



KARAYOLU PROJELERİNDE İNŞA EDİLEN ÇELİK ŞERİT DONATILI ZEMİNLERİN İNCELENMESİ

Burak EVİRGEN^{1,*}, İbrahim KELEK², Şule ACARCA¹, Ahmet TUNCAN¹

¹ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye

² Karayolları Genel Müdürlüğü, 14. Bölge Müdürlüğü, Bursa, Türkiye

ÖZ

Farklı kotlarda inşa edilen yapıların etkileşimde olduğu zeminlerde stabilitenin sağlanabilmesi amacı ile yanal toprak basıncına karşı çeşitli istinat yapıları kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak karayolları bünyesindeki projelerde tercih edilen donatılı zemin uygulamaları ise son zamanlarda ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'nin altı bölgesinde inşa edilen 82 farklı çelik donatılı zemin projesi incelenmiştir. Projelere ait verilere göre doğal zemin ve dolgu zeminlere ait içsel parametreler ile duvar yüksekliği ve sürşarj yükü gibi dış etkenlerin sınır değerleri belirlenmiştir. Söz konusu sınır değerler kapsamında gerçekleştirilen teorik hesaplamalar doğrultusunda bir genelleme yapılarak donatı boyu ile donatı kalınlığı gibi tasarım parametrelerinin değişimi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre şerit donatı boyu 2,02 m ile 23,62 m arasında değişirken, kalınlık değeri 0,65 mm ile 10,49 mm arasında değişmektedir. Donatı boyu açısından ilk 5,00 m'lik duvar yüksekliği önem arz etmektedir. Diğer değişkenler sabit tutulduğu takdirde yatay donatı aralığının şerit kalınlığı üzerindeki etkisi hem sürşarj yükü hem de tasarım ömründen daha kritiktir.

Anahtar Kelimeler: Donatılı zemin, Şerit uzunluğu, Şerit kalınlığı, İstinat yapıları, Karayolu

INVESTIGATION OF THE STEEL STRIP REINFORCED SOILS CONSTRUCTED WITHIN HIGHWAY PROJECTS

ABSTRACT

Miscellaneous retaining structures have been used against lateral earth pressure in order to ensure the stability of soils which are interacted with structures constructed at different elevations. In addition, the reinforced soil applications are preferred within highways projects have come into prominence recently. In this study, 82 different steel strip reinforced soil projects built in six regions of Turkey were evaluated. The internal parameters of the natural soil and the backfill materials with the limit values of external factors such as wall height and surcharge load were determined according to the data of the projects. A generalization was made in accordance with the theoretical calculations and the change of design parameters such as reinforcement length and reinforcement thickness were investigated due to these limit values. According to the results, the length of the strip reinforcement varies between 2.02 m and 23.62 m, while the thickness value changes from 0.65 mm to 10.49 mm. The first 5.00 m of wall have importance in terms of reinforcement length. If other variables are kept constant, the effect of the horizontal reinforcement spacing on the strip thickness is more critical than both the surcharge load and design life.

Keywords: Reinforced slope, Strip length, Strip thickness, Retaining structures, Highway

1. GİRİŞ

Derin temel kazıları içeren mühendislik uygulamaları ile karayolu veya demiryolu güzergahlarının inşası sürecinde çoğu zaman zorunluluk arz eden yarma ve dolgu işleri, doğal zeminin farklı açılarla kazılmasını gerektirmektedir. Kayma mukavemeti yüksek olan zeminlerde uygun şev açısı seçildiği takdirde harici bir işlem gerektirmeden güvenli tasarımlar yapılabilir. Ancak sadece şev açısının değiştirilmesi ile güvenli tasarıma imkan vermeyen veya düşeye yakın uygulama gerektiren durumlarda, hem inşa süreci hem de inşa edilen yapının kullanım ömrü boyunca uygun tasarımların yapılabilmesi amacıyla istinat yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. İstinat duvarları, ankrajlı duvarlar, yanal kazıklar ve palplanş duvarlar kalıcı yapılar olarak adlandırılırken, genellikle su uzaklaştırma yöntemlerine de

*Sorumlu Yazar: burakevirgen@eskisehir.edu.tr; 2223213550/7121

Geliş: 10.05.2019 Kabul: 29.07.2019

ihtiyaç duyan destekli iksa kazıları geçici uygulamalar biçiminde karşımıza çıkmaktadır. Şev stabilitesinin sağlanmasını gerektiren yol kenarlarında ise ağırlıklı, konsol veya payandalı istinat duvarları kullanılmaktadır [1]. Her ne kadar TS EN 7994'e [2] göre betonun basınç, donatının da çekme kuvvetlerine karşı çalıştığı 20,00 m'ye varan yüksekliklerde narin konsol istinat duvarları yapılabileceği belirtilse de, yüklerin ve yüksekliğin artması durumunda güvenli ve ekonomik tasarım göz önünde bulundurulduğunda betonarme istinat duvarı yüksekliği 7,50 m'yi aşmamaktadır. Daha yüksek şevlerde kademeli istinat duvarı uygulanabileceği gibi donatılı zemin içeren çözümler de seçilebilmektedir. Aksi halde gerçekleşmesi muhtemel olan şev stabilite problemleri maddi açıdan ciddi zararlara sebebiyet verdiği gibi çoğu zaman ölümcül sonuçlar doğurmakta ve can kayıplarına neden olabilmektedir. Son dönemlerde ülke genelinde meydana gelen istinat duvarı göçmeleri, şev stabilite problemlerinin doğal afetlerin yanı sıra işçilik ve malzeme kusurları ile mühendislik hatalarından da kaynaklandığını ortaya koymaktadır [3].

Zemin ile geotekstil, geogrid ve geonet gibi geosentetiklerin kombinasyonu sonucunda teşkil edilen donatılı zeminler; hızlı inşaa süreci, depreme karşı dayanım, oldukça yüksek çekme mukavemeti, ekonomik fizibilite ve estetik görünümleri dolayısıyla tercih edilmektedir [4]. Rijit istinat duvarlarına kıyasla esnek olması dolayısıyla farklı oturma davranışı beklenen yerlerde ön plana çıkmaktadır. Bu özelliklerine ek olarak yüksek hacimde dolgu gerektiren karayolu projeleri, bu projelerde yer alan alt geçit, üst geçit, menfez gibi sanat yapıları ile yaklaşım yollarındaki mekanik stabilizasyon aşamaları donatılı zemin açısından son derece uygundur. Tabakalar halinde dolgu malzemesinin serimi sırasında donatı yerleştirilmesi ve bu donatıların şev yüzeyindeki kaplama elemanlarına sabitlenmesi biçiminde inşaa edilen donatılı zemin duvarlar son yıllarda Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından sıklıkla tercih edilmektedir.

İlk donatılı zemin istinat duvarı uygulaması Amerika Birleşik Devletleri'nde 1972 yılında, Güney Kaliforniya'da inşaa edilmiştir [1]. Donatılı zemin dayanma yapılarının sistematik analiz ve tasarım kavramını ortaya koyan kişi ise Vidal isimli Fransız bir mühendis olmuştur [5]. Vidal'ın çalışmalarına müteakiben Fransa'da birkaç donatılı zemin istinat duvarı inşaa edilmiştir. Sonrasında Schlosser ve Long [6] ölçekli model testlerinin sonuçlarına dayanarak, radye temeller altındaki donatılı zeminlerde oluşan gerilmelerin dağıtılması için deneysel bir denklem önermiştir. Akinmusuru ve Akinbolande [7] ise donatılı zeminle desteklenen kare temellerin taşıma kapasitesini içeren test sonuçlarını sunmuşlardır. Söz konusu çalışmalardan görüleceği üzere donatılı zeminler sadece şev stabilitesinin sağlanması için değil aynı zamanda temel altı uygulamalarda ön plana çıkmaktadır.

Literatürdeki teorik ve analitik modellemelerin yapıldığı donatılı zemin içeren istinat yapılarına dair çalışmalar farklı değişkenlerin tasarımları ne seviyede değiştirdiğini açıkça ortaya koymaktadır. Allen vd. [8] tarafından çelik donatılı zemin duvarlarla genişletilen 20 adet donatılı duvar kesiti üzerinde duvar rijitliği, zemin mukavemeti, donatı aralığı ve duvar yüksekliği değişkenlerinin donatı çekme yüküne etkileri K-rijitlik metoduna göre incelenmiştir. Düşey donatı aralığının 0,30 m ile 0,75 m arasında değiştiği çalışma sonuçlarına göre zemin mukavemetinin çekme yüklerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğu belirtilirken, duvar rijitliği ve yüksekliğinin donatı yükleri üzerinde ciddi bir etkisi olduğu vurgulanmıştır. Güler vd. [9] farklı donatı aralığı, donatı uzunluğu ve dolgu zemin kombinasyonlarından oluşan donatılı zemin yapılarının göçme davranışlarını Φ -c azaltma metoduna göre sonlu eleman modeli ile analiz etmişlerdir. Değerlendirilen tüm modellerde duvar yüksekliği 9,00 m, temel derinliği 5,00 m ve dolgu zemin tabakasının genişliği 25,00 m olarak seçilmiştir. Düşey donatı aralığı 0,50 m veya 1,00 m alınırken, donatı uzunluğu 4,50 m, 6,00 m, 9,00 m ve 13,00 m mertebelerinde seçilmiştir. Düşük donatı aralığında sistemin bütünüyle göçmeye yaklaştığı ancak donatılı tabakanın zarar görmediği belirtilirken, donatıların düşeyde 1,00 m aralıklarla yerleştirilmesi durumunda ise büyük yer değiştirme değerlerine ulaşıldığı gözlenmiştir. Yazdandoust [10] 1,80 m³ hacme sahip hücre içerisine yerleştirilen şerit donatılarla güçlendirilmiş zemin numunelerine 1 g mertebesinde ivme uygulayarak sarsma tablasında bir dizi test gerçekleştirmiştir. Donatı uzunluğu ve girdi parametrelerinin donatılı zemin istinat duvarının sismik davranışı, göçme mekanizması ve performans seviyelerine etkilerinin incelendiği çalışmada; kritik uzunluk / yükseklik oranı için 0,70 değeri elde edilmiştir.

Miyata ve Bathurst [11] Japon tasarım yönteminde öngörülen çelik şerit donatı yüklerini incelemek amacıyla 18 adet deneysel duvar ile 9 adet vaka çalışmasından elde edilen verileri karşılaştırmışlardır. Bu amaçla 35°'den düşük içsel sürtünme açısına sahip ve %25,00 oranından daha fazla ince malzeme içeren dolgu zeminli duvarlar inşa etmişlerdir. 60,00 mm genişlikte ve 5,00 mm kalınlıkta nervürlü çelik şeritlerle gerçekleştirilen çalışmalarda 0,75 m düşey ve yatay aralıklarla yerleştirilen şeritleri sabitlemek için 180,00 mm kalınlığında betonarme paneller kullanılmıştır. Sonuçta tabakalar arası çelik şeritlerde meydana gelen çekme yüklerini hesaplamak için toprak basıncı katsayısı önerilen tasarım çizelgesi sunulmuştur. Yu vd. [12] tarafından sonlu farklar yöntemi kullanılarak elde edilen donatı çekme yüklerinin değerlendirildiği çalışmada ise 100,00 mm genişliğinde, 2,30 mm kalınlığında ve 4,00, 4,50 ve 5,00 m uzunluğundaki çelik şeritlerle güçlendirilmiş test duvarı kullanılmıştır. Diğer değişkenler sabit tutulduğunda dolgu zemini elastisite modülünün artması ile hem çelik şerit çekme yükü hem de şev topuğunda meydana gelen düşey kaplama yükünün azaldığı belirtilmiştir. Diğer taraftan ara yüz rijitliğinin artması durumunda ise kaplama ile şerit birleşim yüklerinin arttığı vurgulanmıştır.

Kum ağırlıklı zeminde geotekstil, geogrid ve çelik şeritlerin donatı olarak kullanılması durumunda yük yer değiştirme ilişkileri ile yüzey kaplamasında meydana gelen içsel kuvvetlerin değişiminin incelendiği ölçekli modelleme çalışmasında çelik şeritlerin daha yüksek performans sergilediği görülmektedir [13]. Hatami ve Bathurst [14] standart uygulamalara alternatif sunması açısından polipropilen, polyester ve kaynaklı tel örgü gibi donatılarla teşkil edilmiş istinat duvarlarının yapı ve sürşarj yükleri altındaki tepkisini incelemiştir. Farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerin donatı pazarında geniş bir değer aralığı sunması sonucunda çok bileşenli modüler blok duvarların farklı çözümler sunabileceğini belirtmişlerdir. Bathurst vd. [15] tarafından geniş bir veri tabanı kullanılarak AASHTO'da önerilen basitleştirilmiş yöntemin doğruluğu değerlendirilmiştir. Hasır çelik, tel örgü ve çelik şeritlerin kullanıldığı çalışmada incelenen duvar yükseklikleri 4,00 m ile 18,00 m arasında değişirken, düşey donatı aralıkları ise 0,30 m ile 0,75 m aralığındadır. Şerit donatılı duvarlarda granüler dolgu zeminin sürtünme açısının 45°'den küçük olduğu durumlarda AASHTO basitleştirilmiş yönteminin makul derecede doğru olduğunu göstermektedir. Ayrıca sıkıştırma faktöründen kaynaklanan yüksek sürtünme açısı (>45°) içeren dolgularda ise sığ derinliklerdeki donatı yüklerinin, duvar tepesinde gözlenen yüklere yakın olduğu bildirilmiştir.

Stuedlein vd. [16] tarafından inklinometre ve piyezometre ölçümleri sayesinde gerçek zamanlı veriler toplanarak 46,00 m yüksekliğindeki çelik şeritlerle güçlendirilmiş mekanik stabilize duvarın performans seviyeleri incelenmiştir. Aşırı derecede yüksek olmasına rağmen uygun tasarım ve uygulama gerçekleştirildiği takdirde donatılı duvarların öngörülen performans seviyelerine ulaşabildiği belirtilmiştir. Totiç ve Yılmaz [17] köprü yaklaşım rampası inşası için 3,70 m yükseklik ve 12,0 m genişliğe sahip şerit donatılı zemin duvar tasarımını İcad yazılımını kullanarak modellemiştir. Şerit donatılı zemin dayanma yapısından kaynaklanan taban basıncının, sismik koşullar hesaba katıldığında oluşan maksimum zemin emniyetli taşıma gücü değerinden daha düşük olduğunu göstermişlerdir. Söz konusu dayanma yapısının stabilitesinin sağlanabilmesi için düşey ve yatay donatı aralıkları 0,50 m ve çelik şerit uzunluğu 4,60 m olarak hesaplanmıştır. Zevgolis [18] donatılı zemin duvarının üzerine düzgün yayılı etkileyen trafik yükünün duvarın dış yüzeyinin deplasman miktarlarına etkisini incelemiştir. 3,00 m, 6,00 m ve 12,00 m yüksekliğindeki duvarların sonlu elemanlar analizi sırasında yatay ve düşey donatı aralıkları 0,75 m ve trafik yükü ise 20,00 kPa alınmıştır. Sonuçta; duvar yüksekliğinden bağımsız olarak istinat yapısının dışına yerleştirilen trafik yükünün düşey deplasmanlarda ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğu ve duvar arka ucundan 2,00 m uzaklıktan itibaren de yatay deplasmana pratikte bir etkisi olmadığı vurgulanmıştır.

Diğer taraftan, “toprakarme” terimi ile de adlandırılan donatılı zeminler açısından önem arz eden tasarım kriterleri; donatının mekanik ve geometrik özellikleri, doğal zemin parametreleri, dolgu malzemesinin dane boyut dağılımı ile donatıların sabitleneceği kaplama elemanlarının niteliği başlıklarında toplanmaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Şartnamesi'ne [19] göre 0,075 mm'den küçük boyuta sahip dane içeriği %15,00'ten az olan iyi derecelenmiş dolgu malzemesinin düzgünlük katsayısı

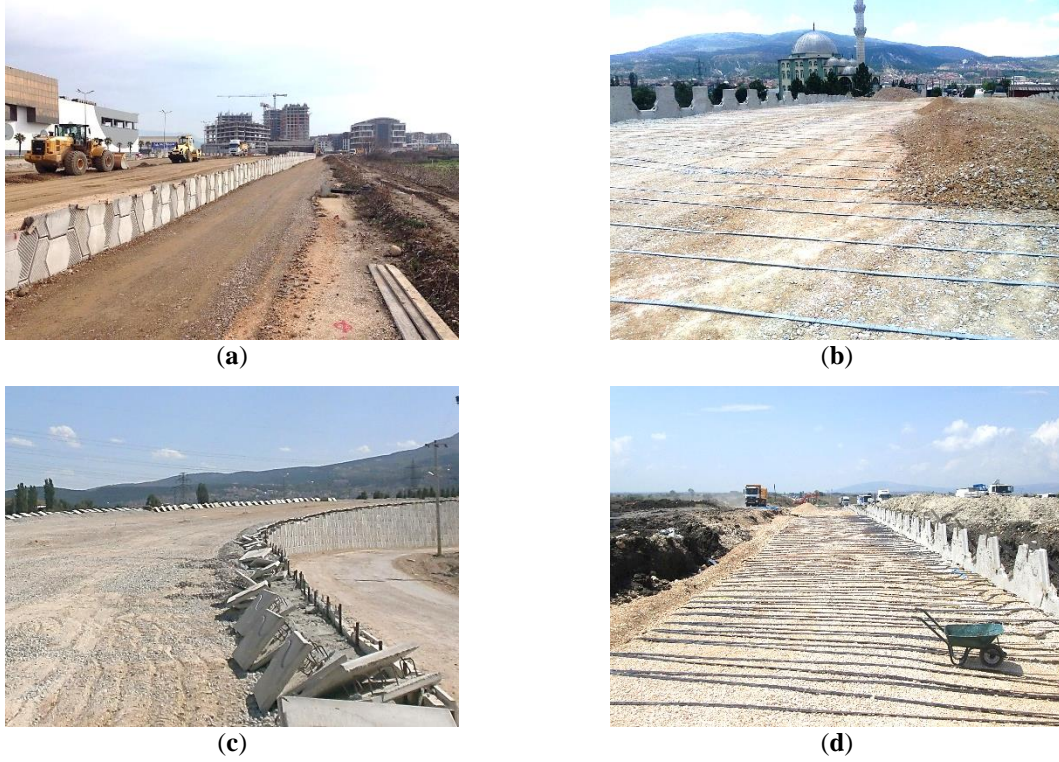
5,00'ten büyük ve plastisite indeks %6,00'dan küçük olmalıdır. TS EN 7994'e [2] göre ise granüler dolgunun içindeki ince malzeme oranı %10,00'u geçmemelidir. Dolgu malzemesinin kil oranı %10,00'u geçmeyen kohezyonlu zemin içermesi durumunda da likit limit %45,00'ten az ve plastisite indeks %20,00'den az olmalıdır. Her iki dolgu tipi için maksimum dane çapı 125,00 mm ve kayma direnci açısı 30° olarak öngörülmektedir. Ancak yüksek dayanımlı donatılarda maksimum dane çapı 250,00 mm'ye yükseltilebilir [2]. Donatı elemanı olarak sıcak daldırma galvaniz kaplı çelik, paslanmaz çelik, alüminyum, düz yüzeyli alüminyum alaşımları veya yüzeyindeki enine çıkıntılarla sürtünmesi arttırılan şeritler kullanılır. Bu donatı elemanları tipik olarak 50,00 mm-100,00 mm genişlikte ve 4,00 mm-10,00 mm kalınlıkta olabilir. Metal eleman kullanılması durumunda 1,00 mm-1,50 mm pas payı bırakılmalıdır [2]. Donatı elemanı olarak kullanılan çelik şeritler minimum 530,00 g/m² sıcak-daldırma galvanizle kaplı olmalıdır ve minimum 510,00 MPa çekme mukavemetine sahip, orta veya yüksek karbon çeliği özelliğinde çelik şeritler kullanılmalıdır [19]. Donatıların sabitlendiği yüzey panelleri ise duvar arkasındaki zemini tutmak, donatı elemanlarına bağlantı noktaları ve estetik görünümüne sahip ön cephe sağlamak, yapıda meydana gelecek deformasyonları karşılamak gibi işlevlere sahiptir. Bu detaylara ek olarak Sun ve Graves [20] tarafından donatılı zemin duvarların yapısal anlamda uzun dönem stabilite durumlarının mukavemet limiti, servis limiti ve LRFD (yük ve dayanım katsayıları ile tasarım) yöntemine göre genel kararlılık kontrollerinin yapılması gerektiğini vurgulanmıştır.

Çalışma kapsamında Türkiye genelinde farklı bölgelerde inşa edilen donatılı zemin duvarların sınır koşulları dikkate alınarak bir genelleme yapılması amaçlanmıştır. Donatılı duvar yüksekliği, sürşarj yükü, yatay donatı aralığı ve servis ömrü değişimine bağlı olarak şerit donatı uzunluğu ve kalınlığının değişimi sunulmuştur. Bölgesel ölçekte incelenen proje sayısı atılarak sonraki çalışmalarda Amerikan Karayolları Birliği (AASHTO) bünyesinde eyaletler bazında yapılan genellemeler benzeri tablolar oluşturulması sağlanabilir. Bu sayede proje yapılması planlanan bölgelerdeki sınır koşullar dahilinde göz önünde bulundurulmuş değişkenlere göre daha tutarlı fizibilite çalışmalarının yapılmasına imkan sağlanmış olacaktır.

2. YÖNTEM

Çalışma kapsamında Türkiye genelinde çeşitli zemin ve iklim koşullarını yansıtan İç Anadolu, Marmara ve Karadeniz bölgeleri ağırlıklı olmak üzere 6 farklı bölgeden toplam 82 donatılı zemin projesi incelenmiştir. Bu projelerden Osmangazi, Kütahya, Afyon ve Karacabey'de bulunan bazı donatılı zemin uygulamaları Şekil 1'de verilmiştir.

Projelerde yer alan granüler dolgu zemin, dolgu arkası doğal zemin ve temel altı zeminin içsel parametrelerinin sınır değerleri listelenmiş ve geniş bir yelpazede veri teşkil etmesi açısından teorik hesaplamalarda bu sınır değerlerin ortalamaları kullanılmıştır (Tablo 1). Söz konusu çalışmada sunulan veriler her ne kadar ülke genelinde karayolları kenarında inşa edilen donatılı zeminler için bir genelleme niteliğinde olsa da bölgesel ölçekteki mevsimsel etkiler ve yağış rejimleri gibi karakteristik özellikler ile deprem ve rüzgar etkileri gibi yerel yüklem koşullarının göz ardı edilmemesi gerektiği unutulmamalıdır. Örneğin, aşırı derecede yağış alan Karadeniz Bölgesinde su seviyesinin hızlı değişimine bağlı efektif gerilme düşüşü, yüzey kaplamalarında yetersiz sayıda barbakan bulunması veya yanlış su giderme yöntemi seçimi ile aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu sonucunda istinat yapıları göçmektedir. Akdeniz Bölgesinde yüksek sıcaklıklarda daha çok kohezyonlu zeminlerde gözlenen çekme çatlağı ve büzülme davranışı göz önünde bulundurulması gerekirken, Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerinde donma - çözülme etkileri ön plana çıkmaktadır. Diğer taraftan özellikle Marmara Bölgesindeki yapı envanterinde bulunan depreme karşı dayanıksız binaların kentsel dönüşüm kapsamında yenilenmesi süreci devam etmektedir. Bu kapsamda yoğun nüfus için gereken çok katlı yapı ihtiyacına bağlı olarak derin temel çukurlarının açılması hem çevre yapıları hem de yol veya boru hatları gibi ulaşım ve altyapı unsurlarını tehdit etmektedir. Doğal olarak istinat duvarları, donatılı zeminler ve tüneller gibi geoteknik uygulamaları da proje bazında ayrı bir değerlendirmeye tabii tutulmak durumundadır.

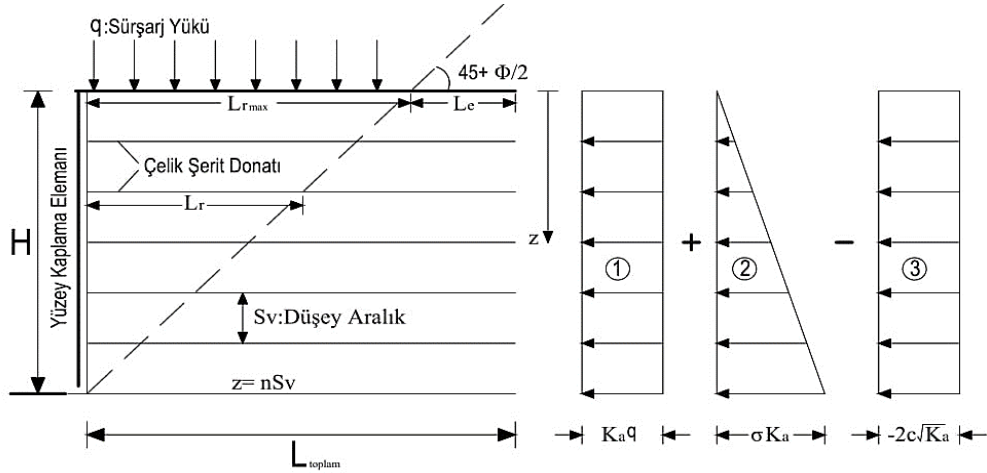


Şekil 1. Karayolları bünyesinde inşa edilen bazı donatılı zemin uygulamaları: (a) Pınar Köprülü Kavşağı - Bursa - Osmangazi; (b) Kütahya - Tavşanlı Yolu; (c) Kütahya - Afyon Yolu; (d) Gökıyı Köprülü Kavşağı - Karacabey.

Tablo 1. Projelerden elde edilen sınır değerler

	Değişken Parametreler			
	Birim	Sembol	Değer Aralığı	Kullanılacak Değerler
Sürşarj Yükü	kN/m^2	q_s	0,00 - 20,00	0 - 5,0 - 10,0 - 15,0 - 20,0
Yatay Donatı Aralığı	m	S_h	0,25 - 1,00	0,25 - 0,50 - 0,75 - 1,00
Yükseklik	m	H	1,00 - 19,00	1,00 m artış
Sabit Parametreler				
Granüler Dolgu				
Kohezyon	kN/m^2	c	0 - 5	3,0
İçsel Sürtünme Açısı	$^\circ$	Φ	30 - 40	35,0
Birim Hacim Ağırlık	kN/m^3	γ	18 - 22	20,0
Dolgu Arkası Doğal Zemin				
Kohezyon	kN/m^2	c	0 - 5	3,0
İçsel Sürtünme Açısı	$^\circ$	Φ	20 - 40	30,0
Birim Hacim Ağırlık	kN/m^3	γ	19 - 23	21,0
Temel Altı Zemin				
Kohezyon	kN/m^2	c	0 - 10	5,0
İçsel Sürtünme Açısı	$^\circ$	Φ	20 - 40	30,0
Birim Hacim Ağırlık	kN/m^3	γ	17 - 24	20,5

Donatılı zemin istinat duvarının tasarım aşamasında genellikle Rankine metodu, Coulomb kuvvet metodu veya Coulomb moment metodu kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında ise Rankine metodu tercih edilmiş olup, Şekil 2’de detayları verilen sürşarj yükü, örtü yükü ve çekme çatlağını içeren basınç dağılım prensibine göre yanıl toprak basıncı hesaplamaları yapılmıştır.



Şekil 2. Donatılı zemin istinat duvarının genel analiz şeması

Donatılı zemin istinat duvarı tasarımı sürecinde incelenen proje limitleri içerisinde kalınarak şev yüksekliği 1,00 m’den 19,00 m’ye kadar 1,00’er m arttırılarak hesaplamalara dahil edilmiştir. 0,25, 0,50, 0,75 ve 1,00 m olmak üzere 4 farklı yatay donatı aralığı seçilmesinin yanı sıra duvar 0,00 ile 20 kN/m² arasında değişen 5 farklı sürşarj yüküne maruz bırakılmıştır. Bu değişken değerlerin yanı sıra düşey donatı aralığı değeri 0,75 m, donatı şerit genişliği (w) 50,00 mm, korozyon oranı 0,012 mm/yıl ve donatı akma dayanımı ise 510,00 MPa alınarak sabit donatı parametreleri belirlenmiştir. Diğer taraftan duvarın servis ömrü değişkeninin sadece donatı kalınlığının belirlenmesinde doğrusal etkisi olduğu göz önünde bulundurularak, projelerde de sabit kabul edilen 75 yıllık sürecin yanı sıra 50 ve 100 yıl için de hesap yapılmıştır. Hesap aşamasında hem donatı kopmasına karşı güvenlik sayısı hem de donatı sıyrılmasına karşı güvenlik sayısı değerleri 3,0 kabul edilmiştir. Örtü zemini ve sürşarj yükünden dolayı duvar yüzeyinde oluşan gerilme (σ_a) ile Rankine aktif toprak basınç katsayısının hesabını gösteren eşitlikler sırasıyla denklem 1 ve 2’de verilmiştir.

$$\sigma_a = qK_a + \gamma HK_a - 2c\sqrt{K_a} \quad (1)$$

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\Phi}{2} \right) \quad (2)$$

Burada; q sürşarj yükü, γ doğal zemine ait birim hacim ağırlık değeri, Φ doğal zemine ait içsel sürtünme açısı değeri ve c ise doğal zemine ait drenajsız kohezyon değeridir.

Donatılı zemin istinat duvarlarında kullanılan donatıların projelendirilmesi sürecinde ön plana çıkan kriterler; donatılarda meydana gelen çekme kuvveti ve donatı uzunluğudur. Yarma - dolgu işleri, donatıların yerleştirilmesi, mekanik stabilizasyon, işçilik ve süre bakımından seçilebilecek en kısa donatı uzunluğu ile çelik dayanımı aşmayacak seviyede güvenli yük mertebelerinde bir tasarım, uygulamada tercih sebebi olacaktır. Bu yüzden, önceki bölümlerde açıklanan sabit ve değişken parametrelerin maksimum çekme kuvveti ile donatı uzunluğu ve donatı kalınlığına etkilerini incelemek amacı ile aşağıda verilen denklemler kullanılmıştır.

$$T_{mak} = (qK_a + \gamma HK_a - 2c\sqrt{K_a})S_v S_h \quad (3)$$

$$t = \frac{GS_K T_{mak}}{w f_y} \quad (4)$$

$$t_{gerçek} = t_{tasarım} + r. servis \text{ ömrü} \quad (5)$$

$$L_{toplam} = L_r + L_e \quad (6)$$

$$L_r = \frac{H}{\tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)} \quad (7)$$

$$L_e = \frac{T_{mak}GS_S}{2w(\gamma H + q) \tan\left(\frac{2\phi}{3}\right)} \quad (8)$$

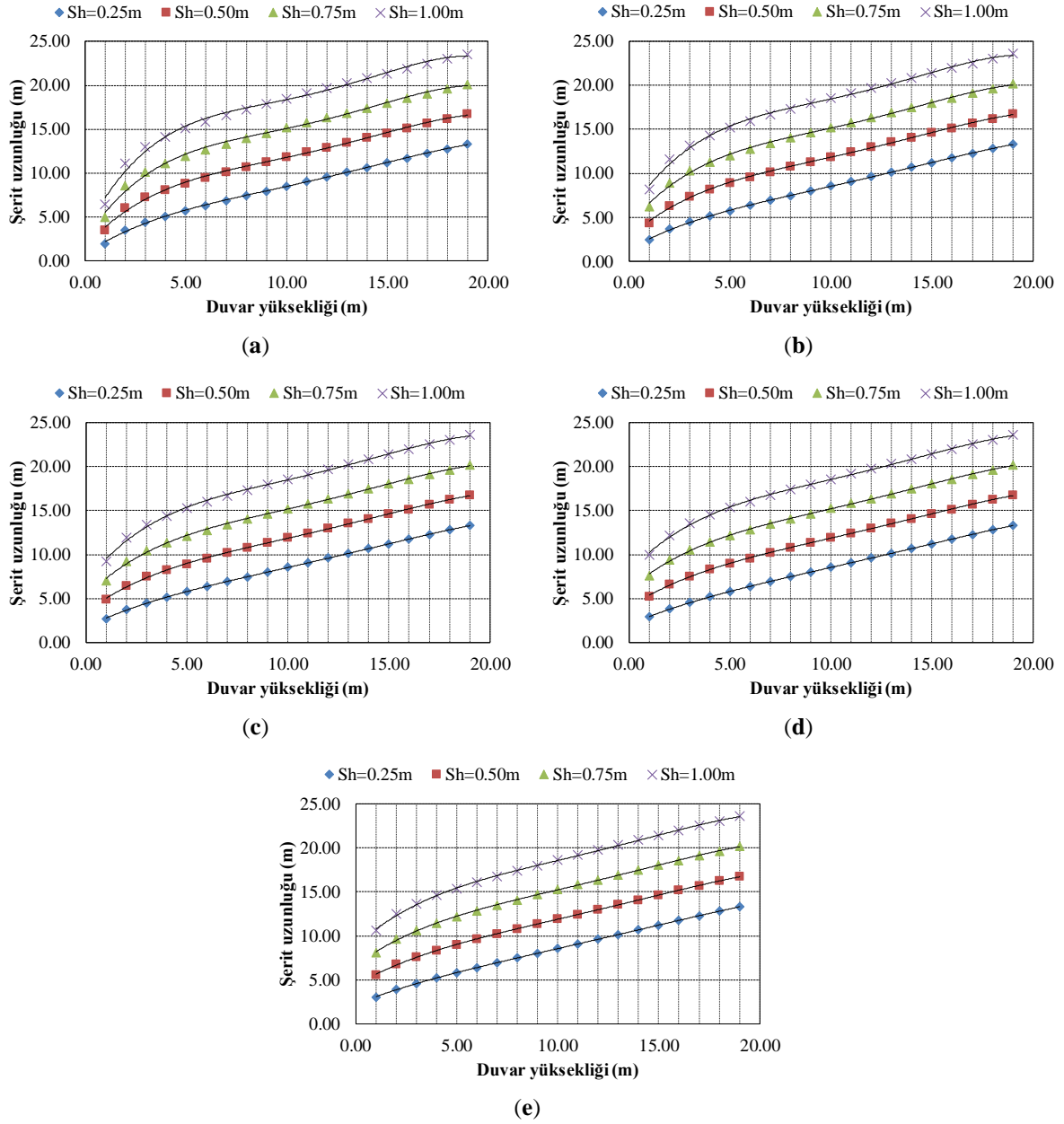
Burada; T_{mak} çelik şeritte oluşan maksimum çekme kuvveti, t çelik şerit kalınlığı, GS_K donatı kopmasına karşı güvenlik sayısı, w çelik şerit genişliği, f_y MPa cinsinden uygulamada kullanılacak olan çelik şeride ait akma dayanımı, S_v düşey donatı aralığı, S_h yatay donatı aralığı, L_r duvar arkasındaki aktif bölgede yer alan donatı uzunluğu, L_e efektif uzunluk, GS_S donatı sıyrılmasına karşı güvenlik sayısı, q sürşarj yükü ve r ise korozyon oranıdır.

3. BULGULAR

Çelik şerit donatılı zemin uygulamalarında maliyet, işçilik ve inşaa süresini etkileyen en önemli faktör donatı boyudur. İstinat yapısının tasarım ömrü ve malzemenin yıllık korozyon kaybı değişkenlerine bağlı olarak hesaplanan donatı kalınlığı ise uzun vadeli tasarımlarda ön plana çıkmaktadır. Diğer taraftan çekme gerilmelerine karşı çalışan donatı boyunun arttırılmasının esas işlevi; donatılarda meydana gelebilecek sıyrılma kaynaklı göçmelerin engelleyerek yüzey kaplaması ile birlikte istinat yapısının genel stabilitesinin sağlamasıdır. Uygun donatı kalınlığı ise maksimum çekme kuvvetine maruz kalan donatıların kopmaya karşı yeterli çekme alanını sağlaması için yeter ve gerek şarttır. Bu bölümde gerçek projelerde yer alan içsel parametre sınır şartlarına göre teorik hesabı gerçekleştirilen çelik donatılı zeminlerde duvar yüksekliği, sürşarj yükü, yatay donatı aralığı ve servis ömrü değişimine göre elde edilen şerit donatı boyu ve kalınlığı sunulmuştur.

3.1. Şerit Donatı Boyu

Duvar yüksekliğinin artması ile sürşarj yükü ve örtü zemininden kaynaklanan yanal toprak basıncı arttığından dolayı, diğer kriterler sabit tutulduğunda doğal olarak bu basıncı karşılamak için gereken donatı boyu ciddi oranda artmaktadır. Şekil 3'teki noktasal dağılıma göre eğilim çizgileri çizilen donatı şerit uzunluğu değişimi incelendiği takdirde, hem yüksüz hem de sürşarj yükü etkimesi durumunda 5,00 m duvar yüksekliğine kadar aşırı artış eğiliminde olan şerit donatı boyu, bu yükseklik değerinden sonra sabit bir eğimle artmaktadır. Hesaplamalar sonucu elde edilen şerit donatı boyu 2,02 m ile 23,62 m arasında değişmektedir. Grafiklerdeki birkaç metrelik değişimler görsel açıdan fazla seçilmiyor olmasına rağmen, metre bazında birim duvar yüksekliğine bağlı ortalama şerit uzunluğu artışı 1,00 m ve 5,00 m arasındaki duvar yüksekliklerinde 3,43 m/m seviyesindedir. 6,00 m ve 19,00 m arasında değişen duvar yüksekliğinde ise sabit bir artış göstererek 1,27 m/m mertebesine gerilemiştir (Tablo 2). Dolayısıyla, çalışma kapsamındaki sınır koşullar dahilinde çelik şerit donatılı zeminlerde 5,00 m duvar yüksekliğinin aşılması durumunda, metre cinsinden birim duvar yüksekliği başına düşen şerit boyunun 2,70 kat azaldığı ve bu yüksekliğin altındaki değerlerin güvenlik açısından daha kritik olduğu söylenebilir. Benzer şekilde sürşarj yükünün artması ile 6,00 m ve 19,00 m arasındaki duvar yüksekliklerinde sabit şerit boyu artışı gözlenmiştir. Ancak daha kısa duvar yükseklikleri için sürşarj yükü artışı sonucunda birim metre başına düşen donatı boyu azalarak artan bir eğilim dahilinde 3,07 ile 3,71 m/m arasında değişmektedir. Yatay donatı aralığının artması ile şerit boyunda artış gözlenmekle birlikte sürşarj yükünden bağımsız olarak her 0,25 m yatay aralık artış için donatı uzunluğu değeri sırasıyla ortalama %38,1, %27,6 ve %21,6'lık artış göstermektedir. Diğer taraftan servis ömrünün donatı boyu hesabında herhangi bir etkisi olmadığı için göz önüne alınmamıştır.



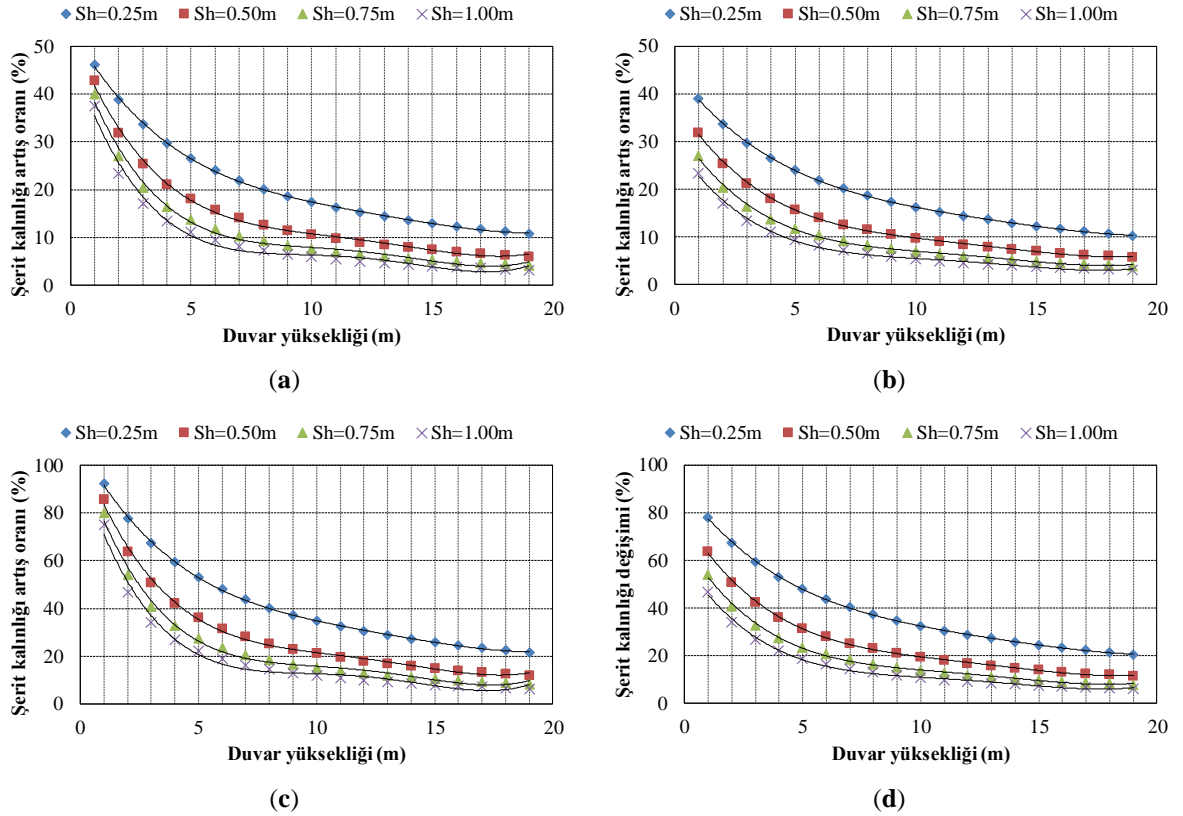
Şekil 3. Duvar yüksekliğine bağlı şerit uzunluğunun değişimi: (a) $q = 0,00 \text{ kN/m}^2$; (b) $q = 5,00 \text{ kN/m}^2$; (c) $q = 10,00 \text{ kN/m}^2$; (d) $q = 15,00 \text{ kN/m}^2$; (e) $q = 20,00 \text{ kN/m}^2$.

Tablo 2. Birim duvar yüksekliğine göre ortalama şerit donatı uzunluğu değişimi

Sürşarj Yüğü (kN/m^2)	Şerit Uzunluğu (m/m)	
	H = 1,00-5,00 m	H = 6,00-19,00 m
0,00	3,07	1,27
5,00	3,31	1,27
10,00	3,48	1,27
15,00	3,61	1,27
20,00	3,71	1,28
<i>Ortalama</i>	<i>3,43</i>	<i>1,27</i>

3.1. Şerit Donatı Kalınlığı

Denklem 5’te görüldüğü üzere servis ömrü ve korozyon oranına bağlı olarak donatı kalınlığının doğrusal bir değişim göstermesi beklenmektedir. 50, 75 ve 100 yıllık servis ömrü için yapılan hesaplamalarda “mm” mertebesinde küçük değişimler içeren doğrusal eğilimli grafikler elde edilmiştir. Bu yüzden grafiklerde görsel anlamda farklılık arz etmeyen ara değerler çıkarılarak sadece yüksüz ve 20,00 kN/m²’lik sürşarj yükü için hazırlanan, 50 yıla oranla 75 ve 100 yıllık şerit kalınlığı artış yüzdelerini içeren grafikler Şekil 4’te verilmiştir. Genel itibariyle duvar yüksekliği, yatay donatı aralığı ve sürşarj yükünün artması ile şerit kalınlığı artış oranı azaltmaktadır. 75 yıllık servis ömrünün 50 yıla oranını içeren grafiklerde %23,00 ile %47,00 arasında değişen değerler, 100 yıllık servis ömrü göz önüne alındığında yaklaşık 2 kat artarak %45,00 ile %92,00 değerlerine yükselmektedir.



Şekil 4. Duvar yüksekliğine bağlı şerit kalınlığı artış oranı: (a) $q = 0,00 \text{ kN/m}^2$ ve 75/50 yıl; (b) $q = 20,00 \text{ kN/m}^2$ ve 75/50 yıl; (c) $q = 0,00 \text{ kN/m}^2$ ve 100/50 yıl; (d) $q = 20,00 \text{ kN/m}^2$ ve 100/50 yıl.

Her 5,0 kN/m²’lik kademeli artışa bağlı olarak 0,03 mm civarında oldukça az miktarda kalınlık artışı içerdiğinden dolayı sürşarj yükü değişkeni göz ardı edilerek, yatay donatı aralığı ve duvar yüksekliğine göre hesaplanan ortalama şerit donatı kalınlığı değişimi Tablo 3’te verilmiştir. Burada görüleceği üzere servis ömründeki her 25 yıllık artış yaklaşık %8,00’lik bir artış sağlarken, yatay donatı aralığında 0,25 m’lik artış kademeleri sırasıyla %56,50, %36,40 ve %26,70 seviyelerinde kalınlık artışı meydana getirmektedir. Dolayısıyla şerit kalınlığı açısından yatay donatı aralığının hem sürşarj yükü hem de tasarım ömründen daha kritik olduğu söylenebilir. Ayrıca projeler kapsamındaki tüm değişkenlere bağlı olarak 0,65 mm ile 10,49 mm arasında değişen şerit kalınlığının piyasada üretilebilecek üst tam sayı değerlerine yuvarlanması gerekmektedir.

Tablo 3. Ortalama şerit donatı kalınlığı (mm)

Yatay Donatı Aralığı (m)	Servis Ömrü (yıl)			Ortalama
	50	75	100	
0,25	1.8	2.1	2.4	2.1
0,50	3.0	3.3	3.6	3.3
0,75	4.2	4.5	4.8	4.5
1,00	5.4	5.7	6.0	5.7
Ortalama	3.6	3.9	4.2	

4. SONUÇLAR

Son yıllarda karayolları çevresindeki istinat yapılarının tasarımında sıklıkla tercih edilen şerit donatılı zeminler için bir genelleme yapmak amacı ile Türkiye genelindeki 82 proje incelenmiştir. Projelerde yer alan zemin ve geometrik özellikler ile teorik hesaplarda gereken parametrelerin ortalamaları alınarak yapılan hesaplamalarda; sürşarj yükü, duvar yüksekliği, yatay donatı aralığı ve servis ömrüne bağlı olarak aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir.

Çalışma kapsamındaki sınır koşullar dahilinde elde edilen şerit donatı boyu 2,02 m ile 23,62 m arasında değişmektedir. 5,00 m duvar yüksekliğine kadar birim duvar yüksekliği başına ortalama 3,43 m/m oranında ciddi bir artış eğiliminde olan şerit donatı boyu, bu yükseklik değerinden sonra sabit bir eğimle ortalama 1,27 m/m seviyelerinde artmaktadır. Dolayısıyla şerit donatı boyu açısından ilk 5,00 m önem arz etmektedir. Diğer taraftan sürşarj yükünün artması ile 5,00 m'den uzun yüksekliklerinde sabit şerit boyu artışı gözlenirken, daha kısa duvar yüksekliklerinde birim metre için gereken donatı boyu azalarak artan bir eğilim sergilemektedir. Ayrıca yatay donatı aralığının artması ile de şerit boyunda artış gözlenmektedir.

Donatılı zeminler açısından bir diğer tasarım parametresi olan şerit donatı kalınlığı, çalışmada incelenen değişkenlere göre 0,65 mm ile 10,49 mm arasında değişmektedir. Şerit kalınlığı; duvar yüksekliği, sürşarj yükü, yatay donatı aralığı ve servis ömrüne paralel olarak doğrusal artış göstermektedir. Şerit kalınlığı artış miktarını içeren 75/50 yıllık servis ömrü oranı ile 100/50 yıllık servis ömrü oranı kıyaslandığında yaklaşık 2 katlık bir artış elde edilmiştir. Diğer değişkenler sabit tutulduğu takdirde yatay donatı aralığının hem sürşarj yükü hem de tasarım ömründen daha kritik olduğu söylenebilir.

Ülke genelinde bölgesel ölçekte veya koordinat bazlı incelenen proje sayısı atırılarak Amerikan Karayolları Birliği (AASHTO) bünyesinde eyaletler bazında yapılan genellemeler benzeri abaklar oluşturulması sağlanabilir. Bu sayede proje yapılması planlanan bölgelerdeki sınır koşullar dahilinde göz önünde bulundurulmuş değişkenlere göre daha tutarlı fizibilite çalışmalarının yapılmasına imkan sağlanmış olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Das BM. Principles of Foundation Engineering. 6th ed. USA: Thomson/Brooks/Cole, 2007.
- [2] TS7994. Zemin Dayanma Yapıları; Sınıflandırma, Özellikleri ve Projelendirme Esasları. Türk Standartları Enstitüsü 1990, Ankara.
- [3] Karadağ MB, Evirgen B, Tuncan M. Çiftlikköy ilçesi gençlik caddesindeki heyelanın vaka analizi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 2019; 7(1): 640-649.
- [4] Evirgen B, Tuncan M, Tuncan A. Modelling study on the geotextile, geogrid and steel strip reinforced slopes, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture 2017; 32(4): 227-240.

- [5] Vidal H. La terre armée, Annales de L'Institute Technique du Batiment et des Travaux Publics 1966; 223: 888-938.
- [6] Schlosser F, Long N. Recent results in French research on reinforced earth, Journal of the Construction Division 1974; 100: 113-237.
- [7] Akinmusuru JO, Akinbolande, JA. Stability of loaded footings on reinforced soil, Journal of the Geotechnical Engineering Division 1981; 107: 819-827.
- [8] Allen TM, Bathurst RJ, Holtz RD, Lee WF, Walters D. New method for prediction of loads in steel reinforced soil walls, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2004; 130(11): 1109-1120.
- [9] Guler E, Hamderi M, Demirkan MM. Numerical analysis of soil-retaining wall structures with cohesive and granular backfills, Geosynthetics International 2007; 14(6): 330-345.
- [10] Yazdandoust M. Investigation on the seismic performance of steel-strip reinforced-soil retaining walls using shaking table test, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2017; 97: 216-232.
- [11] Miyata Y, Bathurst RJ. Measured and predicted loads in steel strip reinforced c-φ soil walls in Japan, Soils and Foundations 2012; 52(1): 1-17.
- [12] Yu Y, Bathurst RJ, Miyata Y. Numerical analysis of a mechanically stabilized earth wall reinforced with steel strips, Soils and Foundations 2015; 55(3): 536-547.
- [13] Özdemir B, Evirgen B, Tuncan A, Onur MI, Tuncan M. Zemin donatıları ile güçlendirilmiş şevlerin değerlendirilmesi, 6. Geoteknik Sempozyumu; 26-27 Kasım 2015; Çukurova Üniversitesi, Adana. pp. 105.
- [14] Hatami K, Bathurst RJ. Numerical model for reinforced soil segmental walls under surcharge loading, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2006; 132(6): 673-684.
- [15] Bathurst RJ, Nernheim A, Allen TM. Predicted loads in steel reinforced soil walls using the AASHTO simplified method, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2009; 135(2): 177-184.
- [16] Stuedlein AW, Bailey M, Lindquist D, Sankey J, Neely J. Design and performance of a 46-m-high MSE wall, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2010; 136(6): 786-796.
- [17] Totiç E, Yılmaz F. Şerit donatılı toprakarme duvar sisteminin uygulanması, Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi 2017; 5(2): 103-111.
- [18] Zevgolis EI. A finite element investigation on displacements of reinforced soil walls under the effect of typical traffic loads, Transportation Infrastructure Geotechnology 2018; 5: 231-249.
- [19] Karayolları Teknik Şartnamesi. Yol Altyapısı, Sanat Yapıları, Köprü ve Tüneller, Üst Yapı ve Çeşitli İşler, Karayolları Genel Müdürlüğü 2013, Ankara.
- [20] Sun C, Graves C. Mechanically stabilized earth (MSE) walls design guidance, University of Kentucky Transportation Center 2013.