

FARKLI SEVİYELERDE AYRIŞMIŞ KUMTAŞLARINDA İNŞA EDİLMİŞ ZEMİN ÇİVİLİ DUVAR PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Anıl YENİ

Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

ORCID: 0000-0003-1530-9847

Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenokon SELÇUK

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

ORCID: 0000-0003-1890-7965

Doç. Dr. Ömer ÜNDÜL

İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği

ORCID: 0000-0002-7048-9759

ÖZET

Zemin çivileri, zeminler veya ayrışmış kaya ortamlarında bulunan yamaç ve şevlerin geçici veya kalıcı stabilitesini sağlamak amacıyla belirli eğimlerde zemine yerleştirilen rijit donatı elemanlarıdır. Zemin çivileri, zemin ile enjeksiyon arasında oluşan yük transferi ile çalışmaktadır. Sakarya-Taşkısığı mevkiine yapılacak olan bir sanayi tesisinin parsel sınırındaki yamacın daha dik konumda kazılarak arazi alanının arttırılması planlanmıştır. Bu planlama kapsamında daha önce yapılan çalışmalarla oluşturulacak şevin kendini tutamama durumundan dolayı ayrışmış kayalara uygun düşük maliyetli zemin çivili duvar destek sistemi olarak seçilmiştir. Bu çalışmada, zemin çivisi uygulaması esnasında ve tamamlanması sonrasında seçilen bu destek sisteminin performansı inklimometre ve zemin çivisi çekme deneyleri ile birer ölçüm noktasında takip edilmiştir. Inklimometrede ölçülen yatay yer değiştirme değeri 2,00 mm ve zemin çivisi çekme deneyinde aderans gerilmesi değeri 190 kPa olarak ölçülmüştür. Mohr-Coulomb bünye modeli kullanılarak yapılan sonlu eleman analizleri sonuçlarına göre yatay deplasman değeri 1,59 cm olarak belirlenmiştir. İleri derecede ayrışmış kumtaşı aderans gerilmesi değeri 75 kPa olarak literatürden yararlanılarak seçilmiştir. Projeye esas tasarımda, olması gerekenden yüksek parametreler seçildiği; arazi ölçüm verileri ve yapılan sayısal analizler ile ortaya koyulmuştur. Bu kapsamda Mohr-Coulomb bünye modeli yerine kaya kütlelerinde daha yaygın olarak kullanılan Hoek-Brown bünye modeli kullanılarak hassaslık ve parametre analizleri yapılmıştır. Jeolojik Dayanım İndisi (GSI), güvenlik katsayısı (GS) ve yatay deplasman (u_x) değerinin belirlenmesi açısından en önemli parametrelerden birisidir. GSI değerinin yeniden değerlendirilmesi yapılmış ve tasarım aşamasında belirlenenden daha farklı GSI değeri kullanılmıştır. Belirlenen yeni GSI değerinin arazi performansından elde edilen gözlem sonuçları ile uyumlu olması için hem karot sandık fotoğrafları hem de hassaslık ve parametre analizleri göz önüne alınarak sahada elde edilen GSI değerlerine yaklaşılmaya çalışılmıştır. Duvar performansının beklenenden daha yüksek olması nedeniyle yapısal elemanların geometrik parametrik analizi yapılmış; şev eğimi, çivi boyu, çiri aralığı ve çivi eğimi tasarım parametrelerinin güvenlik katsayısına ve yatay yer değiştirmeye etkisi incelenmiştir. 65° şev eğimi, 6,00 m çivi boyu, 1,60 m çivi aralığı ve 15° çivi eğiminde tasarımda beklenen güvenlik katsayısı değeri 1,72 olarak hesaplanmışken; yapılan geri analizler sonrasında belirlenen yeni GSI değeriyle güvenlik katsayısı değeri 2,87 olarak belirlenmiştir. Geometrik parametre analizlerinde, tüm varyasyonlarda yüksek güvenlik katsayısı değeri belirlenmiştir.

Bu bağlamda, tasarımın optimum performansı için destek sistemindeki çivi boylarının 4,00 m ve eğimlerinin 20° olması önerilmiştir. Sonuç olarak, çivi boylarının kısaltılmasıyla benzer güvenlik katsayısında daha ekonomik bir tasarımın elde edilebileceği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Zemin çivisi, aderans gerilmesi, yatay yer değiştirme, ayrılmış kumtaşı, sonlu elemanlar yöntemi

ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE OF SOIL-NAILED WALL CONSTRUCTED ON WEATHERED SANDSTONE AT VARYING GRADES

ABSTRACT

In soil/weathered rocks, soil nails are rigid reinforcements positioned at certain angles on the ground to provide slope stability. The slope at the parcel border needs to be made steeper in order to accommodate the construction of a facility in Sakarya-Taşkısığı. Soil nail walls, which are inexpensive and suited for weathered rocks, were needed as support system because the slope was too steep to support itself. Support system performance is measured by an inclinometer and a soil nail pull-out test observed during and after construction. The horizontal displacement on inclinometer value was 2,00 mm and the soil nail pull-out test yielded strength value was 190 kPa. The Mohr-Coulomb model of the finite elements method was used to predict the displacement value during design phase as 1,59 cm. According to the available literature, 75 kPa was selected during the design phase as the bond strength value for highly weathered sandstone. Instrumental field monitoring and numerical analyses revealed that higher values were chosen for the design stage parameters. The Hoek-Brown model that's more frequently used in rock masses was used in this situation for sensitivity and parametric analyses instead of the Mohr-Coulomb model. Geological Strength Index (GSI) is one of the most important variables for calculating the safety factor and displacement value. A greater GSI value chosen during the design phase was utilized after a reevaluation of the GSI value. A new value was determined by considering both the core boxes and the sensitivity analyses in order to be consistent with the data acquired from the field performance. The geometrical parameter analysis of the structural elements was done since the wall performance was higher than expected. The effects of various geometrical parameters including slope angle; nail's length, spacing, angle on safety factor and displacement were examined. Following the assessments, it was determined that the required safety factor value should be 1,72 whereas the anticipated value during the design phase should be 2,20 for the same conditions. The result of parametric analyses shows that high safety factors were calculated in all variations. It is suggested that the nail lengths could be as short as 4,00 m and the nail angle should be 20° for optimum performance. Thus, it has been demonstrated that a more economical design can be obtained by shortening the nail lengths while keeping the system reliable.

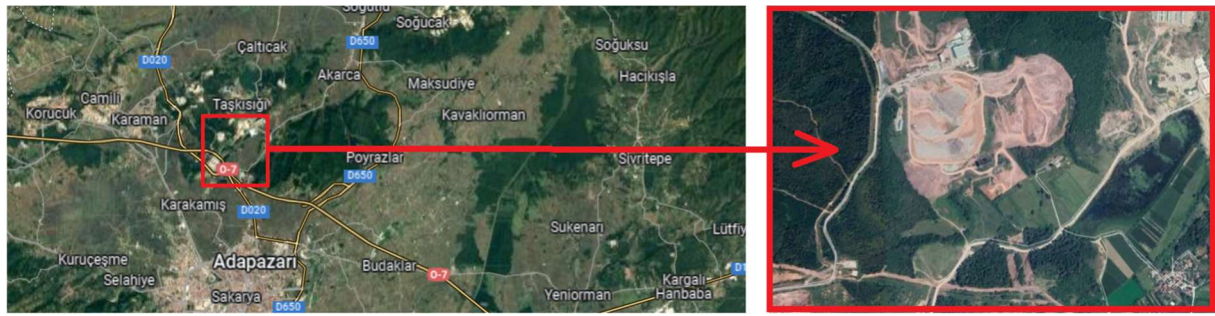
Keywords: Soil nail, bond strength, horizontal displacement, weathered sandstone, finite elements method

1. GİRİŞ

Zemin çivileri, zeminler veya ayrılmış kaya ortamlarında bulunan yamaç ve şevlerin geçici veya kalıcı stabilitesini sağlamak için belirli eğimlerde yerleştirilen rijit donatı elemanlarıdır (Juran, 1987). Delgilerin tamamlanması ile kuyuya yerleştirilen rijit donatı elemanı; enjeksiyon sıvısı ile doldurularak, enjeksiyonlu çivi ile zemin arasında yük transferiyle bağ kuvveti oluşturulur. Zemin çivili destek sistemi uygulaması yapıldıktan sonra servis süresince performansı belirlenmelidir. İnklinometre ölçümleri, duvar deformasyonlarını belirleyebilmektedir (Lazarte vd., 2015).

(Özsoy, 1996; Yılmaz, 2000; Durgunoğlu, 2008) ve pek çok araştırmacı zemin çivili destek sistemlerinin performansını belirlemek için inklinometre sonuçlarını kullanmışlardır. Zemin çivili duvar uygulama süresinde çivi performansını ve çivi-zemin aderans gerilmesini belirlemek amacı ile yerinde zemin çivisi çekme deneyleri de gerçekleştirilmektedir (Schlosser & Guilloux, 1981; Schlosser, 1982; Milligan & Tei, 1998; Pradhan, 2000; Babu & Singh, 2010).

Sakarya ili, Taşkısığı Mevkiinde; Çakraz Formasyonu üzerinde bulunan bir tesisin parsel sınırında (Şekil 1) 200,0 m uzunluğunda 10,0 m yüksekliğinde zemin çivili duvar inşaa edilmiştir. Duvar arkasına yerleştirilen inklinometre ile yatay deformasyon; zemin çivisi çekme deneyi ile aderans gerilmesi belirlenmiş ve elde edilen veriler tasarıma esas sayısal analizlerde kullanılan Mohr-Coulomb bünye modeli sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, uygulama safhasında elde edilen verilerin sayısal analizlerden daha güvenli değerler verdiği görülmüştür. Aşırı tasarımın nedenlerini ortaya koymak için kaya kütlelerinde Hoek-Brown bünye modelinde yeniden analiz yapılmıştır. Kaya kütle sınıflaması tekrar analiz edilmiş; geoteknik parametrelerin belirlenmesi amacı ile hassaslık ve parametre analizi yapılmıştır. Nihayetinde, destek sisteminin daha kısa çivilerle ve daha düşük maliyet ile çözülebileceğini göstermek için de yapısal elemanların geometrik analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası

2. METODOLOJİ

Çakraz Formasyonu kumtaşı birimlerde uygulanan zemin çivili destek sisteminin tasarım aşamasında yararlanılan geoteknik parametreler belirlenirken; arazi gözlemleri, arazi deneyleri ve laboratuvar deneylerinden yararlanılmıştır.

2.1. Çalışma Alanı Jeolojisi ve Mühendislik Jeolojisi

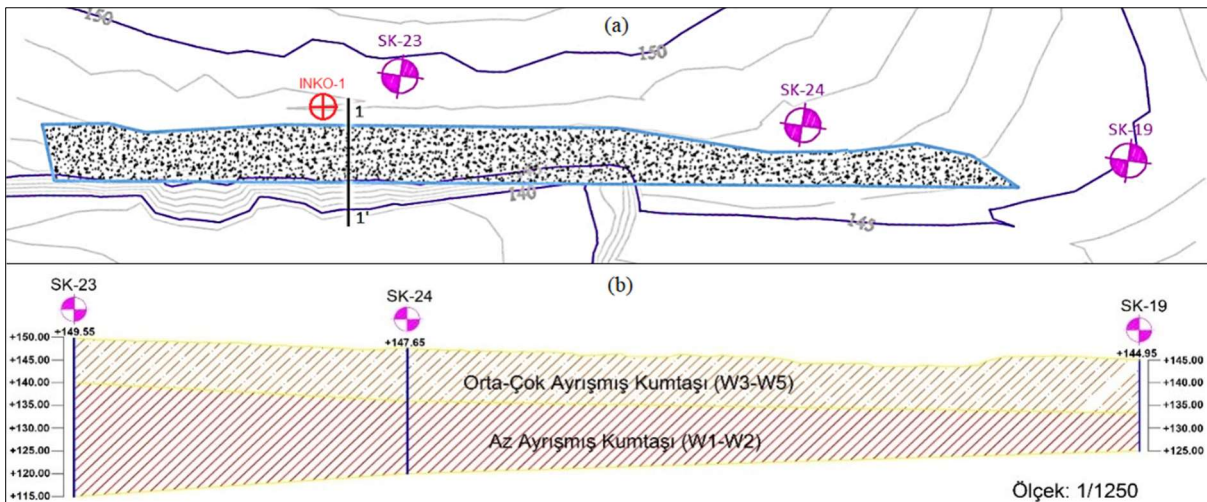
Çalışma, Çakraz Formasyonu'nda ayrılmış kumtaşlarında gerçekleştirilmiştir. Kızıl-kahverenkli sedimentler birim, genel olarak yuvarlak taneli ve kötü boylanmış arkozik kumtaşları ile üst seviyelerde kumtaşı kilaşı aralanmasından oluşmaktadır. Tabakalı bir yapı gösteren birim 30-40° güneybatıya eğimlidir. Çalışmada ISRM (1981) tarafından önerilen 6 ayırtmanlı ayrışma sınıflaması kullanılmış ve kaya kütlelerinin ileri derecede ayrılmış (W4-W5) ve orta derecede ayrılmış (W3) derecelerde ayrışma gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. (a) İleri derecede ayrılmış seviyeler; (b) Orta derecede ayrılmış seviyeler

Jeolojik ortamın tariflenmesi amacıyla arazide farklı derinliklerde SK-19, SK-23 ve SK-24 olmak üzere toplam üç adet sondaj çalışması yapılmıştır. Sondajlara ait lokasyonlar Şekil 3a'da topoğrafik harita üzerinde ve sondajlardan elde edilen zemin profili Şekil 3b'be verilmiştir.

Söz konusu sondajlardan; SK24, SK23 ve SK19 numaralı kuyularda yapılan presiyometre deneyleri sonuçlarına göre Elastisite Modülü ileri derecede ayrılmış kumtaşıda 30-150 MPa değerleri arasında ve orta derecede ayrılmış kumtaşı seviyelerinde 280 MPa değerleri arasında değişmektedir.



Şekil 3. (a) Sondajlara ait lokasyonların Topoğrafik harita üzerindeki yerleşimleri; (b) Verilere göre oluşturulan zemin profili

Araziden elde edilen karot numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, ISRM (2007) tarafından belirtilen yöntemler ile laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Buna göre W4-W5 seviyeleri için doğal birim hacim ağırlık 21-24 kN/m³ arasında; W3 seviyeleri için ise 24-28 kN/m³ arasında değişmektedir. Ortamın mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan tek eksenli sıkışma deney sonuçlarına göre W4-W5 seviyeleri için 10 MPa'dan düşük değerler elde edilmiş; W3 seviyeleri için ise 18-25 MPa arası değerler aldığı tespit edilmiştir.

2.2. Sonlu Elemanlar Sayısal Analiz Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, matematiksel olarak ifade edilmiş sürekli problemlerin çözüm yöntemidir. Sistemin daha küçük parçalara ayrılarak, her bir alt sistemin kendi içinde çözülmesiyle sonuç elde edilir. (Zeinkiewicz, 1977).

Bu çalışmada, model Plaxis 2D programında girdilerinde kaplama yüzeyi plaka eleman; zemin çivileri geogrid eleman; mesh ağı 15 düğüm noktalı; orta yoğunlukta ve düzlem gerilme tercih edilmiştir. Ayrıca Brinkgreve (2005) tarafından önerildiği gibi şevlerin iki boyutlu modellemelerinde sınır koşullarının analiz sonuçlarını etkilememesi için model sınırlarının, kazı derinliğinin en az iki-üç katı olacak şekilde modellenmiştir.

2.2.1. Mohr-Coulomb (MC) Bünye Modeli

MC bünye modelinde, her bir zemin tabakası için sabit ortalama rijitlik veya derinlik ile doğrusal olarak artan bir rijitlik tahmin ve bu sayede hızlıca deformasyon tahmini yapılabilmektedir. (Brinkgreve 2018). Uygulamaya esas tasarımda idealize edilmiş zemin profilinden, MC bünye modelinde zemin çivili destek sistemi tasarımı yapılmıştır.

Sınır koşulları belirlenen şev modelinin bir sonraki aşamasında yapısal elemanlarına ait malzeme parametreleri belirlenmiştir (Tablo 3). Kesit 1-1'de tüm zemin çivileri 6,00 m boyda; çivi eğimi 15°; 1,60 m aralıkla ve şev eğimi 65° tercih edilmiştir. Donatı çapı 28 mm, delgi çapı 127 mm'dir. Q188/188 çelik hasırlı kaplama sistemi 200mm kalınlığındadır.

Tablo 3. Projeye esas tasarımda kullanılan zemin çivisi ve püskürtme beton parametreleri

	Parametre	Sembol	Birim	Değer
Zemin Çivisi	Normal Rijitlik	EA	kN/m	2,32x10 ⁵
	Delik çapı	D _h	m	0,127
	Donatı çapı	d _r	m	0,028
	Donatı Elastisite Modülü	E _r	kN/m ²	2,11x10 ⁸
	Enjeksiyon Elastisite Modülü	E _g	kN/m ²	3,8x10 ⁶
	Yatay Aralık	S _h	m	1,60
	Donatı Uzunluğu	L _x	m	4,00-6,00
Püskürtme Beton	Normal Rijitlik	EA	kN/m	2,5x10 ⁶
	Eğilme Rijitliği	EI	kN/m ² /m	8333
	Eleman Kalınlığı	d	m	0,2
	Poisson Oranı	ν	-	0,2

Tasarım analizlerinde zemin profili 0,00 - 7,50 m arasında ileri derecede ayrılmış kumtaşı, 7,50 m'den daha derine doğru ise orta derecede ayrılmış kumtaşı olarak kabul edilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Projeye esas tasarımda kullanılan Mohr-Coulomb bünye parametreleri

Parametre	Sembol	Birim	Orta Derecede Ayrılmış Kumtaşı	İleri Derecede Ayrılmış Kumtaşı
Elastisite Modülü	E	MPa	417	40
Birim Hacim Ağırlık	γ	kN/m ³	26	21
Kohezyon	c	KPa	87	5
İçsel Sürtünme Açısı	φ	°	32	26
Poisson Oranı	ν	-	0,25	0,25

Mohr-Coulomb modeli analizinde, kaplamadaki maksimum yatay yer değiştirme değeri 2,00 cm ve duvar arkasında yerleştirilecek inklinometre konumunda maksimum yatay yer değiştirme değeri ise 1,59 cm olarak hesaplanmıştır.

2.3. Zemin Çivili Duvar Performansı

Zemin çivili destek sisteminin performansını belirlemek amacı ile duvar arkasına bir adet 12,50 m derinlikte inklinometre yerleştirilmiş ve 1-1' kesitine yakın, +146.00 kotunda bir adet zemin çivisi çekme deneyi yapılmıştır (Şekil 3).

2.3.1. Aletsel Gözlem

Aletsel gözlem, mühendislik yapılarının görsel olarak veya enstrümanlar yardımıyla izlenmesidir. Uygulama safhasında ortaya çıkan deformasyonların ölçülmesi, zemin destek sistemi güvenliği hakkında fikir edinmek açısından son derece önemlidir. Aynı zamanda uygulama safhasında, çivi çekme deneyi yapılarak zeminin aderans gerilmesi belirlenmelidir. Zemin çivili sistemlerin performanslarının izlenmesinde en sık kullanılan yöntem, sistemin yapmış olduğu yatay deformasyonların *inklometre* okumalarıyla belirlenmesidir (Dunnicliff, 1993). 1-1' kesitindeki inklinometrede maksimum yatay yer değiştirme değeri (u_x) 2,00 mm ölçülmüştür. Yatay yer değiştirme değerinin oldukça düşük ölçülmesi duvar performansının iyi durumda olduğu göstermekle beraber; tasarım analizlerinde elde edilen değerin çok altındadır.

Zemin çivisi çekme deneyi ileri derecede ayrılmış kumtaşı biriminde yapılmıştır. Serbest boy $L = 2,00$ m ve kök boyu $L = 4,00$ m olarak tercih edilmiştir. Nihai aderans gerilmesi, zemin-enjeksiyon arasındaki sürtünme tam olarak yenilemediğinden ölçülemediği görülmüştür. Ancak güvenli tarafta kalınarak, donatının akma yükünde zemin-enjeksiyon sıyrılması kabul edilebilir. Bu durumda, zemin-çivi aderans gerilmesi (q_{ult}) değeri minimum olarak kabul görebilmektedir. İleri derecede ayrılmış kumtaşı biriminde 31,0 ton eksenel yük altında zemin çivisi donatısı kopmuştur. Byrne vd., (1998), ileri derecede ayrılmış kumtaşı birimi için aderans gerilmesi (q_{ult}) değerini 75 kPa olarak belirlemişlerdir. Araziye yapılan deneyde $q_{ult} > 190$ kPa olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, deneyde elde edilen bağ kapasitesi değerleri, tasarıma esas projeden oldukça yüksektir.

2.4 Geri Analizlerle Tasarımın Gözden Geçirilmesi

Aletsel gözlem verileri, tasarım aşamasında kullanılan geoteknik parametrelerin olması gerekenden zayıf değerler olarak seçildiğini göstermektedir. Bu nedenle, aletsel gözlem sonuçları ile zeminin parametrelerinin uyumlu olması için geoteknik parametreler yeniden incelenmiştir. Öncelikle MC bünye modeli yerine kaya kütlelerinde daha çok tercih edilen Hoek-Brown (HB) bünye modeli tercih edilerek çalışmaya devam edilmiştir. HB bünye modelinde ise parametrik analiz yapılarak etkin parametre ortaya koyulmuştur. Etkin parametrenin jeomekanik sınıflama ile doğrudan ilişkisi olması nedeniyle; sınıflama değerleri tekrar incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile daha ekonomik bir tasarım ortaya koyabilmek amacıyla geometrik parametre analizleri yapılmıştır.

2.4.1. Hoek-Brown (HB) Bünye Modeli

Lineer elastik ve mükemmel plastik gerilme-şekil değiştirme ilişkisine sahip olan MC bünye modeli, kayanın maruz kalabileceği çok çeşitli gerilme seviyelerini hesaba katmamaktadır. HB bünye modeli kaya kütlelerinin tanımlanmasında daha üstün bir doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme ilişkisi tanımlamaktadır (Hoek & Brown, 2019). Bu nedenle, yeni tasarım HB bünye modeli ile yapılmıştır. HB bünye modelinin kayanın gerilme-şekil değiştirme ilişkisini belirlemesi için kaya kütlelerinin birim hacim ağırlık (γ), elastisite modülü (E), jeolojik dayanım indisi (GSI) ve kaya kütle katsayısı (m_i) parametreleri incelenmiştir.

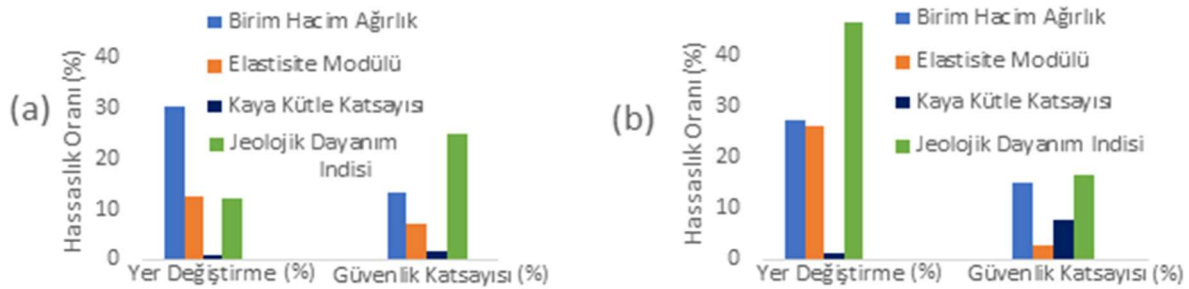
2.4.2. Hassaslık ve Parametre Analizi

Hassaslık çalışması yapılan her bir bünye parametresinin maksimum ve minimum sınırları için çözüm yapılmaktadır. Sert ve Önalp (2011) parametre analizlerinde n adet zemin özelliğinin olması durumunda 2^{n+1} adet modelin hepsinin çözümlenmesi gerektiği belirtilmiştir. Parametre ve hassaslık analizlerinde kullanılan değerler Tablo 5’de verilmiştir. Malzeme parametreleri farklı litolojiler için referans değer olarak ele alınmış, %25 mertebesinde artırılmış ve azaltılmıştır. Bir parametre değerinin değişiminin etkisinin yüzdesel olarak incelenmesi amacıyla diğer tüm parametreler sabit tutularak çözümlenmiştir; güvenlik katsayısı ve yer değiştirmeye etkisi incelenmiştir. Hassaslık analizi için orta derecede ayrılmış kumtaşı birimi ve ileri derecede ayrılmış kumtaşı biriminde HB bünye modeli kullanılarak $2 \times (2^3 + 1) = 18$ adet model oluşturulmuş ve etkileri ortalama % olarak gösterilmiştir (Şekil 4).

Tablo 5. Hoek Brown bünye modelinde kullanılan ayrılmış kumtaşı birimlerine ait parametreler

Parametre	Sembol	Birim	Orta Derecede Ayrılmış Kumtaşı	İleri Derecede Ayrılmış Kumtaşı
Birim Hacim Ağırlık	γ	kN/m ³	26	21
Elastisite Modülü	E	MPa	417	100
Kaya Kütle Katsayısı	m_i	-	17	13
Jeolojik Dayanım İndisi	GSI	-	36	25

İleri derecede ayrılmış birimin yer değiştirme değerine en çok etkiyi birim hacim ağırlık değeri yaparken; orta derecede ayrılmış birimin yer değiştirmesine en çok etkiyi GSI yapmıştır. GSI, ayrışma seviyesinden bağımsız olarak güvenlik katsayısı belirlemede en yüksek etkiye sahiptir. Sonuç olarak, ayrılmış kaya şevlerde yer değiştirme ve duraylılığın belirlenmesinde GSI değerinin etkili olduğu görüldüğünden, GSI değerleri yeniden gözden geçirilmiştir.



Şekil 4. Hassaslık analizleri (a) ileri derecede ayrılmış birim (b) orta derece ayrılmış birim

2.4.3. Jeolojik Gözlem ve Geomekanik Verilerin Analizi

Kaya şevlerin duraylılığına; kaya malzemesinin dayanımı, süreksizlik türü, süreksizlik aralığı, süreksizlik devamlılığı, süreksizlik yüzey pürüzlülüğü, ayrışma derecesi, yeraltı su durumu vb. özellikler etki eder. Zemin çivili destek sisteminde görülen aşırı performans nedeniyle GSI yeniden tanımlanmış ve HB bünye modeli ile yeni analiz yapılmıştır.

2.4.3.1 GSI Değerinin Belirlenmesi

Bienawski (1973) yılında Kaya Kütle Oranı (RMR) kaya sınıflama sistemini ortaya koymuştur. Tek eksenli basınç dayanımı, kaya kalite göstergesi (RQD), süreksizlik aralıkları, süreksizlik durumları ve yeraltı suyu bu sınıflama sisteminin parametreleridir. Hoek & Brown (2019) ise Jeolojik Dayanım İndisi (GSI) sınıflama sistemi ortaya koyulmuştur. Bienawski (1989) yılında RMR ve GSI değerleri arasındaki ilişkiyi tanımlamıştır.

$$GSI = RMR - 5 \quad (7)$$

RMR sınıflamasından yararlanılarak ileri derecede ayrılmış ve orta derecede ayrılmış kumtaşı birimlerinin RMR puanları ve Eşitlik 7 kullanılarak GSI değerleri belirlenmiştir (Tablo 6).

Tablo 6. RMR ve GSI puanları değerlendirilmesi

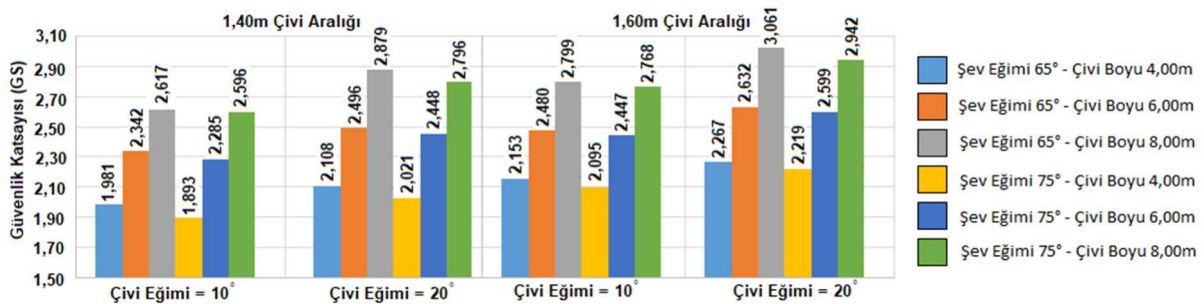
Parametre	İleri Derecede Ayrılmış Kumtaşı	Orta Derecede Ayrılmış Kumtaşı
Ort. q_u (MPa)	12	25
RMR Puanı	2	4
RQD (%)	0-25	25-50
RMR Puanı	3	8
Süreksizlik Aralığı (mm)	< 60	200-600mm
RMR Puanı	5	10
Süreksizliklerin Durumu	Fay dolgusu ve 1-5 mm açık eklemeler	Az kaba yüzeyler, ayrılma <1 mm, sert eklem yüzeyleri
RMR Puanı	10	15
Yeraltı Su Durumu	Nemli	Damlama
RMR Puanı	10	4
Toplam RMR Puanı	30	41
GSI Puanı (RMR-5)	25	36

2.5. Geometrik Parametre Analizi

Yeniden tasarlanan zemin çivili destek sistemi elemanların geometrik etkilerinin araştırılması amacıyla HB bünye modelinde 12 adet parametrik analiz yapılmıştır. Yapı elemanlarının geometrileri değiştirilerek zemin çivili sistemin güvenlik katsayısı değerindeki değişim incelenmiştir (Tablo 5). Tablo 7’de ise HB bünye modeli ile oluşturulmuş sayısal modelde kullanılan parametreler verilmiştir.

Tablo 7. Geometrik model varyasyonları

Şev Eğimi (°)	Çivi Aralığı (m)	Çivi Eğimi (°)	Çivi Boyu (m)
65-75	1,40-1,60	10-20	4,00-6,00-8,00

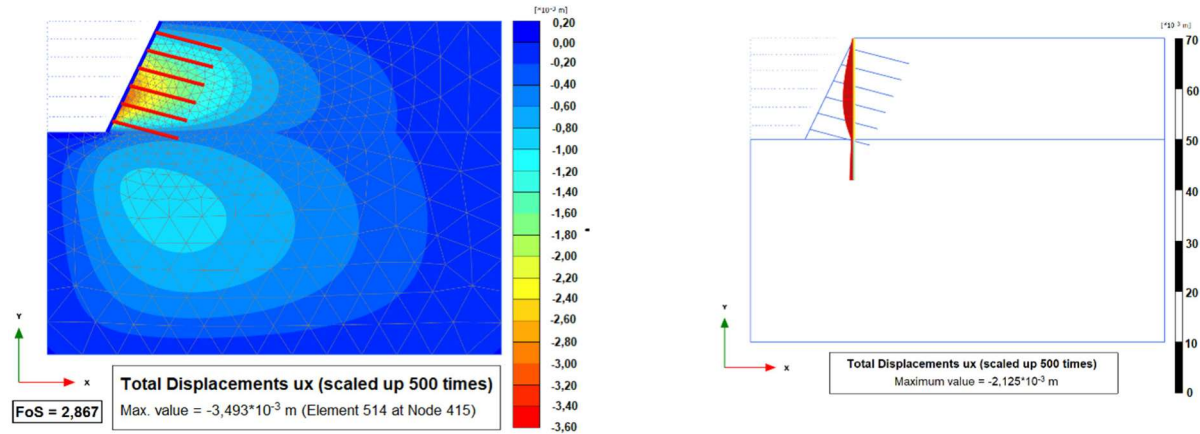


Şekil 5. Hoek-Brown bünye modelinde yapılan geometrik parametrik analiz sonuçları

Şekil 5’de verilen analiz sonuçlarında 65° eğimli şevlerde her koşulda en yüksek GS elde edilmiştir. Şev duraylılığına en çok eleman geometrisi çivi boyları olmuştur. Pham (2020), zemin çivisi eğim açısının en yüksek performansının 10-20° arasında olduğunu belirtmiştir. çivi eğimleriyle yapılan analizlerde 20° çivi eğimde GS değeri daha yüksektir. 1,60 m aralıklı çivilerin duraylılığı 1,40 m aralığa göre daha yüksek olduğu gözükmemektedir.

3. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Tasarım analizlerinde u_x değeri 1,59 cm ön görülmüş ve Byrne vd., (1998) tarafından önerilen ayrılmış kumtaşı q_{ult} değeri 75 kPa kabul edilmiştir. İnklinometre ölçümlerinde elde edilen u_x değeri 2,00 mm ve çekme deneyinden elde edilen q_{ult} değeri 190 kPa olarak hesaplanmıştır. Arazi ölçümlerinin, tasarım değerlerinden fazlasıyla düşük olması nedeniyle geoteknik parametreler yeniden değerlendirilmiştir. Bu amaçla kaya kütlelerinde daha yaygın kullanılan HB bünye modelinde hassaslık analizleri yapılarak, etkin parametrenin GSI değeri olduğu belirlenmiştir. Kaya kütlelerinin RMR puanlaması, arazi performans değerlerini referans alınarak tekrar yapılmış ve arazi sonuçlarına yaklaşılmaya çalışılmıştır. Çalışmada, yeni RMR/GSI değerleri belirlenmiş ve yeni GSI değeriyle oluşturulan HB bünye modeli parametreleriyle (Tablo 5) kesit 1-1’ analiz edilerek yatay yer değiştirmelerin derinlikle değişimi elde edilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Yeniden modellenen Kesit 1-1’ yatay yer değiştirme değerleri

Zemin çivili duvar tasarımında yapılan geometrik parametre sonuçlarına göre duraylılığı en çok etkileyen parametreler çoktan aza doğru; çivi boyları, çivi aralığı, şev eğimi ve çivi eğimi olarak sıralanmaktadır. Şekil 5’de verilen sonuçlara göre çivi eğimi 20°, çivi aralığı 1,60 m olmalıdır. Şev eğiminin 75° tercih edilmesinin duraylılığa olumsuz etkisi olsa da, kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir. Çivi boylarının, duraylılığı en çok etkileyen parametre olduğu görülmektedir. En kısa çivi boyu olan 4,00 m ile birlikte 65°’lik şevde 20° çivi eğimi ile yapılan tasarımda güvenlik katsayısı değeri 2,267 olarak belirlenmiştir. Şev eğiminin 75° tercih edilmesi durumunda 1,60 m aralıklı çivili sistemin güvenlik katsayısı 2,219 olarak belirlenmiştir. Geometrik analizlerde elde edilen yüksek GS değerleri göstermektedir ki; tasarımdaki çivi boylarının 6,00 m yerine 4,00 m tercih edilmesi ile, yeterli güvenliğe sahip şev duraylılığı daha ekonomik bir çözüm ile sağlanabilmektedir.

6. KAYNAKLAR

Babu, G., & Singh, V. (2010). Soil nails field pullout testing: evaluation and applications. International Journal of Geotechnical Engineering, 4(1), 13-21.

Beniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley, New York. 251 pages.

Byrne, R. J., Cotton, D., Porterfield, J., Wolschlag, C., & Ueblacker, G. (1998). *MANUAL FOR DESIGN AND CONSTRUCTION MONITORING OF SOIL NAIL WALLS (REVISED EDITION)*.

Durgunoğlu, H. T. (2008). Performance of deep soil nailed walls.

Hoek, E., & Brown, E. T. (2019). The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3), 445-463. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>

Juran, I. (1987). Nailed-soil retaining structures: design and practice. *Transportation Research Record*, 139-150.

Lazarte, C. A., Robinson, H., Gomez, J. E., Baxter, A., Cadden, A., Berg, R. R., & Berg, R. R. (2015). *Geotechnical engineering circular No. 7 soil nail walls-reference manual*. National Highway Institute (US).

Milligan, G. W. E., & Tei, K. (1998). The pull-out resistance of model soil nails. *Soils and Foundations*, 38(2), 179-190.

Özsoy, M. B. (1996). *Soil Nailing Design, Construction and Monitoring*. ogazici University. Institute for Graduate Studies in Science and Engineering.

Pham, N. T., Bing, P., & Nguyen, N. V. (2020). Study on the effect of some parameters of soil nails on the stability of vertical slopes. *Journal of Mining and Earth Sciences*, 61(6), 30-37. [https://doi.org/10.46326/JMES.2020.61\(6\).04](https://doi.org/10.46326/JMES.2020.61(6).04)

Pradhan, B. (2000). Study of pullout behaviour of soil nails in completely decomposed granite fill.

Schlosser, F. (1982). Behaviour and design of soil nailing. *Proc. of Int. Symp., Held at Asia Institute of Technology*, 399-419.

Schlosser, F., & Guilloux, A. (1981). Le frottement dans le renforcement des sols. *Revue Française de Géotechnique*, 16, 65-77.

Sert, S., & Önalp, A. (2011). Derin Kazılarda Hassaslık ve Parametre Değişimi Analizi. *Geoteknik Sempozyumu, ÇÜ, Adana*.

Yilmaz, S. (2000). Behaviour of soil nailed walls in different soil conditions. Master's Thesis. Fen Bilimleri Enstitüsü.