



Sarmal malzemeli granüler kolonların sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi Investigation of encased granular columns with finite element method

Can Erenson^{1,*} , Niyazi Uğur Terzi¹ 

¹ Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray, Türkiye

Özet

Granüler kolon uygulamaları, zemin taşıma kapasitesinin artırılmasında, sıvılaşmanın önlenmesinde ve stabilitenin sağlanmasında günümüzde yaygın kullanılan güçlendirme teknikleri arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, polyster ve ömrünü tamamlamış atık araç lastikleri ile sargılanmış taş ve kum kolonların geridolgunuz ortamda düşey yüklemeye altındaki deformasyon davranışları ve yük taşıma kapasiteleri deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Kolon stabilitesinin düşey yüklemeye altında bozulmasını engellemek amacıyla kullanılan sargılama materyallerinin göçme anındaki kritik davranışlarını ortaya koyan bu araştırmalar sonucunda, atıl halde bulunan araç lastikleri polyster sarmallı kolonlara göre daha düşük seviyelerde deformasyonlar göstermiştir. Diğer bir deyişle geridolgu malzemesinin bütüncül yapısını muhafaza etmek için kullanılan atık lastikler, taşıma kapasitesi artışında önemli bir rol oynamıştır. Bu uygulama, aynı zamanda geri kazanım açısından ömrünü tamamlamış lastiklere yeni bir kullanım alanı açmaktadır. Yapılan laboratuvar deneyleri ve bu deneyler ile benzer sonuçlar ortaya koyan analizler sonucunda, lastik sarmallı kolonlar, polyster sarmallı kolonlara göre 6 ile 12 kat arasında daha yüksek taşıma kapasitesine ulaşmışlardır.

Anahtar kelimeler: Atık lastikler, Granüler kolon, Nümerik analiz, Sarmal takviyesi, Sonlu elemanlar yöntemi

1 Giriş

Zemin iyileştirmenin en önemli amacı, zeminin mukavemet değerlerini artırmak, taşıma kapasitesinin yeterliliğini sağlamak ve stabiliteyi dengede tutmaya dayanmaktadır. Bunun için zemine tatbik edilen güçlendirme elemanlarının zeminle birlikte kompozit bir eleman halinde çalışması iyileştirme yöntemleri arasında yer almaktadır. Bu çalışmada söz konusu taşıma gücünün artırılması ve stabilitenin korunmasına yönelik olarak granüler kolonlar ve granüler kolonların bütüncül yapısının muhafaza edilmesi için uygulanan atık lastik ve polyster sarmalların etkisi araştırılmıştır. Her iki uygulamada da nihai sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda taşıma gücü yönünden büyük ölçüde olumlu sonuçlar alınmıştır.

Granüler zeminlerin taş ve kum kolonlar ile iyileştirilmesinde, sarmal içerisindeki kumlu ve çakıllı geridolgu malzemesinin tabakalar halinde sıkıştırılarak yerleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Uygulamalarda güçlendirme elemanı olarak taş ve kum kolon çevresine polyster esaslı geotekstil membran ile sarmal sargı yapılmıştır. Bu yöntemde, granüler kolonların taşıma gücü artırılmış olsa da granüler kolona sargılama işleminin uygulanması ve zemin ortamına yerleştirilmesi zor ve uzun sürmektedir. Diğer yandan, geotekstil ve benzeri sargılama

Abstract

Nowadays, reinforcement techniques applied with granular column applications are widely used in increasing soil bearing capacity, preventing liquefaction and providing stability. In this study, polyster encased granular columns and tire encased granular columns were tested under vertical loading without backfill. Deformation behavior and load bearing capacity of granular columns were investigated experimentally and numerically. In this research, the critical behavior of the encasement materials used to prevent the deterioration of column stability under vertical loading has been demonstrated and lower deformations were observed in tire encased columns than polyster encased columns. In other words, the waste tires provide the integrative structure of the backfill material and have played an important role in increasing bearing capacity. This application opens new usage areas for end of life tires in terms of recycling. As a result of the laboratory tests and numerical analyses that showed similar results with these experiments, the tire encased granular columns reached 6 to 12 times more bearing capacity than the polyster encased granular columns

Keywords: Granular column, Encasement, Finite element method, Numerical analysis, Waste tires

malzemelerin beraberinde getirdiği üretim ve işçilik giderleri sistemi daha yüksek maliyetli kılmaktadır. Bu bakımdan araştırmada, atık malzemelerin sargılama malzemesi olarak kullanılması hedeflenmiştir. Çevreci bir yaklaşımın gereği ile ömrünü tamamlamış atık araç lastikleri sarmal malzeme olarak kullanılması sağlanmıştır.

Atık lastikler pek çok şekilde parçalanarak geri kazanılmaktadır ancak bu materyalin depolanması, taşınması ve parçalanma işlemleri de bir maliyet getirdiği için lastiklerin bütüncül bir şekilde geri kazanılması da çalışmanın dikkat çekici diğer bir yönünü ortaya koymaktadır. Lastik içerisinde bulunan tel demetleri, kord bezi ve katmanlar kauçuk hamuruna ilave olarak yüksek dayanıklılık oluşturmaktadır. Bu bakımdan lastik içerisinde tabakalar halinde sıkıştırılmış kumlu ve çakıllı geridolgu malzemelerinin etriye prensibi gibi daha güçlü tutmasını sağlamıştır.

Granüler kolonların boydamca orta noktalarında dört farklı konumundan yanal deformasyonları potansiyometrik cetveller ile alınmıştır. Bu çalışmada düşey yüklemeler etkisinde laboratuvar deneylerinden elde edilen bu deplasmanlar aksel ve yanal olarak gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçların doğruluklarını değerlendirmek için ve deney sistemi ile yüklemeye koşulları ANSYS sonlu elemanlar

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: canerenson@aksaray.edu.tr (C.Erenson)

Geliş / Recieved: 30.06.2020 Kabul / Accepted: 25.11.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngmuh.760183

programı ile modellenmiştir. Daha sonra, nümerik ve deney sonuçları birbirleri ile kıyaslanmıştır.

Granüler kolonların kullanımı doğal zeminlerin iyileştirilmesinde ilk olarak 1800'lü yılların başlarında görülmektedir [1]. Taş kolon uygulamaları ise özellikle 1950'li yıllardan itibaren Avrupa'da 1970'li yıllarda ise Amerika'da görülmeye başlanmıştır. Olumsuz zemin koşullarının bulunduğu sahalarda inşa edilmesi hedeflenen yapıların zemin iyileştirmesinde beklenen zemin taşıma kapasitesinin altında kalınması durumunda granüler kolonların tercih edildiği pek çok uygulama literatürde bulunmaktadır. Bununla beraber taş kolon kesitinin zamana bağlı olarak veya proje yüklerinin üzerine çıktığı durumlarda bozulması, taş kolon çemberinin sargılamaya ihtiyacını doğurmuştur. Geotekstil sarmallı granüler kolonların sektöre dahil olması ile birlikte kayda değer taşıma gücü artışları izlenmiştir. Geotekstil sargılama elemanların geoteknik mühendisliğine sağladığı katkı tecrübi ve akademik yayınlarda biliniyor olmasına karşın zaman zaman maliyet ve uygulama açılarından dezavantajlı olabilmektedir. Bu bakımdan geleneksel sarmallı uygulamaların haricinde yeni bir yöntem olarak lastiklerin sarmal malzeme olarak kullanılması hem taşıma kapasitesi artışı hem de geri dönüşüm yönünden üstünlükler ortaya koymaktadır.

Yumuşak ve gevşek zeminlerin iyileştirilmesinde granüler kolon uygulamaları ile yaygın olarak karşılaşılmaktadır. Yapıdan aktarılan yüklerin projede belirlenen şekilde taşınmaması durumunda zemin taşıma gücünün artırılmasında, oturma sorunlarının giderilmesinde sivilaşan veya mukavemetini kaybeden zeminlerin stabilitesinde söz konusu bu yöntem oldukça etkili sonuçlar vermektedir.

İki farklı tür sargılama malzemesi ile donatılmış taş ve kum kolonların düşey yükleme altındaki kısalmaları ve kolon orta noktalarının yanal doğrultuda genişlemeleri mekanik ve fotogrametrik yöntemlerle belirlenebilmektedir [2]. Ancak güçlendirme elemanlarının farklı koşullardaki zemin ortamları içerisindeki davranışının belirlenebilmesi için geridolgu ile sarmal malzemenin modellenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Düşey yükleme altında deformasyona maruz kalan kolon özellikle zeminin en gevşek bölgesinde ayrışma gösterme eğiliminde bulunmaktadır. Geridolgunun ve takviye sarmal malzemesinin davranışının incelenmesi bu sebepten dolayı önem taşımaktadır. Granüler malzemenin ayrışma bölgelerinin ve büyüklüğünün belirlenmesi, geotekstil kökenli granüler kolon sarmal takviyelerinin zorlanma bölgelerinin belirlenmesi için ise sonlu elemanlar programlarından yararlanılmaktadır. Literatürde, granüler kolonların nümerik yöntemler ile incelendiği pek çok çalışma bulunmaktadır. Özellikle taş kolonların güçlendirilmesinde sayısal modellemenin önemine dikkat çeken bir çalışmada modelleme tekniklerinin 2D ve 3D koşullarda nasıl uygulanacağına yönelik araştırmalarda bulunmuşlardır [3]. Araştırmacılar çalışmalarında, Plaxis 2D ve 3D, DIANA, EXAMINE, ZSoil, ABAQUS, ANSYS, NISA, GEOSTUDIO, CRISP, TOCHNOG, CESAR, GEOFEM 2D ve 3D, FLAC, FLAC 3 gibi pek çok yazılımın

taş kolon uygulamalarında yaygın olarak kullanıldığını vurgulamışlardır. Çalışmada aynı zamanda, sonlu elemanlar ile modelleme yapılırken model iç kuvvet dengelerinin sağlanmasının, farklı bölgelerde oluşan deplasmanların uyumluluğunun, materyaller üzerinde oluşan gerilmelerin gerçeği yansıtmasının ve sınır koşullarının dikkate alınmasının önemi de belirtilmiştir.

Öte yandan, taş kolonların modellenmesi üzerine beş ana yaklaşımın bulunduğunu ileri sürülmüştür [4]. Bunlardan birincisi, eksenel simetrik olarak tek bir kolonu çevreleyen zemin modeli ile kullanılan birim hücre modelidir [5]. Van Impe ise 1983 yılında düzlem gerilme durumunda çok sayıdaki kolonun sürekli yükleme altındaki davranışını modelleyerek bir yöntem geliştirmiştir [6]. Bu metodun dışında, silindirik kolonlar yerine ringler halinde bir modelleme yapılarak da başka bir eksenel simetri durumunda teknik kullanılmıştır [7]. Homogenization (homojenleştirme) adı verilen diğer bir modelleme tekniğinde ise Gáb vd. 2008 yılında, zemin ve taş kolon modelini kompozit zemin parametrelerini ele alarak kullanmıştır [8]. Bu dört metod 2D olarak değerlendirilirken beşinci modelleme tekniği olarak vurgulanan "Full 3D" modelde ise sistem kompleks halde değerlendirilerek üç boyutlu analizler yapılmıştır [9]. Bu araştırmalar sonucunda, geleneksel taş kolon uygulamalarında analizlerin modellemeye uyumu açısından Castro 2017 yılında, birim hücre metodunun oturma ve konsolidasyonun analizinde uygun olup stabilite problemlerinde uygun olmadığını; düzlem gerilme modelinin ve homojenleştirme metodunun kullanıldığı çalışmalarda oturma, konsolidasyon ve stabilite problemlerinde kısmen uygun olduğunu ve 3D modelin kullanıldığı araştırmalarda oturma, konsolidasyon ve stabilite problemleri açısından tamamen uygun olduğunu ortaya koymuştur [10].

Zemin modelleri açısından ise literatürde ortam koşulları ve problem türüne göre farklı modeller kullanılabilmektedir. Kaynaklarda, vibro-replacement (vibro yer değiştirme) metodu ile oturmaların azaltılmasına yönelik çalışmalarda Mohr-Coulomb (MC) zemin modeli [11], geogrid sarmallı taş kolonların davranışlarının incelendiği bir başka çalışmada killi zemin ortamı için Soft Soil (SS, yumuşak zemin) modeli ve kumlu zemin ortamı için Hardening Soil (HS, pekleşen zemin modeli) kullanılmıştır [12].

Yanal destekli yüksek rijitlikteki geosentetik malzeme ile sargılanmış taş kolon davranışının nümerik olarak incelendiği bir çalışmada araştırmacılar, taş kolon deformasyon davranışlarını etkileyen, geosentetik malzemenin rijitliği, geridolgu malzemesinin kayma mukavemeti parametrelerinin etkinliği, kolon çapı ve yanal zemin itkisi gibi parametreleri ABAQUS programında modellemişlerdir ve parametrelerin stabilite üzerindeki etkinliklerini belirlemişlerdir [13]. ANSYS sonlu elemanlar programı ile modelleme yapılan çalışmalar da literatürde bulunmaktadır. Bu kapsamda, karayolu dolgusunun tasarımında taş kolonlar ile güçlendirilmiş kesitin davranışı [14] ve karayolu tasarımında taş kolon uygulamaları ile tabaka kalınlıklarının azaltılmasına yönelik optimizasyonu incelenmiştir [15]. PLAXIS programında 2D ve 3D analizinin farkının araştırıldığı bir başka çalışmada ise

parametrik ve modelsel farklılıkların olmasına rağmen göçme modu ve deformasyon davranışında benzerlikler gözlemlenmiştir [16]. Buna benzer olarak modellerin simule edildiği başka çalışmalarda literatürde yerini almaktadır [17, 18].

Yapılan laboratuvar çalışmaları ve literatür taraması kapsamında elde edilen veriler ışığında bu çalışmada, geridolgunsuz ortamda düşey yüklemeye maruz, atık lastik ve polyester sarmallı taş ve kum kolonların ANSYS programı ile deformasyon davranışı incelenmiştir. 3D olarak modellenen yapılan çalışmada, granüler kolonların deformasyon davranışları konum sensörleri ve fotogrametrik veriler ile örtüşmektedir. Ayrıca, polyester sarmallı taş kolonların nihai yüklemeye altındaki davranışı ve göçme bölgesi de program çıktıları ile benzer sonuçlar göstermiştir. Bu bakımdan, güçlendirme elemanı ve zemin ortamının doğru modellenmesi, tasarım, maliyet ve taşıma gücü kapasitesinin belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada esas olarak, sarmal malzemelerin granüler kolonun taşıma kapasitesine etkisi ve tekstil kökenli sarmalın göçme davranışı üzerine durulmuştur.

2 Materyal ve metot

Laboratuvar deneyleri, 60 cm çaplı 150 cm yükseklikli granüler kolonlar üzerine düşey yüklemeye yapılarak gerçekleştirilmiştir. Tatbik edilen yük etkisinde granüler kolonlara sargılanmış her bir numune üzerinden konum sensörleri ile deplasmanlar okunup kaydedilmiştir ve nihai taşıma kapasitesine erişene kadar göçme paternleri belirlenmiştir. Bununla birlikte, eş zamanlı olarak, düşey yönde potansiyometrik cetveller yardımı ile granüler kolonların düşey yönde şekil değiştirmesi (eksenel oturma) de iki farklı noktadan ölçülmüştür. Düşey yüklemeye, 25 mm kalınlıklı rijit bir yüklemeye plakası üzerine hidrolik krikolar vasıtasıyla aktarılmıştır ve yüklemeye verileri yük hücreleri yardımıyla veri toplama ünitesinde kaydedilmiştir. Deneyler sonucunda, yük hücreleri ve potansiyometrik cetvellerden okunan veriler, bilgisayar ortamında yük deplasman ilişkilendirmeleri yapılarak yorumlanmıştır. Bu bağlamda, davranışa ait yorumlamalar sonuçlar doğrultusunda değerlendirilerek atık lastik ve polyester sarmalların etkinliği ortaya koymuştur.

Deneylerde kullanılan materyallerin mühendislik özellikleri ve deney sistemi içerisindeki yerine ait bilgiler ise aşağıdaki gibi verilmiştir.

2.1 Geridolgu malzemesi

Granüler kolonlarda geridolgu malzemesi olarak iki farklı malzeme kullanılmıştır. Bunlardan birincisi Kırşehir bölgesinden temin edilen Kızılırmak dere kumudur. Bu kum, bünyesindeki danelerin pek çok kum türüne kıyasla daha homojen yapıda olması sebebiyle tercih edilmiştir. Böylelikle, kolon içerisine sıkıştırılarak yerleştirilen kumun, granüler kolonun her tarafında eşit veya benzer karakteristik göstermesi beklenmektedir.

Kumun mühendislik parametreleri elek analizi ve üç eksenli basınç deneyleri ile belirlenmiş olup Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Kırşehir Kızılırmak kumu mühendislik parametreleri

Parametre	Değer
İçsel Sürtünme Açısı (ϕ)	25°
Kohezyon (c)	0 kPa
Kuru Birim Hacim Ağırlık (γ_k)	15.05 kN/m ³
Zemin Sınıfı (USCS)	SP

Diğer geridolgu malzemesi ise 19 mm çaplı agregalardan seçilmiştir. Yükleme sonrasında agregaların aşınmaya bağlı olarak dane dağılımı değiştiği için her deneyde eşdeğer özellikte agregalar kullanılmıştır. Uniformluk katsayısı (c_u) yaklaşık 1 olarak belirlenmiş agregalar üzerinde yapılan deneyler sonucu elde edilen mühendislik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

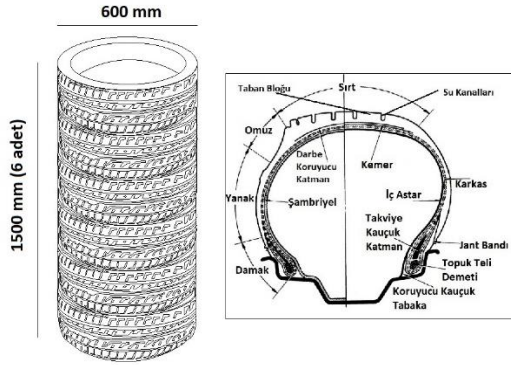
Tablo 2. Ortalama 19 mm çaplı agregaların mühendislik parametreleri

Agrega Özellikleri	Değer
Aşınma Oranı	%33
Kohezyon (c)	0 kPa
Metilen Mavisi	0.5 (temiz)
Zemin Sınıfı (USCS)	GP

2.2 Atık araç lastikleri

Tamamı ömrünü tamamlamış atık lastiklerden oluşan sargılama malzemeleri Aksaray Organize Sanayi Bölgesi’nde ve çevresindeki depolama tesislerinden temin edilerek kullanılmıştır. Lastiklerin seçiminde kalite bazında sadece, her biri yaklaşık aynı çapta (60 cm) olacak şekilde birbirlerinden ayrılan malzemelerden 15 ve 16 inç araç lastiklerinde lastik bütünlüğünü bozacak olan yırtık veya kopukluk bulunmamasına dikkat edilmiştir. 150 cm yüksekliğine ulaşana kadar her bir lastik 10’ar cm’lik tabakalar halinde sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Atıl araç lastiklerinin üst üste diziliminde yerleşim aksının sağlanması için her bir adımda su terazileri kullanılarak yüklemenin eksenel olması sağlanmıştır.

Bütüncül yapıyı muhafaza etmesi için kullanılan atık lastiklerin yatay eksenindeki deplasmanlarına karşı direnç lastiğin yol ile temas eden sırt kısmı tarafından karşılanmaktadır. Esasen üretim amacına yönelik, araç lastiklerinin temel görevleri, yuvarlanma direnci, aerodinamik kuvvetler, iç sürtünme kuvvetleri, yokuş anı yerçekimi kuvveti ve hızlanma esnasındaki eylemsizlik kuvvetlerini karşılamaktır. Karayollarında bu kuvvetlere maruz kalan lastiklerin tasarımında kullanım ömrü ortalama beş yıl olarak belirlenmektedir. Lastikler ulaştırma bakımından her ne kadar araçlar üzerindeki etkinliğini bu sürede yitirse de bünyesinde bulunan katmanlar, çelik teller, kord bezi vb. elemanlardan dolayı mukavemetini uzun süre korumaktadır. Bu çalışmada, düşey yüklemeye altındaki granüler kolonlara etkiyen yükler doğrultusunda geridolgu malzemesinin yanal açılmasını minimize etmek amaçlı atık araç lastikleri kullanılmıştır. Tatbik edilen düşey yüklemenin altında yanal deplasmanları engelleyen kesit ve lastiğin bölgeleri Şekil 1’deki gibidir.



Şekil 1. Lastik dizilimi ve kesiti

Ayrıca, saha uygulamalarında ve özellikle sıvılaşma potansiyeli yüksek zemin profiline sahip bölgelerde mevcut yeraltı suyunun düşey yöne ek olarak yatay yönde de drenajının büyük önem taşımasından dolayı özellikle atık lastik sarmallı sisteme drenaj kanallarının açılması önerilmektedir.

2.3 Polyester

Çalışmada sarmal olarak kullanılan diğer bir materyal olan polyester, yüksek mukavemetli branda olarak bilinen PVC kaplı bir tekstil malzemedir. Yüksek dayanımlı polyester iplikten dokunmuş kumaşlar da yine aynı şekilde her 10 cm'de bir sıkıştırılarak yükseltilmiştir. Sarmal olarak kullanılan bu malzeme tekstil malzemeler arasında ürün özellikleri ve dokunma biçiminden dolayı kumaş türlerine göre daha dayanıklı ve uzun ömürlüdür. Yüksek yırtılma ve kopma dayanımına sahip bu tekstil malzemenin bir diğer üstünlüğü de yüksek sıcaklık ve soğuk iklim koşullarında kullanılabilmesidir. 1100 DTX türü yüksek mukavemetli polyester iplik kumaştan dokunmuş tekstil malzemenin mühendislik özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Polyester sarmalın teknik özellikleri

Özellik	Değer
Kalınlık (mm)	0.45
Ağırlık (gr/m ²)	650
Kaplama	PVC
Atkı Dokuma Sıklığı (adet/cm)	8
Çözgü Dokuma Sıklığı (adet/cm)	8
Doku Şekli	1/1 Bez Ayağı
Kaynak Yapma	EF Kaynağına Uygun
Atkı Kopma Mukavemeti (kg/5 cm)	220
Çözgü Kopma Mukavemeti (kg/5 cm)	300
Su Geçirmezlik (mm/ss)	1000
Isıya Dayanıklılık	+70 ⁰ C
Soğuğa Dayanıklılık	-30 ⁰ C
Yapışma (N/5 cm)	90
Işık Haslığı	5 - 6

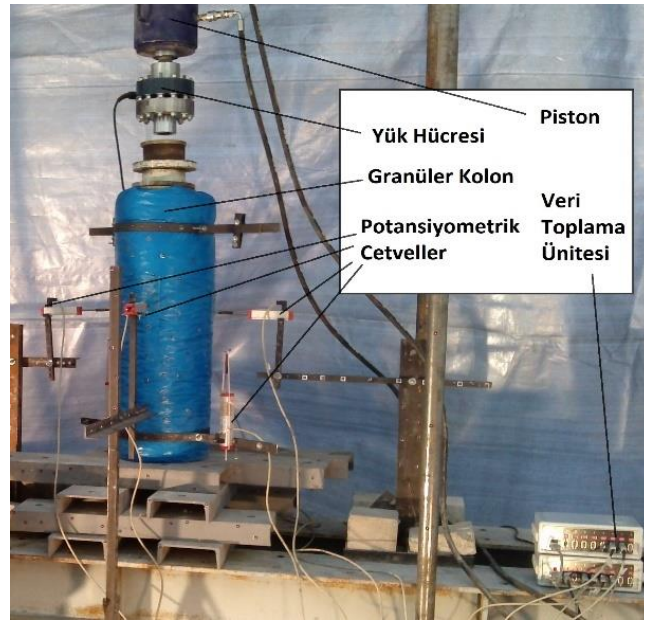
Sarmal malzeme olarak kullanılan ömrünü tamamlamış atık araç lastikleri ve polyester malzemelerinin sistem içerisindeki görünümü Şekil 2'de görüldüğü gibidir.



Şekil 2. (a) Polyester sarmallı (b) lastik sarmallı granüler kolon

2.4 Yükleme, ölçüm düzeneği ve veri toplama ünitesi

Kademeli düşey yüklemeler hidrolik krikovasıyla yükleme plakasına iletilmektedir. Plaka ile piston arasında bulunan yük hücresi saniyede dört adet olacak şekilde veri toplama ünitesine veri akışında bulunmaktadır. Yüklemeler, her kademede deplasmanlar sabitlendikten sonra bir sonraki aşamaya geçerek sürdürülmüştür. Eş zamanlı olarak granüler kolonların dört bir tarafının orta noktalarından potansiyometrik cetveller ile yanıl deplasman okumaları alınmaktadır. Aynı zamanda, granüler kolonların üzerine kurulan bir ölçüm düzeneği ile iki yandan düşey deplasman verileri de toplanmaktadır. Veriler grafikler ve tablolar üzerinden değerlendirilerek yük deplasman ilişkilendirmeleri yapılmaktadır. Yükleme ve ölçüm düzeneği ile veri toplama ünitesi Şekil 3'te verilmiştir



Şekil 3. Deney sistemi

3 Bulgular ve tartışma

Analizlerde gerçek sarmal ve taş kolon davranışının yansıtılabilmesi için dolgu – sarmal ara yüzey tanımlamaları, malzeme özelliklerinin atanması, mesnet ve sınır koşullarının belirlenmesi ve yükleme koşullarının birebir olarak programa aktarılmasına dikkat edilmesi gerekmektedir [19-22]. Bu kapsamda program girdileri Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Program girdileri

Atık Lastik Sarmal	Elastisite Modülü	40 MPa
	Poisson Oranı	0.43
	Yoğunluk	1150 kg/m ³
PVC Sarmal	Elastisite Modülü	15 MPa
	Poisson Oranı	0.41
	Yoğunluk	1444 kg/m ³
Dolgu – Sarmal Arayüzey Kontaktı		Sürtülmeli
Granüler Kolonların Mesnet Koşulu		Ankastre
Yükleme		Kademeli

3.1 Laboratuvar deney sonuçları

Laboratuvar deney sonuçları doğrultusunda elde edilen yük-deplasman verileri Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Deney sonuçları

Deney	Nihai Yük (kPa)	Düşey Deplasman (mm)	Yatay Deplasman (mm)	Düşey Dep./ Yatay Dep.
Lastik Sarmallı Taş Kolon	555	78	7	11.14
Polyester Sarmallı Taş Kolon	88	35	25	1.40
Lastik Sarmallı Kum Kolon	749	48	3	16.00
Polyester Sarmallı Kum Kolon	28	81	23	3.52

Tablolarda belirtilen düşey ve yatay deplasman değerleri nihai yüklemeler altında oluşmuşlardır. Bu yük değerleri, lastik sarmallı granüler kolonlarda %3 kısalma gözlemlenene kadar, polyester sarmallı kolonlarda ise tekstil malzeme yırtılana kadar olacak şekilde uygulanmıştır.

Çakıl geridolgu kullanılan deneylerde, agregalarda göçme limitine ulaşmadan önce ciddi oranda kütle kaybı gözlemlenmiştir. Deney sonrası yapılan gözlemsel incelemelerde, agregaların pürüzlülüklerin büyük ölçüde kaybolduğu izlenmiştir. Bu da sarmal malzemelerin yüksek dayanımını açıkça ortaya koymaktadır. Diğer bir yandan nihai yükleme altında, polyester sarmallı kum kolon

deneylerinde yırtılma sonucu, lastik sarmallı kum kolon deneylerinde ise üstten 3. ve 4. lastiklerin arasında oluşan ayrılma sonucu stabilite bozuklukları gözlemlenmiştir.

3.2 ANSYS Program Çıktıları

ANSYS sonlu elemanlar program çıktıları doğrultusunda elde edilen yük-deplasman verileri Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. ANSYS program çıktıları

Deney	Düşey Deplasman (mm)	Yatay Deplasman (mm)	Düşey Dep./ Yatay Dep.
Lastik Sarmallı Taş Kolon	73.29	8.66	8.46
Polyester Sarmallı Taş Kolon	44.13	33.83	1.30
Lastik Sarmallı Kum Kolon	47.65	4.56	10.45
Polyester Sarmallı Kum Kolon	102.86	16.75	6.14

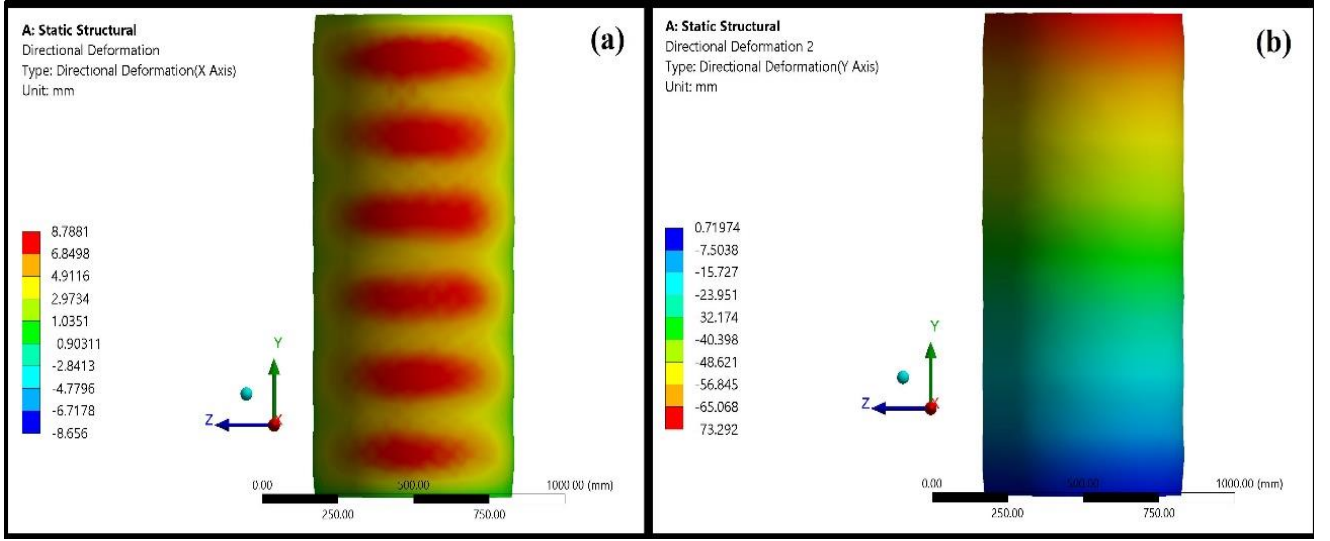
Bu doğrultuda, deney sonuçları ile analizler karşılaştırıldığında yaklaşık sonuçlar ve benzer davranışlar gözlemlenmektedir. Buna bağlı olarak bu çıkarımlar, çalışmanın hedefleri arasında yer alan deformasyon büyüklerinin ve zorlanan bölgelerin bilgisayar ortamında belirlenmesi amacını desteklemektedir. Bu kapsamda düşey yük tatbik edilen granüler kolonların yatay ve düşey yöndeki deplasman kontürleri Şekil 4, 5, 6 ve Şekil 7’de görülmektedir.

Analizler, deneysel veriler ile davranış bakımından yaklaşık, deformasyon büyüklükleri açısından yaklaşık sonuçlar ortaya koymaktadır. Polyester sarmalın her iki geridolgu malzemesi için maksimum zorladığı bölge, deneysel verilerde de olduğu gibi kolon orta kısımlarının yaklaşık 20 – 25 cm üzerinde görülmektedir. Ayrıca, lastik sırt ve yanak bölgeleri arasındaki takviye katmanların, kuşakların ve tellerin granüler kolonlara kazandırdığı katkılar Şekil 4 ve 5’te görülmektedir. Çalışmaya ait gözlemlenen bazı göçme limitleri ise Şekil 8’de gösterildiği gibi meydana gelmiştir.

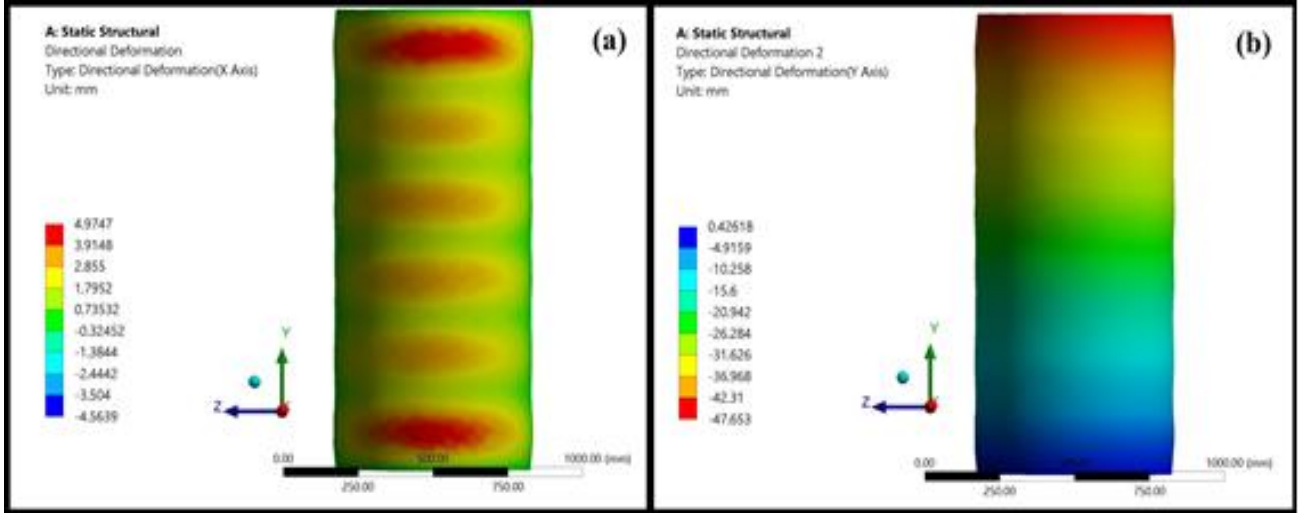
4 Sonuçlar

Bu çalışmada, geleneksel granüler kolon uygulamalarında yeni bir bakış açısı olarak atık lastiklerin geri kazandırılarak sarmal etkisinde incelenmesi araştırılmıştır. Atık lastiklerin depolama, parçalama ve maliyet bakımından olumsuz yönlerini ortadan kaldırmaya yönelik yeni bir kullanım alanının açılması ve güçlü bir sarmal malzeme temin edilmesi çalışmanın iki temel amacını yansıtmaktadır.

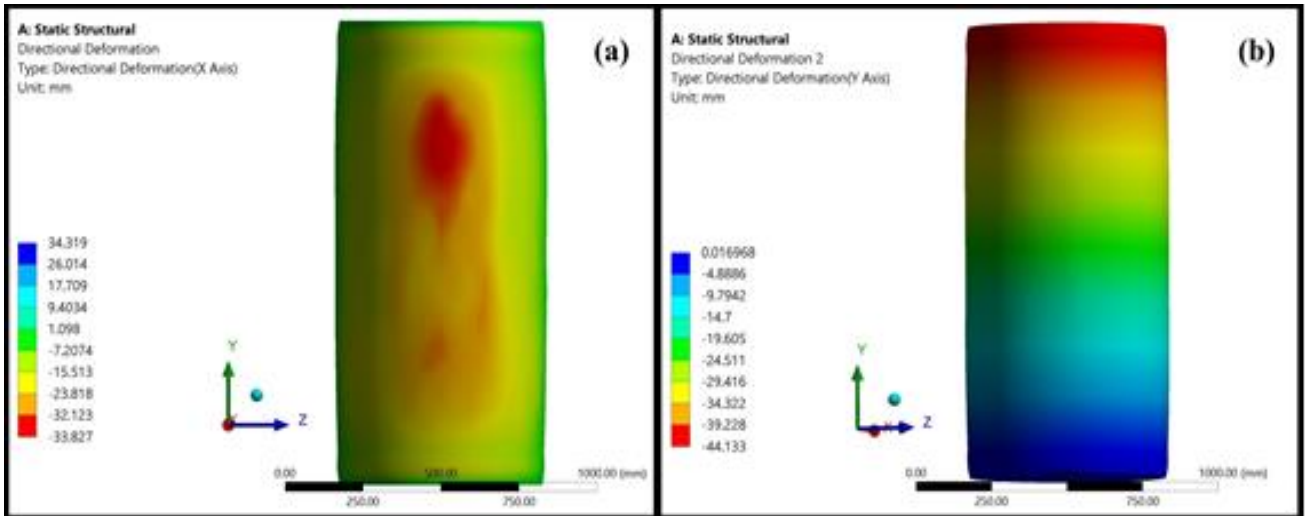
Deneysel çalışmalarda atık lastikler parçalanmadan bütüncül bir yapıda kullanılmıştır. Nümerik analizler ile



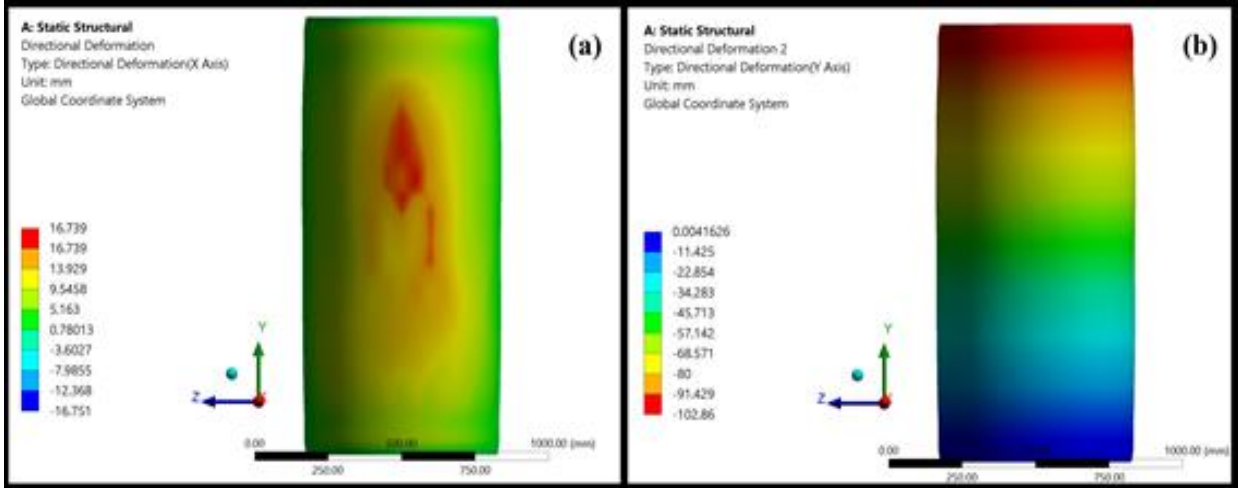
Şekil 4. Lastik sarmallı taş kolon (a) yatay, (b) düşey deplasman kontürleri



Şekil 5. Lastik sarmallı kum kolon (a) yatay, (b) düşey deplasman kontürleri



Şekil 6. Polyester sarmallı taş kolon (a) yatay, (b) düşey deplasman kontürleri



Şekil 7. Polyester sarmallı kum kolon (a) yatay, (b) düşey deplasman kontürleri



Şekil 8. Nihai yükleme anında polyester sarmallı granüler kolonlarda göçme anı

uyumlu olarak elde edilen ve davranışı yansıtan deney sonuçlarına göre, taş kolon agregalarını çepeçevre saran lastik malzemesi ile birlikte yanal deformasyonlara karşı ilave bir rijitlik kazanıldığı açıkça gözlemlenmektedir.

Atık araç lastikler ile sargılanmış tüm granüler kolonlarda yaklaşık 600 kPa gibi yüksek taşıma kapasiteleri elde edilmiştir. 19 mm çaplı agregalı geridolgu malzemesi kullanılan deneylerde atık lastik sarmallı taş kolon, polyester sarmallı taş kolona göre 6.3 kat daha yüksek taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Kum kolon deneylerinde ise atık lastik sarmallı kolon, polyester sarmallı kolona kıyasla 11.3 kat daha fazla taşıma kapasitesi değerine ulaşmıştır.

Diğer bir yandan, atık lastik sarmallı granüler kolon deneylerinde yükün boşaltılmasının ardından kolon ilk haline dönebilmektedir. Ancak, polyester sarmallı kolonlar nihai yükleme sonunda beklenildiği üzere yırtılarak göçmüşlerdir. Lastiklerin kendinden beklenen elastik şekil değiştirme özelliklerini kolon davranışına aktarmış olmaları önemli bir çıkarımdır. Bu durum hem plastik davranışları kontrol altına alırken hem de kolonun sünekliğini ve kesit bütünlüğünü sağlamıştır.

Analiz sonuçları ve deney sonuçları incelendiğinde, düşey yükleme altında farklı geridolgu ortamlarının sıkıştırılarak yerleştirildiği lastik sarmallı granüler

kolonlarda, kum geridolgu malzemeli kolon çakıl geridolgu malzemeli kolona oranla 1.35 kat daha fazla taşıma kapasitesi göstermiştir. Polyester sarmallı deneylerde ise çakıl geri dolgu malzemeli kolon kum geridolgu malzemeli kolona kıyasla 1.33 kat daha fazla taşıma kapasitesine erişmiştir. Ayrıca, atık lastik sarmallı analizlerde, polyester sarmallara kıyasla taş kolonda %40, kum kolonda %54 daha az aksel kılma (oturma) değerleri elde edilmiştir.

Çalışmanın nihai hedefi atık lastiklerin zemin iyileştirme alanında değerlendirilerek geri dönüşüme katkı sağlaması yolunda bir kapı açmaktır. Sonraki çalışmalarda bu yöntemin uygulanabilirliği ve muhtemel sakıncalarına yönelik araştırmaların sürdürülmesi amaçlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmada desteklerinden dolayı Aksaray Üniversitesi BAP (Bilimsel Araştırma Projeleri) Koordinasyon Birimi'ne (2015-086) teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 16

Kaynaklar

- [1] R. D. Barksdale, and R. C. Bachus, Design and Construction of Stone Columns. Federal Highway Administration, USA, 1983.
- [2] C. Erenson, Atık lastiklerin taş/kum kolon uygulamalarında kullanılmasının deneysel olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.
- [3] A. Zukri, and R. Nazir, Numerical modelling techniques of soft soil improvement via stone columns: A brief review. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 342 (1), 2018.
- [4] J. Canizal, A. Cimentada, A. Da Costa, M. Miranda, and C. Sagasetta, Theoretical analyses of laboratory tests of kaolin clay improved with stone columns. ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement, 3, pp. 373–81, Brussels, Belgium, 2012.
- [5] N. P. Balaam, and J. R. Booker, Effect of stone column yield on settlement of rigid foundations in stabilized clay. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 9, pp. 331–51, 1985. <https://doi.org/10.1002/nag.1610090404>.
- [6] W. Van Impe, Improvement of settlement behaviour of soft layers by means of stone columns. In Proceedings, 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering: Improvement of Ground, 1, pp. 309-312, 1983.
- [7] H. A. Elshazly, D. H. Hafez, and M. E. Mossaad, Reliability of conventional settlement evaluation for circular foundations on stone columns. Geotechnical and Geological Engineering, 26, 323, 2008. <https://doi.org/10.1007/s10706-007-9169-9>.
- [8] M. Gäb, H. F. Schweiger, D. Kamrat-Pietraszewska, and M. Karstunen, Numerical analysis of a floating stone columns foundation using different constitutive models. Geotechnics of Soft Soils - Focus on Ground Improvement, CRC Press, London, 2008.
- [9] T. M. Weber, S. M. Springman, M. Gäb, and V. Racansky, Numerical modelling of stone columns in soft clay under an embankment. pp. 305–11, 2009. <https://doi.org/10.1201/9780203883334.ch39>.
- [10] J. Castro, Modeling stone columns materials. Materials, 10-782, 2017. <https://doi.org/10.3390/ma10070782>.
- [11] J. Pivarc, Stone columns – determination of the soil improvement factor. Slovak Journal of Civil Engineering, 19, 17–21, 2011. <https://doi.org/10.2478/v10189-011-0014-z>.
- [12] J. Gniel, and A Bouazza, Predicted site behaviour of geogrid encased stone columns. Australian Geomechanics, 44, pp. 11–16, 2009.
- [13] M. Khabbazian, V. N. Kaliakin, and C. L. Meehan, Numerical study of the effect of geosynthetic encasement on the behaviour of granular columns. Geosynthetics International, pp. 132-143, 2010. <https://doi.org/10.1680/gein.2010.17.3.132>.
- [14] A. H. K. Al-Shukur, and H. N. Al-Khafajy, Effect some parametric on optimum design of highway embankment with stone columns. Journal University of Kerbala, 15 (2), pp. 192-205, Scientific, 2017.
- [15] A. H. K. Al-Shukur, and H. N. Al-Khafajy, Optimum design for highway embankment with stone column. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), 8 (1), pp. 863–872, 2017.
- [16] N. K. Shien, Numerical study of floating stone columns. Ph.D. Thesis, National University Of Singapore, 2013.
- [17] A. P. Ambily, and S. R. Gandhi, Behavior of stone columns based on experimental and FEM analysis. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133, 405–15, 2007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10900241\(2007\)133:4\(405\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900241(2007)133:4(405)).
- [18] J. K. Mitchell, and T. R. Huber, Performance of a stone column foundation. Journal of Geotechnical Engineering, 111 (2), 205-223, 1985. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339410\(1985\)111:2\(205\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339410(1985)111:2(205)).
- [19] T. Giurgiu, F. Ciortan, and C. Pupaza, Static and transient analysis of radial tires using ANSYS. Recent Advances in Industrial and Manufacturing Technologies, 2012.
- [20] T. Hiyake, Automotive Design: Advanced Nonlinear Simulation. Ix (2), Ansys, 2015. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)10970207\(19980815\)42:7<1279::AID-NME437>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/(SICI)10970207(19980815)42:7<1279::AID-NME437>3.0.CO;2-I).
- [21] Y. Başar, and M. Itskov, Finite element formulation of the Ogden material model with application to rubber - like shells. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 42 (7), 1279-1305, 1998. <https://doi.org/10.1177/0954407015590018>.
- [22] J. M. Conradie, P. S. Els, and P. S. Heyns, Finite element modelling of off-road tyres for radial tyre model parameterization. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Automobile Engineering, 230 (4), 564-578, 2016. <https://doi.org/10.2346/1.2137519>.

