

HOROSAN HARCİ KULLANILARAK YAPILAN MODEL KEMERİN PERFORMANSININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK BELİRLENMESİ

Recep KANIT, Nihat Sinan IŞIK
Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü
06500 Teknikokullar, ANKARA

ÖZET

Ülkemizde Selçuklular ve Osmanlı dönemlerinde inşaa edilen ve değişik dönemlerde restorasyonları yapılarak halen kullanılmakta olan birçok tarihi yapı bulunmaktadır. Bu yapıların tarihsel değerlerini koruyabilmeleri için restorasyonlarının aslına uygun elaman ve malzemelerle yapılması gerekmektedir. Bu sebeple restorasyon çalışmalarında orjinal yapıya uyan malzemeler kullanılmalı ancak malzemelerin performansı da yeterli olmalıdır. Bu çalışmada Türkiye Cumhuriyeti Vakıflar Genel Müdürlüğü (T.C.V.G.M.) tarafından tarihi yapıların restorasyon çalışmalarında kullanılan Horosan harcının mekanik özellikleri incelenmiş ve kemerlerdeki performansı model bir kemer ve sayısal analizler kullanılarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar: hem model deney, hem de sayısal analizler, Horosan harcının bu tarihi yapılarda açıklık geçme elemanı olarak yapılan kemerlerde kullanıldığında başarılı bir performans sağladığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Horosan harcı, kemerler, ayrık elemanlar yöntemi

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL DETERMINATION OF THE PERFORMANCE OF A MODEL MASONRY ARC BUILDED USING HOROSAN MORTAR

ABSTRACT

Our country includes lots of restored historical structures from Selçuklu and Osmanlı era which are still used. In order to preserve these historical structures for the future community, these structures has to be restored originally. For this reason, materials having adequate performance and armony with the original structure has to be used during restoration works. In this study mechanical properties of Horosan mortar, which is used by Turkish Republic General Directory of Foundations for restoration works of historical structures, were investigated together with its performance in the masonry arches by model tests and numerical analyses. Both model tests and numerical analyses suggest that the performance of Horosan mortar is adequate for masonry arches.

Key Words: Horosan mortar, masonry arches, distinct element method.

1. GİRİŞ

Horosan harcı, taş blokları birbirine bağlayabilmek için, eski Türk mimarisinde, özellikle Osmanlı dönemi mimarisinde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Eski mimari dönemin taşıyıcı sistemleri olan kemerler ve kubbelerin başarılı bir şekilde yapılabilmesi, Horosan harcı sayesinde olmuştur.

Horosan harcının tam olarak muhtevası bilinmemekle birlikte içerisinde, kil, kireç, taş tozu, taş kırıntıları, mermer tozu, su, keçi kılı ve hatta yumurta akı bulunduğu tarihi kayıtlardan anlaşılmaktadır. Bununla birlikte harcın içeriğinin yöresel uygulamalarda değişiklik gösterebildiği bilinmektedir.

Tarihi eserlerin restorasyonu kültür değerlerimizin korunması ve gelecek kuşaklara aktarılabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Restorasyon çalışmalarının amacı eserin orijinalinin bozulmadan yenilenmesidir. Bu amaçla kullanılacak malzemeler de mümkün olduğu kadar orijinale yakın olmalıdır. Ancak unutulmaması gereken bir

önemli husus da kullanılacak malzemelerin performansıdır. Bu çalışmada Türkiye Cumhuriyeti Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından tarihi yapıların restorasyon çalışmalarında kullanılmak üzere, içeriği belirlenmiş olan Horosan harcının mekanik özellikleri incelenmiş ve kemerlerdeki performansı model bir kemer ve sayısal analizler kullanılarak belirlenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

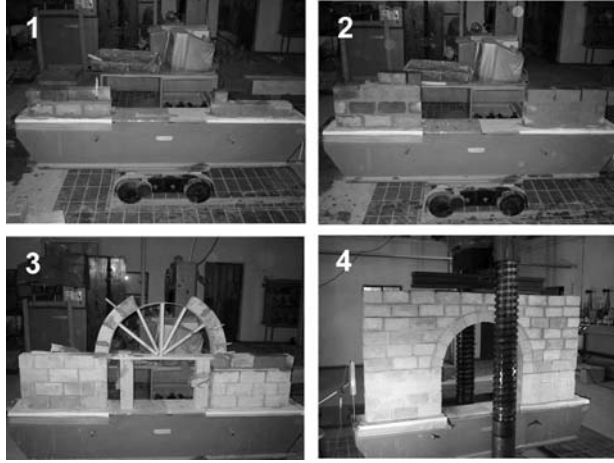
2.1 Materyal

2.1.1 Horosan harcı

Eski yapıların restorasyon çalışmaları, orijinal malzemeye sadık kalınarak yapılmalıdır. Bu gerekliliği sağlayabilmek amacıyla Türkiye Cumhuriyeti Vakıflar Genel Müdürlüğü (T.C.V.G.M) eski kayıtlara dayanarak, restorasyon çalışmalarında kullanılmak üzere Horosan harcının orijinaline en yakın olan bir harç formülü belirlemiştir. Çizelge: 1’de bu harcın yaklaşık 0.01 m³’deki malzeme çeşitleri ve miktarları verilmiştir.

Tablo 1. Model harcın içeriği

Malzeme	Miktar (0.01 m ³ harç için)
Tuğla kırıntısı	10 adet dolu tuğla
Taş kırıntısı	5.4 kg.
Kireç	6480 cm ³
Mermer tozu	1.08 kg.
Su	2160 cm ³
Keçi kılı	86 gr.



Şekil 1. Model kemerin yapım aşamaları

Harcın içeriğine detaylı bakıldığında, tuğla ve taş kırıntılarının dolgu malzemesi olarak ve keçi kılının çekme mukavemetini artırıcı donatı olarak kullanıldığı görülür. Karışımda kullanılan kireç ise sönmüş kireçtir. Harcın kısa sürede mukavemet kazanması, kirecin suyunu kaybederek sertleşmesiyle gerçekleşmektedir. Kireç, mermer tozu ve tuğla kırıntısından gelen mineraller ise harca uzun dönemde puzzolanik mukavemet kazandırmaktadır. Kireç ve mermer tozunun sağladığı kalsiyum, tuğla kırıntısının karışıma sağladığı silika ile reaksiyona girerek puzzolanik mukavemet artışı sağlamaktadır.

2.1.2 Model kemer

Horosan harcının, kemer sistemlerinde gösterebileceği performansı belirleyebilmek için kesme Ankara taşından (andezit), Şekil:1.'de yapım aşamaları görülen model kemer yapılmıştır. Şekil: 2' de de model kemerin şematik gösterimi ve boyutları gösterilmiştir.

Şekil 2. Model kemerin şematik gösterimi ve boyutları

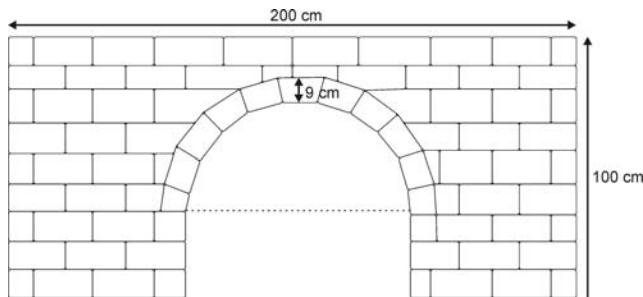
2.2 Metot

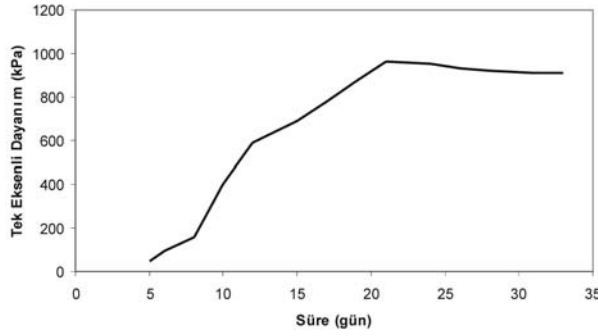
T.C.V.G.M'nün tanımladığı içeriğe göre harç hazırlanmış, malzemenin mekanik özelliklerini belirleyebilmek amacıyla tek eksenli basınç dayanımı, üç eksenli ve direk kesme deneyleri yapılması planlanmış ve bunun için hazırlanan harç uygun kalıplara dökülmüştür. Üç eksenli ve tek eksenli deneyleri için 38 mm çaplı 80 mm boyunda tüpler, direk kesme deneyi numuneleri için ise 60x60x25 mm boyutlarında kare kalıplar kullanılmıştır. Tek eksenli numuneler harcın zamanla mukavemet artışını gözlemek, direk kesme ve üç eksenli deneyler ise harcın mekanik davranışına uygun olan yenilme modelinin ve bu modelin parametrelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır.

Harcın mekanik özellikleri belirlendikten sonra, model kemer G.Ü. Teknik Eğitim Fak. Yapı Mekaniği Lab. 500 ton kapasiteli Universal pres ile test edilmiş, model kemerin sayısal analizleri de yapılarak bu analiz sonuçları test sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

3. HOROSAN HARCININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Tek eksenli sıkışma deneyleri, 38 mm çaplı 80 mm boyundaki tüplerden elde edilen silindirik numunelere harç döküldükten sonra belirli zaman aralıklarında ve 1 mm/dak. hızla yükleme kullanılarak yapılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil: 3. harcın zamanla mukavemet artışını göstermektedir. Şekil: 3'ten görüldüğü gibi harcın mukavemeti yaklaşık olarak 28 gün sonra sabitlenmiştir. Ancak unutulmamalıdır ki puzzolanik reaksiyonlar nedeniyle daha uzun vadede bir miktar daha mukavemet artışı gerçekleşebilecektir.



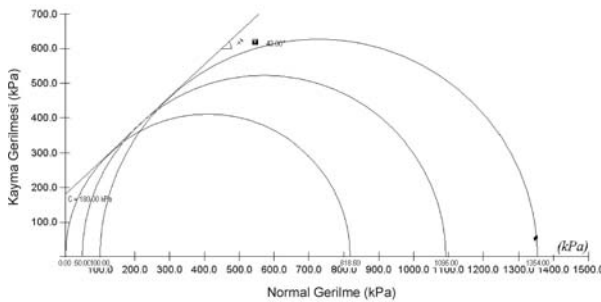


Şekil 3. Harcın mukavemetinin zamanla değişimi

Deney numuneleri için harç karışımı hazırlanırken, mümkün olduğu kadar homojen bir karışım hazırlamaya dikkat edilmiştir. Şekil: 3'te görülen düzensizliklerin her numunenin döküm şartlarında oluşan çok az farklılıklardan ve yine az miktardaki heterojenlikten kaynaklandığı düşünülmektedir.

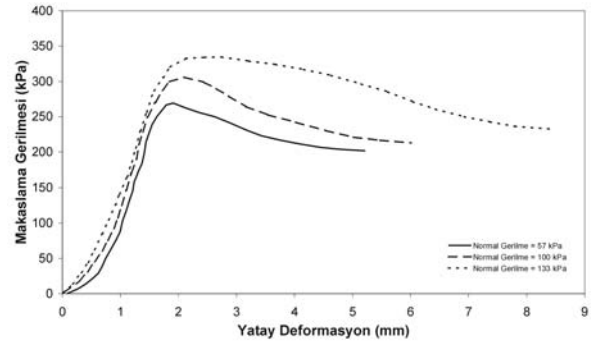
Mukavemet artışı durduktan sonra harcın yenilme modelini belirlemek ve kemerin sayısal analizlerinde kullanılacak parametreleri bulmak için, harç üzerinde üç eksenli ve direk kesme kutusu deneyleri yapılmıştır.

Üç eksenli deneyler, farklı hücre basınçları altında ve 1 mm/dak. yükleme hızıyla üç adet olarak gerçekleştirilmiştir. Her bir deneyin Mohr dairesi çizilmiş ve yenilme zarfı bu dairelerin teğetlerinden belirlenmiştir. Şekil: 4'de üç eksenli deney sonuçları görülmektedir. Şekil: 4 incelendiğinde yenilme zarfının doğrusal olduğu, dolayısıyla harcın mekanik davranışının Mohr-Coulomb yenilme modeline uygun olduğu söylenebilir. Bu sebeple Mohr-Coulomb yenilme modeli parametreleri olan kohezyon (c) 180 kPa ve içsel sürtünme açısı (ϕ) 43° olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Üç eksenli deney sonuçları

Benzer bir şekilde, farklı normal gerilmeler altında üç adet direk kesme deneyleri yapılmıştır. Deney sonunda her bir normal gerilme (σ_n) ve yenilme altındaki makaslama gerilmesi (τ) veri çiftlerinden geçen doğru belirlenerek, Mohr – Coulomb yenilme modeli parametreleri belirlenmiştir. Direk kesme deneyi sonuçlarına göre kohezyon (c) 220 kPa ve içsel sürtünme açısı (ϕ) 40.7° olarak bulunmuştur. Şekil: 5. direk kesme deneyinde üç farklı normal gerilme düzeyindeki kesme gerilmesi – deformasyon ilişkisini göstermektedir.



Şekil 5. Direk kesme deneyinde üç farklı normal gerilme düzeyindeki kesme gerilmesi – deformasyon ilişkisi.

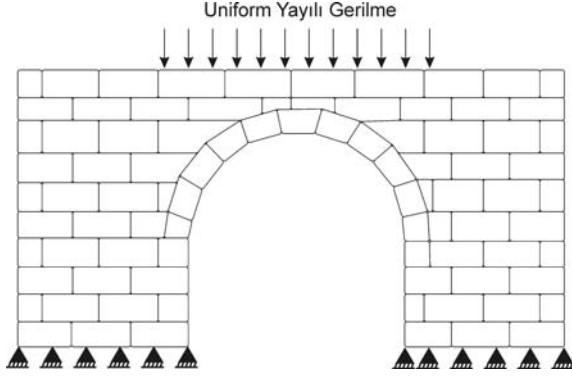
Makaslama yay sabiti değeri (K_s) Şekil: 5.'den 167320 kN/m^3 olarak belirlenmiştir, bu değer harcın makaslama hareketi sırasında göstereceği elastik kayma deformasyonu miktarını kontrol etmektedir.

Model kemeri oluşturan bloklarda meydana gelen deformasyon bloklar arasındaki makaslama hareketinden oluştuğu için model kemeri sayısal analizlerinde, direk kesme kutusu deneyinden elde edilen parametreler kullanılmıştır.

4. MODEL DENEY

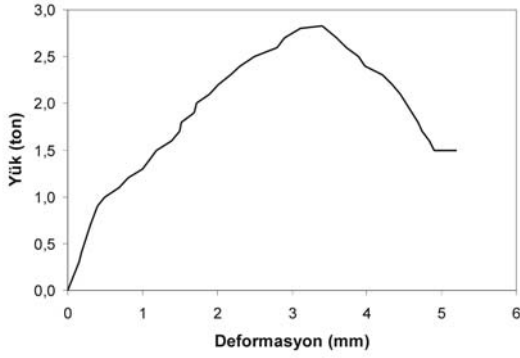
Bölüm 2.1.2'de tanımlanan model kemer yapıldıktan 1 ay sonra, Şekil: 6. da görülen yükleme koşulları altında ve 1 mm/dak. yükleme hızıyla, yenilene kadar uniform yayılı olarak yüklenmiştir.

Deney sırasına kemer üzerindeki yük ve deformasyon değerleri sayısal olarak bir veri toplama ünitesine kayıt edilmiştir. Bu şekilde deney sırasında kemeri yük –deformasyon davranışı belirlenmiştir.



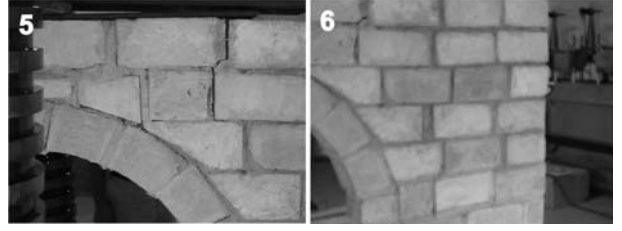
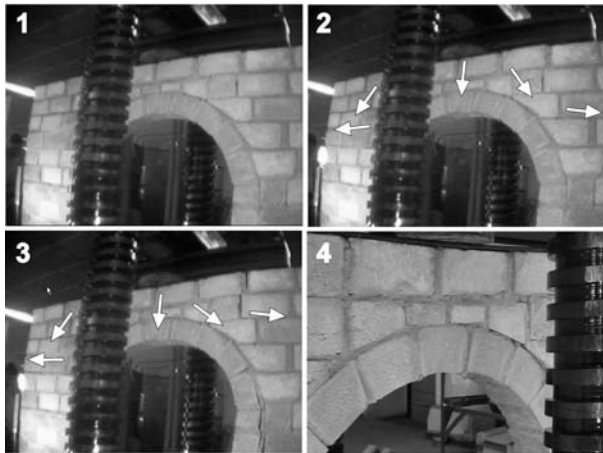
Şekil 6. Model kemerin deney sırasındaki yüklemeye koşulları

Şekil: 7. kemerin deney sırasındaki yük – deformasyon grafiğini göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi kemerin deneyin yüklemeye şartları altında maksimum dayanımı 2.83 ton olarak belirlenmiştir.



Şekil 7. Model kemerin deney sırasındaki yük – deformasyon grafiği

Şekil: 8. de bulunan fotoğraflar deneyin çeşitli aşamalarında kemerde görülen deformasyonları ve yönlerini göstermektedir.



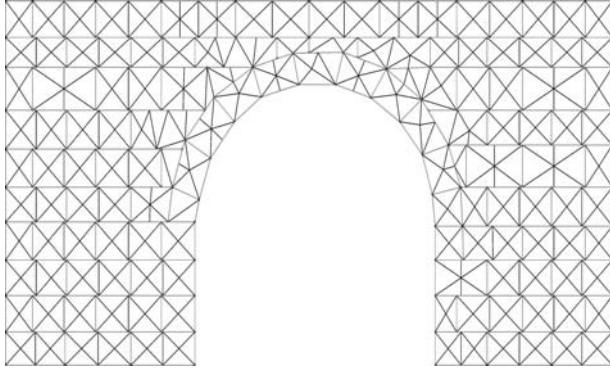
Şekil 8. Deneyin çeşitli aşamalarında kemerde görülen deformasyonlar ve yönleri

5. MODEL KEMERİN SAYISAL ANALİZLERİ

Model kemer deneyine ek olarak kemer sisteminin sayısal analizi, Horosan harcının laboratuvar deneylerinden elde edilen dayanım ve deformasyon parametrelerinin doğruluğunu test etmek amacıyla UDEC (Universal Distinct Element Code) adlı yazılım ile yapılmıştır.

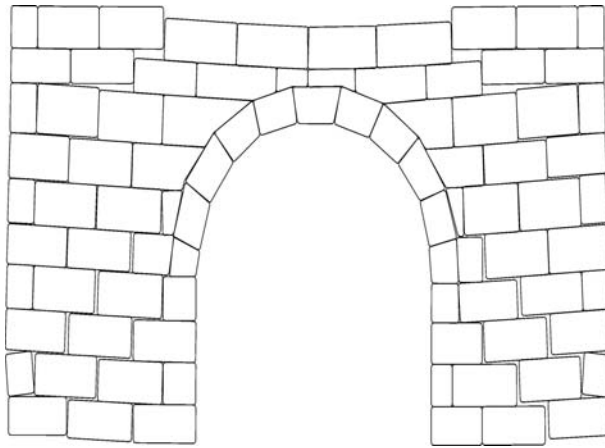
Açılımı “Evrensel Ayrık Eleman Kodu” olan UDEC programı ayrık elemanlar yöntemini esas almakta ve genel olarak eklemeli kaya kütleleri, taş yapılar vb. süreksizlikler içeren ortamların statik ve dinamik yükler altındaki davranışlarını modellemek için kullanılmaktadır. Ayrık elemanlar metodunda süreksiz olan ortam birbirinden ayrı bloklar ile modellenmekte, ancak bloklar arasındaki süreksizlik özellikleri ile bloklar birbirlerini etkilemektedir. Ayrıca her bir blok kendi içinde sonlu farklar ağı ile modellenerek blokların kendi iç yapılarında meydana gelen deformasyonlar da belirlenebilmektedir. UDEC yönteminde bloklular sistemlerde büyük çaplı hareketlerin ve bunlara bağlı deformasyonların hesaplanması için uygun olan Lagrange yaklaşımını kullanmaktadır (1).

Model kemer 87 blok eleman kullanılarak UDEC'e tanıtılmış, ayrıca her bir blok eleman kendi içinde sonlu farklar ağına bölünmüştür. UDEC'e girilen bloklular sistem Şekil: 2 de görülmektedir. Model kemerin alt sınırına x ve y yönlerindeki deformasyonlar sıfır olacak şekilde sabit sınır koşulu uygulanmıştır. Bloklar arasındaki süreksizliklerin özellikleri, Horosan harcının direk kesme deneyinden elde edilen parametreler kullanılarak UDEC'e tanıtılmıştır. Blok özellikleri için ise Ankara taşı için tipik olan değerler kullanılmıştır. Şekil: 9 model kemerin sonlu farklar ağına bölünmüş halini göstermektedir.

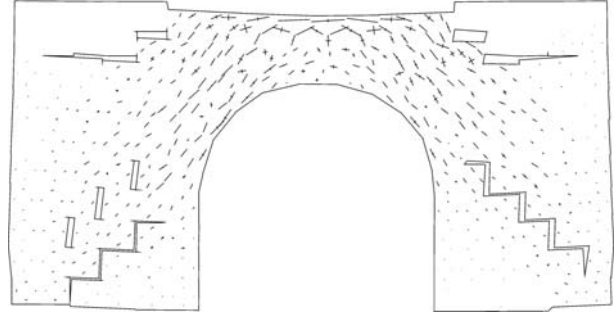


Şekil 9. Model kemerin sonlu farklar ağına bölünmüş hali

Laboratuvar deneyinden elde edilen model kemerin, taşıyabileceği maksimum yük değeri, sayısal modele uygulanmış ve sistemdeki gerilme ve deformasyonlar hesaplanılmıştır. Şekil 10. UDEC ile elde edilen model kemerin deforme olmuş halini göstermektedir. Şekil 10 dan görülebileceği gibi deformasyonların hem büyüklükleri hem de yönleri laboratuvar deneyi ile uyumludur. Şekil 11 ise kemerde oluşan maksimum (σ_1) ve minimum (σ_3) gerilme vektörlerini göstermektedir. Bu gerilme vektörleri kemerin üzerine uygulanan gerilmenin kemer yapısı ile sağ ve sol tarafa aktarılma mekanizmasını göstermektedir.



Şekil 10. UDEC ile elde edilen model kemerin deforme olmuş hali (deformasyon düzeyleri çizim için 10 kat büyütülmüştür)



Şekil 11. Kemerde oluşan maksimum (σ_1) ve minimum (σ_3) gerilme vektörleri (deformasyon düzeyleri çizim için 10 kat büyütülmüştür)

6. SONUÇLAR

T.C.V.G.M'nün tarihi yapıların restorasyonunda kullanılmak üzere tanımladığı Horosan harcının yaklaşık olarak 28 gün sonra mukavemetinin sabitlendiği belirlenmiştir. Harcın Mohr–Coulomb yenilme kriterine uygun davrandığı üç eksenli ve direk kesme kutusu deneylerinden tespit edilmiştir. Mohr–Coulomb yenilme parametreleri sırasıyla üç eksenli direk kesme kutusu deneylerinden kohezyon (c) 180 ve 220 kPa, içsel sürtünme açısı (ϕ) 43° ve 40.7° olarak hesaplanmıştır.

Model kemer üzerinde yapılan yükleme deneyinden elde edilen maksimum yük 2.83 tondur. Bu değer sayısal modele girilmiş ve UDEC yazılımı ile model deneyde görülen deformasyonlara benzer mertebeler ve şekillerde deformasyonlar elde edilmiştir.

Horosan harcının mukavemet değerleri Ankara taşı ile karşılaştırıldığında oldukça düşük olmasına rağmen, eski mimari dönem taşıyıcı sistemi olan kemerlerde kullanıldığında başarılı sonuçlar verdiği hem model deney ile hem de sayısal analizler ile görülmüştür.

KAYNAKLAR

Itasca, UDEC Universal Distinct Element Code, Itasca Consulting Group Inc. Minnesota, 2001.