

Makale / Research Paper

Sürdürülebilir Beton ve Zemin Dolgulu Sürekli Temellerin Monoton Yükler Altındaki Davranışı

Ilyas SARIBAS^{1a}, Bahadır OK^{1b*}

¹Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana/TÜRKİYE
bahadirok@atu.edu.tr

Received/Geliş: 06.05.2022

Accepted/Kabul: 23.08.2022

Öz: Günümüz ihtiyaçlarına cevap veremeyen yapıların yenilenmesi, doğal afetler, bölgesel ve küresel savaşlar sonucunda önemli oranda inşaat ve yıkıntı atığı malzeme ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan bu atıkların dönüştürülerek tekrar kullanılması yoluyla bertaraf edilmesi son yılların en önemli araştırma konularındandır. İnşaat ve yıkıntı atığı malzemeler dönüştürülerek geri dönüşümlü agregalar elde edilmektedir. Geri dönüşümlü agreganın sürdürülebilir bir ürün olarak yeni beton üretiminde veya zemin dolgusu olarak kullanılması için detaylı çalışmalar yapılmış ve bu çalışmaların kapsamı genişleyerek devam etmektedir. Bu çalışma kapsamında ise hem üst yapıyı temsil eden sürekli temel kirişi hem de temelin altındaki dolgu zeminin sürdürülebilir malzemelerle üretildiği varsayılan yapı zemin etkileşim problemi incelenmiştir. Çalışma kapsamında üst yapıyı temsil eden sürekli temel kirişinin beton özellikleri konvansiyonel ve sürdürülebilir betonla dikkate alınmıştır. Zemin dolgusunun karakteristik özellikleri ise beş farklı sürdürülebilir malzeme ile dikkate alınmıştır. Yapılan nümerik simülasyonla, temelde meydana gelen çökme, dönme, eğilme momenti, kesme kuvveti ve yay kuvvetleri elde edilmiştir. Sürdürülebilir yapı-zemin etkileşim problemi için elde edilen bu sonuçlar, konvansiyonel yapı-zemin etkileşim probleminden elde edilen sonuçlarla kapsamlı olarak karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalardan elde edilen sonuçlara göre temelde meydana gelen çökme, dönme, eğilme momenti, kesme kuvveti ve yay kuvvetlerinin sürdürülebilir malzeme özelliklerinden belirli oranda etkilendiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yapı-zemin etkileşimi; Geri dönüşümlü agrega; Sürdürülebilir ve konvansiyonel beton; Sürekli temel; Sürdürülebilir dolgu.

The Behavior of Continuous Foundations with Sustainable Concrete and Soil Under Monotonic Loads

Abstract: Due to the renovation of structures, natural disasters, and regional-global wars, construction and demolition waste material is generated. The remediation of these wastes by recycling and reusing activities is one of recent most common research topics. Recycled aggregates are obtained through the recycling activities of these waste materials. In the literature, detailed studies have been carried out to use recycled aggregate as a sustainable product in producing new concrete or as a filling material. Besides, the scope of these studies continues to expand. In this comprehensive study, the structural behavior of the soil-structure interaction problem under the monotonic load, which is assumed to be produced with sustainable materials, was investigated. Furthermore, the concrete properties of these foundation beams representing the superstructure were considered with conventional and sustainable concrete. The characteristics of the filling materials were regarded with five different sustainable materials. The deflection, rotation, bending moment, shear force, and spring forces are obtained based on the numerical simulation. The sustainable soil-structure interaction problem results were compared with the conventional counterparts. Based on the comparisons, it was observed that the deflection, rotation, bending moment, shear force, and spring forces that occur in the foundation beam are affected by sustainable material properties.

Keywords: Soil-Structure interaction; Recycled aggregates; Sustainable and conventional concrete; Continuous foundation; Sustainable filling.

Bu makaleye atıf yapmak için

Saribas I., Ok B., "Sürdürülebilir Beton ve Zemin Dolgulu Sürekli Temellerin Monoton Yükler Altındaki Davranışı", El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 2022, 9 (3); 1098-1112.

How to cite this article

Saribas I., Ok B., "The Behavior of Continuous Foundations with Sustainable Concrete and Soil Under Monotonic Loads", El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2022, 9 (3); 1098-1112.

ORCID: *0000-0002-9855-6941; *0000-0001-8333-5671

1. Giriş

İkinci dünya savaşından sonra popüler hale gelen sürdürülebilirlik kavramı insanlar tarafından sürekli olarak önemsenen kavramlardan birisidir. Gelecek nesillerin ihtiyaç duyacağı hammaddeleri optimum seviyede tüketerek günümüz ihtiyaçlarını karşılama olarak da tanımlanan sürdürülebilirlik, inşaat sektöründe de son yıllarda önemli bir gündem haline gelmiştir. Beton ve betondan üretilen ürünler gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin ekonomisinde önemli yer tutan inşaat sektörünün ana çıktılarındandır [1]. Bu ürünlerin üretiminde önemli miktarda doğal kaynak kullanılmaktadır. Bu kaynakların başında ise doğal agrega (DA) kaynakları gelmektedir. İnşaat sektörünün artan hammadde ihtiyacı bu kaynakların hızlı bir şekilde tükenmesine neden olmaktadır. Doğal kaynakların hızlı bir şekilde tükenmesi hem inşaat sektörünü hem de ülkelerin ekonomisini tehlikeye sokmaktadır. Bundan dolayı ikinci dünya savaşından sonra beton ve beton türevi ürünlerin üretiminde doğal kaynakların yerine sürdürülebilir ürünlerin kullanılması hedeflenmektedir [1]. Sürdürülebilir malzemeler, atık ürünlerin dönüştürülmesiyle elde edilmektedir. Özellikle üst yapıda kullanılabilecek en temel sürdürülebilir malzeme ise inşaat ve yıkıntı atığı betonların geri dönüştürülmesiyle elde edilen geri dönüşümlü agregadır (RCA). Geri dönüşümlü agregadan üretilen beton ise yeşil beton veya sürdürülebilir beton (SB) olarak isimlendirilmektedir. Geri dönüşümlü agrega ve bu agregadan üretilen sürdürülebilir betonun yeni yapıların üretiminde kullanılması için önemli sayıda deneysel ve analitik çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar neticesinde RCA'ların belirli şartları sağlaması durumunda yeni yapıların üretiminde kullanılabileceği hem bilimsel çalışmalarda hem de birden fazla uluslararası malzeme yönetmeliklerinde belirtilmiştir [1-7]. Ayrıca, sürdürülebilir malzemelerin zemin/yol dolgusunda kullanılabilirliği de oldukça fazla araştırılan konular arasındadır. Bu konuda daha önce yapılan birçok çalışmada beton atığı, tuğla atığı, doğal agrega atığı, cam atığı vb. birçok atığı karışık şekilde içerebilen geri dönüşümlü agregalar kullanılmıştır [8-12]. Bunun dışında birçok araştırmacı kullanım ömrünü tamamlamış esnek kaplamalı yollarda asfalt kaplamanın kazılması ile ortaya çıkan atığın geri dönüştürülerek (geri dönüştürülmüş asfalt kaplama: RAP) geoteknik uygulamalarında kullanılması durumunu araştırdığı da bilinmektedir. Özellikle esnek kaplamalı yolların nispeten kısa kullanım ömürlü olmaları, çevre şartları ve kapasitesinden fazla teker yüküne maruz kalmaları çabuk deforme olmalarına neden olmakta bu durum ise önemli miktarlarda RAP malzemesini ortaya çıkarmaktadır. Bazı araştırmacılar ise RCA ve RAP gibi malzemeleri belirli oranlarda karıştırarak elde ettikleri karışımın dolgularda doğal agregalar yerine kullanımını araştırmışlardır [13-15].

İnşaat mühendisliği yapılarının gerçekçi bir şekilde modellenerek analiz edilebilmesi için üst yapı ve zeminin gerçek davranışı temsil edecek şekilde modellenmesi gerekmektedir. Yapı ve zemin birlikte dikkate alındığı modelleme yöntemi ise yapı zemin etkileşimi (YZE) olarak tanımlanmaktadır. Yapı zemin etkileşiminde elastik temel yaklaşımı çokça kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem üst yapı ile zemini basit bir şekilde idealize ederek çözümüne imkân sağladığı için önemlidir. Yapı-zemin etkileşiminde, zemine oturan elastik temel probleminin çözümü için Winkler [16], Filonenko-Borodich [17], Hetenyi [18], Pasternak [19], Vlasov ve Leontiev [20], Reissner [21], Kerr [22], Kerr ve Coffin [23] tarafından bazı nümerik modeller önerilmiştir. Bu modeller arasında en yaygın olanı Winkler [16] modelidir. Yapı-zemin etkileşiminde oldukça fazla kullanılan Winkler [16] modeli basit bir yapısal model olmakla birlikte aynı zamanda bazı handikapları olan bir modeldir. Modelin temel handikabı, modellemede zeminin kesme kapasitesinin ihmal edilmesidir. Zeminin kesme kapasitesinin ihmal edilmesi durumunda, yer değiştirmenin enine doğrultuda yayılmadığı kabul edilmektedir. Bu nedenle yüklü ve yüksüz düzlemler arasında yer değiştirme süreksizliği ortaya çıkmaktadır. Ancak, gerçekte zeminin bir kesme kapasitesi vardır ve yükleme durumunda yer değiştirme süreksizliği oluşmamaktadır. Tüm bu eksikliklere rağmen birçok yapı-zemin problemi için yeterli yaklaşım sağlayan Winkler [16] modeli, sadeliği ve kullanım kolaylığından dolayı günümüzde en çok kullanılan zemin modellerinden birisidir. Ayrıca, farklı özelliklerdeki yapısal elemanlar; döşemeler, köprü döşemelerindeki ızgara sistemler, bir ve iki doğrultudaki sürekli temeller, dönel kabuklar, yatay yük etkisindeki düşey kazıklar ve palplanşlar Winkler [16] hipoteziyle

modellenebilmektedir. Bundan dolayı karmaşık bağıntılarla tanımlanan hipotezlere rağmen Winkler [16] hipotezi yapı zemin etkileşiminde oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Winkler [16] zemin modeli konvansiyonel betonun (KB) kullanıldığı üst yapı ve doğal agreganın dolgu malzemesi olarak kullanıldığı YZE probleminin çözümü için birçok çalışma kapsamında kullanılmıştır [16-23]. Ancak, sürdürülebilir betondan üretilen sürekli temeller ve RCA-RAP karışımlarıyla elde edilen sürdürülebilir zemin dolgusunun olduğu YZE probleminde henüz kullanılmamıştır. Bu çalışma kapsamında sürdürülebilir betondan üretildiği kabul edilen temel kirişiyle sürdürülebilir malzeme ile oluşturulan zemin dolgusu arasındaki YZE problemi Winkler [17] zemin modeliyle çözülmüştür. Elde edilen analiz sonuçları takip eden bölümlerde kapsamlı olarak sunulmuştur.

2. Materyal ve Metot

2.1. Nümerik Simülasyonda Dikkate Alınan Malzemeler

Yapı-zemin etkileşiminde iki farklı beton özelliklerine sahip temel kirişi dikkate alınarak modelleme yapılmıştır. Modelleme yapılan temel kirişlerindeki KB ve SB'nin karakteristik özellikleri ve gerilme-şekil değiştirme ilişkileri Belen ve diğ. [24] tarafından önerilen beton modeli kullanılarak elde edilmiştir. Bu betonların gerilme-şekil değiştirme ilişkileri RCA oranına bağlı olarak Denklem 1-8'e göre hesaplanmış ve Şekil 1a'da verilmiştir. Ayrıca, SB ve KB için aşağıda verilen Denklem 1-8 ile hesaplanan karakteristik beton değerleri Tablo 1'de detaylı olarak verilmiştir. Hem Şekil 1a ve hem de Tablo 1 detaylı olarak incelendiğinde Belen ve diğ. [24] tarafından önerilen modele göre SB ve KB için hesaplanan beton dayanımları aynı olsa da bu betonların elastisite modülleri arasında yaklaşık olarak %25 fark olduğu görülmektedir.

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{(k \cdot \eta - \eta^2)}{(1 + (k - 2)\eta)} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \quad (2)$$

$$k = 1.05 \frac{E_{cm} |\varepsilon_{c1}|}{f_{cm}} \quad (3)$$

$$E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.30} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{c1} = 0.70 (f_{cm})^{0.31} \quad (5)$$

$$\varphi_{cm}^{rec} = -0.0020 \times \%RCA + 1 \Rightarrow (E_{cm}) \quad (6)$$

$$\alpha_c^{rec} = 0.0021 \times \%RCA + 1 \Rightarrow (\varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c2}) \quad (7)$$

$$\beta_{cu}^{rec} = 0.0022 \times \%RCA + 1 \Rightarrow (\varepsilon_{cu1}, \varepsilon_{cu2}) \quad (8)$$

Denklem 1-8 verilen, σ_c beton gerilmesini, f_{cm} ortalama beton basınç dayanımını (28 günlük), k ve η gerilme-şekildeğişme katsayılarını, ε_c basınç birim şekil değiştirmesini, ε_{c1} maksimum basınç dayanımına karşılık gelen birim şekil değiştirmeyi, E_{cm} ortalama sekant elastisite modülünü, φ_{cm}^{rec} elastisite modülü için dönüşüm katsayısı, α_c^{rec} maksimum gerilme için dönüşüm katsayısı, β_{cu}^{rec} maksimum şekil değiştirme için dönüşüm katsayısı, $\%RCA$ kaba geri dönüşümlü agrega oranını temsil etmektedir [24].

Temel kirişlerindeki donatı gerilme-şekil değiştirme ilişkileri TBDY-2018'de [25] tanımlanan Denklem 9-11 dikkat alınarak elde edilmiş ve Şekil 1b'de verilmiştir. Donatı gerilme-şekil değiştirme ilişkisi hem boyuna hem de enine donatı için geçerlidir. Ayrıca, donatı karakteristik özellikleri Tablo

1’de detaylı bir şekilde verilmiştir.

$$f_s = E_s \varepsilon_s \Rightarrow (\varepsilon_s < \varepsilon_{sy}) \quad (9)$$

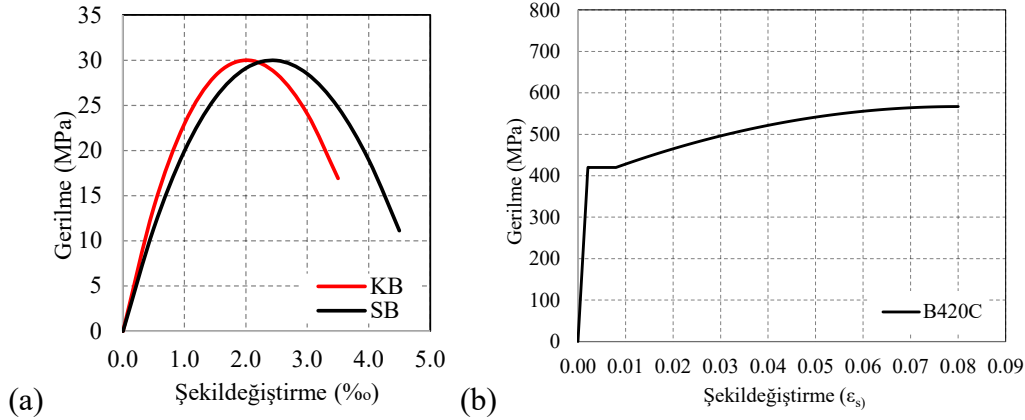
$$f_s = f_{sy} \Rightarrow (\varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < \varepsilon_{sh}) \quad (10)$$

$$f_s = f_{su} - (f_{su} - f_{sy}) \frac{(\varepsilon_{su} - \varepsilon_s)^2}{(\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh})^2} \Rightarrow (\varepsilon_{sh} < \varepsilon_s < \varepsilon_{su}) \quad (11)$$

Denklem 9-11’de verilen, f_s donatı çeliği gerilmesini, E_s donatının elastisite modülünü, ε_s donatı birim şekil değiştirmesini, f_{sy} donatı akma dayanımını, ε_{sy} donatı akma birim şekil değiştirmesini, ε_{sh} pekleşmeli donatı birim şekil değiştirmesini, ε_{su} maksimum donatı birim şekil değiştirmesini, f_{su} donatı kopma dayanımını temsil etmektedir [25].

Tablo 1. Betonarme sürekli temel kirişlerinin malzeme özellikleri.

Kirişler	f_c (MPa)	f_{cu} (Mpa)	f_{ct} (Mpa)	E_c (Mpa)	ρ_c (kg/m ³)	ε_{co}	f_{sy} (Mpa)	E_s (Gpa)
KB	30	16.9	1.92	30600	2500	0.002	420	200
SB	30	11.1	1.92	24500	2500	0.0024	420	200



Şekil 1. Gerilme-şekil değiştirme ilişkileri (a) sürdürülebilir beton (SB) ve konvansiyonel beton (KB), (b) B420C donatı çeliği.

Yapı zemin etkileşim probleminde üst yapı temelinin, %100 RCA (RCA100), %100 RAP (RAP100), %85 RCA ile %15 RAP karışımı (RCA85RAP15), %70 RCA ile %30 RAP karışımı (RCA70RAP30) ve %50 RCA ile %50 RAP karışımı (RCA50RAP50) olmak üzere beş farklı geri dönüşümlü agrega ile inşa edilen dolgu zemine oturacağı düşünülmüştür. Bu karışımlarda kullanılan malzemelerin karakteristik özellikleri Arulrajah ve diğ. [12]’nin çalışmasından elde edilmiştir. Ayrıca bu zeminlerin yatak katsayısı (K_s) değerleri, CBR değeri kullanılarak iki farklı amprik yaklaşım ile elde edilmiştir. K_s değeri, birinci yaklaşımda Denklem 12 [26] ile, ikinci yaklaşımda ise esneklik modülü (M_R) değerleri dikkate alınarak Denklem 12 ve 13 [27-28] kullanılarak hesaplanmıştır. Nihai K_s değeri bu iki yaklaşımdan elde edilen değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

$$K_s = 97.142CBR^{0.5842} \quad (12)$$

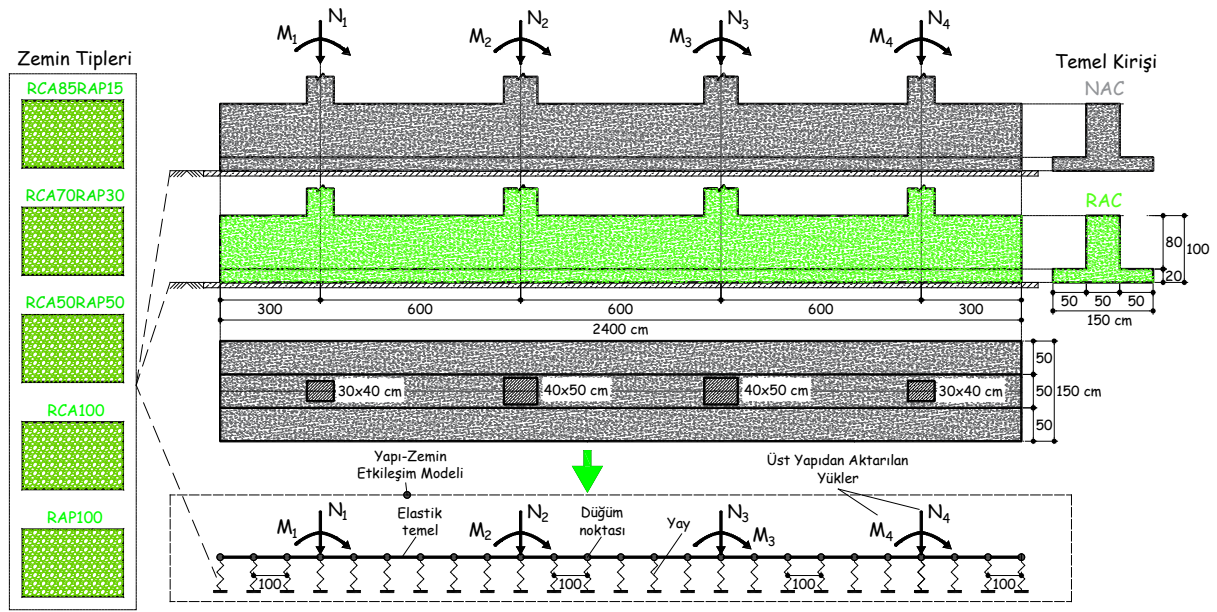
$$M_R = 3116CBR^a \quad (13)$$

$$K_s = \frac{M_R}{19.4} \quad (14)$$

Yapı-zemin etkileşiminde dikkate alınan tipik üst yapıyı temsil eden temel ve zemin durumu Şekil 2’de verilmiştir. Ayrıca, çalışma kapsamında dikkate alınan temelin boyutları, yükleme durumu ve zemin koşulları aynı şekilde kapsamlı olarak verilmiştir. Üst yapıdan depremler için hesaplanan ve temele etkileyen sabit ve hareketli yükler (moment, aksel yük) Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Temele etkileyen yük kombinasyonları.

Yükleme koşulları	N1-N4 (kN)	N2-N3 (kN)	M1-M4 (kNm)	M2-M3 (kNm)
Ölü yük \approx	280	540	35.0	40.0
Hareketli yük \approx	140	300	25.0	40.0



Şekil 2. Sürdürülebilir temel kirişi boyutları, sürdürülebilir dolgu tipleri ve yapı-zemin etkileşimi simülasyonu (boyutlar cm cinsindedir).

Elastik zemine oturan temel kabulüyle modellenen yapı zemin etkileşim problemünde dikkate alınan temel 24 eşit parçaya bölünmüş, bölünme sonucunda ortaya çıkan her diğüm noktasına zeminin karakteristik özelliklerini temsil edecek bir yay atanmıştır. Bu yaylara ait yay katsayıları (K) zeminlerin yatak katsayısı (K_s) değerleri ile temel genişliği çarpımı ile elde edilmiştir. Çalışma kapsamında dikkate alınan zeminlere ait karakteristik özellikler Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Zemin koşulları.

Zemin tipleri	RCA (%)	RAP (%)	K_s (kN/m ³)	B (m)	$K=BxK_s$ (kN/m ²)
RCA100	100	0	427202	1.50	640804
RCA85RAP15	85	15	313907	1.50	470861
RCA70RAP30	70	30	259331	1.50	388997
RCA50RAP50	50	50	237673	1.50	356509
RAP100	0	100	206943	1.50	310415

Sürdürülebilir beton ve bu betonun üretiminde kullanılacak olan malzemelerin çevresel, sosyal ve ekonomik olarak bazı kriterleri sağlaması gerekmektedir. Bu kriterler; fonksiyonellik, düşük maliyet, geri dönüştürülebilirlik, tasarruf sağlamak, düşük enerji tüketimi ve düşük kirletici özelliklere sahip olmaktır [29-30]. Sürdürülebilir beton ve bu betonun üretiminde kullanılan geri dönüşümlü agrega, tüm bu kriterler dikkate alındığında; fonksiyonellik, düşük maliyet, geri dönüştürülebilirlik, tasarruf sağlamak, düşük enerji tüketimi ve düşük kirletici özellik gibi kriterleri sağlamaktadır. Ayrıca sürdürülebilir beton çevresel, ekonomik ve sosyal etkiler kapsamında Tablo 4'te verilen kriterlere göre değerlendirildiğinde, yeni yapıların üretiminde sürdürülebilir beton kullanımı önemli bir araştırma alanı olarak karşımıza çıkmaktadır [29-30]. Ülkelerin ekonomisinde lokomotif görevi gören inşaat sektöründe sürdürülebilir betonların kullanılması potansiyeli Tablo 4'te verilen birçok problemin direkt veya dolaylı yollardan ortadan kalkmasına imkân sağlayacaktır. Dolayısıyla inşaat sektöründe yeni yapıların veya yapısal elemanların üretiminde sürdürülebilir betonun kullanılması çevresel, sosyal ve ekonomik açıdan bir zorunluluk gibi görünmektedir [29-30].

Tablo 4. Sürdürülebilir betonlar için çevresel, ekonomik ve sosyal ölçütler.

<i>Etki</i>	<i>Sürdürülebilirlik ölçütleri</i>	<i>Durum</i>
<i>Çevresel</i>	Atıklarda azalma var mı?	✓
	Hava kirliliği engellenebiliyor mu?	✓
	Üretilen malzeme çevre için zehirli mi?	✓-X
	CO ₂ emisyonunu azaltıyor mu?	✓
	Doğada var olan biyolojik çeşitliliğinin korunmasını sağlıyor mu?	✓
	Malzeme toprağın niteliği için zararlı etkisi var mı?	✓
	Malzeme çevredeki kokuların emilimini sağlıyor mu?	✓-X
	Üretilen malzeme geri dönüştürülebilir özelliğine sahip mi?	✓
	Yeniden kullanılabilme kapasitesi yüksek mi?	✓
	Görsel açıdan çevre kirliliği engellenebiliyor mu?	✓
	Gürültü kirliliğinin oluşmamasını sağlıyor mu?	✓
	Tüketilen enerji miktarı az mı?	✓
	Doğal ve yerel kaynaklardan elde edilebiliyor mu?	✓
Su kirliliği engellenebiliyor mu?	✓	
<i>Ekonomik</i>	Hammaddelerin depolanacağı yere taşınması sırasında tüketilen enerji miktarının az olması sağlanabiliyor mu?	✓
	Taşıma maliyeti azaltılabiliyor mu?	✓
	Bakım onarımı kolay mı?	✓
	Dayanıklı ve uzun ömürlü mü?	✓
	Mal ve hizmet sunumunda daha az materyal kullanılmasını sağlıyor mu?	✓
<i>Sosyal</i>	Malzeme bölgenin sosyal dokusuna uygun mu?	✓
	Sağlıklı bir çevre sağlayabiliyor mu?	✓
	Malzeme insanoğlu için güvenliği sağlayabiliyor mu?	✓
	İnsanların barınma ihtiyacını karşılıyor mu?	✓
	İnsan gereksinimleri olan eğitim, kültürel etkinlikler, uygun iş ve ev gibi sosyal dengeleri sağlayabiliyor mu?	✓
Yerel iş gücünün desteklenmesini sağlıyor mu?	✓-X	

2.2. Nümerik Simülasyonun Detayları

Yapı zemin etkileşiminde üst yapıyı temsil eden temelin rijitliğini hesaba katarak sürekli temel kirişinin elastik zemine oturduğu varsayımı ile yapılan çözüm Winkler [16] tarafından yapılmıştır. Üst yapının oturduğu zeminin elastik yaylardan oluştuğu kabul edilerek yapılan modele Winkler [16] zemini denmektedir. Elastik zemine oturan temel kirişinin nümerik modellemesi farklı yükleme durumları için kapsamlı olarak yapılmıştır. Çalışma kapsamında dikkate alınan Winkler [16] zeminine oturan temel kirişi aksel yük ve moment etkisindedir (Şekil 2). Bu etkiler altında farklı malzeme özelliklerine bağlı olarak elastik zeminde meydana gelecek, çökme (y_x), dönme (θ_x), eğilme momenti (M_x) ve kesme kuvveti (Q_x) ve yay kuvveti ise temel araştırma parametreleridir. Nümerik modellemede SAP2000 (Integrated Software for Structural Analysis and Design) yazılımı kullanılmıştır. İlgili yükler altında gerçek yapısal davranışın temsil edilebilmesi için betonarme temel 24 eşit parçaya bölünerek her düğüm noktasına Winkler [16] hipotezine göre yay atanmıştır. Atanan yayların karakteristik özellikleri zemin türüne göre değişmektedir (Tablo 3). Elastik zemine oturan temel kirişinin çözümü (15) ve (16) numaralı denklemler ile verilmektedir.

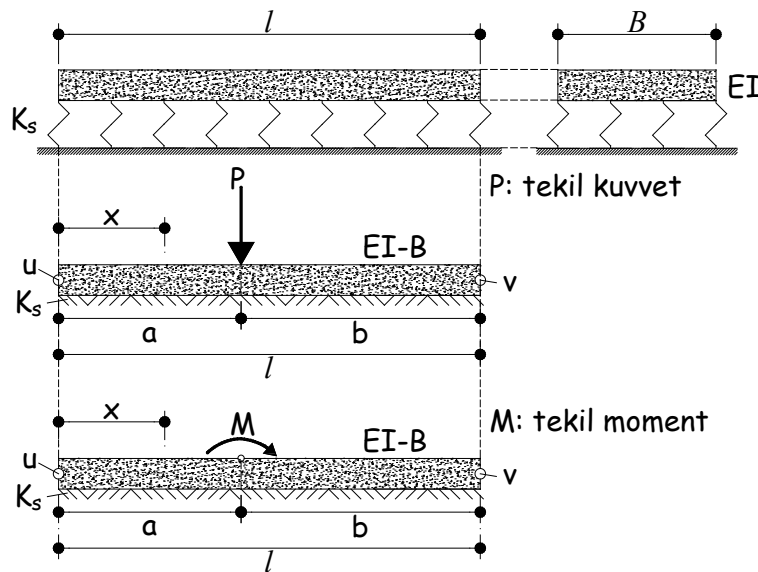
$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -Ky \quad (15)$$

$$K = K_s B \quad (16)$$

Bu denklemlerdeki K , yay katsayısını, K_s , zeminin yatak katsayısını, B , ise temelin zemine oturan taban genişliğini temsil etmektedir. Ayrıca, E temel kirişi malzemesinin elastisite modülünü, I ise temel kiriş kesitinin ağırlık merkezinden geçen eksene göre atalet momentini temsil etmektedir. Hesap kolaylığı açısından yukarıda verilen 15 numaralı diferansiyel Denklem 17'deki gibi yazılabilir. Buradaki λ ifadesi Denklem 18'deki gibi tanımlanmıştır.

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + 4\lambda^4 y = 0 \quad (17)$$

$$4\lambda^4 = \frac{K}{EI} \text{ or } \lambda = \sqrt[4]{\frac{K}{4EI}} \quad (18)$$



Şekil 3. Sonlu temel kirişteki tekil aksel yük ve tekil moment etkime durumları.

Denklem 17'nin çözümü Denklem 19'daki gibi yapılabilmektedir. Yapı zemin etkileşiminde elastik zemine oturan sonlu uzunlukta temel elemanın özel çözümlerinin farklı yüklemeler için ayrı ayrı elde edilebilmektedir (Şekil 3). Çalışma kapsamında dikkate alınan elastik zemine oturan sonlu uzunluktaki bir kirişin tekil eksenel yük ve tekil eğilme momenti etkisindeki çözümleri aşağıda ayrı ayrı verilmiştir (Şekil 3). Buna göre, elastik zemine oturan iki ucu boşta uv kirişine $x=a$ noktasında bir P tekil yükün etkimesi durumunda kirişin herhangi bir x kesitinde meydana gelecek çökme (y_x), dönme (θ_x), eğilme momenti (M_x) ve kesme kuvveti (Q_x) değerlerinin aşağıdaki 20-23 bağıntılarından hesaplanabileceği Hetenyi [20] tarafından ifade edilmiştir.

$$y(x) = e^{\lambda x} (A \cos \lambda x + B \sin \lambda x) + e^{-\lambda x} (C \cos \lambda x + D \sin \lambda x) \quad (19)$$

$$y_{(x)} = \frac{PL^3}{4EI} \frac{1}{(\lambda l)^3} \beta_{yp}^{(x)} = \frac{PL^3}{4EI} \delta_{yp}^{(x)} \quad (20)$$

$$\theta_{(x)} = \frac{PL^2}{2EI} \frac{1}{(\lambda l)^2} \beta_{\theta p}^{(x)} = \frac{PL^2}{2EI} \delta_{\theta p}^{(x)} \quad (21)$$

$$M_{(x)} = PL \frac{1}{\lambda l} \beta_{MP}^{(x)} = Pl \delta_{MP}^{(x)} \quad (22)$$

$$Q_{(x)} = P \beta_{QP}^{(x)} = P \delta_{QP}^{(x)} \quad (23)$$

Elastik zemine oturan iki ucu boşta uv kirişine $x=a$ noktasında bir M tekil momentinin etkimesi durumunda kirişin herhangi bir x kesitinde meydana gelecek çökme (y_x), dönme (θ_x), eğilme momenti (M_x) ve kesme kuvveti (Q_x) değerlerinin aşağıdaki 24-27 bağıntılarından hesaplanabileceği Hetenyi [20] tarafından ifade edilmiştir.

$$y_{(x)} = -\frac{2\lambda^2 M}{K} \beta_{yM}^{(x)} = -\frac{ML^2}{2EI} \frac{1}{(\lambda l)^2} \beta_{yM}^{(x)} = -\frac{ML^2}{2EI} \delta_{yM}^{(x)} \quad (24)$$

$$\theta_{(x)} = -\frac{2\lambda^3 M}{K} \beta_{\theta M}^{(x)} = -\frac{ML}{2EI} \frac{1}{\lambda l} \beta_{\theta M}^{(x)} = -\frac{ML}{2EI} \delta_{\theta M}^{(x)} \quad (25)$$

$$M_{(x)} = -M \delta_{MM}^{(x)} \quad (26)$$

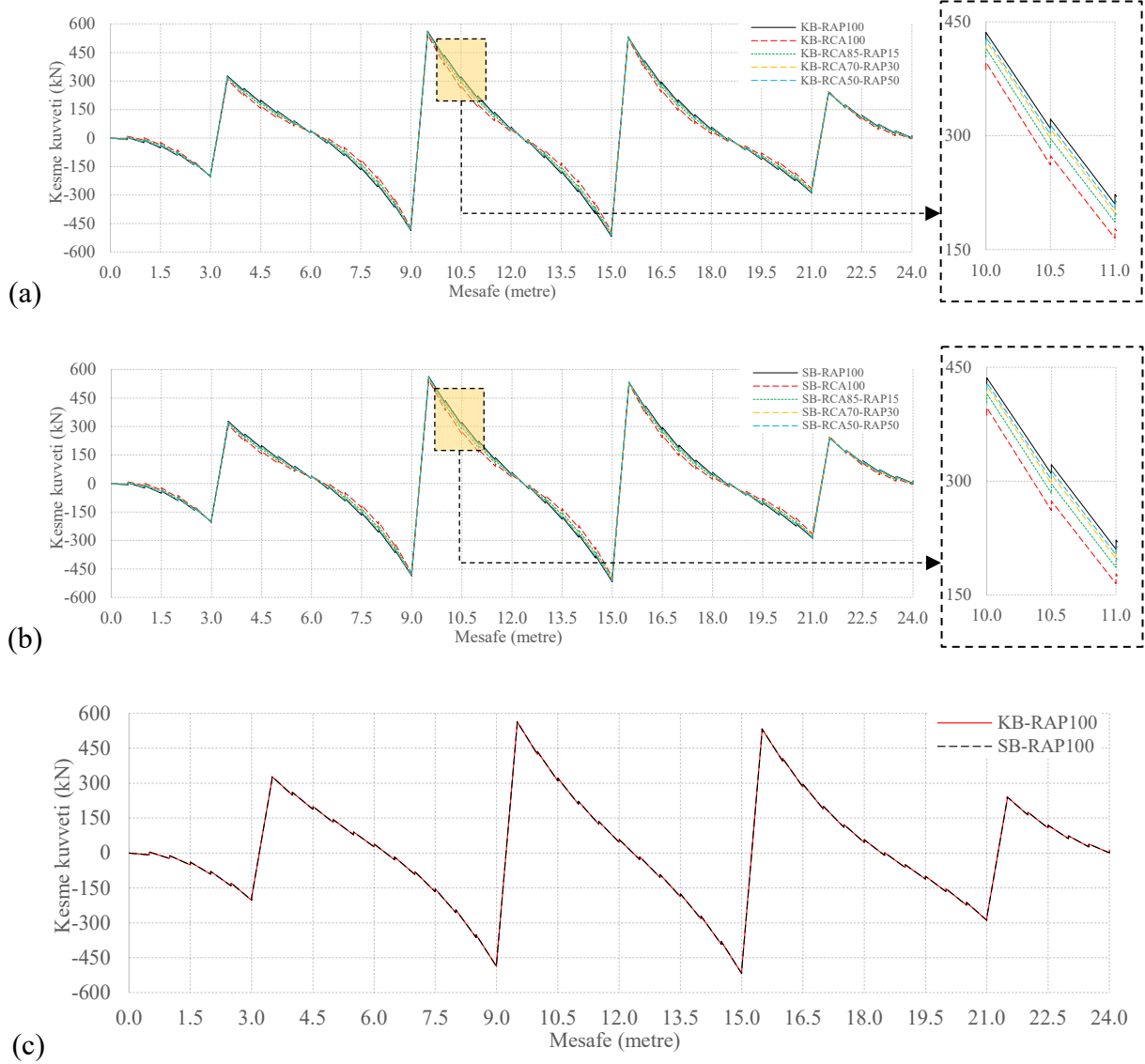
$$Q_{(x)} = -\lambda \beta_{QM}^{(x)} = -\frac{\lambda l}{l} M \beta_{QM}^{(x)} = -M \delta_{QM}^{(x)} \quad (27)$$

Elastik zemine oturan temel probleminin çözümünde temele etkiyen tekil yük ve tekil moment durumunda yukarıdaki denklemler dikkate alınarak gerekli hesaplamalar yapılabilmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

Detayları yukarıda verilen nümerik simülasyon sonucunda KB ve SB'nin dikkate alındığı temellerde çökme (y_x), dönme (θ_x), eğilme momenti (M_x), kesme kuvveti (Q_x) ve yay kuvvetleri elde edilmiştir. Analizler sonucunda elde bu parametrelerin mesafeye bağlı değişimleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4-8'de verilmiştir. Şekil 4 detaylı olarak incelendiğinde, aynı beton (KB veya SB) özelliklerinin dikkate alındığı sürekli temel kirişinin zemin dolgusundaki RAP malzemesinin oranı arttıkça temelde meydana gelen kesme kuvveti kapasitesi artmıştır. En düşük kesme kuvveti kapasitesi RCA100 dolgusunu kullanıldığı temel kirişlerinde meydana gelmiştir. Temel kirişlerinde meydana gelen kapasitesi değişiminde zemin yatak katsayısının etkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, aynı zemin

koşullarına sahip (RAP100) iki farklı betonun (KB ve SB) dikkate alındığı temelde meydana gelen kesme kuvveti kapasiteleri benzer olarak elde edilmiştir. Bu durumun ortaya çıkmasının nedeni Belen ve diğ. [24] tarafından önerilen modelden elde edilen beton dayanım değerlerinin benzer olmasıdır. Nümerik simülasyonda beton ve donatı gerilme-şekil değiştirme ilişkileri lineer olmayan durum dikkate alınarak modellenmiştir. Bu modellemede her iki betonun dayanım değerleri aynı olsa da bu betonların elastisite modelleri arasında %25'lik fark bulunmaktadır. Elastisite modülü değerleri arasındaki bu farklılık, monotonik yüklemeye maruz bırakılan YZE probleminde temel kirişlerinin kesme kapasitesinde değişime neden olmamıştır.

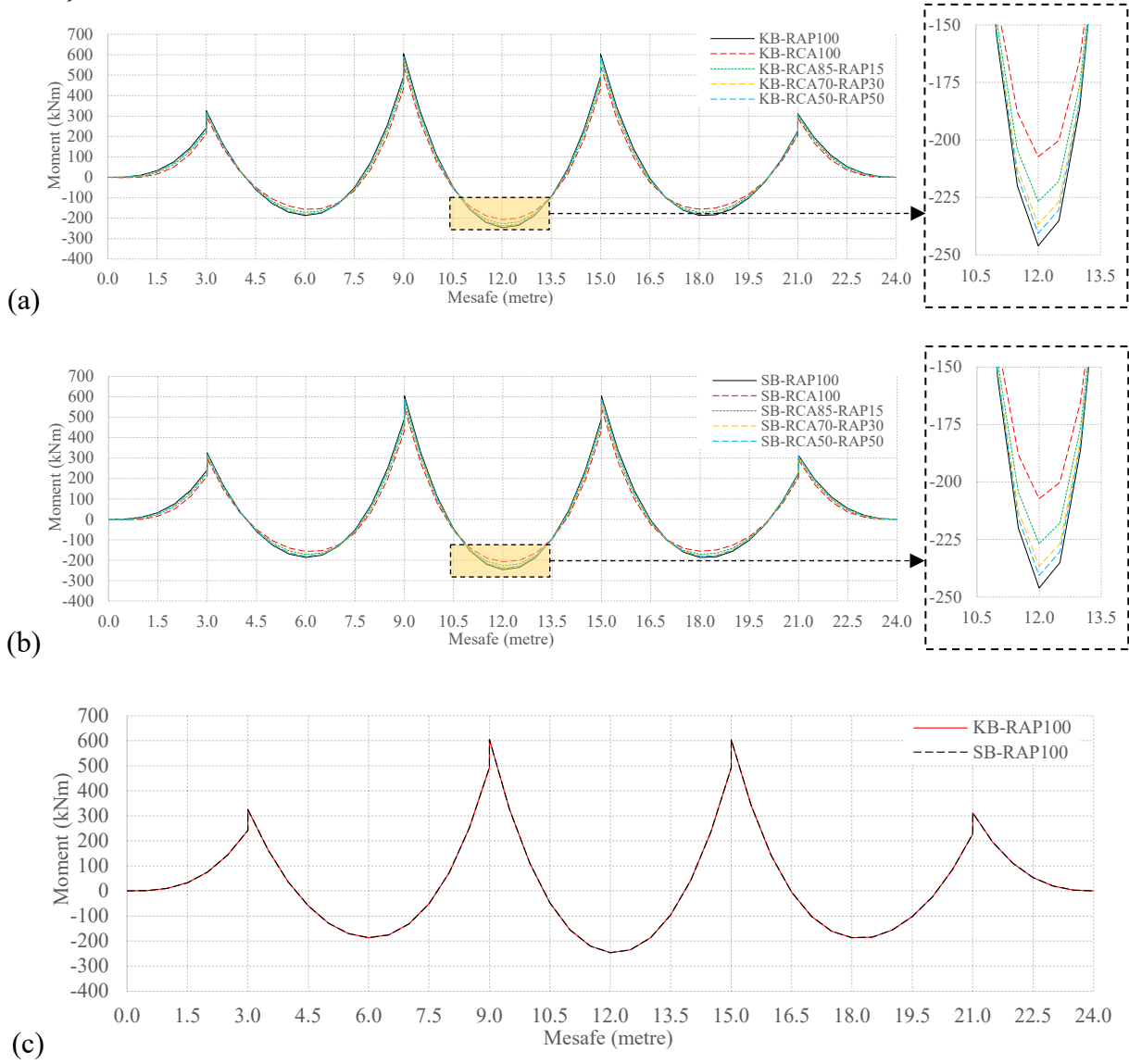


Şekil 4. Elastik temelde farklı zemin özelliklerine bağlı olarak meydana gelen kesme kuvveti-mesafe ilişkileri (a) KB temel kirişi ve farklı zemin tipleri, (b) SB temel kirişi ve farklı zemin tipleri, (c) Aynı zemin sınıfına sahip temel kirişi.

Şekil 5, 6 ve 7 detaylı olarak incelendiğinde, aynı beton (KB veya SB) özelliklerinin dikkate alındığı sürekli temel kirişinin zemin dolgusundaki RAP malzemesinin oranı arttıkça temelde meydana gelen eğilme momenti, çökme ve dönme kapasiteleri artmıştır. En düşük eğilme momenti, çökme ve dönme kapasiteleri RCA100 dolgusunun kullanıldığı temel kirişlerinde meydana gelmiştir. Bu dayanım farkına neden olan temel araştırma parametresinin zemin yatak katsayısı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, aynı zemin koşullarına sahip (RAP100) iki farklı betonun (KB ve SB) dikkate alındığı

temelde meydana gelen eğilme momenti, çökme ve dönme kapasiteleri benzer olarak elde edilmiştir (Şekil 5c, 6c, 7c).

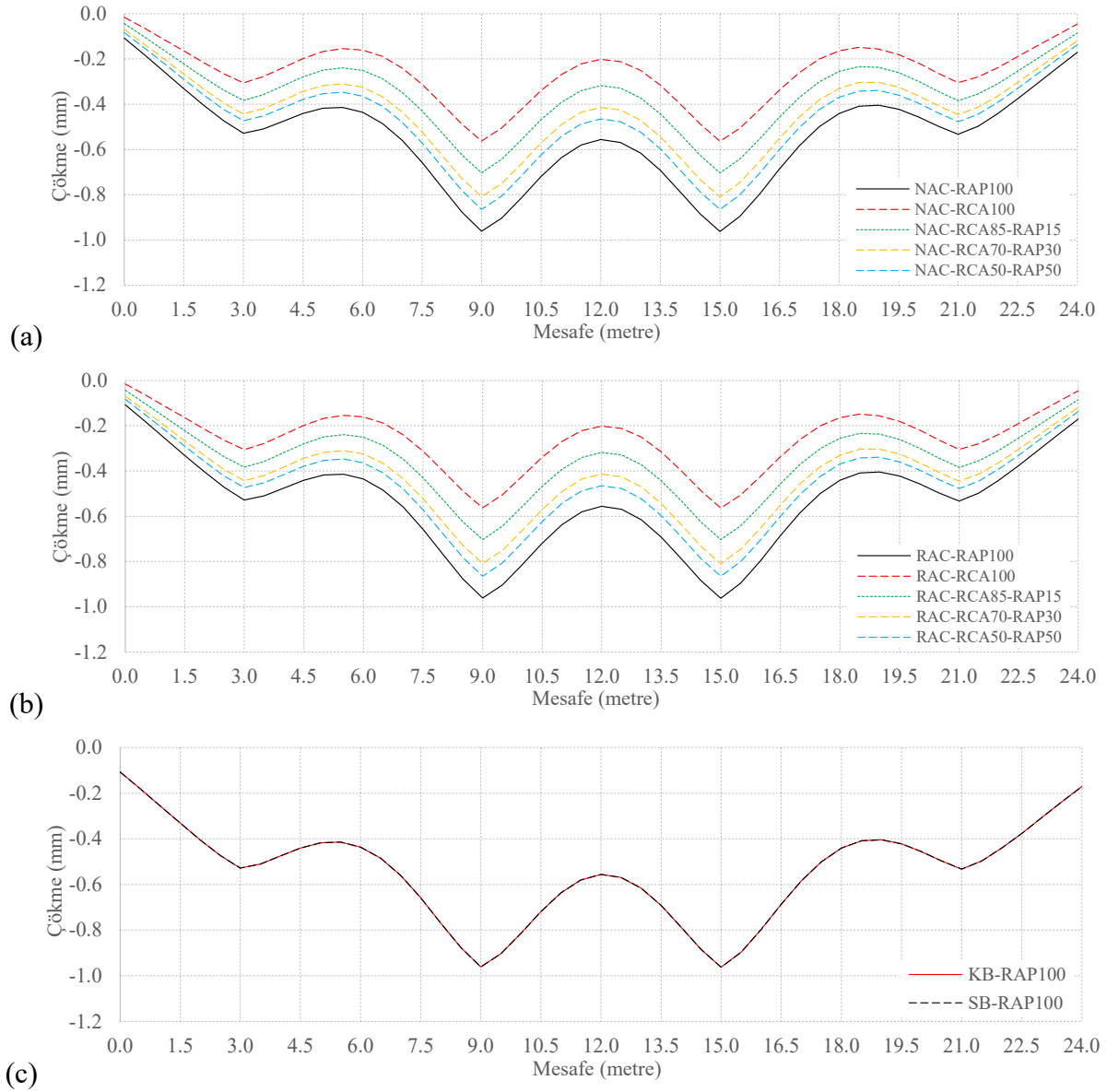
Bu durumun ortaya çıkmasının nedeni Belen ve diğ. [24] tarafından önerilen modelden elde edilen beton dayanım değerlerinin benzer olmasıdır. Nümerik modellemede beton ve donatı gerilme-şekil değiştirme ilişkileri lineer olmayan durum dikkate alınmıştır. Bu durumda her iki betonun dayanım değerleri aynı olsa da bu betonların elastisite modelleri arasında %25'lik fark bulunmaktadır [31]. Elastisite modülü değerleri arasındaki bu farklılık, monotonik yüklemeye maruz bırakılan YZE probleminde temel kirişlerinin eğilme momenti, çökme ve dönme değerlerinde değişime neden olmamıştır.



Şekil 5. Elastik temelde farklı zemin özelliklerine bağlı olarak meydana gelen eğilme momenti - mesafe ilişkileri (a) KB temel kirişi ve farklı zemin tipleri, (b) SB temel kirişi ve farklı zemin tipleri, (c) Aynı zemin sınıfına sahip temel kirişi.

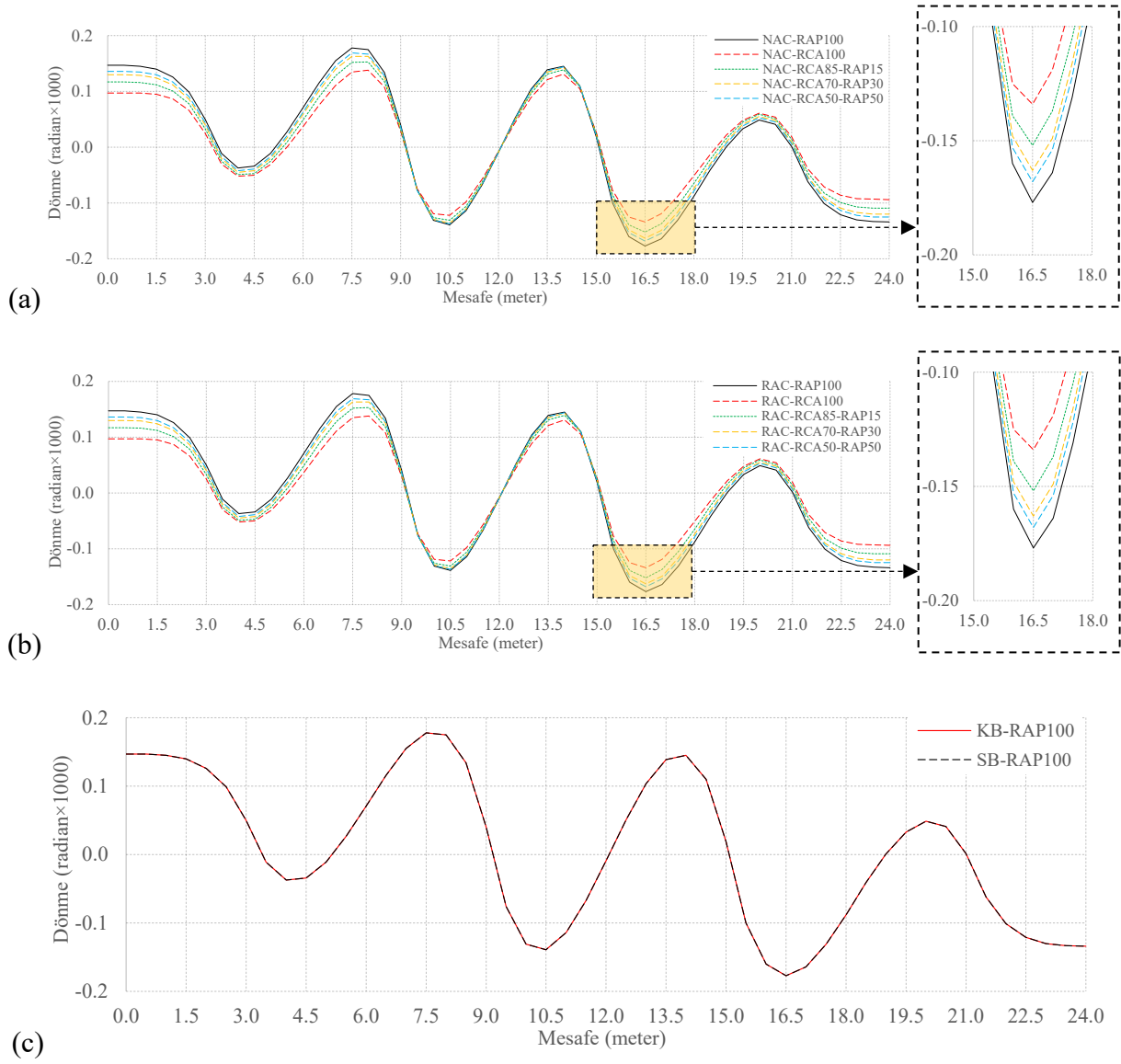
Elastik zemine oturan betonarme temel kirişinin nümerik simülasyonunda dikkate alınan en temel parametrelerden birisi de zemin yatak katsayısıdır. Zemin yatak katsayısı dikkate alınarak elde edilen yay katsayısı Winkler hipotezinde elastik temel tanımı için kullanılmaktadır. Bu nedenle elastik zemine oturan temel kirişinde zemin dolgusu olarak farklı sürdürülebilir malzemelerin kullanılması durumunda temelde meydana gelecek olan yay kuvvetleri, araştırılması gereken en temel konulardandır. Bu çalışma kapsamında beş farklı sürdürülebilir zemin dolgusunun kullanıldığı YZE

problemde sürekli temel altında elastik zeminin tanımlanması için kullanılan yaylarda meydana gelen yay kuvvetleri elde edilmiştir. Elde edilen bu yay kuvvetleri Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 6. Elastik temelde farklı zemin özelliklerine bağlı olarak meydana gelen çökme-mesafe ilişkileri (a) KB temel kirişi ve farklı zemin tipleri, (b) SB temel kirişi ve farklı zemin tipleri, (c) Aynı zemin sınıfına sahip temel kirişi.

Şekil 8 kapsamlı olarak incelendiğinde, yay kuvvetlerinin RCA ve RAP malzeme oranlarından önemli derecede etkilendiği görülmektedir. Dolgu zeminde RAP oranı arttıkça yay kuvvetlerinin azaldığı, RCA oranı arttıkça ise yay kuvvetlerinin arttığı Şekil 8a-b’den anlaşılmaktadır. Aynı zemin dolgusuna (RAP100) sahip SB ve KB sürekli temel kirişlerinde yay kuvvetleri benzer olarak elde edilmiştir. Bu sonucun ortaya çıkmasındaki en temel etken ise her iki temel kirişi için dikkate alınan betonlarda karakteristik basınç dayanımlarının benzer olmasıdır. Bu iki betonda elastisite modüllerinin farklı olması davranışı etkilememiştir [32].

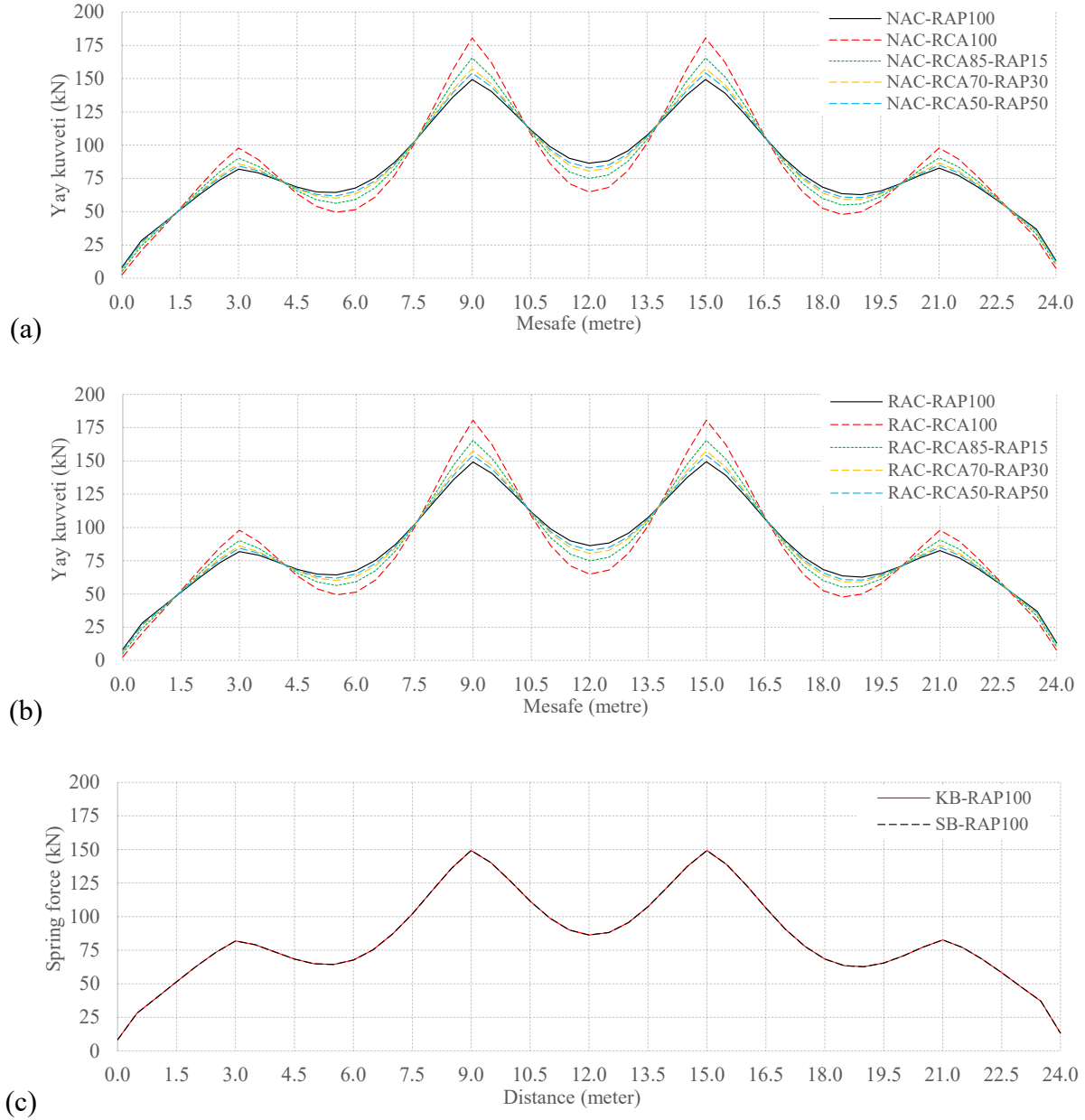


Şekil 7. Elastik temelde farklı zemin özelliklerine bağlı olarak meydana gelen dönme-mesafe ilişkileri (a) KB temel kirişi ve farklı zemin tipleri, (b) SB temel kirişi ve farklı zemin tipleri, (c) Aynı zemin sınıfına sahip temel kirişi.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında sürdürülebilir beton ve zemin dolgulu yapı zemin etkileşim problemlerinin monotonik yükler altındaki davranışları kapsamlı olarak incelenmiştir. Yapılan detaylı çalışmayla aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Winkler hipotezinin sürdürülebilir betonlu ve dolgulu elastik zemine oturan temel kirişlerinin nümerik simülasyonunda kullanılabileceği görülmüştür.
- Sürdürülebilir beton ve dolgulu elastik zemine oturan temel kirişlerinde monotonik yükleme altında meydana gelen, kesme kuvveti, eğilme momenti, çökme, dönme ve yay kuvvetlerinin zemin dolgusundaki RCA ve RAP agrega oranlarından önemli oranda etkilendiği görülmüştür. Bu tip problemlerde zemin dolgusunda RCA oranının RAP oranından fazla olması durumunda daha yüksek performans elde edilmiştir. Yine de sürdürülebilirliğin artırılması açısından zemin dolgusunda %15 ve daha az miktarda RAP kullanımının uygun olacağı düşünülmektedir.



Şekil 8. Elastik temelde farklı zemin özelliklerine bağlı olarak meydana gelen yay kuvveti-mesafe ilişkileri (a) KB temel kirişi ve farklı zemin tipleri, (b) SB temel kirişi ve farklı zemin tipleri, (c) Aynı zemin sınıfına sahip temel kirişi.

- Aynı zemin tipine ve farklı beton özellikleri sahip olan elastik zemin oturan sürekli temel kirişlerinde benzer çökme, dönme, eğilme momenti, kesme kuvveti ve yay kuvvetleri elde edilmiştir.
- Yapılan nümerik simülasyon sonucunda, sürdürülebilir beton ve dolguların konvansiyonel beton ve dolguların yerine kullanılabileceği görülmüştür.

Yukarıdaki sonuçlar, bu çalışma kapsamında dikkate alınan yapı zemin etkileşim problemleri için geçerlidir. Daha fazla sonuca ulaşmak için daha kapsamlı çalışmaların yapılmasına ihtiyaç duyulacaktır.

Yazarların Katkıları

IS ve BO çalışmaya eşit oranda katkı sağlamıştır. Her iki yazar da makalenin son halini okudu ve onayladı.

Çıkar Çatışması

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- [1]. Xiao, J., *Recycled Aggregate Concrete Structures*, Springer Tracts in Civil Engineering, 1, Berlin, Germany, (2018).
- [2]. Goksu, C., Saribas, I., Binbir, E., Akkaya, Y., Ilki, A., *Structural Behavior of Recycled Aggregates Concrete Obtained from Low Quality Concrete*, *Structural Engineering & Mechanics*, 2019, 69 (1): 77-93.
- [3]. Saribas, I., Goksu, C., Binbir, E., Ilki, A., *Seismic Performance of Full-Scale RC Columns Containing High Proportion Recycled Aggregate*, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2019, 17 (11): 6009-6037.
- [4]. Saribas, I., Goksu, C., Binbir, E., Ilki, A., *Shear-flexure Interaction in RAC Columns Under Simulated Seismic Actions*, *Engineering Structures*, 2021, 231: 111746.
- [5]. Saribas, I., *Structural Optimization Behavior of Green Concrete Members*, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2022, 47: 5033–5051.
- [6]. Ok, B., Sarici, T., Talaslioglu, T., Yildiz, A., *Geotechnical Properties of Recycled Construction and Demolition Materials for Filling Applications*”, *Transportation Geotechnics*, 2020, 24: 100380.
- [7]. Saribas, I., Ok, B., *Seismic Performance of Recycled Aggregate-Filled Cantilever Reinforced Concrete Retaining Walls*, *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11 (4): 1-11.
- [8]. Vieira C.S., Pereira, P.M., *Use of Recycled Construction and Demolition Materials in Geotechnical Applications: a Review*, *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 103: 192-204.
- [9]. Disfani, M.M., Arulrajah, A., Haghghi, H., Mohammadinia, A., Horpibulsuk, S., *Flexural Beam Fatigue Strength Evaluation of Crushed Brick as a Supplementary Material in Cement Stabilized Recycled Concrete Aggregates*, *Construction and Building Materials*, 2014, 68: 667–676.
- [10]. Gabr, A.R., Cameron, D.A., *Properties of Recycled Concrete Aggregate for Unbound Pavement Construction*, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, 24 (6): 754-764.
- [11]. Blankengel, B. J. *Characterization of Recycled Concrete for Use as Pavement Base Material*, Yüksek Lisans, Brigham Young University, Department of Civil and Environmental Engineering, (2005).
- [12]. Arulrajah, A., Piratheepan, J., Disfani, M.M., *Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate Blends in Pavement Subbases: Laboratory and Field Evaluation*, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26 (2): 349-357.
- [13]. Kazmee, H., Tutumluer, E., “*Evaluation of Aggregate Subgrade Materials Used as Pavement Subgrade/Granular Subbase*” Research Report FHWA-ICT-15-013, Illinois Center for Transportation, U.S.A., (2015).
- [14]. Ayan, V., Limbachiya, M.C., Omer, J.R., Azadani, S.M.N., *Compaction Assessment of Recycled Aggregates for Use in Unbound Subbase Application*, *Journal of Civil Engineering and Management* 2014, 20 (2): 169-174.
- [15]. Herrador, R., Pérez, P., Garach, L., Ordóñez, J., *Use of Recycled Construction and Demolition Waste Aggregate for Road Course Surfacing*, *Journal of Transportation Engineering*, 2012, 138 (2): 182-190.
- [16]. Winkler, E., *Die Lehre von der Und Festigkeit*, Kessinger Publishing, Prague, Czech Republic, (1867).
- [17]. Filonenko-Borodich, M.M., *Some Approximate Theories of Elastic Foundation*, *Uchenyie Zapiski Moskovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Mehanika*, 1940, 46: 3-18.

- [18]. Hetenyi, M., A General Solution for the Bending of Beams on an Elastic Foundation of Arbitrary Continuity, *Journal of Applied Physics*, 1950, 21 (1): 55-58.
- [19]. Pasternak, P. L., On a New Method of Analysis of an Elastic Foundation by Means of Two Constants, *Gosudarstvennoe Izdatelstvo Literaturi po Stroitelstvu I Arkhitekture*, Moscow, Russia (1954).
- [20]. Vlasov, V.Z., Leontiev, N.N., *Beams Plates, and Shells on Elastic Foundations*, Israel Programme for Scientific Translations, Jerusalem, Israel, (1966).
- [21]. Reissner, E., A Note on Deflection of Plates on a Viscoelastic Foundation, *Journal Applied Mechanics*, 1958, 25: 144-155.
- [22]. Kerr, A., Elastic and Viscoelastic Foundation Models, *Journal of Applied Mechanics*, 1964, 31(3): 491-498.
- [23]. Kerr, A.D., Coffin, D.W., Beams on a Two-Dimensional Pasternak Base Subjected to Loads That Cause Lift-Off, *International Journal of Solids and Structures*, 1991, 28 (4): 413-422.
- [24]. Belén, G.F., Fernando, M.A., Diego C.L, Sindy, S.P., Stress-strain Relationship in Axial Compression for Concrete Using Recycled Saturated Coarse Aggregate, *Construction and Building Materials*, 2011, 25(5): 2335-2342.
- [25]. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-18), *Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar*, Ankara, Türkiye, (2018).
- [26]. Abu El-Maaty Behiry, A.E., Characterization of the Layered Pavement by Modelling and Calibration of Resilient Modulus, *American Journal of Civil Engineering*, 2014, 2 (3): 74-86.
- [27]. George, K.P., Prediction of Resilient Modulus from Soil Index Properties, *Research Report FHWA/MS-DOT-RD-04-172*, The Mississippi Department of Transportation, U.S.A., (2004)
- [28]. American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO-93), *Guide for Design of Pavement Structures*, Washington D.C., U.S.A., (1993).
- [29]. Tufan M.Z., Özel C., Sürdürülebilirlik Kavramı Ve Yapı Malzemeleri İçin Sürdürülebilirlik Kriterleri, *International Journal of Sustainable Engineering and Technology*, 2018, 2(1), 9-13.
- [30]. Kılınçarslan Ş., Şimşek Y., Uygun E., Akoğlu M., Cesur B., Tufan M.Z., Turan U., Sürdürülebilir Yapı Malzemeleri Açısından Bina Sertifikasyon Sistemlerinin İncelenmesi, *International Journal of Sustainable Engineering and Technology*, 2019, 3(1), 1-14.
- [31]. Sarıbaş, İ. Geri Dönüşümlü Agregalı Beton İçin Gerilme-Şekil Değiştirme Modeli, *El-Cezeri*, 2019, 6, 156-165.
- [32]. Özgür, M., Bozdoğan, K. B. Betonarme Binalarda Zemin-Yapı Etkileşiminin Sismik Tasarım Parametrelerine Etkileri, *El-Cezeri*, 2022, 9, 507-521.