

ÇELİK CÜRUFLLARININ YOL DOLGU MALZEMESİ OLARAK KULLANIMINDA DRENAJ PERFORMANSININ SAYISAL ANALİZİ

Ayşegül BAYIN SARIAHMETOĞLU *^{ID}

Bilal KORKMAZ **^{ID}

Mustafa HATİPOĞLU **^{ID}

Aslı YALÇIN DAYIOĞLU **^{ID}

Alınma: 16.06.2023; düzeltme: 21.07.2023; kabul: 09.08.2023

Öz: Bu çalışmada, Amerikan Karayolları Müdürlüğü FHWA (Federal Highway Administration) tarafından geliştirilmiş bir yazılım olan DRIP (Drainage Requirement in Pavements) aracılığıyla, demir çelik endüstrisi atık malzemesi olarak ortaya çıkan çelik cürufllarının hidrolik iletkenliğinin drenaj süresi ve karayolu temel tabakasının kalınlığı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analizlerde üçü elektrik ark fırını (EAF), bir tanesi pota fırını (PF) cürufu olmak üzere dört farklı tesisten elde edilmiş çelik cürufu (SS), ayrıca drenaj performansının karşılaştırması ve kontrol amacıyla bir adet tabii zemin malzemesi kullanılmıştır. Drenaj yüzdesi (U), temel tabakası kalınlığı (H) ve hidrolik iletkenlik (k)'in drenaj süresi üzerindeki etkisi incelenmiş olup analizler sonucunda ince dane içeriğinin ve hidrolik iletkenliğin, özellikle drenaj süresini, drenajın %40'ı tamamlandıktan sonra önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Ayrıca, temel kalınlığının artırılması, drenaj süresinde ciddi bir azalmaya neden olmaktadır. Kontrol malzemesi ile farklı tesislerden elde edilmiş çelik cürufu malzemesinin performansları karşılaştırıldığında, özellikle elektrik ark fırını çelik cürufu malzemelerinin drenaj özelliklerinin yol dolgusu malzemesi olarak kullanımında tatmin edici sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Ahahtar Kelimeler: Çelik Cürufu, Drenaj, Sayısal Analiz, DRIP, Yol Dolgusu

Numerical Analysis of the Drainage Performance of Steel Slags Used In Embankment Fills

Abstract: In this study, the effect of hydraulic conductivity of steel slag, a by-product of steel industry, on the drainage time and the thickness of the highway foundation layer was investigated via DRIP (Drainage Requirement in Pavements) software developed by Federal Highway Administration (FHWA). Three electric arc furnace (EAF) and one ladle slag (LS) from four different facilities along with a control soil were used in the analyses to compare their drainage performance as an embankment material. Analyzes were performed on steel slag and natural aggregate materials to investigate the effect of drainage percentage (U), base layer thickness (H) and hydraulic conductivity (k) on drainage time. The results show that the fines content and hydraulic conductivity significantly affect the drainage time, especially after 40% of the drainage. In addition, increasing the thickness of the foundation causes a serious reduction in the drainage time. When the performances of the control material and the steel slag obtained from different facilities were compared, it was seen that the drainage properties of especially the electric arc furnace steel slag materials yielded satisfactory results in case used as an embankment fill material

Keywords: Steel Slag, Drainage, Numerical Analysis, DRIP, Embankment Fill

* İstanbul Teknik Üniversitesi, Afet Yönetimi Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

** İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

İletişim Yazarı: Aslı YALÇIN DAYIOĞLU (yalcinas@itu.edu.tr)

1. GİRİŞ

Demir çelik endüstrisinde yıllık çelik üretiminin dünya çapında yaklaşık 1,8 milyar ton olduğu, bu üretim sonucunda yaklaşık 300 milyon ton (Mt) çelik cürufunun ortaya çıktığı tahmin edilmektedir. (World Steel Association, 2022). Söz konusu cürufuların yığılarak biriktirilmesi hem günümüzde zor bulunan arazilerin işgal edilmesine, hem de bu malzemelerin yerine doğal kaynakların kullanılarak tükenmesine neden olmaktadır. Buna ilaveten doğal agrega üretimi sırasında meydana gelen, doğal alanların tahribi, tozlaşma, sera gazı emisyonları, gürültü ve görüntü kirliliği gibi olumsuz çevresel etkiler azaltılmaktadır. Ayrıca, hammadde tüketiminin azaltılması ile sürdürülebilirlik desteklenerek, bir endüstri kolunun yan ürünü başka bir sektörün hammaddesi olarak kullanılmaktadır Dolayısı ile bu malzemelerin kullanımının artması için alternatif alanların geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Çelik cürufunun dünya çapında yaklaşık %80'inin geri dönüştürüldüğü, bu miktarın yaklaşık %50'sinin başta karayollarında temel, alt temel ve dolgu malzemesi olmak üzere, çimento sektöründe klinker üretiminde, park sahaları gibi alanlarda asfalt içinde, beton bloklar ve parke taşı olarak inşaat mühendisliğinin farklı uygulama alanlarında yapay agrega olarak kullanıldığı belirtilmektedir (Teo vd 2020). Çelik cürufunun inşaat sektöründe kullanım uygunluğunun değerlendirilmesine yönelik çalışmalar incelendiğinde, özellikle yüksek fırın ile üretilen çelik cürufu (SS), granül baz, beton ve sıcak karışım asfalt agregaları ve tamamlayıcı çimentolu malzemeler gibi çok çeşitli otoyol uygulamalarında kullanıma uygun olduğu görülmektedir (Diotti vd., 2021; Maharaj vd., 2017; Morata ve Saborido, 2017; Grubeša ve Barišić, 2016; Wang vd., 2020). Mathur vd. (1999) yüksek fırın cürufu, aşınmış çelik cürufu, granüle cüruf, uçucu kül ve kireç karışımlarının, düşük hacimli trafik yollarının alt temel veya temel katmanlarında doğal olarak mevcut agregaların ikamesi olarak kullanılmak üzere performansını incelemişlerdir. Pamukçu ve Tuncan (1993), alt temel ve taban katmanı olarak kullanılan çimento ile stabilize edilmiş çelik cüruf agregasının özelliklerini değerlendirmişlerdir. Çalışmada, çelik cüruf karışımlarının çimento ile stabilize edilmiş doğal agregalarla karşılaştırılabilir mukavemet değerleri sergilediğini göstermiştir. Kamon vd. (1993), kaolinit ve CAS (karbonatlı-alümina tuzları) ile kıyaslandığında, EAF cürufunun güçlü mukavemet kazanımı davranışı gösterdiğini ve yol inşaatlarında alt taban malzemesi olarak kullanılabilme potansiyeline sahip olduğunu belirtmişlerdir. Yol tabanlarında ve alt temellerde kullanıldığında çelik cürufunun tatmin edici performansı literatürdeki birçok araştırmada gösterilmiştir. Rohde vd. (2003) düşük hacimli yollar için temel malzeme olarak EAF cürufunun kullanımını araştırmışlardır. Çalışmada, EAF cürufunun esneklik modülünün doğal agregalardan çok daha yüksek olduğu ve buna ek olarak, düşük hacimli yollarda temel malzeme olarak EAF cürufunun kullanımının toplam yol maliyetini önemli ölçüde düşürebileceği sonucuna varmışlardır. Aiban (2006), ağırlıkça %30 ~ %85 çelik cürufu ile doğal agregaların (marn ve kum) karışımlarını içeren yol tabanlarının tatmin edici CBR değerleri sergilediğini göstermiştir. Çelik cürufu ve uçucu kül, çimento, yüksek fırın cürufu vb. gibi diğer malzemelerle oluşturulan karışımların () yol temel malzemesi olarak performansı üzere araştırmalar da mevcuttur. Mymrin vd. (2005), yol taban tabakası olarak çimento ile aktive edilmiş çelik cürufu ve doğal agrega karışımlarının kullanımının, yol taban tabakası kalınlığındaki azalma nedeniyle yol yapım maliyetini düşürebileceğini göstermiştir.

Dünyanın en büyük çelik üreticilerinden biri olan Türkiye'de çelikhane cürufu miktarı ton ham çelik başına, 150-200 kg arasındadır (TÇÜD, 2015). Ülkemizde şu ana kadar demir-çelik üretiminden elde edilen cürufun büyük kısmının atıl durumda saklama alanlarında bekletildiği ve her yıl 3 milyon tondan fazla EAF cürufunun bu atıl yığına eklendiği bilinmektedir. Türkiye'de çelikhane cürufunun karayollarında standart bir ürün olarak kullanılabilmesi için araştırmalar yapılmaktadır. Çelikhane cürufunun yol alt ve üstyapısında kullanılabilirliğinin ve performansının belirlenebilmesi için ülkemizde üretim yapan farklı tesislerdeki çelik cürufuları farklı çalışmalarda incelenmiştir. Cürufun yapısal davranışının araştırılması kapsamında çelikhane cürufunun yol uygulamalarında granüler tabakalarda, bitümlü sıcak karışımlarda yapay agrega olarak kullanılması durumları araştırılmış, bağlayıcı oranı ve sıkıştırma miktarının,

Türkiye’de geçerliliği olan Karayolları Teknik Şartnamesi’nde (KTŞ) verilen limitler dâhilinde olduğu belirlenmiştir (Karadağ vd., 2020). Fırat vd. (2020) yaptıkları çalışmada belirli oranlarda çelikhane cürufu, uçucu kül ve dolguya uygun bir zemin malzemesi ile karışım hazırlandığında CBR değerinde %130 oranında bir artış görüldüğü ve çelikhane cürufunun güvenle yol dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi sonucuna varmışlardır. Karadağ vd. (2020) çelik cürufunun yol temel ve alt temel yapımında kullanılması durumunu sonlu elemanlar metodu ile modelleyip çözümlenmiştir. Sonuçlar bütün olarak değerlendirildiğinde ise Türkiye’de çelik cürufunun doğal agrega yerine yol üst yapısında güvenle kullanılabilmesi kanıtlanmış olup yalnızca alt temelde kullanılması durumunda tekrarlı trafik yükleri altında hem yol performansını artıracığı hem de doğal kaynakların tüketimini azaltıp demir çelik endüstrisinin atık ürünü olan çelik cürufunun geri dönüşümü sağlanacağını belirtmiştir (Karadağ vd., 2020).

Deniz vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada çelik cürufunun oldukça yüksek mukavemet özelliklerine haiz olduğu bildirilmiştir. Çelik cürufu ayrıca yüksek özgül ağırlığa sahiptir ve iyi bir sıkıştırma davranışı sergilemektedir. Ancak, bazik oksijen fırınlarından (BOF) ve elektrik ark ocaklarından (EAO) elde edilen çelik cürufunun ihtiva ettiği serbest kalsiyum (Ca), suya maruz kaldığında kalsiyum hidroksite ($Ca(OH)_2$) dönüşmekte ve moleküler yoğunluk farklarından ötürü hacimsel genişleme meydana gelmektedir. Bu sebepten ötürü otoyol uygulamalarında çelik cürufu kullanılırken dikkat edilmesi gerekmektedir. Dayioğlu ve Aydilek (2017), çelik cürufunun yol tabakalarında kullanılmadan önce atmosferik koşullar altında yaşlandırılması gerektiğini ileri süren araştırmalara alternatif bir çözüm yöntemi geliştirmek için çelik cürufunun mekanik özelliklerini korurken, şişme potansiyelini azaltan yenilikçi bir yöntem önermiştir. Çelik cüruf materyalleri bitümlü asfalt materyalle kaplanmış bu karışımlar, kaplanmamış çelik cüruf malzemesiyle birlikte, hızlandırılmış şişme deneylerine tabi tutulmuştur. Genel olarak sonuçlar, çelik cürufunun otoyol dolguları için uygun bir sürdürülebilir yapı malzemesi olabileceğini ve çelik cürufunun sızıntı suyunun, çevrede tipik bir doğal oluşumdan geçtikten sonra yüzey sularını kirletmeyeceğini göstermiştir.

Çelik cürufunun yol uygulamalarında kullanılabilirliğinin mekanik açıdan değerlendirildiği çalışmalar literatürde mevcuttur (Deniz vd 2009, Dayioğlu vd 2014, Dayioğlu ve Aydilek 2017, Yıldırım ve Prezzi 2022). Ancak mekanik özelliklerin yanısıra yol dolgularında temel, temel altı veya dolgu malzemesi olarak agrega yerine kullanılacak malzemelerin hidrolik özelliklerinin de belirli limit değerlere sahip olması gerektiği bilinen bir gerçektir. Buna ilaveten geri dönüşümlü beton agregası ve geri dönüşümlü asfalt agregasının drenaj özellikleri ile ilgili literatürde çalışmalar bulunmakta olup (Haider vd 2014a, Haider vd 2014b, Mijic vd 2023) yine dolgu malzemesi olarak mekanik açıdan kullanımı uygun olan çelik cürufunun drenaj özellikleri ile ilgili bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu çalışmada Amerikan Karayolları Müdürlüğü FHWA (Federal Highway Administration) tarafından geliştirilmiş bir yazılım olan DRIP (Drainage Requirement in Pavements) aracılığıyla, çelik cürufunun hidrolik iletkenliğinin drenaj süresi ve karayolu temel tabakasının kalınlığı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

Bu çalışmada Türkiye’de üretilmiş, yol temel tasarımında ve uygulamasında kullanılabilinecek, farklı fiziksel özelliklere sahip üçü elektrik ark fırını (SS1, SS2 ve SS3), biri pota fırını cürufu (SS4) olmak üzere dört farklı tesisten elde edilmiş çelik cürufu ve çelik cürufunun drenaj performansının değerlendirilmesinin yapılabilmesi için yol temel tasarımında kullanılabilme potansiyeline sahip bir adet doğal kontrol malzemesi (KM) kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan malzemeler ve fiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan numunelerin fiziksel özellikleri

Malzeme	TİP	İDO (%)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	C _c	C _u	PI	Zemin Sınıflandırılması	
									USCS	AASHTO
SS1	EAF	1,90	7,30	12,0	16,0	1,1	2,50	NP	GP	A-1-a
SS2	EAF	2,80	0,50	1,19	1,57	1,57	3,54	NP	GP	A-1-a
SS3	EAF	1,30	0,99	3,88	11,48	0,91	23	NP	GP	A-2-7
SS4	PF	5,52	0,11	1,06	8,09	0,74	132,8	NP	GP	A-2-7
KM	-	10,00	0,15	0,3	0,57	0,80	5	NP	SP-SM	A-1-b

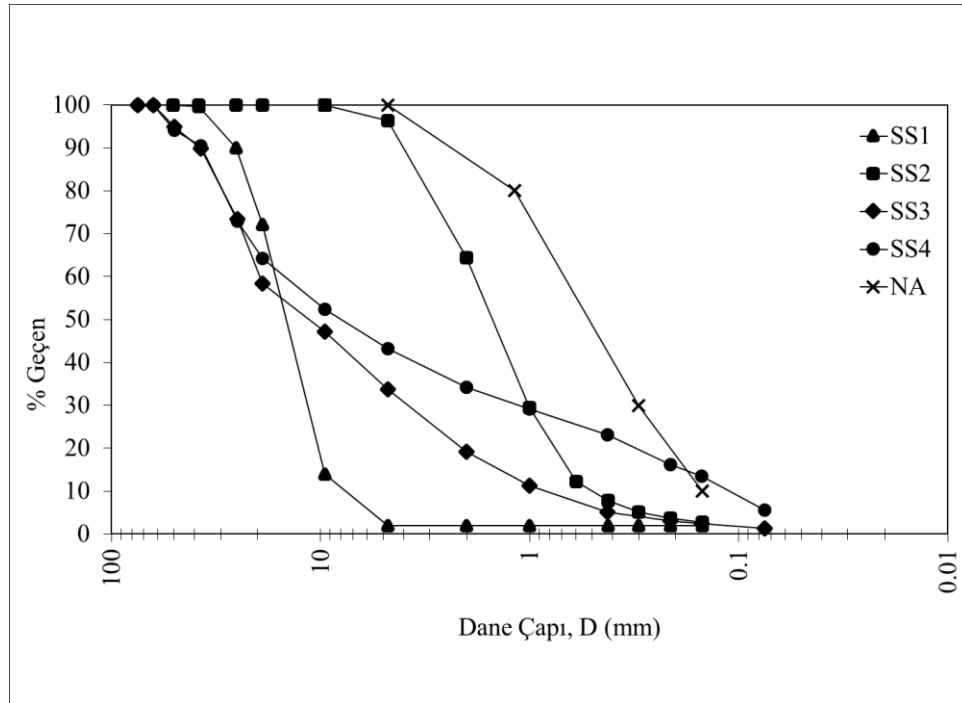
SS: Çelik cürufu, KM: Kontrol malzemesi (doğal agrega), İDO: İnce dane oranı, CC: Derecelenme katsayısı, Cu: Üniformluk katsayısı, PI: Plastisite indisi, BZSS: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi, AASHTO: Amerika Karayolları Zemin Sınıflandırma Sistemi

Tablo 1’de verilen numunelerin mekanik özellikleri incelendiğinde teslim alınan numuneler üzerinde yapılan elek analizi sonucunda ince dane oranının KM için %10, SS1, SS2, SS3 ve SS4 malzemelerinde sırasıyla %1,9, %2,8, %1,3 ve %5,5 olduğu görülmektedir. Çalışmada kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için ASTM D698–12 ve ASTM D1557–12 standartlarında tanımlanan Method B yöntemi kullanılarak standart ve modifiye proktor deneyleri yapılmış olup numunelerin optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları Tablo 2’de verilmiştir. ASTM D698–12 standartlarına uygun olarak belirlenen optimum su muhtevasında ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında hazırlanan numuneler üzerinde ASTM D2434-68 standardında belirtilen sabit seviyeli permeabilite deneyi ile ASTM D1883–16 standardında belirtilen Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi yapılmıştır. Deney esnasında standarta uygun olarak kalıbın en küçük boyutunun 1/10’undan daha büyük boyutlu danelerin deney sonucunu etkilememesi için 3/8 no’lu elek (9,50 mm) üzerinde kalan malzemeler elenerek ayrılmıştır. Çalışmada kullanılan numuneler için ASTM standartlarında yapılan laboratuvar deney sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Permeabilite değeri en yüksek SS2, en düşük ise SS4 numunelerinde elde edilmiştir. Ayrıca CBR sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek CBR değeri SS1, en düşük CBR değeri SS4 numunelerinde elde edilmiştir. SS1 ve SS2 yaş CBR değerlerinin SS3 ve SS4 yaş CBR değerlerinden merteye olarak yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum SS4 için ince dane oranının yüksekliği ile açıklanabilir. Diğer yandan SS3 numunesinin düşük ince dane oranına rağmen SS1 ve SS2 ile karşılaştırıldığında CBR değerinin nispeten düşük olmasının sebebi dane çapı dağılımının yanında dane yuvarlaklığı, köşeliliği ve pürüzlülüğü gibi faktörlerin de danelerin yerleşimini etkilemesi olabilir (Haider vd 2014a).

Yol temel tabakalarında kullanılan agreganın dane çapı dağılımı drenaj performansını etkilemektedir. Drenaj süresinin maksimum sürede olmasını sağlayacak dane çapı dağılımında ince dane miktarı maksimum bulunmaktadır. Bu araştırmada farklı yüzde oranlarında ince daneye sahip, KTŞ tanımlanan dolgu malzemesi kriterini sağlayan numuneler kullanılmıştır. Çalışmada kullanılacak numunelerin granülometri eğrisi Şekil 1’de verilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan numunelerin mekanik özellikleri

Malzeme	Gs	Standart Proktor		Modifiye Proktor		k (cm/s)	CBR
		W _{opt} (%)	γ _{kmaks} (kN/m ³)	W _{opt} (%)	γ _{kmaks} (kN/m ³)		
SS1	3,75	7,5	26,00	6,0	28,00	1,9×10 ⁻²	130
SS2	3,63	9,3	24,80	7,0	26,40	2,0×10 ⁻²	116
SS3	3,62	9,0	24,83	-	-	1,1×10 ⁻²	54
SS4	2,73	18,0	17,12	-	-	3,0×10 ⁻⁴	46
KM	2,70	10,2	19,75	9,0	20,07	1,5×10 ⁻²	60

**Şekil 1:**

Numunelerin dane çapı dağılımları.

2.2. Yöntem

Yol dolgu kesimlerinin yolun hizmet ömrü boyunca stabil kalması ve tolerans dışı oturmaların oluşmaması, yol yapısındaki su dengesinin korunması için yol dolgusunda kullanılacak malzemenin hidrolik geçirgenliği çok önemlidir. Bu nedenle; bu çalışma kapsamında, farklı tesislerden elde edilmiş çelik cürufu malzemelerinin ve kontrol malzemesinin temel malzemesi olarak kullanılması durumunda Şekil 3'te verilen yol geometrisinin drenaj performansının tespitinin DRIP (Drainage Requirement in Pavements) yazılımı aracılığıyla belirlenmesi amaçlanmaktadır. DRIP 2.0 yazılımı, 2002 yılında Federal Karayolları İdaresi (FHWA) ve Amerikan Ulaştırma Bakanlığı (USDOT) tarafından geliştirilmiş oluşan ve analitik yöntemler ile çözüm yapan bir yazılımdır. Programda girdi olarak yol geometrisi, meteorolojik bilgiler, dane çapı dağılımı ve permeabilite bilgilerinin girilmesi gerekmekte, program çıktısı

olarak da geçirgen temel tabakası kalınlığı ve drenaj süresi elde edilmektedir. FHWA tarafından belirlenen ve DRIP (Drainage Requirement in Pavements) yazılımında drenaj süresine karşılık gelen malzeme kalite sınıfı Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Çalışmada kullanılan malzemelerin drenaj performansları

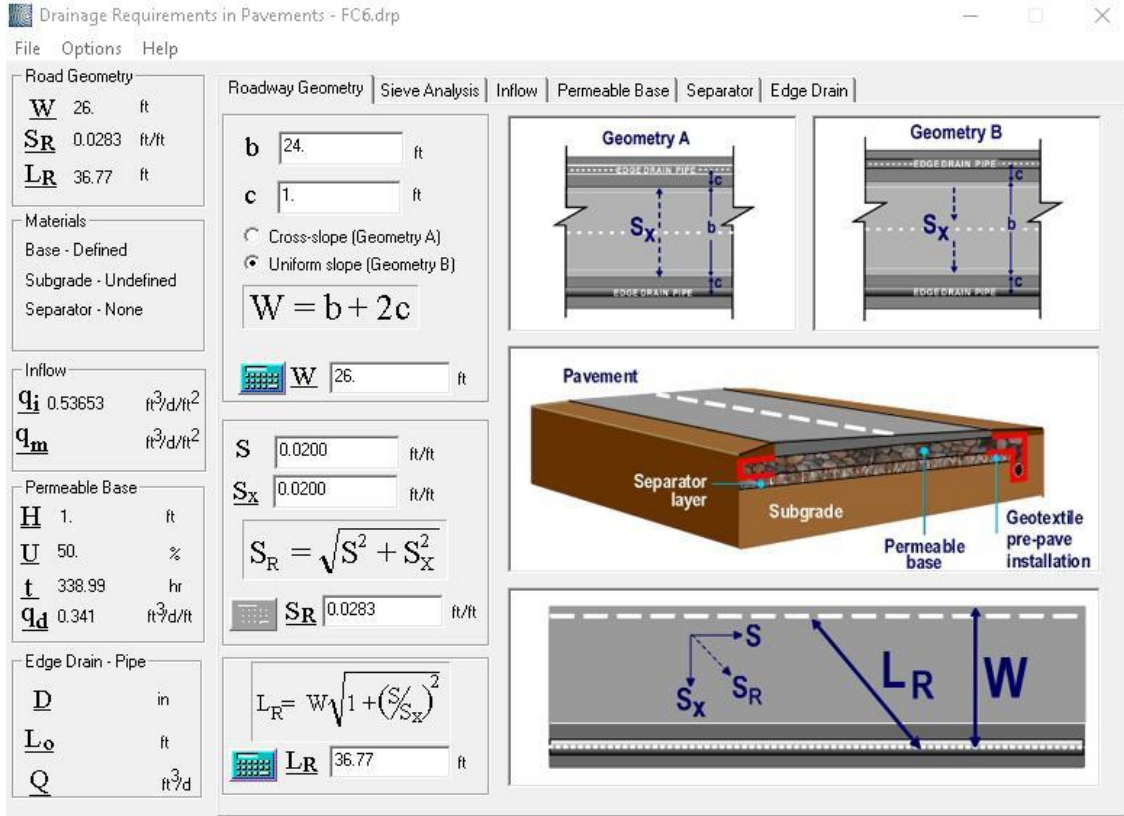
%50 Drenaj Süresi	AASHTO drenaj kalitesi sınıflandırması
2 saat	Mükemmel
1 gün	İyi
7 gün	Orta (Uygun)
1 Ay	Zayıf
Drenaj gerçekleşmiyor	Çok zayıf

Analizde drenaj (L_R) uzunluğunu hesaplamak için boyuna eğim (S) ve enine eğim (S_x) %2 olarak kabul edilmiştir. Gerekli temel kalınlığını (H) hesaplamak için Moulton yöntemi kullanılmıştır (1980). Moulton yönteminde temel kalınlığı kaplama sızma hızı (q_i), drenaj uzunluğu (L_R), temel malzemesinin permeabilite (k) ve karayolu eğimi (S) parametrelerine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Gerekli temel kalınlığı elde edildikten sonra drenaj için gereken süreyi değerlendirmek için Haider (2014b) ve Hatipoğlu vd (2020)'nin önerdiği gibi temel tabakasına sızan suyun %50'sinin drenajı için geçen süre yaklaşımı kullanılmıştır. Bu amaçla, DRIP yazılımı içine gömülü Barber-Shannon (1952) ve Casagrande-Sawyer (1952) denklemleri kullanılmıştır. Her iki yöntem de drenaj yüzdesi U , efektif porozite n_e , drenaj uzunluğu L , permeabilite k ve tabaka kalınlığı H değerlerine bağlı olarak drenaj süresi hesaplanmaktadır. Analizde, Şekil 4'te verilen iki farklı yönde ikişer tane olmak üzere her birinin genişliği 3,7 m olan, toplamda 14,8 m genişliğindeki dört şeritli ve her iki tarafında 3 m genişliğinde banketlere sahip bir yol kesiti seçilmiştir. Analiz ve hesap yöntemleri hakkında detaylı bilgi Hatipoglu vd (2020) ile Mijic vd (2023)'te verilmektedir.

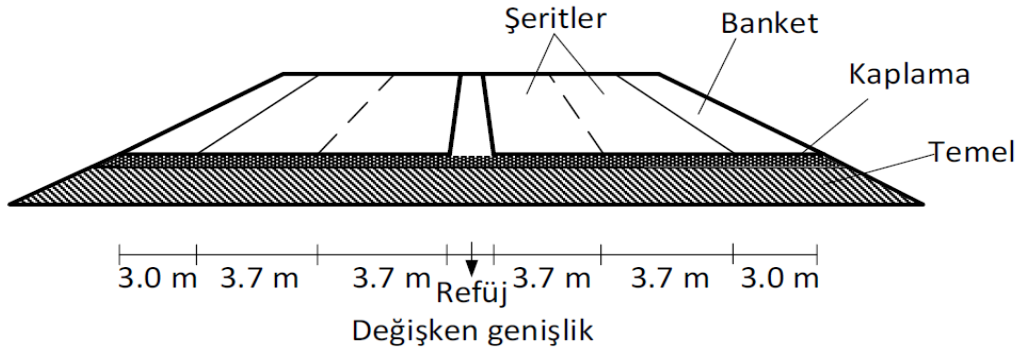
3. SAYISAL ANALİZ ÇIKTILARI VE DEĞERLENDİRME

Tablo 2'de mekanik özellikleri verilen numuneler için DRIP yazılımı kullanılarak sayısal analiz yapılmış ve Şekil 4'te drenaj (U), Şekil 5'te temel kalınlığı (H), Şekil 6'da efektif porozitenin temel tabakasına sızan suyun %50'sinin tabakadan sızması için gereken süreye (drenaj süresi) etkisini gösteren grafikler elde edilmiştir. DRIP yazılımına gömülü Casagrande ve Shannon (1952) ve Barber ve Sawyer (1952) denklemleri drenaj süresini hesaplamak için kullanılmış ve her iki yöneme göre hesaplanan drenaj süreleri karşılaştırılmıştır.

$H=0,3$ m için drenaj yüzdesine göre drenaj süresindeki değişimi gösteren Şekil 4'teki grafikler incelendiğinde hem Barber/Sawyer hem de Casagrande/Shannon yönteminde %40 drenaja kadar drenaj süresinin önemli ölçüde etkilenmediği ancak $\%40 < U < \%98$ için drenaj süresinin değişiminde özellikle SS4 ve NA numuneleri için önemli bir artış olduğu tespit edilmiştir. Casagrande /Shannon yöntemi Barber/ Sawyer yöntemine kıyasla drenaj süresi için daha düşük değerler vermektedir. Benzer sonuçlar literatürde de görülmektedir (Haider vd 2014a, Aydilek vd 2015, Hatipoglu vd 2020, Mijic vd 2023). En uzun ve en kısa drenaj süresi sırasıyla SS4 ve SS2 numunelerinde elde edilmiştir. Bu durum ince dane oranı ve permeabilite değerleri ile açıklanabilir.

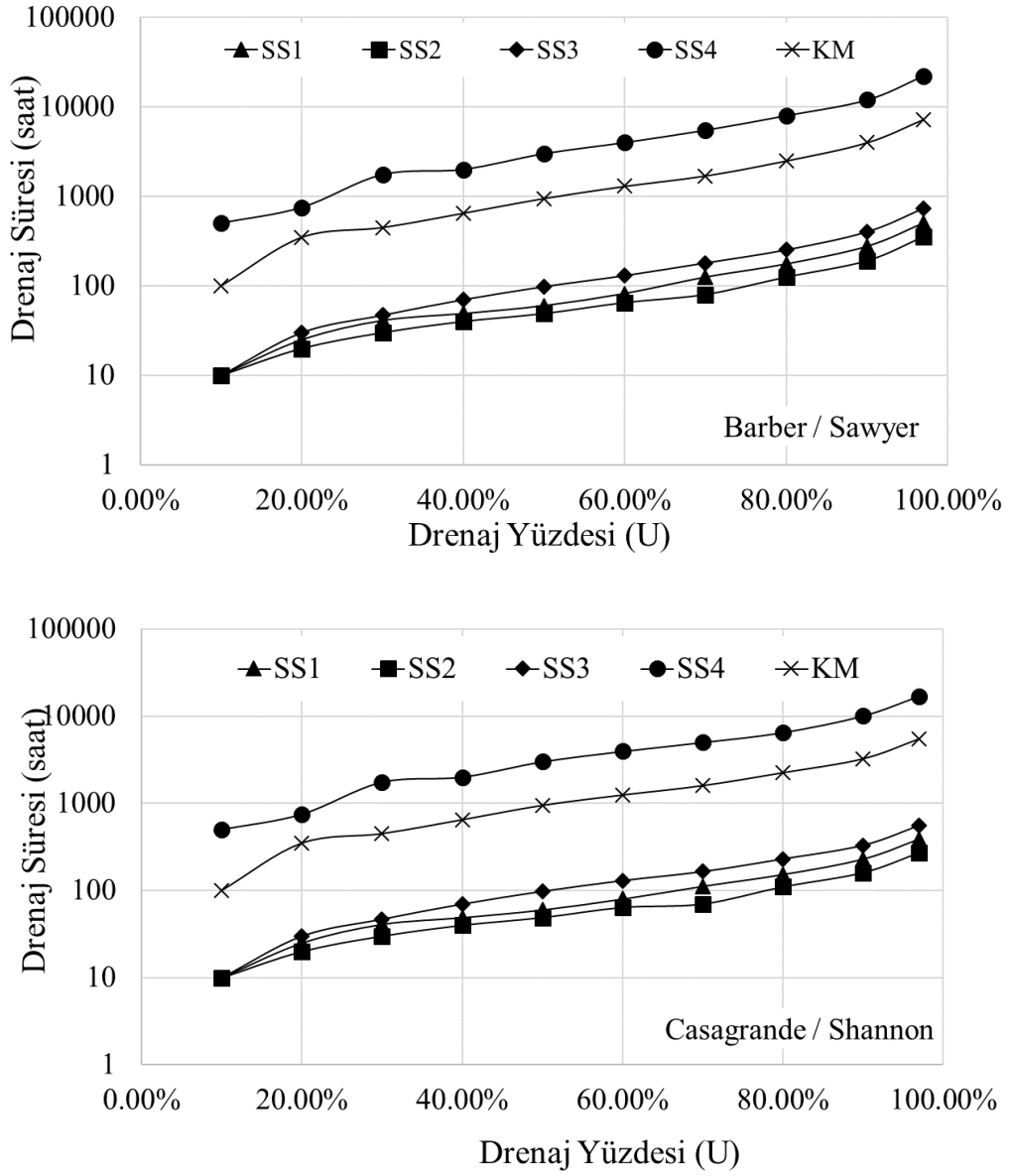


Şekil 2:
DRIP yazılımının arayüzü.



Şekil 3:
Çalışmada kullanılan yol kesiti

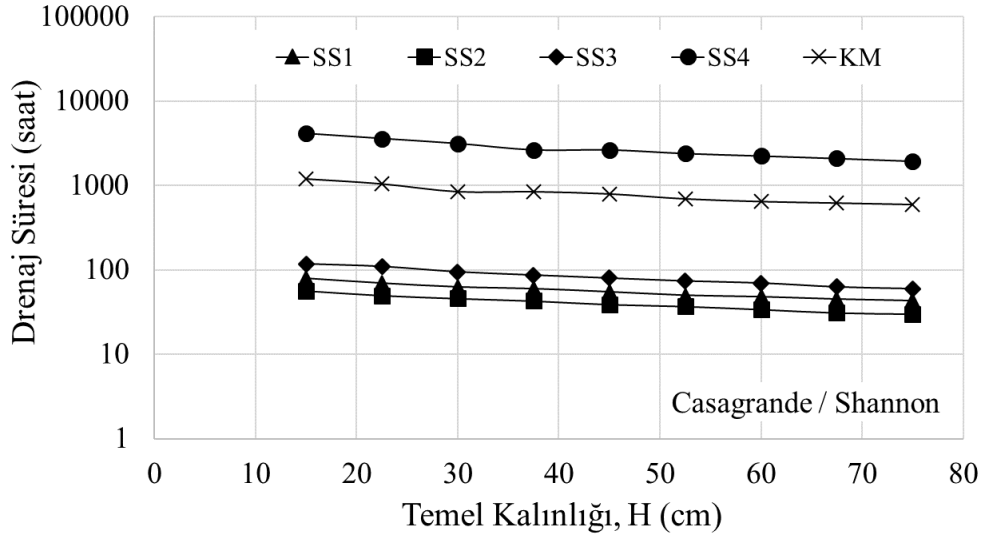
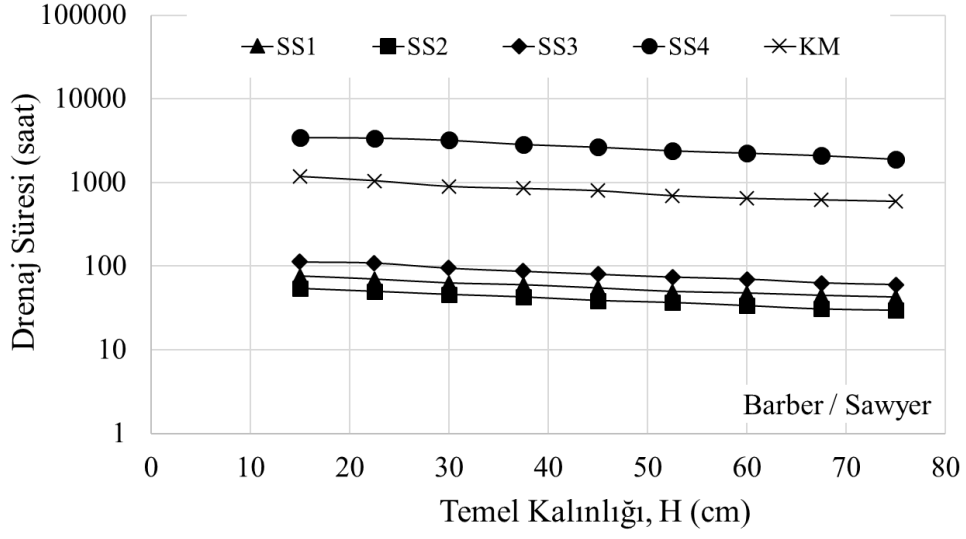
Şekil 5'te görüldüğü gibi, temel tabakasında serili malzeme kalınlığı artırıldığında drenaj süresinde azalma gözlemlenmektedir. Benzer sonuçlar Hatipoğlu vd (2020) tarafından da elde edilmiştir. Drenaj süresindeki azalma miktarı hem dane çapı dağılımına hem de hidrolik iletkenliğe bağlıdır. Bu sebepten ötürü yine yukarıda bahsedildiği üzere en yüksek ince dane miktarına sahip SS4 numunesinin drenajı için gereken süre diğerlerine göre oldukça yüksektir. Diğer malzemelerin permeabilite katsayıları birbirine oldukça yakın değerlerde seyretmekle beraber (Tablo 2), içerdiği yüksek ince daneli malzeme miktarı sebebi ile kontrol malzemesi (KM) için herhangi bir temel kalınlığında gereken drenaj süresi, diğer üç çelik cürufu malzemesine göre daha uzundur.



Şekil 4:

H=0,3 m için a) Barber-Sawyer yöntemi ile b) Casagrande – Shannon yöntemi ile drenaj yüzdesi U'nun drenaj süresi üzerindeki etkisi

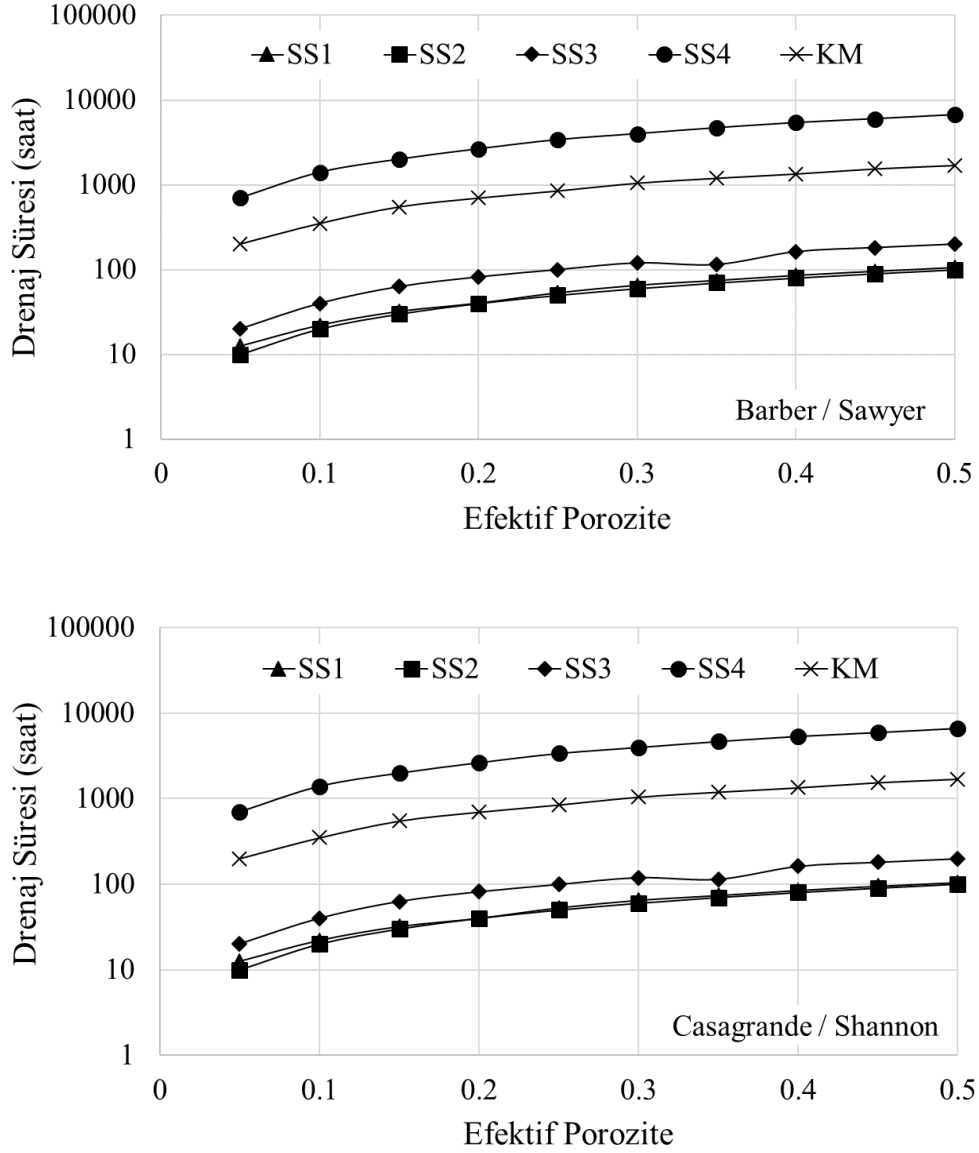
Efektif porozite n_e , FHWA tarafından yerçekimi etkisinde zemin tabakasından drene olan su hacmi olarak tanımlanmakta ve poroziteden farklı olarak kapiler kuvvetler etkisindeki su hacmini dikkate almamaktadır. Dolayısı ile efektif porozite arttıkça drene olacak su miktarı artmakta ve drenaj süresi uzamaktadır. Şekil 6'da efektif porozite 0,05'ten 0,5'e yükseldiğinde, drenaj süresinde büyük oranda bir artış olduğu görülmektedir. En büyük artış SS4 malzemesinde gözlemlenmiştir. Daha düşük hidrolik iletkenliğe sahip SS4 malzemelerinin kullanılması durumunda inşaat için daha büyük temel kalınlıkları gerekmektedir.



Şekil 5:

Temel kalınlığının drenaj süresine etkisi

Bir karayolu temelinin drenaj süresini etkileyen en önemli faktör temel malzemesinin hidrolik iletkenliğidir. Nümerik analizde kullanılan malzemelerin drenaj performanslarına ait bilgiler Tablo 4’te özetlenmiştir. %50 drenaj süresi en kısa numune 46 saat ile SS2, en uzun numune 2869 saat ile SS4 olduğu tablodan görülmektedir.



Şekil 6:

Etketif porozitenin drenaj süresine etkisi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, temel tabakası olarak kullanılabilme potansiyeline sahip çelik cürufu malzemelerinin karayolu drenaj performansını değerlendirmek için sayısal bir çalışma yapılmıştır. Tüm numuneler için elde edilen sayısal analiz sonuçları karşılaştırıldığında permeabilite katsayısı daha yüksek olan çelik cüruflarının daha iyi performans sergiledikleri tespit edilmiştir. Ayrıca hem Barber/Sawyer (1952) hem de Casagrande/ Shannon (1952) yöntemleri ile elde edilen ve drenaj yüzdesi (U), temel kalınlığı (H), efektif poroziteye (n) bağılı drenaj süresinin karşılaştırılabilir sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tablo 4. Çalışmada kullanılan malzemelerin drenaj performansları

Malzeme	k (cm/s)	%50 Drenaj Süresi (Saat)	AASHTO drenaj kalitesi sınıflandırması
SS1	$1,9 \times 10^{-2}$	65	Orta (Uygun)
SS2	$2,0 \times 10^{-2}$	46	Orta (Uygun)
SS3	$1,1 \times 10^{-2}$	94	Orta (Uygun)
SS4	$3,0 \times 10^{-4}$	2869	Çok zayıf
KM	$1,5 \times 10^{-3}$	929	Çok zayıf

- Drenaj süresinin %40 drenaja kadar önemli ölçüde değişmediği, ancak $\%50 < U < \%98$ için önemli bir artış olduğu tespit edilmiştir. En uzun ve en kısa drenaj süresi sırasıyla SS4 ve SS2 numunelerinde elde edilmiştir.
- Temel kalınlığına göre drenaj süresindeki maksimum değişim, Barber / Sawyer (1952) ve Casagrande/ Shannon (1952) yöntemleri için değerlendirildiğinde temel kalınlığı arttıkça drenaj süresinin azaldığı tespit edilmiştir.
- Daha düşük hidrolik iletkenliğe sahip SS malzemelerinin karayolu inşaatında granüler temel malzemesi olarak kullanılması durumunda daha büyük temel kalınlığı gerektiği anlaşılmaktadır.

Yolun geometrisi, dane çapı dağılımı, gözeneklilik ve hidrolik iletkenlik temel malzemenin drenaj kapasitesini etkileyen önemli faktörlerdir. İnşaat mühendisliği uygulamalarında sürdürülebilir malzeme yönetimi ve doğal malzemelerin korunmasına katkı sağlamak amacıyla çelik cürufu malzemesinin karayolu temel tabakasında kullanılması durumunda drenaj kapasitesini tahmin etmek için yukarıda belirtilen faktörler dikkate alınmalı ve %50 drenaj için gereken süreyi bulmak için DRIP analizi yapılmalıdır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Gerçekleştirilen çalışmada Ayşegül BAYIN SARIAHMETOĞLU ve Bilal KORKMAZ literatür taraması, kullanılan malzemelerin temin edilmesi, deney numunelerinin hazırlanması, laboratuvar deneylerinin yapımı, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve sonuçların incelenmesi başlıklarında; Aslı YALÇIN DAYIOĞLU ve Mustafa HATİPOĞLU; çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve sonuçların incelenmesi, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

KAYNAKLAR

1. Aiban, S. A. (2006). Utilization of Steel Slag Aggregate for Road Bases. *Journal of Testing and Evaluation*, ASTM, Vol 34, No. 1: 65–75. doi: 10.1520/JTE12683.
2. ASTM D1883-16 (2016). Standard test method for California Bearing Ratio (CBR) of laboratory-compacted soils. ASTM International, West Conshohocken.
3. ASTM-D1557-12 (2012). Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
4. ASTM-D698 (2012) Standard practice for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). ASTM International, West Conshohocken, PA.
5. Aydilek, A., Haider, I., Cetin, A., Kaya, Z., ve Hatipoglu, M. (2015). Development of Design Guidelines for Proper Selection of Graded Aggregate Base in Maryland State Highways. MD-15-SP109B4G-1. Maryland State Highway Administration, Baltimore, MD.
6. Barber, E. S., ve Sawyer, C. L. (1952). Highway subdrainage. *Public Roads*, 26(12), 251-268.
7. Casagrande, A., ve Shannon, W. L. (1952). Base course drainage for airport pavements. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 117(1), 792-814. doi:10.1061/TACEAT.0006654
8. Dayioglu, A. Y., ve Aydilek, A. H. (2017). Evaluation of mitigation techniques for the expansive behavior of steel slag. *In Proc., Geotechnical Frontiers*, 276, 360-368. doi:10.1061/9780784480434.039
9. Dayioglu, A. Y., Aydilek, A. H., ve Cetin, B. (2014). Preventing swelling and decreasing alkalinity of steel slags used in highway infrastructures. *Transportation Research Record*, 2401(1), 52-57. doi:10.3141/2401-06
10. Deniz, D., Tutumluer, E., ve Popovics, J.S. (2009). Expansive characteristics of reclaimed asphalt pavement (RAP) used as base materials. Illinois Center for Transportation, University of Illinois at Urbana Champaign, FHWA-ICT-09-055.
11. Diotti, A., Cominoli, L., Galvin, A. P., Sorlini, S., ve Plizzari, G. (2021). Sustainable Recycling of Electric Arc Furnace Steel Slag as Aggregate in Concrete: Effects on the Environmental and Technical Performance. *Sustainability* (Switzerland), 13(521). doi:10.3390/su13020521
12. Firat, S., Dikmen, S., Yilmaz, G. ve Khatib, J. M., (2020). Characteristics of engineered waste materials used for road subbase layers. *KSCE J. Civ.Eng.* 24 (9): 2643–2656. doi:10.1007/s12205-020-2242-0
13. Grubeša, I. N., ve Barišić, I. (2016). Environmental Impact Analysis of Heavy Metal Concentrations in Waste Materials Used in Road Construction. *Elektronički Časopis Građevinskog Fakulteta Osijek*, 13, 23–29. doi:10.13167/2016.13.3
14. Haider, I., Cetin, B., Kaya, Z., Hatipoglu, M., Cetin, A., ve Ahmet, H. A. (2014b). Evaluation of the Mechanical Performance of Recycled Concrete Aggregates Used in Highway Base Layers. *Geo-Congress*, 234 GSP, 3686–3694. doi:10.1061/9780784413272.357
15. Haider, I., Kaya, Z., Cetin, A., Hatipoglu, M., Cetin, B., ve Aydilek, A. H. (2014a). Drainage and mechanical behavior of highway base materials. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(6), 04014012. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000708

16. Hatipoglu, M., Cetin, B., ve Aydilek, A. H. (2020). Effects of fines content on hydraulic and mechanical performance of unbound granular base aggregates. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 146(1), 04019036. doi:10.1061/JPEODX.0000141
17. Kamon, M., Nontananandh, S., ve Katsumi, T. (1993). Utilization of stainless-steel slag by cement hardening. *Soils and Foundations*, 33(3), 118-129. doi.org/10.3208/sandf1972.33.3_118
18. Karadağ, H., Fırat, S., ve Işık, N. S. (2020). Çelikhane Cürufunun Yol Temel ve Alttemel Malzemesi Olarak Kullanılması. *Politeknik Dergisi*, 23(3), 799–812. doi:10.2339/politeknik.612190
19. KTŞ, T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü (2013). Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013.
20. Maharaj, C., White, D., Maharaj, R., ve Morin, C. (2017). Re-Use of Steel Slag as an Aggregate to Asphaltic Road Pavement Surface. *Cogent Engineering*, 4(1), 1416889. doi:10.1080/23311916.2017.1416889
21. Mathur S., Soni S. K., ve Murty A. (1999). Utilization of Industrial Wastes in Low-Volume Roads. *Transportation research record* 1652, 246–256. doi:10.3141/1652-31
22. Mijic, Z., Hatipoglu, M., Dayioglu, A. Y. ve Aydilek, A. H. (2023). Numerical Analysis of Hydraulic Conductivity Effect on the Utilization of Recycled Asphalt Pavement in Highway Design, in *Geo-Congress 2023: Soil Improvement, Geoenvironmental, and Sustainability*, GSP 339, 612-622. doi:10.1061/9780784484661.064
23. Morata, M., ve Saborido, C. (2017). Recycled Aggregates with Enhanced Performance for Railways Track Bed and Form Layers. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3(2), 322–335. doi:10.1007/s40831-016-0095-z
24. Moulton, L. K. (1980). Highway subdrainage design. Federal Highway Administration Report No. FHWA-TS-80-224.
25. Mymrin, V. A., Ponte, H. A., Ponte, M. J. J. S., ve Maul, A. M. (2005). Structure formation of slag-soil construction materials. *Materials and Structures*, 38, 107-113. doi:10.1007/BF02480582
26. Pamukcu, S., ve Tuncan, A. (1993). Laboratory characterization of cement-stabilized iron-rich slag for reuse in transportation facilities. *Transportation research record*, 1424, 25-33.
27. Rohde, L., W. Peres Núñez, ve J. Augusto Pereira Ceratti (2003). Electric arc furnace steel slag: base material for low-volume roads. *Transportation research record*, 1819, 201-207. doi:10.3141/1819b-2
28. TÇÜD, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, (2015). Demir Çelik Cüruf Raporu. Türkiye Çelik Üreticileri Derneği. 2015.
29. Teo, P. Ter, Zakaria, S. K., Salleh, S. Z., Taib, M. A. A., Sharif, N. M., Seman, A. A., Mohamed, J. J., Yusoff, M., Yusoff, A. H., Mohamad, M., Masri, M. N., ve Mamat, S. (2020). Assessment of Electric Arc Furnace (EAO) Steel Slag Waste's Recycling Options into Value Added Green Products: A Review. *Metals*, 10, 1–21. doi:10.3390/met10101347
30. Wang, G., Chen, X., Dong, Q., Yuan, J., ve Hong, Q. (2020). Mechanical performance study of pervious concrete using steel slag aggregate through laboratory tests and numerical simulation. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121208. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121208
31. World Steel Association. (2022). World Steel in Figures. World Steel Association, 3–30.

Bayın S.A. ve ark: Çelk Crflarnn Yol Dlgu Mlzmsi Olrk Kullanmında Drenaj Prformnsnn Syısal Anlızi.

32. Yildirim, I. Z., ve Prezzi, M. (2022). Subgrade stabilization mixtures with EAF steel slag: an experimental study followed by field implementation. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(6), 1754-1767. doi:10.1080/10298436.2020.1823389