

YOL GRANÜLER TABAKALARINDA KULLANILAN ÇELİKHANE CÜRUFUNUN MAKSİMUM KAYMA MODÜLÜ

MAXIMUM SHEAR MODULUS OF STEEL SLAG USED IN ROAD GRANULAR LAYERS

Hüseyin KARADAĞ¹, Seyhan FIRAT², Nihat Sinan IŞIK³
Derviş Volkan OKUR⁴, Gülgün YILMAZ⁵

ÖZET

Deformasyon seviyelerinin düşük olduğu davranışı tanımlayan malzeme karakteristikleri içerisinde maksimum/dinamik kayma modülü (G_{maks}), dinamik yükler altındaki zemin davranışını tanımlamada kullanılan bir parametredir. Laboratuvar ortamında genellikle rezonant kolon deneyi veya bender elemanı deneyi yöntemi ile hesaplanır. Bu çalışmada granüle tabakaları çelikhane cürufundan oluşan esnek yol üstyapısının sonlu elamanlar yöntemi ile analizi için gerekli olan cüruf maksimum kayma modülü rezonant kolon deneyleri ile elde edilmiştir. Farklı hücre basınçlarında gerçekleştirilen rezonant kolon deneyleri sonucu çelikhane cürufunun çevre basıncına bağlı maksimum kayma modülü grafiği de geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çelikhane cürufu, Maksimum kayma modülü, Rezonant kolon deneyi

ABSTRACT

The soil maximum shear modulus (G_{max}) is the parameter used to define the soil deformation behaviour under dynamic loads. Maximum shear modulus can be determined by resonant column test or by bender element test method at laboratory. This study aimed to determine the maximum shear modulus of steel slag for analysing of steel slag based layer of flexible road pavement. Maximum shear modulus of steel slag was obtained by carrying out the resonant column test at different cell pressures. As a result of the resonant column tests, the cell pressure dependent plot of the maximum shear modulus of the steel slag was developed.

Keywords: Steel slag, maximum shear modulus, resonant column test

¹ Dr., Aile ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı, karatagh@gmail.com (Sorumlu Yazar)

² Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, sfirat@gazi.edu.tr

³ Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, nihatsinan@gazi.edu.tr

⁴ Prof. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, vokur@ogu.edu.tr

⁵ Prof. Dr., Eskişehir Teknik Üniversitesi, gulgunyilmaz@eskisehir.edu.tr

1. GİRİŞ

Karayolu inşaatında en çok kullanılan malzeme agregadır. Doğal kaynakların korunması ve enerji verimliliği esasına dayanan farklı üretim süreçleri arasındaki simbiyotik ilişki, sürdürülebilirliğin temel yöntemlerinden bir tanesidir. Üretim faaliyeti sonucu ortaya çıkan yan ürünler veya atık ürünler bir başka üretim sürecine dahil edilerek doğal kaynaklardan tasarruf edilmiş olur. Çelikhane cürufunun da yol inşaatında agrega yerine kullanılması sonucu hem doğal kaynakların korunmuş olur hem de agrega üretimi için harcanacak enerjiden tasarruf edilmiş olur (Karadağ vd., 2020).

Çelikhane cürufu zemin iyileştirme temel, taş kolon uygulamaları, alttemel yol yapımı, su yapılarında anroşman, gabion duvarlar, riprap, balast malzemesi, asfalt agregası, çimento katkısı vb. birçok alanda kullanılmaktadır (Motz ve Geiseler, 2001; Euroslag 2012; USGS, 2015; Nationalslag, 2018; Karadağ vd., 2020, Sarımurat vd., 2021). Türkiye’de çelikhane cürufunun geri dönüşüm oranı %40 civarındadır (TÇÜD, 2015). Yol uygulamalarında temel ve alttemel malzemesi olarak kullanılması durumunda en az doğal malzeme kadar performans gösterdiği yapılan sayısal analizler göstermektedir (Karadağ vd., 2018, 2020, 2022; Karadağ ve Fırat 2022).

Trafik yükleri tekrarlı dinamik yüklerdir. Çelikhane cürufunun yol üstyapısında kullanılması durumunda yapılacak analizlerde, dinamik yükler altındaki deformasyon parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Malzemelerin deprem vb. dinamik yükler altındaki deformasyon karakteristikleri konvansiyonel deneyler ile elde edilen deformasyon karakteristiklerinden farklıdır. Literatürde zeminlerin dinamik yükler altındaki kayma deformasyon modülünün belirlenmesi için çeşitli laboratuvar ve arazi deneyleri mevcuttur.

Arazi deneyleri malzemelerde dalga yayılma teorisine dayalı, birim deformasyon seviyesi 10^{-5} mertebesinde olan, düşük deformasyonlu jeofizik yöntemeye dayalı deneyler ve yüksek deformasyon deneyleri olmak üzere iki gruba ayrılabilir.

Yüksek deformasyonlu deneyler, gerçekte zeminlerin yüksek birim deformasyonlardaki dayanım parametrelerini ölçmeye yönelik deneylerdir. Başlıca yüksek deformasyonlu arazi deneyleri; Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), Konik Penetrasyon Deneyi (CPT), Dilatometre Deneyi (DMT) ve Pressiyometre Deneyi (PMT)’dir. Bu deneylerin çoğu istinat yapıları, tüneller ve temeller gibi deformasyon seviyesinin yüksek olduğu koşullarda, zeminlerin yüksek birim deformasyonlardaki mühendislik parametrelerini belirlemeye yönelik deneyler olsa da literatürde araştırmacılar tarafından bu deneylere dayalı olarak zeminlerin düşük birim deformasyon parametrelerini belirlemeye yönelik geliştirilen ampirik yöntemler de mevcuttur.

Düşük deformasyonlu arazi deneyleri olarak; sismik yansıma deneyi, sismik kırılma, sismik kuyu, karşit kuyu vb. sayılabilir. Sismik yöntemeye dayalı düşük deformasyon deneylerinde zeminlerin maksimum kayma deformasyon modülü (G_{max}), sismik ölçüm sırasında elde edilen kayma dalgası hızından hesaplanır.

Zemin malzemelerinin dinamik yükleme koşullarındaki dayanım ve deformasyon parametrelerini belirlemeye yönelik çeşitli laboratuvar deneyleri de mevcuttur.

Laboratuvar deneyleri de kendi içinde düşük deformasyonlu deneyler ve yüksek deformasyonlu deneyler olarak ayrılır.

Düşük deformasyonlu deneyler;

- Rezonant kolon deneyi (serbest-serbes RC, serbest-sabit RC)
- Piezoelektrik Bender elemanı,

Yüksek deformasyonlu deneyler ise;

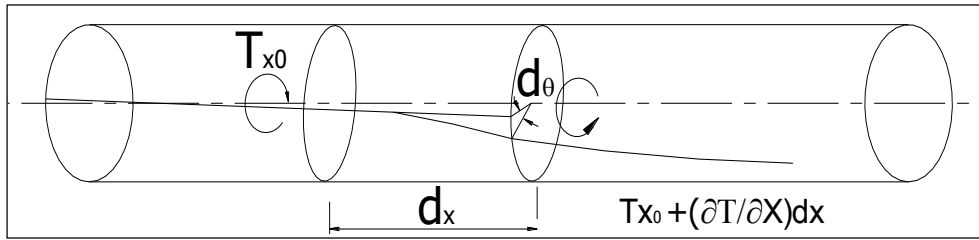
- Dinamik üç eksenli deney,
- Dinamik kesme deneyi,
- Burulmalı kesme deneyleridir.

Model deneyler olarak da sarsma tablası ve santrifüj deneyler kullanılabilmektedir (Kramer, 1996).

Bu çalışmada, rezonant kolon deneyleri yapılarak çelikhane cürufunun maksimum kayma modülü belirlenmiştir. Granüler malzemelerin deformasyon modülü çevre basıncına bağlı olarak değişir. Rezonant kolon deneyleri farklı hücre basınçlarında gerçekleştirilerek her bir hücre basıncı için farklı kayma modülü belirlenmiştir. Hücre basınçları ise yapılan ön statik ve dinamik sayısal analizlerde lastik basıncı sonucu temel ve alttım tabaklarında oluşan ortalama gerilmeler esas alınarak belirlenmiştir. Laboratuvar deneyleri sonucunda çelikhane cürufunun kayma modülünün değişen çevre basıncına bağlı kayma modülü grafiği geliştirilmiştir. Literatürdeki boşluk oranına bağlı kayma modülü çalışmalarından da faydalanılarak çelikhane cürufu kayma modülünün boşluk oranı ve çevre basıncına bağlı eşitliği elde edilmiştir.

2. SONSUZ UZUNLUKTAKİ BİR ÇUBUKTA BURULMA

Şekil 1’de yer alan sonsuz uzunluktaki bir çubukta T burulma torkuna maruz kalan bir çubukta birim boyda (dx) meydana gelen birim dönme $d\theta$ ise hareket denge denklemi, iç ve dış kuvvetlerin dengesinden Eşitlik 1’deki gibi elde edilir:



Şekil 1. dx uzunluğunda silindirik bir çubukta burulma kuvveti-dönme ilişkisi (Kramer,1996).

$$(T_{x0} + \frac{\partial T}{\partial x} dx) - T_{x0} = \rho J dx \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (1)$$

Burada J çubuğun burulma atalet momentidir. Eşitliğin sol tarafındaki işlem yapılır ve her iki taraf dx’e bölünürse aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \rho J \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (2)$$

Cisimdeki burulma-dönme ilişkisi temel mukavemet denklemlerinden aşağıdaki gibi olacaktır:

$$T = GJ \frac{\partial \theta}{\partial x} dx \quad (3)$$

Eşitlik 2 ile Eşitlik 3 birleştirilirse burulma dalgası denklemi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = v_s^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (4)$$

Burada G çubuğun kayma modülüdür. Eşitlik 4'ten, çubuğun kayma dalgası hızı ile kayma modülü arasındaki ilişki Eşitlik 5'teki gibi olur:

$$G = \rho v_s^2 \quad (5)$$

Literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan deneylerde G_{max} , boşluk oranı ve ortalama çevre basıncının bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Hardin ve Richart kayma dalgası hızı için aşağıdaki eşitliği önermişler (Hardin ve Richart, 1963).

$$v_s = C(B - e)(p')^{n/2} \quad (6)$$

Burada C, B ve n zemine bağlı parametrelerdir. p' ise ortalama efektif gerilmedir. Zemin faz ilişkilerinden:

$$\rho = \rho_s / (1 + e) \quad (7)$$

olduğundan, Eşitlik 5, Eşitlik 6 ve Eşitlik 7 birleştirildiğinde maksimum kayma dalgası modülü Eşitlik 8'deki gibi elde edilecektir (Jia, 2018):

$$G_{max} = \rho_s C^2 (B - e)^2 (p')^n / (1 + e) \quad (8)$$

Bu eşitlik ise aşağıdaki genel formda yazılabilir.

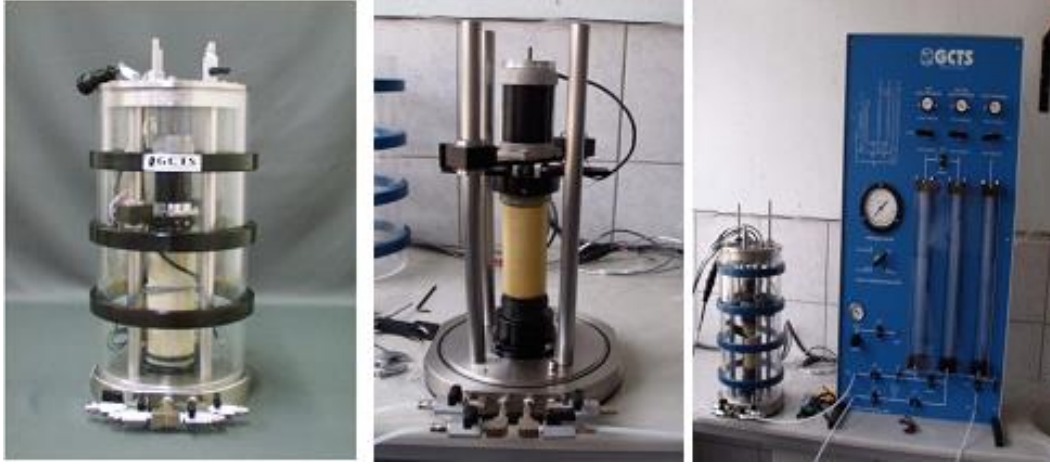
$$G = A_G F(e) (\sigma_c')^{n_G} \quad (9)$$

Burada A_G ve n_G gerilme geçmişi, mineraloji, tabakalanma, parçacık pürüzlülüğü ve köşeli yüzey gibi faktörlere bağlı malzeme sabitleridir (Clayton, 2011; Menq, 2003). G_{max} ve σ_c' ise KPa birimindedir. $F(e)$ boşluk oranının bir fonksiyonu olup Eşitlik 8'den hareketle aşağıdaki denklemde yer aldığı şekilde ifade edilebilir:

$$F(e) = (B - e)^2 / (1 + e) \quad (10)$$

3. REZONANT KOLON (RC) TEST SONUÇLARI

ERDEMİR'den elde edilen çelikhane cürufunun dinamik kayma modülünün (G_{max}) belirlenmesi için 50, 100, 150 ve 200 kPa hücre basınçları altında rezonant kolon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Rezonant kolon deneyi (Şekil 2), zeminlerin deformasyon seviyesine bağlı kayma modülü ve sönüm özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan başlıca yöntemlerden biridir. Bu deneyde, üç eksenli bir hücre içinde zemin numuneleri kullanılır. Bu numuneler burulmalı veya eksenel titreşim moduna maruz bırakılırlar. Bir frekans alanı ya da motor vasıtasıyla uygulanan bu yük zemin numunesinin rezonansa girdiği frekans değerine kadar devam eder. Bu aşamadan sonra, zemin numunesinin rezonans frekans değeri elde edilmiş olur. Zemin numunesinin boyutları ile rezonans frekansı kullanılarak kayma dalgası yayılım hızı hesaplanabilir. Bu aşamadan sonra, motor sisteminin veya elektromanyetik sistemin enerjisi kesilerek numunenin serbest titreşime geçmesi sağlanır. Serbest titreşen numunenin titreşiminin bitişi gözlenir ve buradan zeminin sönümleme özellikleri hesaplanır (ASTM, 2007).



Şekil 2. Rezonant kolon test cihazı

50, 100, 150, 200 ve 250 kPa hücre basınçlarında gerçekleştirilen deneye ilişkin veriler aşağıda Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Rezonant kolon deney sonuçları

γ (%)	(e)	Dr	σ' (kPa)	f_r (Hz)	V_s (m/sn)	G_{max} (MPa)
0,001	0,68	0,92	50	113	220,12	79,73
0,001	0,68	0,92	100	137	266,87	117,19
0,001	0,68	0,92	150	147	286,35	134,92
0,001	0,68	0,92	200	159	309,73	157,85
0,001	0,68	0,92	250	169	329,21	178,33

4. ÇELİKHANE CÜRUFU İÇİN G_{max} - σ_3 BAĞINTISI

Granüler zeminlerde dinamik kayma modülü çevre basıncı, boşluk oranı ve dane çapı ile ilişkilidir. Bu ilişki Hardin ve Richart tarafından Eşitlik 9'daki genel formda önerilmiştir. Eşitlik 9'da A_G ve n_G malzeme sabitleri, $F(e)$ ise boşluk oranının bir fonksiyonudur ve çeşitli araştırmacılar için önerilen $F(e)$ fonksiyonunun genel formu daha önce Eşitlik 10'da $F(e) = (B - e)^2 / (1 + e)$ şeklinde verilmiştir. Eşitlikte "e" boşluk oranı ve "B" ise malzemeye bağlı bir parametredir. Çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen $F(e)$ fonksiyonu değeri Menq tarafından Çizelge 2'de özetlenmiştir (Menq, 2003).

Çizelge 2. Çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen A_G ve n_G $F(e)$ değerleri

Zemin Tipi	Referans	$F(e)$	A_G	n_G	Zemin
Kumlu zeminler	Hardin ve Richart	$(2,17-e)^2/(1+e)$	7 000	0,50	Yuvarlak yüzeyli Ottawa kumu
		$(2,97-e)^2/(1+e)$	3 300	0,50	Köşeli, kırılmış kuartz
	Iwasaki vd.	$(2,17-e)^2/(1+e)$	9 000	0,38	temiz kum (11 farklı kum)
	Kokusho	$(2,17-e)^2/(1+e)$	8 400	0,50	Toyoura kumu
	Yu ve Richart	$(2,17-e)^2/(1+e)$	7 000	0,50	temiz kum (3 farklı kum)
Çakıllar	Prange	$(2,97-e)^2/(1+e)$	7 230	0,38	Balast (D50 = 40 mm, Cu = 3.0)
	Kokusho ve Esashi	$(2,17-e)^2/(1+e)$	13 000	0,55	Kırmataş (D50 = 30 mm, Cu = 10)
		$(2,17-e)^2/(1+e)$	8 400	0,60	Yuvarlak çakıl (D50 = 10 mm, Cu = 20)
	Tanaka vd.	$(2,17-e)^2/(1+e)$	3 080	0,60	Çakıl (D50 = 10 mm, Cu = 20)
	Goto vd.	$(2,17-e)^2/(1+e)$	1 200	0,85	Yuvarlak çakıl (D50 = 2 mm, Cu = 10)

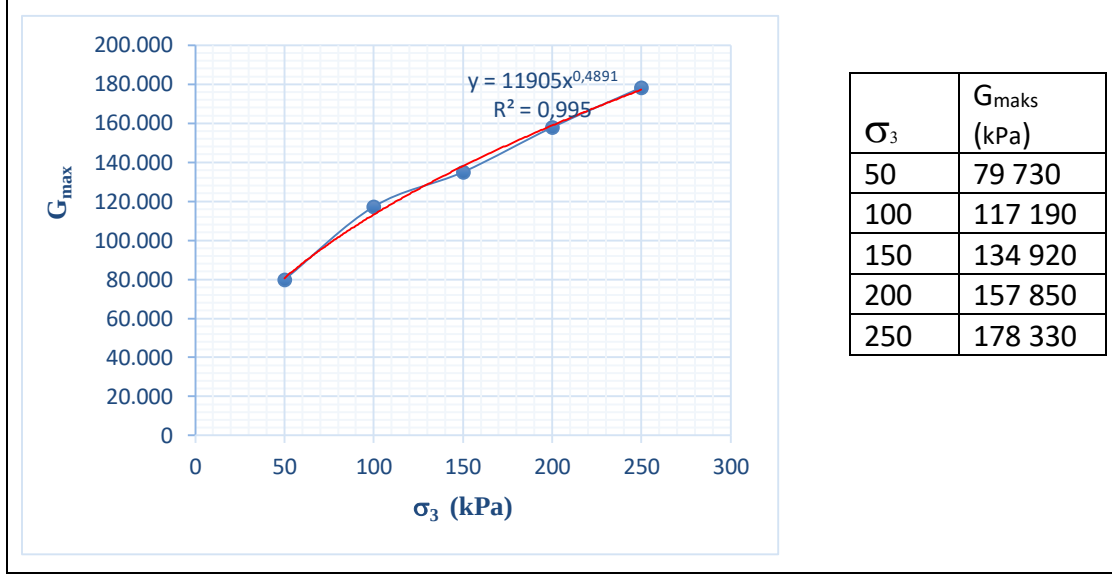
Seed ve diğ., zeminlerin sönüm ve kayma modülü için yapmış oldukları drenajsız dinamik üç eksenli test sonuçlarından hareketle Eşitlik 11'de yer alan korelasyonu geliştirmişlerdir. Eşitlikteki $(K_2)_{max}$ ve n_G malzeme sabitleridir. $(K_2)_{max}$ çakıllar için 80-180 ve kumlar için ise 55-80 aralığında değerler almaktadır. Burada G ve σ_c psf birimidir (Seed, vd., 1986).

$$G_{max} = 1000 (K_2)_{max} (\sigma_c)^{n_G} \quad (11)$$

Lin ve diğ. ise çakıl depozitleri üzerine yaptıkları rezonant kolon (RC) ve dinamik üç eksenli testler sonuçlarında, kayma rijitlik modülünün (G) çevre basıncı ve maksimum dane çapının artmasıyla büyüdüğünü tespit etmişlerdir (Lin vd., 2011). Literatür araştırmaları, boşluk oranının (e) artması ile kayma rijitlik modülünün azaldığı göstermiştir (Eşitlik 8).

Laboratuvarda çelikhane cürufu için elde edilen rezonant kolon (RC) sonuçlarından hareketle dinamik kayma modülü ile çevre basıncı arasındaki ilişki için Eşitlik 12 elde edilmiştir.

$$G_{max} = 11905 F(e)x(\sigma_3)^{0,4891} \quad (12)$$



Şekil 3. Çelikhane cürufunun G_{max} - σ_3 ilişkisi

Cüruf malzemesi köşeli yapısından ve granülometrik özelliklerinden dolayı kırmataş grubundan malzeme sayılabilir. Bu nedenle Çizelge 2’de kırmataş için önerilen $(2.17 - e)^2 / (1 + e)$ eşitliği Eşitlik 12’de yerine konulursa, Eşitlik 12 aşağıdaki şekilde yeniden yazılabilir:

$$G_{max} = 9009((2.17 - e)^2 / (1 + e))(\sigma_3)^{0,4891} \quad (13)$$

5. SONUÇLAR

Malzemelerin deprem vb. dinamik yükler altındaki deformasyon karakteristiklerinin konvansiyonel deneyler ile elde edilen deformasyon karakteristiklerinden farklıdır. Literatürde zeminlerin dinamik yükler altındaki kayma modülünün belirlenmesi için çeşitli laboratuvar ve arazi deneyleri mevcuttur. Bu çalışmada, yol üstyapısındaki temel, alttemel tabaklarında kullanılan çelikhane cürufunun tekrarlı trafik yükleri altındaki deformasyon davranışının belirlenmesi amacıyla gerekli olan maksimum kayma modülü rezonant kolon deneyleri ile elde edilmiştir.

Çalışmanın asıl amacı temel ve alttemel tabakalarında çelikhane cürufu kullanılan bir esnek yol üst yapısının hareketli trafik yükleri altında yük tekrar sayısına bağlı kesitin toplam deformasyonlarının hesaplamaması için gerekli olan cüruf dinamik kayma modülünün elde edilmesidir. Teker basıncı altında temel ve alttemel seviyelerinde oluşan gerilme seviyeleri farklı olduğu için çelikhane cürufunun maksimum kayma modülü

değerlerinin de farklı gerilme seviyelerine bağlı değerin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için de çelikhane cürufunun farklı hücre basıncındaki maksimum kayma modülü değerleri belirlenmiş ve bu değerlerden hareketle çevre basıncına bağlı değişen maksimum kayma modülü grafiği çalışma kapsamında geliştirilmiştir.

Günümüzde yol üst yapısının mekanistik-ampirik analizine ilişkin çeşitli şartnameler geliştirilmiştir. Diğer yandan çelikhane cürufu da artık bütün dünyada yol üst yapısının çeşitli katmanlarında kullanılan bir malzemedir. Yol üst yapısının tekrarlı trafik yükleri altındaki deformasyonlarının tahmini için üst yapı katmanlarında kullanılan malzemelerin deformasyon parametrelerinin sahadaki gerçek gerilme seviyelerine bağlı değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Çalışma, yol üst yapısı ile ilgili yapılacak dizayn ve analizler ile akademik çalışmalar kapsamında yapılacak çalışma ve numerik analizlere de katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- ASTM (2007). Standard test methods for modulus and damping of soils by resonant-column method. D4015-07.
- Clayton, C. (2011.). "Stiffness at small strain: research and practice", *Géotechnique*, 61(1), 5-37.
- Euroslag, 2012, Position paper on the status of ferrous slag, The European Slag Association, Duisburg.
- Hardin, B.O., Richart, F.E. (1963). Elastic wave velocities in granular soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 89, 33-65. Jia, J. (2018). "Soil dynamics and foundation modeling" Cham: Springer International Publishing, 82-87.
- Karadağ, H., S. Fırat, and N.S. Işık., (2018). Assessment of performance of steel slag used in road base by finite element analysis, 13th International Congress on Advances in Civil Engineering, Çeşme-İzmir, 83870-83877.
- Karadağ H., Fırat, S., Işık, N.S., (2020). Çelikhane Cürufunun Yol Temel ve Alttemel Malzemesi Olarak Kullanılması, *Politeknik Dergisi* Cilt 23, Sayı 3, 799 – 812.
- Karadağ, H., Fırat, S., Işık, N. S., Yılmaz, G. (2022). Determination of permanent deformation of flexible pavements using finite element model, *GRAĐEVINAR*, 74 (6), 471-480, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2708.2019>
- Karadağ, H., Fırat, S. (2022). The response of flexible pavement roads to loading frequency, 7th International Conference on Road and Rail Infrastructure-CETRA 2022, P.435-439, Pula-Croatia, doi: <https://doi.org/10.5592/CO/CETRA.2022.1468>
- Kramer, S.L. (1996). Geotechnical earthquake engineering. New Jersey: Prentice-Hall, 184-248.

- Lin,S.Y., Lin, P.S., Hong-Su Luo, H.S., Juang, C.H. (2011), "Shear modulus and damping ratio characteristics of gravelly deposits", *Canadian Geotechnical Journal*, 37(3), 638-651.
- Menq, F.-Y. (2003). "Dynamic properties of sandy and gravelly soils", Ph.D. Thesis, University of Texas at Austin, 106-122.
- Motz, H., Geiseler, J., (2001), Products of steel slags an opportunity to save natural resources, *Waste Management*, 21(3):285-293.
- Sarimurat S., Firat, S., Işık, N.S., (2021). Taş kolon performanslarının hipoplastik model ile analizi, *politeknik, Politeknik Dergisi*, Cilt 24, Sayı 3, 997- 100
- Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M. and Tokimatsu, K. (1986). "Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(11), 1016-1032.
- TÇÜD, (2015). Demir Çelik Cüruf Raporu, ÇŞB, Ankara.
- İnternet: U.S. Geological Survey (USGS), (2015), Iron and steel slag statistics and information"http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_&_steel_slag/index.html#contacts.
- İnternet: Common Uses for Slag, (2018) URL: <http://www.nationalslag.org/common-uses-slag>, Son Erişim Tarihi: 29.12.2018.

