

Araştırma Makalesi - Research Article

Geosentetik Donatılı İstinat Duvarı ile Betonarme İstinat Duvarının Karşılaştırmalı Analizi: Kastamonu-Karabük Karayolu Örneği

Comparative Analysis of Geosynthetic Reinforced Earth Wall and Reinforced Concrete Retaining Wall: Kastamonu-Karabük Highway Case Study

Halil İbrahim Yumrutaş^{1*}, İnan Keskin², Ulaş Aydın³

Geliş / Received: 07/10/2021

Revize / Revised: 26/02/2022

Kabul / Accepted: 01/03/2022

ÖZ

Dolgu uygulaması karayolu ve demiryolu inşaatlarında sıklıkla karşılaşılan bir uygulamadır. Bu çalışmada dolgu stabilizasyonunu sağlamak amacıyla yapılan ve geleneksel sanat yapılarından olan betonarme istinat duvarı ile geosentetik (geogrid) donatılı istinat yapısı maliyet, yapım süresi, hizmete açılma süresi, estetiklik ve hizmet ömrü kriterleri dikkate alınarak karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Mukayeseler, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından uygulama yapılmakta olan aynı karayolu üzerindeki farklı iki lokasyondaki mühendislik yapıları üzerinde yapılmıştır. Birinci lokasyonda mevcut geosentetik donatılı duvar yerine betonarme istinat duvarı projelendirilirken, ikinci lokasyonda ise mevcut betonarme istinat duvarı yerine geosentetik donatılı duvar projelendirilmiştir. KGM pozları doğrultusunda maliyet analizleri yapılmıştır. Özellikle yükseklik artışına paralel olarak geosentetik donatılı duvarların maliyet açısından avantajlı duruma geçtiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca hizmet ömrü, inşa süresi, kullanıma açılma süresi ve estetiklik kriterleri açısından performansları değerlendirildiğinde ise geosentetik donatılı duvarların daha avantajlı olduğu ortaya konulmuştur. Çalışma sonuçlarından elde edilen bilgilerin, yol çalışmalarında dolgu stabilite sorunu ortaya çıkan lokasyonlarda hem performans hem de maliyet açısından hangi sanat yapısının tercih edilmesinin daha uygun olacağına karar verilmesine katkı sunulacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler- *Geosentetik Donatılı Duvar, İstinat Duvarı, Yüksek Dolgu, Sanat Yapısı*

ABSTRACT

Embankment is a frequently encountered application in road and railway constructions. In this study, reinforced concrete retaining wall, which is one of the traditional engineering structures and constructed to provide fill stabilization, and geosynthetic (geogrid) reinforced retaining structure were analyzed comparatively by considering cost, construction time, duration for service, service life, and aesthetics criteria. The comparisons were carried out on the engineering structures in two different locations on the same highway, which are under responsibility of the General Directorate of Highways (KGM). In the first location, a reinforced concrete retaining wall was designed instead of the existing geosynthetic reinforced wall, while a geosynthetic reinforced wall was

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: iyumrutas@karabuk.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-3696-7016>)

²İletişim: inankeskin@karabuk.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-2977-4352>)

³İletişim: ulasaydin1061@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-3194-9337>)

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Demirçelik Kampüsü, Karabük, Türkiye

designed instead of the existing reinforced concrete retaining wall in the second location. Cost analyses were made in line with KGM items. It was concluded that geosynthetic reinforced earth walls became advantageous in terms of cost, especially in parallel with the increase in height. In addition, it is revealed that geosynthetic reinforced walls are more advantageous when their performance is evaluated in terms of construction time, duration for service, service life and aesthetics criteria. It is thought that the data obtained from results of the study will contribute decision makers to decide the most appropriate engineering structure in terms of both performance and cost at the locations where filling stability problems arise in highway construction.

Keywords- Geosynthetic Reinforced Earth Wall, Retaining Wall, High Embankment, Engineering Structure

I. GİRİŞ

Doğal ya da suni yollarla oluşan şevlerin dengede kalabilmesi amacıyla arazide düşük eğimli kademelendirme yapılabileceği gibi, betonarme, taş veya toprakarme duvar da inşa edilebilir. Son zamanlarda geosentetik donatılı istinat duvarları, geleneksel betonarme ve taş duvarlara alternatif olarak geniş bir uygulama alanı bulmuştur [1]. Literatürde geosentetik donatılı istinat duvarlarının 2 ve 3 boyutlu stabilite analizlerine, tasarım parametrelerinin optimizasyonuna, sismik performans ve sismik tasarımı etkileyen parametreler üzerine, maliyet optimizasyonu üzerine, geosentetik duvar ve zemin davranışlarının nümerik analizlerine, performansını artırmaya yönelik tasarım önerilerine, laboratuvar modellerine ilişkin olarak çok sayıda çalışma yer almaktadır [2-26]. Geosentetik donatılı istinat duvarlarını sürdürülebilirlik açısından irdeleyen ve geleneksel geri dolgular yerine inşaat atıkları gibi çeşitli sürdürülebilir malzemelerin kullanımını öneren bazı çalışmalar da mevcuttur [27,28]. Bazı araştırmacılar ise geosentetik donatılı duvarların karayolu, demiryolu gibi alanlardaki çeşitli uygulamalarına dikkat çekmişlerdir [29,30]

Tekstil ürünlerin yumuşak zeminlerde karayolu inşasında bir yardımcı eleman olarak kullanımına ilişkin en eski örnekler dokuma kamış örtülerin eski Romalılar tarafından kullanılması olarak gösterilebilmektedir. Günümüz tekniklerine benzer şekilde, bu örtüler bataklık zemin üzerine serilerek üzeri taş ile kaplanmıştır. Modern anlamda membranlar kullanılarak zeminlerin güçlendirilmesi konsepti ise ilk olarak Casagrande tarafından zayıf zeminlerde yüksek mukavemetli membranların yüzeye yatay olarak serilmesi şeklinde kullanımının önerilmesiyle ortaya çıkmıştır [31]. Donatılı zemin kavramı 1966 yılında H. Vidal tarafından ortaya atılmış ve uygulama süresinin kısa oluşu, uygulama kolaylığı, çok yönlü uygulanabilmesi ve ekonomik oluşu gibi sebeplerle kabul görmüştür [32,33]. Yetmişli yılların başından beridir Dünyanın pek çok yerinde dayanma yapılarının inşasında zeminlerin güçlendirilmesi amacıyla geosentetikler kullanılmaya başlanmıştır. Son yıllarda birçok inşaat mühendisliği probleminin çözümünde geosentetikler tüm Dünyada başarılı bir şekilde kullanım alanı bulmuş olup günümüzde kabul görmüş bir yapı malzemesi olarak dikkat çekmektedir. Geosentetiklerin kullanımıyla birlikte birçok mühendislik probleminin çözümünde ekonomik alternatifler doğmuştur. Geosentetikler zeminler, kayalar ve/veya diğer inşaat malzemeleri ile birlikte kullanılabilen sentetik esaslı malzemelere verilen genel bir isimdir. Geotekstiller, geogridler, geonetler, geomembranlar, geokompozitler geniş bir yelpazedeki sentetik ürünlerdir [31]. Geotekstiller; dolgular, sıg temeller, kaplamalı/kaplamasız karayolları, demiryolları, erozyon kontrolü, şev stabilitesi, dolgu barajlar gibi inşaat mühendisliği uygulamalarında ayırma, stabilizasyon (güçlendirme), filtrasyon, drenaj, yalıtım gibi amaçlarla kullanılmaktadırlar [31,34].

Dolgu içerisinde belirli kademelerde uygulanan geosentetik donatılar (geotekstil veya geogrid), dolgunun oluşturduğu yatay zemin yüklerini, çekme kuvveti olarak üzerine almaktadır. Geosentetik donatılar, zeminin çekme direnci ve kopmadan önceki şekil değiştirme kabiliyetini artırdığı için dik dolgu şevleri yapılabilmektedir. Böylelikle 90 dereceye yakın açılarda 25-30 m yüksekliğe ulaşabilen geosentetik donatılı istinat duvarları inşa edilebilmektedir. Bu malzemelerin alternatif malzemelerin yerini almasında yer kazanma, malzeme kalite kontrolü, imalat kalite kontrolü, maliyetteki kazanımlar, teknik üstünlük, inşaat süresini kısaltma, malzemede gelişim, malzemede tedarik edilebilirlik ve çevresel duyarlılık açısından birçok üstünlük sağlaması önemli etken olmaktadır. Geosentetik dolgu duvarların günümüz şartlarında tercih edilmesinin önemli bir diğer sebebi ise inşaatı tamamlandığında duvar ön yüzüne ayrıca bir kaplama maliyeti getirmemeleridir [1,34]

Can [35], geosentetik donatılı istinat duvarlarının ön tasarımında kullanılacak ekonomik boyutlardaki donatı uzunluklarının hesaplanması amacıyla çeşitli sayısal analizler gerçekleştirmiştir. Polat [36], Geo5 ve Plaxis olmak üzere iki ayrı yazılım kullanarak farklı geosentetik donatılı istinat duvar yükseklikleri için, dolgu zemin sınıfındaki değişimin sonuçlarını araştırmıştır. Algin vd. [37], geosentetik donatılı zemin istinat duvarının ön

tasarımında kullanılabilir en ekonomik donatı uzunluğu oran aralıklarını, uluslararası rehber çalışmalarda öngörülerle karşılaştırarak tartışmışlardır. Çiçek vd. [38], sonlu elemanlar yöntemi ile yumuşak zemindeki bir dolguda geosentetik donatı kullanımının etkisini donatı uzunluğu, donatı sayısı ve şev açısı değişkenlerini göz önünde bulundurarak analiz etmişlerdir.

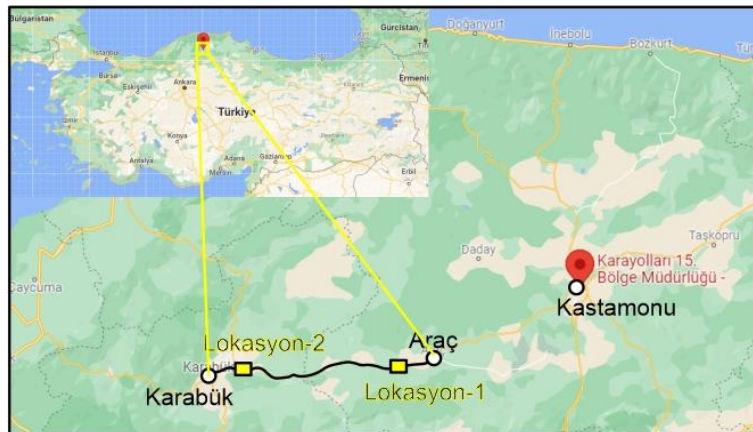
Türköz vd. [39], heyelan meydana gelen bir alanda arazi çalışmaları ve proje raporları doğrultusunda elde edilen zemin özellikleriyle analizler yapmış ve alternatif bir çözüm önerisi olarak geogrid donatılı duvar için geoteknik model ortaya koymuştur. Buna göre geogrid donatılı duvarların düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir olması ile belli miktarda deformasyona ve suyun geçişine izin veren yapısı nedeniyle heyelan bölgelerinde en uygun yöntemlerden biri olarak değerlendirilebileceğini ifade etmişlerdir.

Literatür çalışmaları değerlendirildiğinde geosentetik donatılı duvar ile geleneksel çözüm önerilerinin bir uygulama alanı içerisinde mukayese edilerek yeterince tartışılmadığı görülmekte ve bu çalışmanın literatüre bir yenilik kazandıracağı düşünülmektedir. Bu amaçla geosentetik dolgu duvarların literatürde sıklıkla anılan avantajlarının ortaya konulabilmesi adına Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından uygulaması yapılan iki farklı lokasyonda alternatif çözüm önerileri ile birlikte karşılaştırmalı analizler yapılmış ve ilgili Kamu kurumlarının karar verme süreçlerine katkı sağlanması hedeflenmiştir.

Duvar yüksekliğinin artmasına bağlı olarak betonarme istinat duvarı maliyet avantajını kaybetmekte, artan duvar yüksekliği ile geosentetik donatılı duvarın ekonomikliği daha da belirginleşmektedir. Geleneksel betonarme istinat duvarı çözümlerinde belirli bir yükseklikten sonra kesitlerin oldukça büyük boyutlara ulaşması özellikle kamulaştırma maliyetinin imalat maliyetlerine kıyasla çok daha önemli olduğu şehir içi uygulamalarda geosentetik donatılı duvarların çok daha avantajlı olacağı değerlendirilmektedir. Bunun yanı sıra hizmet ömrü, inşaa süresi, kullanıma açılma süresi ve estetiklik gibi tali kriterler de dikkate alındığında geosentetik donatılı istinat duvarlarının geleneksel betonarme istinat duvarlarına iyi bir alternatif olabileceği ve elde edilen sonuçlar bağlamında mevcut literatürü desteklediği görülmüştür.

II. ÇALIŞMA ALANININ TANITILMASI

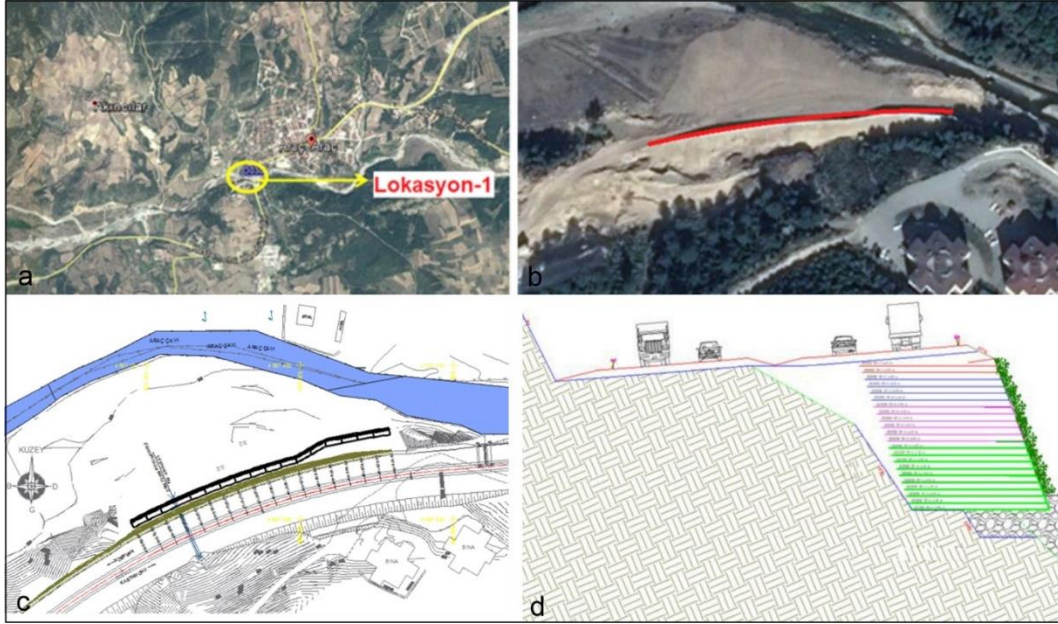
Çalışma alanı, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) sorumluluğundaki 2x2 şeritli Kastamonu-Karabük D-030 devlet yolu güzergahı üzerindedir. İncelemeye konu olan bölünmüş yola ait yer bulduru haritası Şekil 1'de yer almaktadır. Söz konusu yolun KM:39+950,00~41+260,00 arası Lokasyon 1 ve KM:39+950,00~41+260,00 arası ise Lokasyon 2 olarak adlandırılmıştır. Lokasyon 1'de uygulanan mevcut geosentetik dolgu duvar yerine betonarme istinat duvarı projelendirilmiştir. Lokasyon 2'de ise mevcut betonarme istinat duvarı yerine geosentetik dolgu duvar projelendirilmiştir. Her bir lokasyon için yapılan mevcut ve alternatif projeler dikkate alınarak her iki durum için maliyet, hizmet ömrü, inşaa süresi, kullanıma açılma süresi ve estetiklik kriterleri açısından karşılaştırmalar yapılmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası

A. Mühendislik Yapısı Genel Özellikler ve Değerlendirmeler (Lokasyon 1)

Çalışmaya konu olan sanat yapısının ilki Kastamonu-Karabük bölünmüş karayolu üzerinde KM:39+950,00-41+260,00 arasında kalan mevkideki Kastamonu ili, Araç ilçesi çıkış viyadüğü yaklaşımda bulunan geosentetik donatılı istinat duvarı olup uydu görüntüsü, plan paftası, duvar uygulaması proje plan paftası, proje enkesit paftası Şekil 2’de sunulmuştur. Geosentetik donatılı duvar imalatında mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 1’de sunulan 4 farklı tipte dikişli geogrid kullanılmış olup her bir tip farklı renk ile gösterilmiştir.



Şekil 2. (a) Geosentetik donatılı duvarın uydu görüntüsü, (b) Plan paftası, (c) Duvar uygulaması proje plan paftası, (d) Proje enkesit paftası

Tablo 1. Geosentetik donatılı duvar imalatında kullanılan geogrid türleri mekanik özellikleri

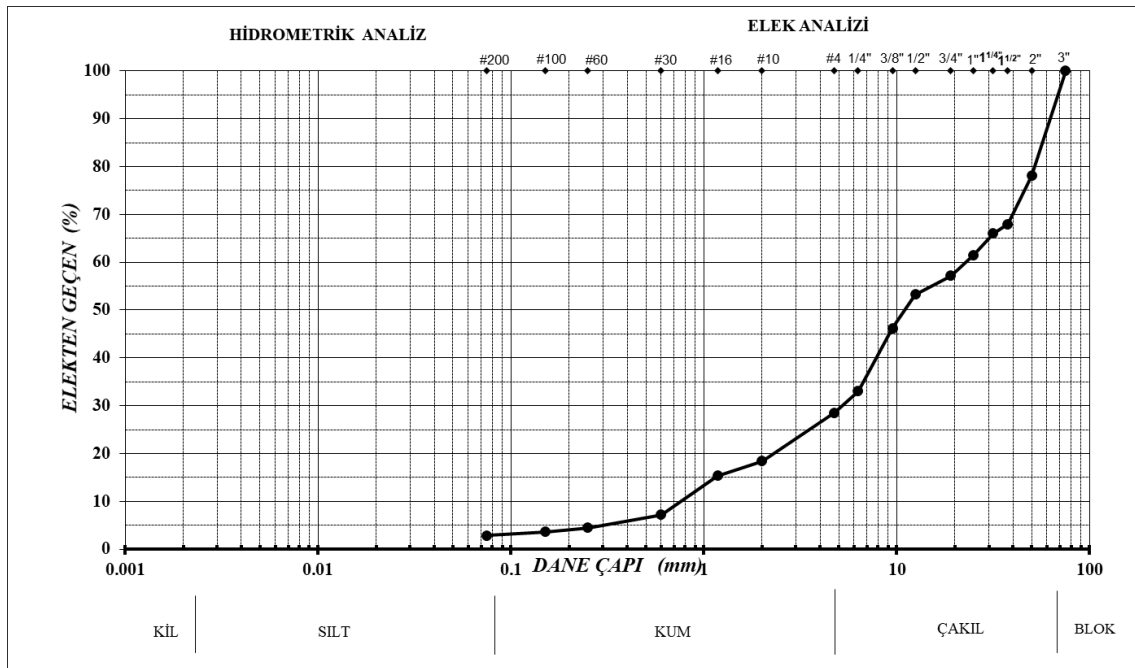
Geogrid tipi	Çekme gerilmesi (ISO EN 10319) kN/m		Birim deformasyon %		Birim ağırlık g/m ²	Göz açıklığı mm	Kullanım yeri (katmanlar)
	İmalat yönü	İmalat yönüne dik	İmalat yönü	İmalat yönüne dik			
Tip 1	35	20	13 (±2)	13 (±2)	240	20-35	En üst iki sıra
Tip 2	55	30	13 (±2)	13 (±2)	280	20-35	Dört sıra
Tip 3	80	30	13 (±2)	13 (±2)	350	20-35	Altı sıra
Tip 4	110	30	13 (±2)	13 (±2)	420	20-35	En alt on sıra

Lokasyon-1’de, bozuşma rengi gri-grimsi sarı renkli tabaka kalınlığı yer yer 1 m’ye ulaşabilen Nummulites fosili içeren yatay tabakalı kalkerler bulunmaktadır. Çatlak araları kil dolgululu olan birimin üzerinde 1 metreye yakın nebati toprak yer yer de 2,00 m’ye kadar kendi ayrışmasından türeyen yamaç molozu görünümü rezidüel zemin bulunmaktadır. Birimin süreksizlik yüzeyleri pürüzlü, sert ve dayanımlı, çoğunlukla kapalı ve devamsız ve yoğun mangan sıvalı olup yer yer limonitleşmeler gözlenmiştir. Duvarın oturduğu zemin ve dolgu malzemesine ait geoteknik parametreler zemin özelliğine göre belirlenmiş ve Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Lokasyon 1- Zemin parametreleri

Malzeme	Φ°	γ (kN/m ³)
Dolgu Malzemesi	34	19
Geri Dolgu	34	19
Temel	30	19

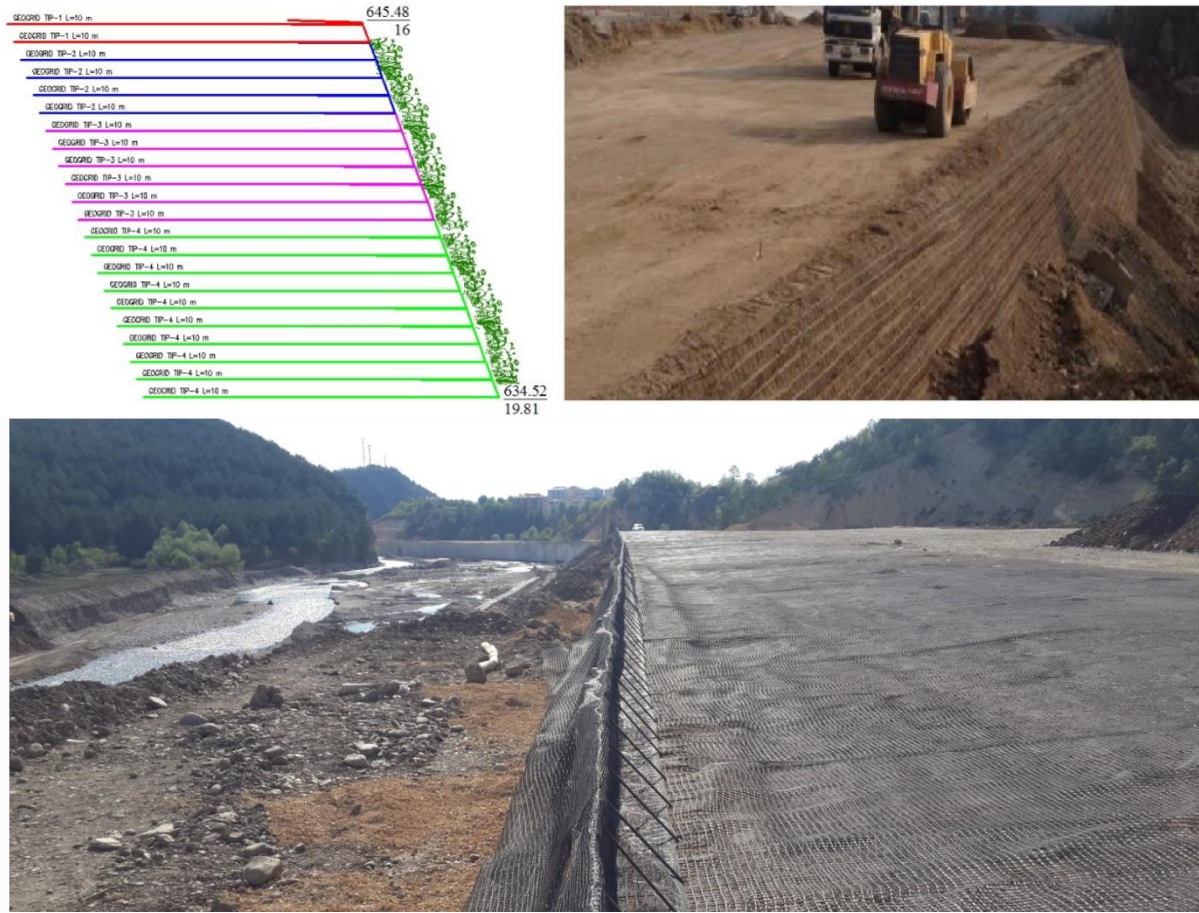
Lokasyon 1’de Geosentetik donatılı duvarda kullanılan dolgu malzemesine standart proktor deneyi, Kaliforniya taşıma oranı (Yaş CBR), likit limit (LL), plastik limit (PL), elek analizi (Şekil 3), kum konisi deneyleri yapılmıştır. Buna göre $\rho_{kmax} = 2,082 \text{ g/cm}^3$, optimum su içeriği ise %9,70, ortalama Yaş CBR değeri % 43,20 olup dolgu malzemesi GW (iyi derecelenmiş çakıl, kum-çakıl) olup non-plastiktir ve ortalama % 99,86 rölatif sıklık oranında sıkışma elde edilmiştir.



Şekil 3. Geri dolgu malzemesi gradasyon eğrisi

Lokasyon-1 Geosentetik Donatılı Duvar Uygulama Projesi ve İmalat Metrajları

Projede temel alt kotundan itibaren kullanılan geogrid sıra sayıları ve tipleri ile geosentetik donatılı duvarın tamamlanmış hali Şekil 4’te gösterilmiştir. Geosentetik donatılı duvar yüksekliği 11,00 m ve şev eğimi 1/3 (x/y) olarak uygulanmıştır. Geogridler dolgu zemin üzerine 10,00 m uzunluğunda serilmektedir. Her bir dolgu katmanı 50 cm olacak şekilde serilerek sıkıştırılmış ve ardından geogrid 2,50 bohçalama ile bir üst sıraya katlanarak bir sonraki sıraya geçilmiş ve 22 sıra olacak şekilde imalat tamamlanmıştır.



Şekil 4. Geosentetik donatılı duvar proje enkesit paftası ve geoduvar imalat safhaları

Geosentetik şev sistemlerinin maliyetleri genel olarak m^2 birim maliyeti üzerinden hesaplanmaktadır [33]. Geoduvar yapımında kullanılan geogridler metrekare birimi üzerinden hesaplanmıştır. Geogrid, dolgu zemin üzerine 10,00 m boyunda serilmiş, ardından 2,50 m katlanarak ilk sıra tamamlanmış ve ikinci sıra dolguya geçilmiştir. Diğer tüm sıralarda da aynı şekilde uygulama yapılarak imalat tamamlanmıştır. Geosentetik donatılı duvarda kullanılan geogrid metrajı Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Lokasyon 1- Geogrid metrajı (1m uzunluk için)

Geogrid tipi	Grid boyu (m)	Katlama payı (m)	Toplam boy (m)	Birim Uzunluk (m)	Benzer (adet)	Alan (m^2)
	a	b	c=a+b	d	e	f=c x d x e
Tip 1	10,00	2,50	12,50	1,00	2	25,00
Tip 2	10,00	2,50	12,50	1,00	4	50,00
Tip 3	10,00	2,50	12,50	1,00	6	75,00
Tip 4	10,00	2,50	12,50	1,00	10	125,00
						275,00

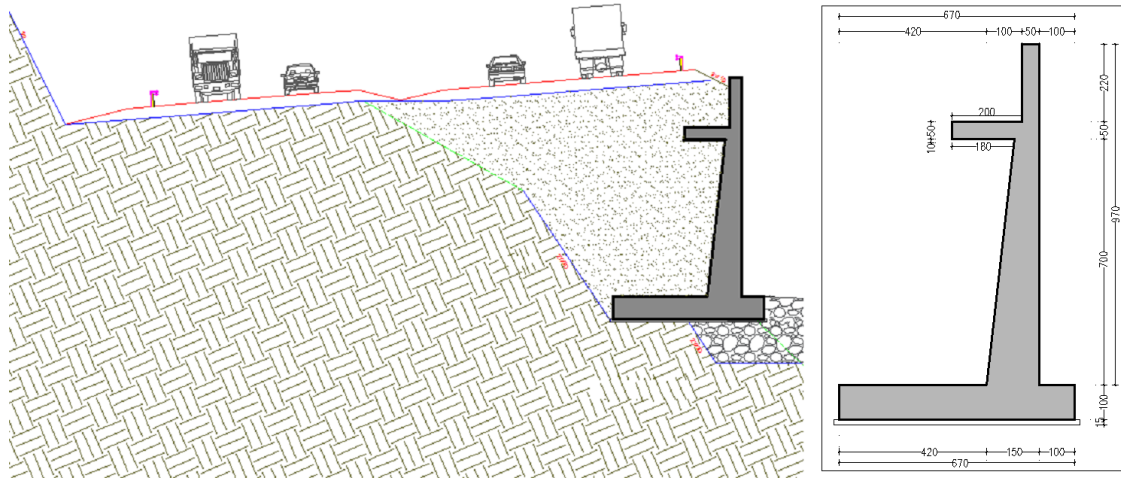
Geosentetik donatılı duvarın geogrid malzemesi dışındaki iş kalemleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Geosentetik donatılı duvar için önceden yapılan kazı ve sonrasında yapılan dolgular uygulama projesi üzerinden alınarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucu bulunan metrajlar ve birim uzunluk (1 m) için hesaplanan keşif bedelleri Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4. Geosentetik duvar metraj ve keşif özeti (1m uzunluk için)

Poz No	İmalat Adı	Birim	Miktar	2020 Birim Fiyat (TL)	2020 Metretül Fiyatı (TL)
KGM/Özel poz	Geogrid Tip 1	m ²	25	32,05	801,25
KGM/Özel poz	Geogrid Tip 2	m ²	50	34,76	1.738,00
KGM/Özel poz	Geogrid Tip 3	m ²	75	38,32	2.874,00
KGM/Özel poz	Geogrid Tip 4	m ²	125	53,06	6.632,50
KGM/Özel poz	Bitki tutucu	m ²	19,26	16,59	319,52
KGM/23.011/K	Çelik hasır (işçilik dahil)	ton	0,09463	4.963,60	469,71
KGM/23.014/K	Kanca demiri (işçilik dahil)	ton	0,03991	5.517,48	220,20
KGM/23.014/K	U demiri (işçilik dahil)	ton	0,03471	5.517,48	191,51
KGM/2200	Yarma kazısı	m ³	54,68	14,69	803,25
KGM/2209	Gövde dolgusu	m ³	6,85	3,31	22,67
KGM/Özel poz	Kademe dolgusu	m ³	104,95	35,11	3.684,79
					17.734,73

Geosentetik Donatılı Duvar Yerine Projelendirilen Betonarme İstinat Duvarı

Lokasoyon-1'de bulunan mevcut geosentetik donatılı duvar uzunluğu 260 metredir. Mevcut geosentetik donatılı duvar yerine projelendirilen betonarme istinat duvarı için ön boyutlar seçilip tahkikler yapıldıktan sonra Şekil 5'teki gibi h= 10,85 m yüksekliğindeki (grobeton dahil) duvar profili oluşturulmuştur. Duvar profilinin projesinde kullanılan beton sınıfı C-30/37, donatı çeliği S420 dayanım değerlerine sahiptir. Betonarme istinat duvarındaki iş kalemlerinin metrajları ve birim uzunluklar (1m) için keşif bedelleri proje üzerinden hesaplanarak Tablo 5'te özetlenmiştir. Hesaplarda KGM 2020 yılı birim maliyetleri kullanılmıştır. Hesap kolaylığı açısından ve sağlıklı bir mukayese yapılabilmesi adına metraj değerleri metretül cinsinden ifade edilerek birim maliyetler ortaya konulmuştur.



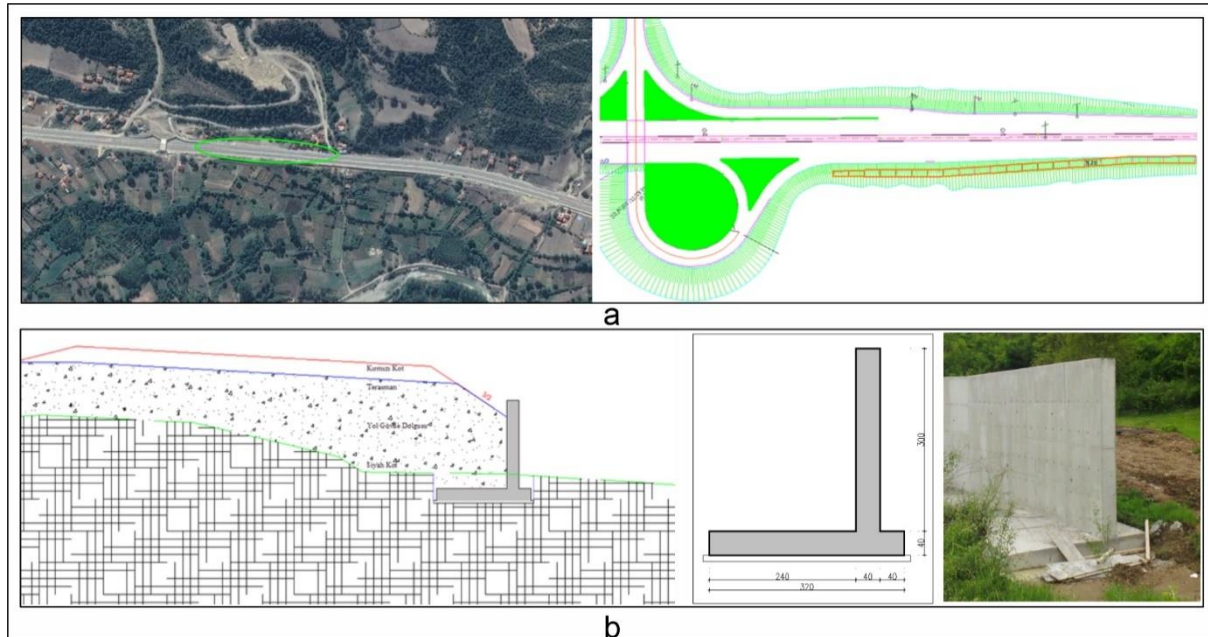
Şekil 5. Geosentetik donatılı duvar yerine projelendirilen betonarme istinat duvarı enkesit ve boyutları

Tablo 5. Betonarme istinat duvarı malzeme metraj ve keşif özeti (1m uzunluk için)

Poz No	İmalat Adı	Birim	Miktar	2020 Birim Fiyat (TL)	2020 Metretül Fiyatı (TL)
KGM /16.100/K-1	Demirsiz grobeton (kalıp dahil)	m ³	1,290	132,66	171,13
KGM /16.130/K	Demirli beton (kalıp dahil)	m ³	16,950	283,31	4.802,10
KGM/ 23.015/K	Kalın Donatı çeliği (işçilik dahil)	ton	2,018	5.246,41	10.587,26
KGM/ 14.210	Kazı	m ³	31,470	30,40	956,69
					16.517,18

B. Mühendislik Yapısı Genel Özellikler ve Değerlendirmeler (Lokasyon 2)

Lokasyon-2 olarak adlandırılan çalışma alan Karabük–Kastamonu bölünmüş karayolu üzerinde KM:61+340,00-61+450,00 arasında kalan, Kastamonu ili, Araç ilçesi Balçık hisar mevkiinde bulunan betonarme istinat duvarı sanat yapısıdır. Duvar yüksekliği h=3,55 m (grobeton dahil) olarak uygulanmıştır. Uydu görüntüsü, proje plan paftası, proje enkesit paftası ve boyutları Şekil 6’da sunulmuştur. KM:61+340,00-61+450,00 arasında kalan betonarme istinat duvarı yerine aynı lokasyonda geosentetik donatılı duvar projelendirilip kıyaslama yapılması hedeflenmektedir.



Şekil 6. Lokasyon-2 (a) Betonarme istinat duvarı uydu görüntüsü (b) Proje enkesit paftası ve boyutları

Lokasyon-2'de, grimsi yeşil renkli kumtaşı ince taneli, katmanlı olan kumtaşlarından oluşan birimin tabaka eğimleri şev içine doğrudur. Birim seyrek, düzensiz ve devamsız eklemli olmasına rağmen kimi kesimlerde sık süreksizlik özelliklerine sahiptir. Eklem yüzeyleri pürüzlü çimento malzemesi olup dolgu malzemesi kalsiyum karbonattır. Bu birimin mevcut yol üzerinde izlenen şevleri duraylı olup yarma şevi 2/3 olarak belirlenmiştir. Bu bölgelerdeki ayrışma III-IV, dayanım IV dür.

Lokasyon-2 Betonarme Duvar Uygulaması ve İmalat Metrajları

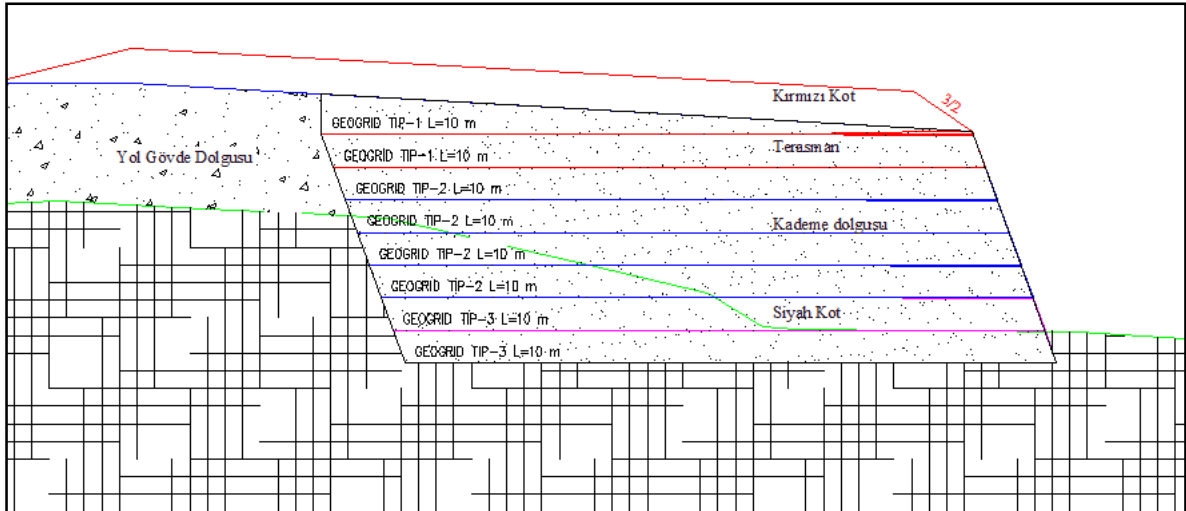
Lokasyon-2'de halihazırda imalatı tamamlanmış olan betonarme istinat duvarı, yol gövde dolgusunun stabilitesini sağlamak amacıyla imal edilmiştir. Kullanılan beton sınıfı C-30/37, donatı çeliği ise S420 MPa dayanımlarına sahiptir. Betonarme duvarın uygulama projesi üzerinden hesaplanan metrajlar ve KGM 2020 yılı birim maliyetleri kullanılarak oluşturulan birim boydaki (1m) keşif bedelleri Tablo 6’da sunulmuştur. Hesap kolaylığı açısından ve sağlıklı bir mukayese yapılabilmesi adına metraj değerleri metretül cinsinden ifade edilerek birim maliyet ortaya konulmuştur.

Tablo 6. Betonarme istinat duvarı malzeme metraj ve keşif özeti (1m uzunluk için)

Poz No	İmalat Adı	Birim	Miktar	2020 Birim Fiyat (TL)	2020 Metretül Fiyatı (TL)
KGM/16.100/K-1	Demirsiz grobeton (kalıp dahil)	m ³	0,340	132,66	45,1044
KGM/16.130/K	Demirli beton (kalıp dahil)	m ³	2,480	283,31	702,6088
KGM/23.014/K	İnce Donatı çeliği (işçilik dahil)	ton	0,129	5.517,48	711,7549
KGM/23.015/K	Kalın Donatı çeliği (işçilik dahil)	ton	0,233	5.246,41	1222,4135
KGM/14.210	Kazı	m ³	3,408	30,40	103,6032
					2.785,48

Betonarme İstinat Duvarı Yerine Projelendirilen Geosentetik Donatılı Duvar

Lokasyon-2'de betonarme istinat duvarı yerine projelendirilen geosentetik donatılı duvarda 3 ayrı tip olmak üzere toplamda 8 sıra geogrid kullanımı öngörülmüş olup Şekil 7'de enkesiti sunulmuştur. Duvar yüksekliği 3,50 m olup 10,00 m boyunda serilen geogridler, 2,50 m katlanarak alttaki sıra tamamlanarak bir üst sıranın dolgusu serilerek tüm dolgu kademesinde imalat benzer şekilde tamamlanmıştır. Geosentetik donatılı duvar temel kazıları serbest kazı durumu oluşturdukları için, KGM poz sisteminde yarma kazısı olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 7. Betonarme istinat duvarı yerine projelendirilen geosentetik donatılı duvar enkesiti

Lokasyon-2 Geogridlerin Mekanik Özellikleri

Geosentetik donatılı duvar imalatında mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 7’de sunulan 3 farklı tipte dikişli geogrid kullanılmış olup her bir tip farklı renk ile gösterilmiştir.

Tablo 7. Geosentetik donatılı duvar imalatında kullanılan geogrid türleri mekanik özellikleri

Geogrid tipi	Ham mad de	Çekme gerilmesi (ISO EN 10319) kN/m		Birim deformasyon %		Birim ağırlık g/m ²	Göz açıklığı mm	Kullanım yeri (katmanlar)
		İmalat yönü	İmalat yönüne dik	İmalat at yönü	İmalat yönüne dik			
Tip 1	polyester	35	20	13 (±2)	13 (±2)	240	20-35	En üst iki sıra
Tip 2	polyester	55	30	13 (±2)	13 (±2)	280	20-35	Dört sıra
Tip 3	polyester	80	30	13 (±2)	13 (±2)	350	20-35	En alt iki sıra

Lokasyon-2 Geosentetik Donatılı Duvar Uygulama Projesi ve İmalat Metrajları

İmalat sırasındaki yapım aşamaları Lokasyon-1’de verilen sıralama ile aynı olacaktır. Geosentetik donatılı duvar yapımında kullanılacak malzeme metrajları Tablo 8’de gösterilmiştir.

Tablo 8. Lokasyon 2- Geogrid metrajı (1m uzunluk için)

Geogrid tipi	Grid boyu (m)	Katlama payı (m)	Toplam boy (m)	Birim Uzunluk (m)	Benzer (adet)	Alan (m ²)
Tip 1	10,00	2,50	12,50	1,00	2	25,00
Tip 2	10,00	2,50	12,50	1,00	4	50,00
Tip 3	10,00	2,50	12,50	1,00	2	25,00

Geosentetik donatılı duvarın geogrid malzemesi dışındaki iş kalemleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucu bulunan metrajlar ve birim uzunluk (1 m) için hesaplanan keşif bedelleri Tablo 9’da özetlenmiştir. En altta yer alan 5 sıra geogrid malzemeyi 10 m uzunluğunda yerleştirebilmek amacıyla bir miktar yarma kazısı yapılması gerekmekte olup gerekli miktarlar hesaplanarak maliyet analizine dahil edilmiştir.

Tablo 9. Geosentetik Donatılı duvar metraj ve keşif özeti (1m uzunluk için)

Poz No	İmalat Adı	Birim	Miktar	2020 Birim Fiyat (TL)	2020 Metretül Fiyatı (TL)
KGM/Özel poz	Geogrid Tip 1	m ²	25	32,05	801,25
KGM/Özel poz	Geogrid Tip 2	m ²	50	34,76	1.738,00
KGM/Özel poz	Geogrid Tip 3	m ²	25	38,32	958,00
KGM/Özel poz	Bitki tutucu	m ²	6,30	16,59	104,52
KGM/23.011/K	Çelik hasır (işçilik dahil)	ton	0,03101	4.963,60	153,92
KGM/23.014/K	Kanca demiri (işçilik dahil)	ton	0,01305	5.517,48	72,00
KGM/23.014/K	U demiri (işçilik dahil)	ton	0,01543	5.517,48	85,13
KGM/2200	Yarma kazısı	m ³	11,38	14,69	167,17
KGM/Özel poz	Kademe dolgusu	m ³	38,29	35,11	1.344,36
					5.424,35

III. KARŞILAŞTIRMALI ANALİZLER

Tasarım mühendisleri, belirli bir inşaat mühendisliği probleminin çözümünde genellikle geleneksel yöntemler ile geosentetik donatılı çözümlerden hangisini tercih etmeleri gerektiği noktasında kararsızlık yaşamaktadırlar. Rasyonel bir karar vermek amacıyla aşağıda bahsedilen hususlarda bir mukayese yapmak yararlı olacaktır[40];

- Göreceli ekonomiklik
- Maliyet-performans verimliliği
- Güvenlik katsayısı
- Fizibilite
- Malzeme temini
- İnşaat süresi.

Çalışmadan elde edilen bulgular değerlendirilerek maliyet, hizmet ömrü, inşa süresi, kullanıma açılma süresi, estetik görünüm hususlarında karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir.

A. Maliyet Analizi

Bir geosentetik donatılı duvarın maliyeti yarma/dolgu gereksinimi, duvar/şev boyutları ve türü, mevcut zemin durumu, geri dolgu malzemesinin temini, yüzey işlemleri, kalıcı/geçici olma durumları gibi birçok faktöre bağlı olarak değişebilmektedir [33]. Durukan ve Tezcan [40], çalışmalarında, donatı tipinden bağımsız olarak geosentetik donatılı istinat duvarların özellikle 6 m'yi aşan duvar yüksekliklerinde, geleneksel betonarme duvarlardan daha ekonomik olduğunu ortaya koymuşlardır. Kamulaştırma sınırı, yüksek kamulaştırma maliyetleri, korunması gerekli kültürel varlıklar, gelecekteki uygulamalar için ayrılan rezerv alanlar gibi durumların ortaya çıkması, geosentetik donatılı duvarların kullanımını neredeyse zorunlu kılmakta ve maliyeti önemli derecede etkilemektedir. Bu sebeple bilimsel temelli bir sonuca ulaşabilmek için birçok faktörün karşılaştırmalı olarak analiz edilerek bir maliyet performansı ortaya konulması gerekmektedir [31]. Pisini vd.[28] geotekstil donatılı istinat duvarlarının daha verimli, ekonomik ve dayanıklı olduğunu ifade etmekte, Vibha ve Divya [27] ise donatılı istinat yapılarının konvansiyonel sistemlere nazaran maliyet açısından daha efektif bir alternatif olduğuna dikkat çekmektedir. Geosentetik donatılı duvarlar yüksek kalitede geri dolgu gerektirmediklerinden dolayı da ekonomik olarak kazanç sağlamaktadırlar. Ayrıca hemen hemen dik olarak elde edilebilen yapısı sebebiyle alandan tasarruf sağlayarak özellikle kent içi karayolu, demiryolu vb. uygulamalarda kamulaştırmadan kaynaklanan muhtemel yüksek bedellerin azaltılmasına katkı sağlarlar ve betonarme istinat duvarları ile birlikte şevli yüzeylere ekonomik bir alternatif olarak değerlendirilirler. Muadil sanat yapılarına oranla hemen hemen yarı fiyatına inşa edilebilirler [33].

Bu çalışmada uluslararası literatüre de konu olan maliyete ilişkin değerlendirmeler dikkate alınarak belirli bir uygulama alanında ekonomik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, geosentetik donatılı duvar ve geleneksel betonarme istinat duvarının ekonomik açıdan değerlendirilebilmesi amacıyla aynı geoteknik koşullarda benzer amaç için inşa edilecek iki farklı sanat yapısının ilk yapım maliyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Sanat yapılarının imalatı için gerekli malzeme/işçilik/makine gereksinimleri hesaplanarak elde edilen metraj değerleri KGM 2020 birim fiyatları ile çarpılmış ve maliyetler hesaplanmıştır. Tablo 4 ve Tablo 5'teki özet veriler ışığında Lokasyon-1'de mevcut geosentetik donatılı duvar, alternatif olarak projelendirilen h: 10,70 m yüksekliğindeki betonarme konsol istinat duvarı ile maliyet açısından birbirlerine yakın olduğu, Lokasyon-2'de ise mevcut h: 3,40 m yüksekliğindeki betonarme istinat duvarının alternatif olarak projelendirilen geosentetik donatılı duvara oranla daha ekonomik olduğu görülmektedir.

Çalışmamızda her iki lokasyonda da elde edilen maliyete ilişkin bulgular literatürü destekler nitelikte olup yükseklik artışına paralel olarak geosentetik donatılı duvarların geleneksel betonarme istinat yapılarına nazaran ekonomik açıdan daha avantajlı duruma geçmeye başladığı görülmektedir. Geosentetik dolgu duvar uygulamasının karayolu ve demiryolu inşaatlarının dolgu uygulamalarında özellikle belirli bir yükseklikten sonra ekonomik açıdan iyi bir alternatif olabileceği değerlendirilmektedir.

B. Hizmet Ömrü

Betonarme yapılar servis ömürlerine göre dört gruba ayrılmaktadır. Buna göre, birinci grup yapılar, geçici yapılar ve hizmet süreleri minimum 1-5 yıl arasında olan yapılardır. İkinci grup yapılar, değiştirilebilir taşıyıcı elemanlarla hizmet süresi minimum 5 yıl olan yapılardır. Üçüncü grup yapılar, hizmet süresi minimum 50 yıl olan bina ve kamu yapıları ve dördüncü grup yapılar ise servis ömrü minimum 100 yıl olan anıtsal binalar, köprüler ve önemli inşaat mühendisliği yapıları olarak belirlenmiştir [41]. Betonarme istinat duvarları mühendislik yapıları olarak ifade edilmekte olup hizmet süreleri muhtelif kaynaklarda 100-120 yıl olarak öngörülmektedir. [1,33,41] Geosentetik donatılı duvarlarda kullanılan geogrid ömürleri polyester malzemenin ömrü ile aynıdır. Fakat inşaat işlerinde doğada kaybolma ömrünün değil, sünme faktörünü de dikkate alarak literatürde ifade edilen güvenlik katsayılarını sağlayacak hizmet sürelerinin geçerli olacağı düşüncesiyle geoduvvarların hizmet süreleri de minimum 100-120 yıl olarak öngörülmüştür [1,33,41] Yapım hatalarının olmaması ve malzeme kalitelerinin şartnamelerdeki sınırlar içerisinde olduğu sürece her iki duvar sisteminin kullanım ömürlerinin yakın değerlerde olduğu ve birbirlerine üstünlüğü bulunmadığı değerlendirilmektedir.

C. İnşaa Süresi

Geosentetik dolgu duvarların inşası konvansiyonel muadillerine oranla nispeten daha kolay ve hızlı olmaktadır (Ingold, 1982). Geosentetik donatılı duvar imalatında son sıra geogridin dolgusu tamamlandıktan sonra yol terasman seviyesinde hazır hale gelir. Burada sıkışma testleri yapılarak şartname limitlerine bakılır. Uygunluk sağlandığı takdirde geoduvvar imalatı tamamlanmış olur. Bu aşamadan sonra üstyapı imalatına hemen geçilebilir. Bitki tutucu yüzeylerin yeşillendirilmesi herhangi bir statik öneme sahip değildir.

Betonarme istinat duvarında ise duvar arkası dolgudan önce kalıp, donatı çeliği, beton dökümü ve betonun mukavemet kazanması gibi zaman gerektiren aşamalar mevcuttur. Temel kazısının ardından, tesviye ve demirli betonu zeminden gelebilecek yeraltı sularına karşı korumak amacıyla grobeton imalatı yapılır. Sonra kalıp ve donatı çeliği imalat işlemleri bir günde tamamlanır. Daha sonra radye betonu dökümü ve ardından bir gün beklenerek perde betonu dökümü gerçekleştirilir. Uygulama alanındaki şantiye günlük raporları dikkate alındığında tüm bu işlemler 4 günde tamamlanmıştır. Lokasyon 1’de halihazırda uygulanan geosentetik donatılı duvarda ise geogrid serme, dolgu ve sıkıştırma işlemlerinin tamamı 1,5 günde tamamlanmıştır. Bu sonuçlar geosentetik donatılı duvarların imalatının geleneksel istinat yapılarına oranla daha hızlı olduğunun göstergesi olup literatürde bu yöndeki değerlendirmeleri desteklemektedir.

D. Kullanıma Açılma Süreleri

Betonarme istinat duvar imalatı tamamlandıktan sonra bir diğer aşama olan duvar arkası dolgu işlemine geçmeden önce betonun prizini tamamlaması ve belli bir dayanıma ulaşması gerekmektedir. Radye ve perde betonu dökümünü müteakip minimum yedi gün sonra, duvar arkası dolgu işlemine ve sonrasında da üstyapı imalatına geçilebilir. Uygulama alanında betonarme istinat duvarı betonundan alınan 15x15x15 cm küp numuneler, kür havuzunda 7 gün ve 28 gün bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyi uygulanmıştır. Bu deney sonucunda 7 gün sonunda betonun yaklaşık %80 dayanım değeri kazandığı görülmüştür. Alınan beton küp numuneleri KGM tarafından denetlenen laboratuvar ortamında test ile uygunluğu rapor edilmekte ve bir sonraki süreçlere geçilebilmektedir. Geleneksel istinat duvarının emniyetli beton dayanımını kazanması için gereken minimum süreler dikkate alındığında Geosentetik donatılı duvarların imalat sonrası kullanıma açılma süreleri açısından son derece avantajlı olduğu aşikardır.

E. Estetik Görünüm

Geosentetik donatılı duvarlar, ön cephe kaplama elemanlarına geometrik şekil, doku ve renk verilebildiği için estetik görünüme sahiptirler. Betonarme istinat duvarında ise soğuk derzden dolayı oluşabilecek renk/ton farklılıkları, kalıp birleşim bölgelerindeki geçiş izleri, tayrot (tierod) demirlerinin neden olduğu boşluklar, segregasyon oluşumu vb. duvar görünümünü olumsuz etkilemektedir. Söz konusu çalışma alanının da dahil olduğu proje güzergahı üzerinde 96+580.00 km’de yer alan bir betonarme istinat duvarı (Şekil 8a) ve bir geosentetik donatılı duvar (Şekil 8b) üzerinden estetik görünüme ait örneklendirme yapılmıştır.



Şekil 8. Geleneksel betonarme istinat duvarı (a) Yüzey kaplamalı geosentetik donatılı duvar(b)

Geosentetik duvar yüzeyi, uygun bir malzeme ile kaplanması ya da bitki tutucu örtüler vasıtasıyla yeşillendirilmesi neticesinde doğa ile uyumlu hale gelmekte ve geleneksel istinat yapılarına nazaran estetik görünüm kazandırmaktadır. Her ne kadar yüzeydeki çimlerin bakımı potansiyel bir sorun olarak gözükse de uygun tasarımlar ile bu sorunun üstesinden gelinebilmektedir [1,33]

Estetik görünümün subjektif bir olgu olması sebebiyle Kastamonu-Karabük yolu Km:96+580.00'da Şekil 7'de yer alan iki farklı sanat yapısının estetik açıdan değerlendirilmesine yönelik bir anket çalışması yapılmıştır. Ankete katılanlara ön yüzeyi bloklu sistem ile kaplı mevcut geosentetik donatılı duvar (Şekil 7b) ile betonarme istinat duvarı (Şekil 7a) fotoğrafları gösterilip cinsiyet, yaş, eğitim durumu, meslek bilgileri temin edilerek hangi sanat yapısını daha estetik buldukları sorulmuştur. Anket yapılan 20 kişiden 16'sı geosentetik duvarın daha estetik olduğunu ifade etmişlerdir. Elde edilen sonuç literatürdeki kaynakların geosentetik duvarın estetikliğine yönelik değerlendirmeleri ile uyum göstermektedir.

IV. SONUÇLAR

Lokasyon-1'de mevcut geosentetik donatılı duvar yerine 10,85 m yüksekliğinde betonarme istinat duvarı projelendirilmesi yapılmıştır. Burada maliyet analizleri sonucunda geosentetik donatılı duvar ile betonarme istinat duvar maliyetlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Lokasyon-2' de ise 3,55 m yüksekliğindeki mevcut betonarme istinat duvarını yerine geosentetik donatılı istinat yapısı projelendirilmiştir. Bu lokasyondaki kıyaslamada betonarme istinat duvarının ekonomik açıdan daha avantajlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Her iki lokasyonda elde edilen kıyaslama sonuçları ve literatür çalışmaları ışığında ortaya çıkan sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Duvar yüksekliğinin artışına bağlı olarak betonarme istinat duvarı maliyet avantajını kaybetmekte, artan duvar yüksekliği ile geosentetik donatılı duvarın ekonomikliği daha da belirginleşmektedir. Ayrıca geleneksel istinat duvarı uygulamalarında yükseklik arttıkça duvar kesitleri artmakta ve büyük temel boyutlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Buna bağlı olarak özellikle şehir içi uygulamalarda yüksek kamulaştırma maliyetinin doğmasına sebep olmaktadır. Kamulaştırma maliyeti açısından değerlendirildiğinde de geosentetik donatılı duvarlar avantajlı olmaktadır. Betonarme istinat duvarlarında belirli bir yükseklikten sonra kesitler uygulama aşamasına geçilemeyecek kadar artmakta iken geosentetik donatılı duvarlarda bir yükseklik üst sınırı yoktur.
- Kamulaştırma sınırı, yüksek kamulaştırma maliyetleri, korunması gerekli kültürel varlıklar, gelecekteki uygulamalar için ayrılan rezerv alanlar gibi durumların ortaya çıkması, geosentetik donatılı duvarların kullanımını neredeyse zorunlu kılmakta ve imalat maliyetini ikinci planda tutmaktadır.
- Geosentetik donatılı duvarın, betonarme istinat duvarına göre temele aktardığı yük daha azdır ve dönmeye karşı büyük emniyet sağlar. Betonarme istinat duvarlarının arka dolgu işlemi tamamlandıktan sonra zamanla oturma problemlerinin oluşması muhtemeldir. Uzun vadeli performans açısından değerlendirildiğinde de geosentetik donatılı duvarların daha avantajlı olduğu düşünülmektedir.
- Yatay kurplarda teşkil edilecek olan geleneksel istinat yapılarında donatı çeliği, beton kalıbı ve ano uzunlukları esnekliği sınırlarken, geosentetik donatılı duvarların iç ve dış kurpları kolayca dönebilecek olması geosentetik duvarları uygulama kolaylığı açısından daha avantajlı kılmaktadır.

- İnşaat işlerinde en önemli parametrelerden birisi zamandır. Hem imalatın tamamlanması hem de imalat sonrası hizmete alınabilmesi için geçen süre oldukça önem arz etmektedir. Geosentetik donatılı duvarların imalatı ve imalat sonrası hizmete alımı, betonarme istinat duvarlarına göre çok daha hızlıdır. Hizmet ömrü açısından değerlendirildiğinde ise her iki sanat yapısının da benzer sürelerde hizmet verebileceği değerlendirilmektedir.
- Geosentetik donatılı duvar kullanımındaki ekipmanlar, geleneksel betonarme istinat duvarına göre daha azdır. Her ekipman bakım, onarım ve operatör maliyeti doğuracağından geosentetik donatılı duvar kullanımı ekonomik açıdan daha avantajlı hale gelmektedir.
- Özellikle şehir içi uygulamalarda görsellik önemli bir etkidir. Geosentetik duvarların ön cephe elemanlarına geometrik şekil, doku, renk verilebilmesi veya doğaya uyumlu bitkisel peyzaj uygulamaları yapılabilmesi önemli bir avantajdır.

Ayrıca benzer çalışmanın farklı yükseklikler dikkate alınarak tekrarlanması ile söz konusu mühendislik yapıları için optimum yükseklik/maliyet performans oranının elde edilmesine katkı sağlanacağı değerlendirilmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, Polat Yol AŞ'ye çalışma kapsamında bilgi ve belge desteklerinden dolayı teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- [1] Aydın, U. (2019). Yüksek dolgularda geo-sentetik donatılı duvar ile hafifletme konsollu betonarme istinat duvarının kıyaslanması (Kastamonu-Karabük Yolu örneği), *Karabuk University*.
- [2] Manahiloh, K. N., Nejad, M. M., & Momeni, M. S. (2015). Optimization of Design Parameters and Cost of Geosynthetic-Reinforced Earth Walls Using Harmony Search Algorithm, *International Journal Of Geosynthetics And Ground Engineering*, 1(2), 1–12 (2015).
- [3] Vahedifard, F., Leshchinsky, B. A., Sehat, S., & Leshchinsky, D. (2014). Impact of Cohesion on Seismic Design of Geosynthetic-Reinforced Earth Structures, *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 140 (6).
- [4] Basudhar, P. K., Vashistha, A., Deb, K., & Dey, A. (2007). Cost Optimization of Reinforced Earth Walls", *Geotechnical And Geological Engineering*, 26(1), 1–12.
- [5] Gaudio, D., Masini, L., & Rampello, S. (2018). A performance-based approach to design reinforced-earth retaining walls, *Geotextiles And Geomembranes*, 46 (4), 470–485.
- [6] Kashani, A. R., Saneirad, A., & Gandomi, A. H. (2019). Optimum design of reinforced earth walls using evolutionary optimization algorithms, *Neural Computing And Applications*, 32 (16).
- [7] Gaudio, D., Masini, L., & Rampello, S. (2018). Seismic Performance of Geosynthetic-Reinforced Earth Retaining Walls Subjected to Strong Ground Motions.
- [8] Xu, J., Du, X., & Yang, X. (2019). Stability analysis of 3D geosynthetic–reinforced earth structures composed of nonhomogeneous cohesive backfills, *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, 126.
- [9] Han, J. & Leshchinsky, D. (2006). Stability analyses of geosynthetic-reinforced earth structures using limit equilibrium and numerical methods.
- [10] Gaudio, D., Masini, L., & Rampello, S. (2021). A Procedure to Design Geosynthetic-Reinforced Earth-Retaining Walls Under Seismic Loadings.
- [11] Yang, S., Gao, Y., Cui, K., Zhang, F., & Wu, D. (2020). "Three-dimensional internal stability analysis of geosynthetic-reinforced earth structures considering seismic loading, *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, 130, 105979.
- [12] Belal, A. M. (1997). Finite Element Analysis of Geosynthetic Reinforced Soil Retaining Walls Subjected to Seismic Loading, *The University of Mississippi The*.
- [13] Aroni Hesari, S., Javankhoshdel, S., Payan, M., & Jamshidi Chenari, R. (2021). Pseudo-static internal stability analysis of geosynthetic-reinforced earth slopes using horizontal slices method, *Geomechanics And*

Geoengineering, 1–26.

- [14] Akhlaghi, T. & Nikkar, A. (2014). Numerical analyses of dynamic response of geosynthetic-reinforced soil retaining wall, *Geosystem Engineering*, 17 (2), 142–149.
- [15] Rahmouni, O., Mabrouki, A., Benmeddour, D., & Mellas, M. (2016). A numerical investigation into the behavior of geosynthetic-reinforced soil segmental retaining walls, *International Journal Of Geotechnical Engineering*, 10 (5), 435–444.
- [16] Wu, J. & Pham, T. (2010). An analytical model for calculating lateral movement of a geosynthetic-reinforced soil (GRS) wall with modular block facing, *International Journal Of Geotechnical Engineering*, 4 (4), 527–535.
- [17] Mandal, J. N. & Jambale, K. S. (1991). Computer aided design of geosynthetic reinforced soil walls, *Geotechnical And Geological Engineering*, 9 (2), 139–151.
- [18] Djabri, M. & Benmebarek, S. (2016). FEM Analysis of Back-to-Back Geosynthetic-Reinforced Soil Retaining Walls, *International Journal Of Geosynthetics And Ground Engineering*, 2 (3), 26.
- [19] Kim, Y. S. & Won, M. S. (2005). "Deformation behaviors and finite element analyses of geosynthetic reinforced soil walls, *KSCE Journal Of Civil Engineering*, 9 (5), 363–369.
- [20] Başbuğ, E., Cengiz, C., & Güler, E. (2021). 1-g Shaking table tests to determine the behavior of geosynthetic reinforced soil walls under seismic loads, *Transportation Geotechnics*, 30.
- [21] Lu, L., Ma, S., Wang, Z., & Zhang, Y. (2021). Experimental study of the performance of geosynthetics-reinforced soil walls under differential settlements, *Geotextiles And Geomembranes*, 49 (1), 97–108.
- [22] Kilic, I. E., Cengiz, C., Edincliler, A., & Guler, E. (2021). Seismic behavior of geosynthetic-reinforced retaining walls backfilled with cohesive soil", *Geotextiles And Geomembranes*, 49 (5): 1256–1269.
- [23] Linhares, R. M., Mirmoradi, S. H., & Ehrlich, M. (2021). Evaluation of the effect of surcharge on the behavior of geosynthetic-reinforced soil walls, *Transportation Geotechnics*, 31.
- [24] Rahmaninezhad, S. M. & Han, J. (2021). Lateral facing deflections of geosynthetic-reinforced retaining walls under footing loading", *Transportation Geotechnics*, 30.
- [25] Alhadj Chehade, H., Dias, D., Sadek, M., Jenck, O., & Hage Chehade, F. (2020). Upper bound seismic limit analysis of geosynthetic-reinforced unsaturated soil walls, *Geotextiles And Geomembranes*, 48 (4), 419–430.
- [26] Balaban, E., Smejda, A., & Onur, M. İ. (2020). Geosentetik Donatılı İstinat Duvarının Analitik, Deneysel ve Sonlu Elemanlar Yöntemleri ile Performans Analizi, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7 (2), 621–637.
- [27] Vibha, S. & Divya, P. V. (2020). Geosynthetic-Reinforced Soil Walls with Sustainable Backfills, *Indian Geotechnical Journal*, 1–10.
- [28] Pisini, S., Thammadi, S., & Shukla, S. (2021). Sustainability Study on Geosynthetic Reinforced Retaining Wall Construction, Ground Improvement and Reinforced Soil Structures, *Springer, Singapore*, 765–773.
- [29] Han, J., Jiang, Y., & Xu, C. (2017). Recent advances in geosynthetic-reinforced retaining walls for highway applications, *Frontiers Of Structural And Civil Engineering*, 12 (2), 239–247.
- [30] Tatsuoka, F., Tateyama, M., Koseki, J., & Yonezawa, T. (2014). Geosynthetic-Reinforced Soil Structures for Railways in Japan, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 1 (1), 3–53.
- [31] Shukla, S. K. (2002). Geosynthetic applications—general aspects and selected case studies, *Geosynthetics and their Applications*, ThomasTelford publishing, 393-419.
- [32] Özkol, O. (2006). Design of Geosynthetically Reinforced Retaining Structures, PhD Thesis, Istanbul Technical University, Institute of Science.
- [33] Berg, R., Christopher, B. R., & Naresh C., S. (2009). Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes.
- [34] Yılmaz, R. & Eskişar, T. (2009). Usage of Geosynthetic Products to Solve Geotechnical Problems and Their

- dvantages, *İnşaat Mühendisleri Odası Yayınları*, 437–452.
- [35] Can, S. (2017). Geosentetik Donatılı İstinat Duvarlarının Numerik Analizi ve Tasarım Aşamaları, *Harran University*.
- [36] Polat, A. (2020). Parametric Analysis on Geosynthetic Reinforced Retaining Wall, *Balıkesir University*.
- [37] Algın, H. M., Can, S., & Ekmen, A. B. (2016). Geosentetik Donatılı Zemin İstinat Duvarı Tasarımında Donatı Uzunluğunun Tahmini, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 1 (2), 35–44.
- [38] Çiçek, E., Güler, E., & Yetimoğlu, T. (2015). Sedde Şevlerinin Geosentetik ile Donatlandırılmasının Stabiliteye Etkileri, *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8 (1), 100–114.
- [39] Türköz, M. & Kaba, E. (2019). Heyela Stabilizasyonund Rijit Ve Geosentetik Donatili Duvarların Karşılaştırmalı Analizi Ve Bir Uygulama, *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 7 (2), 146–158.
- [40] Durukan, Z. & Tezcan, S. S. (1992). Cost analysis of reinforced soil walls, *Geotextiles And Geomembranes*, 11 (1), 29–43.
- [41] Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills.