyecek gibi görünen, birbiriyle rekabet halinde olan herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile finansal çıkar veya kişisel ilişkinin bulunmadığını beyan etmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] European Commission. (2020, March). A New Circular Economy Action Plan for a Cleaner and More Competitive Europe. European Commission: Brussels, Belgium. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2020%3A98%3AFIN>
- [2] J. Choudhary, B. Kumar, A. Gupta, "Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review", *Constr. Build. Mater.*, vol. 234, 117271, (2020).
- [3] A. Wozzuk, L. Bandura, W. Franus, "Fly ash as low cost and environmentally friendly filler and its effect on the properties of mix asphalt", *J. Clean. Prod.*, vol. 235, pp. 493-502, (2019).
- [4] C. Plati, "Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review", *Constr. Build. Mater.*, vol. 211, pp. 539-555, (2019).
- [5] Y. Jiang, T.C. Ling, C. Shi, S.Y. Pan, "Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete-A review", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 136, pp. 187-197, (2018).
- [6] B.A. Abd Alhay, A.K. Jassim, "Steel Slag Waste Applied to Modify Road Pavement". IOP Publishing in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1660(1), 012067, (2020).
- [7] M. Shiha, S. El-Badawy, A. Gabr, "Modeling and performance evaluation of asphalt mixtures and aggregate bases containing steel slag", *Construction and Building Materials*, vol. 248, 118710, (2020).
- [8] M. Pasetto, N. Baldo, "Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag", *Construction and Building Materials*, vol. 25(8), pp. 3458-3468, (2011).
- [9] H. Kumar, S. Varma, "A review on utilization of steel slag in hot mix asphalt", *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 14, pp. 232-242, (2021).
- [10] G. Wang, Y. Wang, Z. Gao, "Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 184(1-3), pp. 555-560, (2010).
- [11] C. Maharaj, D. White, R. Maharaj, C. Morin, "Re-use of steel slag as an aggregate to asphaltic road pavement surface", *Cogent Engineering*, vol. 4(1), 1416889, (2017).
- [12] Z. Chen, Z. Gong, Y. Jiao, Y. Wang, K. Shi, J. Wu, "Moisture stability improvement of asphalt mixture considering the surface characteristics of steel slag coarse aggregate", *Construction and Building Materials*, vol. 251, 118987, (2020).
- [13] M.R. Hainin, G. Rusbintardjo, M.A.S. Hameed, N.A. Hassan, N.I.M. Yusoff, "Utilization of steel slag as an aggregate replacement in porous asphalt mixtures", *J. Teknol.*, vol. 69(1), pp. 67-73, (2014).
- [14] L. He, C.Y. Zhan, J. Gao, J. Xie, T.Q. Ling, "Application status of steel slag asphalt mixture", *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol. 20(2), pp. 15-33, (2020).
- [15] H. Karadag, S. Fırat, N.S. Işık, G. Yılmaz, "Determination of permanent deformation of flexible pavements using finite element model", *Grđevinar*, vol. 74(06), pp. 471-480, (2022).
- [16] BOF SLAG: Basic oxygen furnace (Thailand Trading Company) - Mining Machine - Industrial Supplies Products - DIYTrade China manufacturers, DIYTrade.com. [Online]. Available: [https://www.diytrade.com/china/pd/20376629/BOF\\_SLAG\\_Basic\\_oxygen\\_furnace.html](https://www.diytrade.com/china/pd/20376629/BOF_SLAG_Basic_oxygen_furnace.html) (accessed Mar. 07, 2023).
- [17] O. US EPA, "Electric Arc Furnace (EAF) Slag," Jun. 03, 2021. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/smm/electric-arc-furnace-eaf-slag>
- [18] [Online]. Available: <https://electrodepaste.en.made-in->

- china.com/product/IFXJIhZjMrVc/ChinaLadle-Furnace Refining-Slag-Fuesd-Sythetic-Slag.html (accessed 25 July 2023)
- [19] H. Qasrawi, "Use of Relatively High Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Steel Slag as Coarse Aggregate in Concrete", *ACI Materials Journal*, vol. 109(4), pp. 471-478, (2012).
- [20] H. Karadağ, S. Fırat, N.S. Işık, "Çelikhane Cürufunun Yol Temel ve Alttemel Malzemesi Olarak Kullanılması", *Politeknik Dergisi*, vol. 23(3), pp. 799-812, (2020).
- [21] M. Özsoy, S. Fırat, "Çelik Cürufu ile Yapılan Yol Katmanlarının Sayısal Analizleri", *Politeknik Dergisi*, in press, (2023).
- [22] S.W. Perkins, M. Ismeik, "A synthesis and evaluation of geosynthetic-reinforced base layers in flexible pavements-part-i." *Geosynthetics International*, vol. 4(6): pp. 549-604, (1997).
- [23] H. Karadağ, "Yol Temel ve Alttemel Tabakalarında Kullanılan Çelikhane Cürufunun Dinamik Performansının Sonlu Elemanlar Analizi ile Değerlendirilmesi", *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, pp.70-133, (2020).
- [24] J. M. Duncan, C. L. Monismith and E. L. Wilson, "Finite element analysis of pavements". *Highway Research Record*, vol.228, no. 18-33, pp.157, (1968).
- [25] M. Kim, "Three-dimensional finite element analysis of flexible pavements considering nonlinear pavement foundation behavior". *Ph.D. Thesis*, University of Illinois Urbana, Illinois, 57-70, (2007).
- [26] B. Saad, H. Mitri and H. Poorooshasb, "Three-dimensional dynamic analysis of flexible conventional pavement foundation". *Journal of transportation engineering*, vol. 131(6), pp. 460-469, (2005).
- [27] S. M. Zaghoul and T. White, "Use of a three-dimensional, dynamic finite element program for analysis of flexible pavement". *Transportation research record*, (1388), (1993).
- [28] W. Uddin and L. Ricalde, "Nonlinear material modeling and dynamic finite element simulation of asphalt pavement". In *Fourteenth Engineering Mechanics Conference*. (2000).