

TUĞLA KEMERLERİN DENEYSEL DAVRANIŞI VE BİLGİSAYAR MODELİ ANALİZLERİ

Recep KANIT ve Nihat S. IŞIK

Yapı Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06500 Teknikokullar, Ankara
rkanit@gazi.edu.tr, nihatsinan@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 27.10.2005; Kabul/Accepted: 08.02.2006)

ÖZET

Bu çalışmanın amacı değişik geometrilere sahip model tuğla kemerlerin deney sonuçları ile sayısal analiz sonuçlarını yığma yapıların sayısal analizlerindeki güçlükleri de gözönüne alarak karşılaştırmaktır. Blokların arasında bulunan süreksizliklerin çekme dayanımları oldukça düşüktür ve oluşan kayma gerilimlerinden etkilenirler. Bu nedenle yığma yapıların mekanik davranışları süreksizliklerin özelliklerinden etkilenmektedir. Model deneylerde 85 cm açıklığa sahip, dairesel, sepet kulpu ve sivri kemerler açıklıkları boyunca yüklenmişlerdir. Deneyler sırasında kemer üzerindeki yük artırılmış ve kemerde oluşan deplasmanlar ile birlikte kaydedilmiştir. Deney sonuçlarına göre dairesel kemer 18 ton, sepet kulpu kemer 22 ton, sivri kemer ise 21 ton maksimum yük taşımıştır. Sürekli ortam varsayımına dayanan sonlu elemanlar ve sonlu farklar yöntemlerinin yığma yapı analizlerinde kullanılabilirlikleri bu tür yapıların süreksiz yapısı dolayısıyla sınırlıdır. Bu çalışmada yığma kemerlerin eşdeğer sürekli ortam parametreleri deneysel çalışmada elde edilen deformasyonlar ile sonlu farklar yöntemi sonuçları kalibre edilerek elde edilmiştir, ancak ayrık elemanlar yöntemi sonuçlarının, sonlu farklar sonuçlarından daha gerçekçi olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Yığma kemerler, ayrık elemanlar yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi.

EXPERIMENTAL BEHAVIOR OF BRICK MASONRY ARCHES AND ANALYSES BY COMPUTER MODELS

ABSTRACT

The purpose of this study is to compare the numerical analyses and model test results of three brick arches having different geometries by considering the difficulties associated with the numerical modeling of masonry structures. Discontinuities present between the blocks have a very low tensile strength and are very vulnerable to shear forces generated between blocks under loading. Because of this reason, mechanical behavior of masonry structures is effected from the shear strength of discontinuities generated on the mortar and block contacts. In the model tests circular, basket handle and sharp point arches having 85 cm openings were loaded above the opening. During tests load is increased and corresponding displacements were recorded together with the applied load. According to test results circular arch, basket handle arch and sharp point arch carried 18, 22 and 21 ton-force load, respectively. Applicability of the numerical methods such as finite element and finite differences based on continuum assumption is limited because of the discontinuous nature of the masonry structure. In this study equivalent parameters of the masonry arches were determined by calibration of finite difference model results with experimental deformations. However discrete element analyses yielded more realistic deformation pattern than Flac3D finite difference analyses.

Keywords: Masonry arches, discrete element modeling, finite element modeling.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsanlığın ortak kültürel mirası olan tarihi yapıların gelecek nesillere bırakılabilmesi için aslına uygun bir şekilde korunması ve onarılması gerekmektedir. Bunun için de bu yapıların öncelikle mekanik davranışlarının bilinmesi gerekir. Modern betonarme ve çelik yapıların davranışlarını gelişmiş sayısal yöntemlerle ayrıntılı

bir şekilde ortaya koymak mümkündür. Çoğu kemer, tonoz, kubbe, vb. eğrisel formda olan yığma yapılarda ise harç vasıtasıyla birbirlerine bağlanan taş veya tuğla blokların sürekli ortam oluşturulması sebebiyle sayısal yöntemlerle asıl davranışı ortaya koymak pek mümkün olamamaktadır. Bu nedenle tarihi yapıların korunması ve doğru yöntemlerle onarılabilmesi için yapısal davranışlarının anlaşılması gerekmektedir.

2. AMAÇ (PURPOSE)

Bu çalışmada yığma yapıların gerçek mekanik davranışlarının sayısal analiz yöntemleriyle ortaya konulması güçlüğü göz önüne alınarak; üç ayrı şekilde yapılan model tuğla kemer deneysel ve sayısal analizlere tabi tutularak; deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır.

3. YIĞMA YAPILARIN ANALİZİ (ANALYSIS TECHNIQUES OF MASONRY STRUCTURES)

Yığma yapıların; içerdiği süreksizliklerden dolayı heterojen ve anizotropik olması yapım sürecinin uzunluğuna bağlı olarak işçilik ve malzeme kalitesinin değişebilmesi ve mevcut hasar durumunun tam olarak bilinmemesi sebebiyle sayısal analizleri güç olmaktadır. Yığma yapıyı oluşturan blokların bağlantı bölgelerinde oluşan süreksizliklerin çekme dayanımları oldukça düşüktür ve yük altında bloklar arasında makaslama hareketleri oluşmaktadır. Bu nedenle harç-blok birleşim yüzeyinin makaslama dayanımı da yapının mekanik davranışını etkilemektedir.

Çok karmaşık geometrik formlara sahip olan tarihi yapılar öncelikle elastik yöntemlerle analiz edilmeli, yapı içerisinde gerilme dağılım mekanizması belirlenmeli ve daha sonra daha komplike modellemeler yapılmalıdır.

Taş kemer köprüler, basit geometrik formlarından dolayı kubbe, tonoz ve kemerlerden oluşan diğer tarihi yapılara oranla daha kolay yorumlanabilen yapısal davranışa sahiptirler [1]. Köprüler, 3 boyutlu yapısal davranış sergileyen diğer yapıların tersine, köprü ana eksen ve yerçekimi doğrultusundaki düşey eksenin oluşturduğu düzlem içerisinde asıl yük aktarma mekanizmasını gerçekleştirirler. Deprem ve sel gibi doğal afetlerin neden olduğu yük etkilerinden dolayı, elbette bu düzleme dik doğrultuda da önemli deformasyon ve iç kuvvetler oluşmaktadır. Ancak kemerli taş köprülerin geometrik formunu belirleyen yapısal davranış unsurları söz konusu düzlem üzerinde gerçekleşir [1].

4. YIĞMA YAPILARIN ANALİZİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER (METHODS USED IN THE ANALYSES OF MASONRY STRUCTURES)

Yığma yapıların analiz edilebilmesi için bugüne kadar çeşitli yöntemler geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bunları kısaca sıralayacak olursak:

- Geometrik yük faktörü [2].
- Doğrusal elastik sonlu elemanlar analizi,
- Limit bloklu analizi [3].
- Doğrusal olmayan elastik-plastik sonlu elemanlar yöntemi,
- Ayrık elemanlar yöntemi.

Geometrik yük faktörü yönteminde, geometrik güvenlik faktörü kemerin kalınlığının, uygulanan yükü karşılayabilecek minimum kalınlığa oranı olarak tanımlanmaktadır [2]. Bu yöntem yük altında kemerde oluşan

deformasyonları hesaplayamamaktadır ve sonuçları, mühendisin yargısına oldukça hassas bir biçimde bağlıdır.

Doğrusal elastik sonlu elemanlar yöntemi ise çalışma yükleri (emniyetli yükler) altında yığma yapıda, kemerde oluşacak olan deformasyonları hesaplayabilmekle birlikte yapının göçme mekanizmasını ve yükünü vermemektedir.

Limit bloklu analizi, yığma yapıyı rijit blokların birleşiminden oluştuğunu kabul ederek yenilme yükünü ve mekanizmasını belirleyebilmektedir.

Doğrusal olmayan elastik-plastik sonlu elemanlar yöntemi ise, hem yığma yapı sisteminin deformasyonlarını hem de göçme mekanizması ile plastik bölgelerini hesaplayabilmektedir. Ancak, bu yöntemin en önemli dezavantajı süreksizlikler içeren yığma yapı sisteminin, sürekli ortam kabulleriyle çözülmeye çalışılmasıdır. Bu nedenle süreksizlikler içeren anizotropik yığma yapı sisteminin eşdeğer bir deformasyon modülü ve dayanım parametreleri ile temsil edilmesi gerekir.

5. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

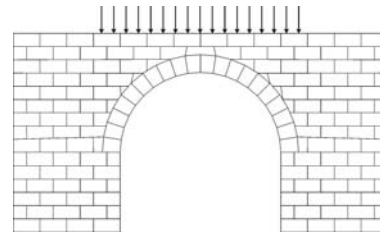
Bu çalışmada üç farklı şekilde model tuğla kemer, içi dolu tuğla ve çimento harcı kullanılarak yapılmıştır. Harcın nihai mukavemetinin % 85'ine ulaşana kadar (7 gün) beklenilmiş, ve Gazi Üniv. T.E.F. Yapı Bölümü laboratuvarındaki universal pres altında kemer açıklığı genişliği kadar yayılı yükü yüklenilmiştir. Şekil 1, model kemerlerin yükleme biçimini göstermektedir.

Her üç kemer modelinde de deplasman ölçerler (LVDT) kemerlerde oluşan maksimum düşey deplasmanları ölçecek şekilde konumlandırılmışlardır. Şekil 2'de ise model kemerleri ve boyutlarını göstermektedir.

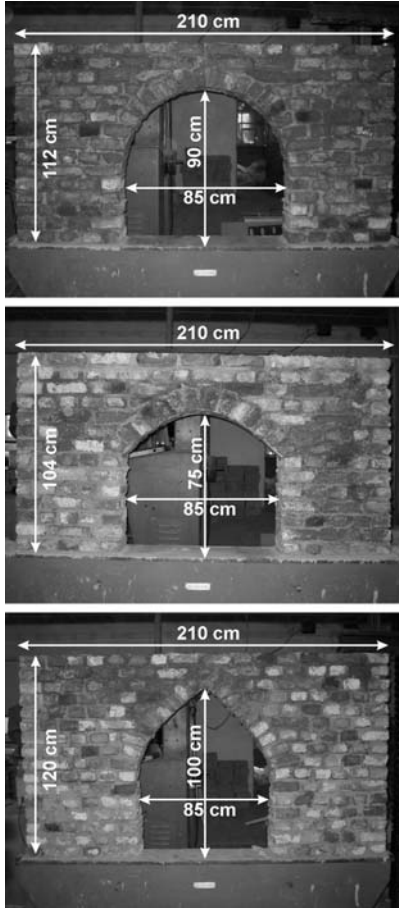
Sayısal analizler için Flac3D ve Udec programları kullanılmıştır.

Flac3d özellikleri

Flac3D, 3 boyutlu sürekli bir ortamın sayısal analizlerini yapmak amacı ile geliştirilmiş bir sonlu farklar programıdır [4]. Flac, statik bir problemin çözümünde bile dinamik hareket denklemlerini algoritmasında kullanır. Bunu yapmanın amacı modellenen fiziksel sistem duraysız olsa bile sayısal çözümün duraylı olmasını sağlayabilmektir [4]. Flac3D'ye ilişkin detaylı bilgiler [4]'de bulunabilir.



Şekil 1. Model kemerlerin yükleme biçimi (Schematic representation of loading pattern of model arches)



Şekil 2. Model kemerler ve boyutları (Model arches and their dimensions)

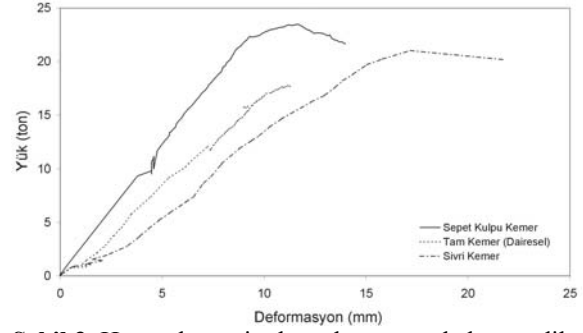
Udec Özellikleri

Ayrık elemanlar yöntemi yazılımları genel olarak eklemli kaya kütleleri, taş yapılar vb. süreksizlikler içeren ortamların statik ve dinamik yükler altındaki davranışlarını modellemek amacıyla kullanılmaktadır. Bu yöntemde süreksiz olan ortam birbirinden ayrı bloklar ile modellenmekte, ancak bloklar, aralarındaki süreksizliklerin mekanik özellikleri dolayısıyla birbirleri ile etkileşim içinde olmaktadır. Bu çalışmada daha önce de belirtildiği gibi iki boyutlu “Universal Distinct Element Code (UDEC)” isimli ayrık elemanlar yöntemi programı kullanılmıştır. UDEC her bir bloğu sonlu farklar ağı ile modelleyebilmekte dolayısıyla blokların kendi iç yapılarında meydana gelen deformasyonları da belirleyebilmektedir. UDEC bloklu sistemlerde büyük çaplı hareketlerin ve bunlara bağlı deformasyonların hesaplanabilmesi için uygun olan Lagrange yaklaşımını kullanılmaktadır [5].

5.1. Yöntem (Method)

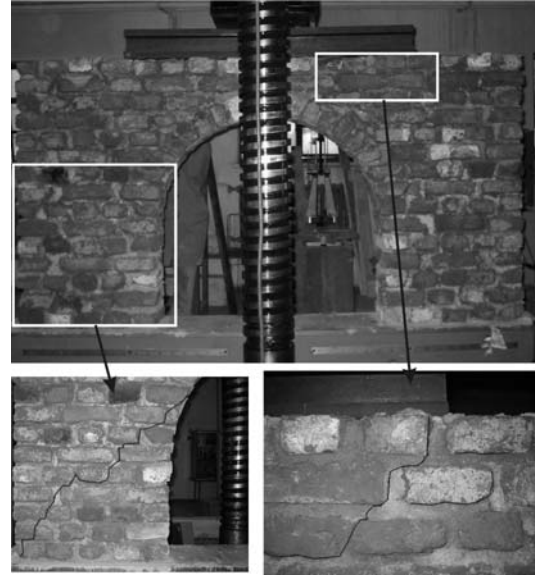
5.1.1. Model kemerlerin deney sonuçları (Test results of model arches)

Her üç kemerin deneyler sırasında kayıt edilen yük-deformasyon grafikleri Şekil 3'te gösterilmektedir. Bu grafiğe göre tam kemer 18 ton sepet, kulpu kemer 22 ton ve sivri kemer 21 ton maksimum yük taşımıştır.

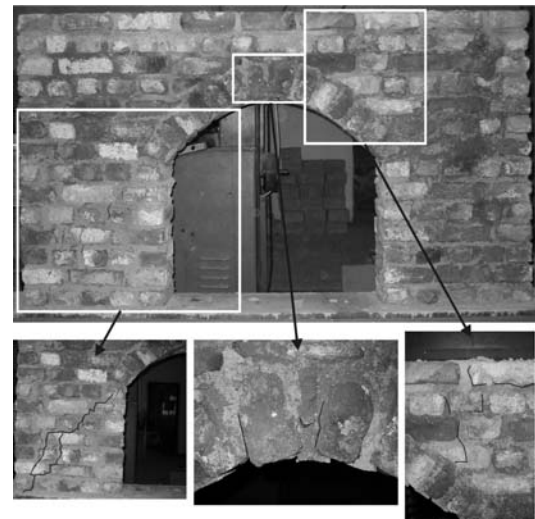


Şekil 3. Her üç kemerin deneyler sırasında kayıt edilen yük-deformasyon grafikleri (Load-deformation graphs of model arches)

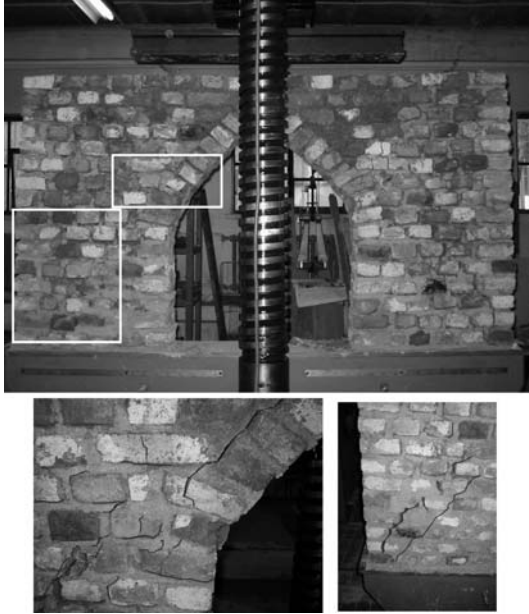
Şekil 4-6, yenilme anında sırasıyla tam, sepet kulpu ve sivri kemerlerde görülen deformasyonları ve açılmaları göstermektedir.



Şekil 4. Yenilme anında tam kemerde görülen deformasyonlar ve açılmalar (Deformations and cracks occurred during the failure of circular arch)



Şekil 5. Yenilme anında sepet kulpu kemerde görülen deformasyonlar ve açılmalar (Deformations and cracks occurred during the failure of basket handle arch)



Şekil 6. Yenilme anında sivri kemerde görülen deformasyonlar ve açılmalar (Deformations and cracks occurred during the failure of sharp arch)

5.1.2. Sayısal analizler (Numerical analyses)

Model kemerlerin doğrusal olmayan sonlu farklar ve ayrık elemanlar analizlerini sağlıklı bir biçimde yapabilmek için yığma yapı sistemini meydana getiren bileşenlerin mekanik davranışlarının belirlenmesi gerekir. Bu nedenle blokları oluşturan tuğlanın, harcın ve tuğla harç ara yüzeyinin mekanik davranışları laboratuvar deneyleri ile belirlenmiştir. Tuğla ve harç numunelerin, basma ve çekme dayanımları ile elastisite modülleri, tuğla ile harç ara yüzeyinin ise kayma rijitliği ile Mohr-Coulomb dayanım parametreleri bulunmuştur.

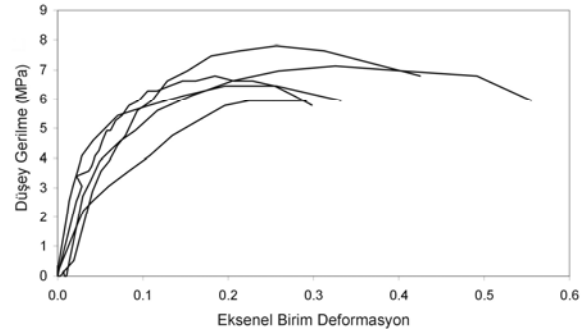
Tuğlanın Mekanik Davranışı

Model kemerin yapımında kullanılan dolu tuğlanın ortalama elastisite modülü (E) 3000 MPa, basma dayanımı (σ_c) 12 MPa ve çekme dayanımı (σ_t) 0.9 MPa olarak belirlenmiştir.

Harcın Mekanik Davranışı

Model kemerlerin yapımında sıradan çimento harcı kullanılmıştır, model kemer yapıldıktan sonra 1 hafta boyunca kür uygulanmış ve bu hafta sonunda deney yapılmıştır. Aynı süreçte harçtan numuneler alınarak, 70 mm çaplı 175 mm boylu silindirik örnekler hazırlanmıştır. Bu örnekler üzerinde tek eksenli dayanım ve dolaylı çekme deneyleri yapılmıştır. Harcın ortalama çekme dayanımı 489 kPa, ortalama basma dayanımı ise, 6.6 MPa ve ortalama deformasyon modülü (E_{50}) ise 8000 MPa olarak tespit edilmiştir.

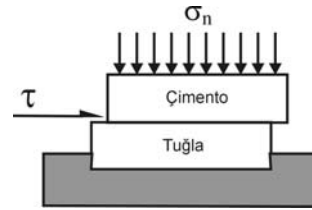
Şekil 7, harç numunelerine yapılan tek eksenli deney sonuçlarından elde edilen gerilme-deformasyon ilişkilerini göstermektedir.



Şekil 7. Harç numunelerine yapılan tek eksenli deney sonuçlarından elde edilen gerilme-deformasyon ilişkileri (Stress-strain plots of mortar specimens during compression tests)

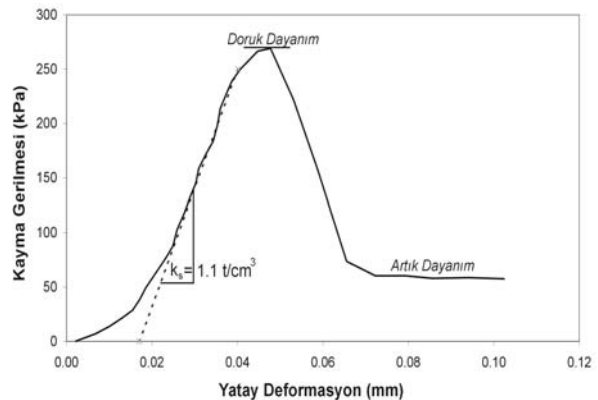
Tuğla Harç Bileşim Noktalarının Mekanik Davranışı

Yığma yapı sisteminde hiç şüphesiz en zayıf noktayı bloklar ile harcın birleştiği yüzey oluşturmaktadır. Bu yüzeyin mekanik davranışını anlayabilmek için, bir yarısı harç, diğer bir yarısı ise tuğla olan 6cm×6cm×2cm boyutlarındaki kare numuneler üzerinde direk kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Deney şematik olarak Şekil 8'de gösterilmektedir.

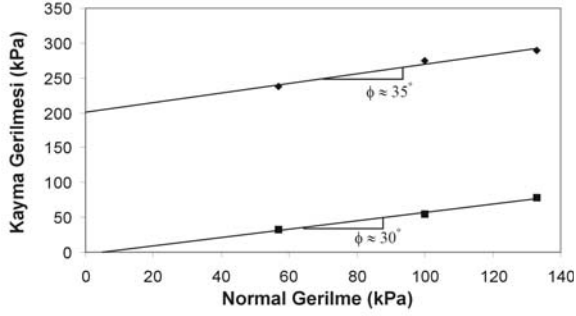


Şekil 8. Direk kesme deneyinin şematik gösterimi (Schematic representation of direct shear box test)

Bu deneyde örneğe belirli bir düzeyde σ_n (normal gerilme) uygulanmış ve numune yenilene kadar kesme gerilmesi artırılmıştır. Deney sırasında kesme gerilmesi ve yatay deformasyon verileri kayıt edilmiştir. Şekil 9, direk kesme deneyinden elde edilen (100 kPa normal gerilme için (σ_n)), kayma gerilmesi (τ)-yatay deformasyon grafiğini göstermektedir. Grafikte doruk ve artık kayma mukavemetleri de işaretlenmiştir.



Şekil 9. Direk kesme deneyinden elde edilen (100 kPa normal gerilme için) kayma gerilmesi-yatay deformasyon grafiği (Shear stress-deformation graph of a sample under 100 kPa stress)



Şekil 10. Harç-tuğla ara yüzünün doruk ve artık dayanım parametreleri (Peak and residual shear strength parameters of the brick and mortar surface)

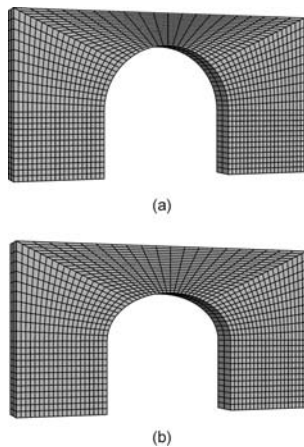
Direk kesme deneyi üç farklı normal gerilme altında yapılmış ve böylece $\sigma_n - \tau_{\text{doruk}}$ $\sigma_n - \tau_{\text{artık}}$ veri noktaları elde edilmiştir. Bu noktalardan geçen doğrunun eğimi, harç-tuğla yüzeyinin sürtünme açısını, doğrunun τ eksenini kestiği değer ise bu yüzeyin adezyon değerini göstermektedir. Şekil 10'da Harç-tuğla ara yüzeyinin doruk ve artık dayanım parametreleri gösterilmektedir.

Sürtünme direncinden dolayı normal gerilmelerle (σ_n), ile birlikte kayma direnci de artmaktadır, bu sebeple kayma dayanımı "Coulomb" kanunu ile ifade edilir [3].

5.1.2.1. 3 Boyutlu sonlu farklar analizleri (Three dimensional finite difference analyses)

Doğrusal olmayan elastik-plastik sonlu elemanlar yöntemi, yığma yapı sistemlerinin analizinde kullanılacak güçlü araçlardan biridir. Bu sebeple, deneyleri yapılan model kemerlerin üç boyutlu sonlu farklar analizleri Flac3D [4] programı ile yapılmıştır. Şekil 11'de tam kemer (a) ve sepet kulpu kemerin (b) Flac3D modelleri görülmektedir. Bütün kemer modellerinin alt sınırı model deneylerde olduğu gibi her üç yöndeki deplasmanlara kapatılmıştır.

Ayrı ayrı blokların, harcın ve birleşim yüzeylerinin mekanik davranışı deneylerle belirlenmişse de bloklardan ve bunların birleşim yerlerinden meydana gelen yığ-



Şekil 11. Flac3D modelleri, a) tam kemer, b) sepet kulpu kemer (Flac3D models a) circular arch, b) basket handle arch)

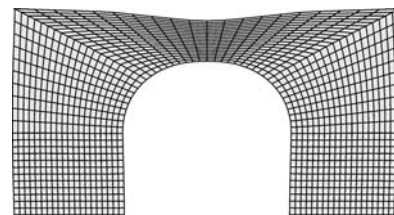
ma yapı sisteminin deformasyon modülü ve dayanım parametreleri bilinmemektedir. Bu parametreleri tahmin edebilmek amacıyla Flac3D modelleri, kemerler üzerinde yapılan deney sonuçları kullanılarak kalibre edilmiştir. Yığma yapı sisteminin deformasyon modülünü belirleyebilmek için, model deneylerde elde edilen yenilme yükünün yarısına karşılık gelen maksimum deformasyon Flac3D analizlerinde de elde edilene kadar deformasyon modülü değiştirilmiş, bunun sonucunda yığma yapı sisteminin ortalama modülü "E₅₀" 400 MPa olarak belirlenmiştir (hesaplamalarda 0.3 poisson oranı (ν) kullanılmıştır). Bu değer hem harcın (8000 MPa) hem de tuğlanın (5000 MPa) deformasyon modülü değerinden oldukça düşüktür. Bu durumun harç tuğla birleşim yüzeylerinin diğer bileşenlere oranla oldukça zayıf olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Daha önce bahsedildiği gibi, harç-tuğla birleşim yüzeyinin makaslama dayanım parametreleri $c = 200$ kPa $\phi = 35^\circ$ olarak tespit edilmiştir. Yığma yapı sisteminin dayanım parametrelerinin ise bu değerlerden daha yüksek olması nispeten sağlam tuğla blokların varlığı dolayısıyla beklenmektedir. Her üç kemerin Flac3D analizlerinde, model deneylerden elde edilen yenilme yükü $c = 400$ kPa, $\phi = 40^\circ$ ve çekme dayanımı 200 kPa değerleri kullanılarak elde edilmiştir.

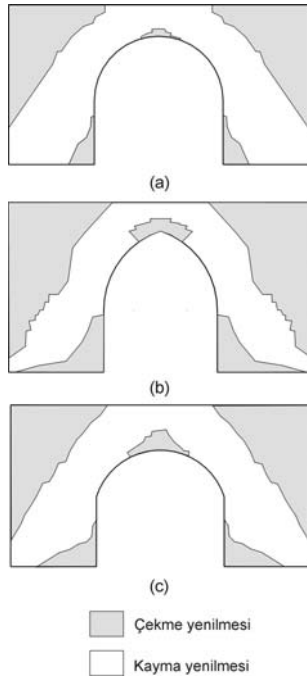
Lourenco, çalışmasında, bloklar arasındaki süreksizliklerin çekme dayanımı olarak 0.2 N/mm^2 (200 kPa) ve kohezyon 0.3 N/mm^2 (300kPa) değerlerini kullanmıştır [6]. Orduna ve Lourenço limit bloklu analizi yöntemiyle analiz ettikleri yığma kemer blok birleşim yüzeylerinin sürtünme katsayısı olarak 0.75 ($\phi=38^\circ$) kullanmışlardır [3].

Şekil 12'de tam Flac3D kemer modelinin yenilme yükünün yarısı kadar bir yük altında deforme olmuş hali gösterilmektedir. Bu şekil deformasyonları belirgin hale getirebilmek amacıyla 15 kat büyütülmüştür.

Şekil 13'de ise her üç kemer modelinde yenilme yükü altında oluşan plastik bölgeler ve özellikleri gösterilmiştir. Şekil 13'den de açıkça görülebildiği gibi, kemerlerde iki temel yenilme mekanizması gözlenmektedir. Bunlar kayma ve çekme yenilmeleridir. Çekme yenilmesi bölgeleri özellikle kemer aksının tam üzerinde gözlenmektedir. Kayma yenilmesi bölgelerinde ise blokların kaymaları bu bölgede tuğlaların birbirinden uzakla-



Şekil 12. Flac3D tam kemer modelinin yenilme yükünün yarısı kadar bir yük altında deforme olmuş hali (15 kat büyütülmüş) (The deformed shape of the circular arch determined by Flac3D, (magnified 15 times))



Şekil 13. Her üç kemerde gözlenen plastik bölgeler, a) tam kemer, b) sivri kemer, c) sepet kulpu kemer (Plastic zones observed in arches a) circular arch, b) sharp point arch, c) basket handle arch)

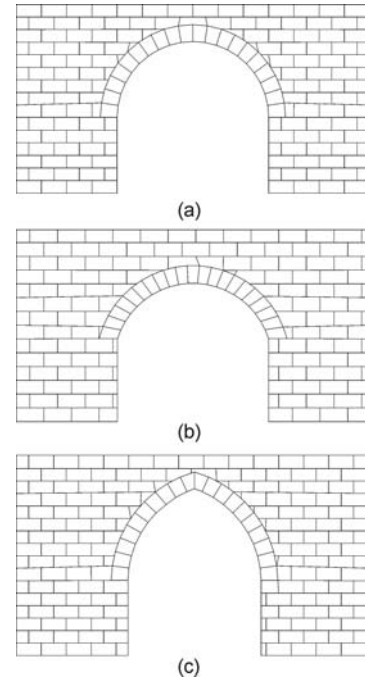
şarak, boşluklar oluşmasına sebep olacaktır. Bu bölgeler ise model deneyler sırasında gözlenen açılma bölgeleriyle uyum göstermektedir (Şekil 4-6). Tam kemer aksında gözlenen çekme yenilmesi alanı diğer iki kemere göre oldukça azdır. Buna göre daire şeklinin en ideal kemer biçimi olduğu söylenebilir.

5.1.2.2. UDEC, ayrık elemanlar metodu analizleri (UDEC, discrete element method analyses)

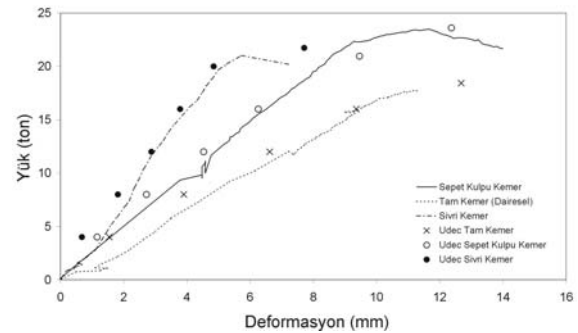
Daha önce de belirtildiği gibi, ayrık elemanlar metodu yöntemi yığma yapı sistemlerinin analizleri için oldukça uygun bir yöntemdir. Bu nedenle tam, sepet kulpu ve sivri kemerlerin Şekil 14’de görülen ayrık elemanlar modelleri UDEC programı ile oluşturulmuştur. Bu modellerde blok özellikleri laboratuvar deneylerinden elde edildiği gibi sisteme girilmiştir. Normal rijitlik (k_n) ise kayma rijitliğinin (k_s) üç katı olarak alınmıştır.

Şekil 9 incelendiğinde, blok-harç ara yüzeyi doruk dayanımına ulaştıktan hemen sonra artık dayanımın düştüğü görülmektedir. UDEC ara yüzeylerin bu davranışını modelleyebilmektedir, bu nedenle UDEC’e doruk dayanım parametrelerine ilave olarak artık dayanım parametreleri de girilmiştir.

Şekil 15’te UDEC modelleri ile elde edilen yük deformasyon grafikleri, deneylerden elde edilen yük deformasyon grafikleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 15’e göre kemerlerin UDEC simülasyonlarından elde edilen yük deformasyon ilişkileri deney sonuçlarına oldukça yakın çıkmıştır. Şekil 16’da ise her üç kemerin UDEC modelinde, yenilme durumunda gözlenen deformasyonlar görülmektedir.



Şekil 14. Her üç kemerin UDEC modeli (UDEC models of the arches)

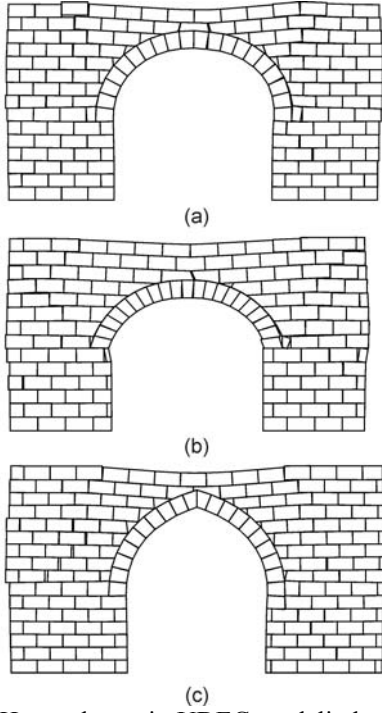


Şekil 15. UDEC modelleri ve deneylerden elde edilen yük deformasyon grafikleri ve yük deformasyon grafiklerinin karşılaştırılması (Comparison of the load-deformation graphs obtained from model tests and from UDEC simulations)

6. DEĞERLENDİRME (EVALUATION)

Birbirlerine harç vasıtasıyla bağlanmış olan bloklardan oluşan yığma yapı sistemlerini sürekli ortam olarak kabul etmek ve bu ortamın ortalama deformasyon modülü ve dayanım parametrelerini belirleyebilmek, sistemin içerdığı süreksizlikler ve anizotropik davranışı sebebiyle oldukça güçtür. Sonlu elemanlar ve sonlu farklar gibi sürekli ortam kabullerine dayanan sayısal yöntemlerin yığma yapı analizlerinde kullanılabilirlikleri, sistemin yaklaşık parametrelerinin belirlenmesindeki zorluklardan dolayı sınırlıdır. Bu çalışma da sonlu farklar analizleri için gereken parametreler model deney sonuçları kullanılarak kalibre edilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmişse de gerçek bir yığma yapının analizlerinde sayısal modelin kalibre edilmesi neredeyse imkansızdır.

Ayrık elemanlar yönteminde yığma yapı sistemini oluşturan parçalar sayısal modele ayrı ayrı tanımlandığından, bu yöntemde yığma yapı sistemini temsil eden tek



Şekil 16. Her üç kemerin UDEC modelinde, yenilme durumunda gözlenen deformasyonlar (Deformations of arches determined with UDEC under failure load)

bir mukavemet ve deformasyon modülü belirlenmesine ihtiyaç yoktur. Bu nedenle model kemerlerin UDEC analizleri, hem deformasyon biçimi hem de yenilme yükü ve şekli açısından sonlu farklar analizlerine kıyasla daha gerçekçi sonuç vermiştir. Şekil 17’de model kemerlerde deney sırasında gözlemlenen çatlakların konumları, Flac3D ile belirlenen yenilme bölgeleri ve UDEC modellerinde, yenilme durumunda gözlenen deformasyonlar gösterilmiştir.

Şekil 17 incelendiğinde, model kemerlerde gözlenen çatlaklarının konumlarının, Flac3D ile belirlenen çekme ve makaslama yenilme bölgeleri ile ve UDEC modellerinde gözlenen deformasyon biçimi ile uyumlu olduğu görülür. Ayrık eleman modellerinin en önemli dezavantajı ise yöntemin üç boyutlu bir yapının tamamına uygulanmasındaki güçlülüdür. Böyle bir uygulamaya ciddi bir hacimde geometrik veri girişi ve hesaplama gerektirecektir.

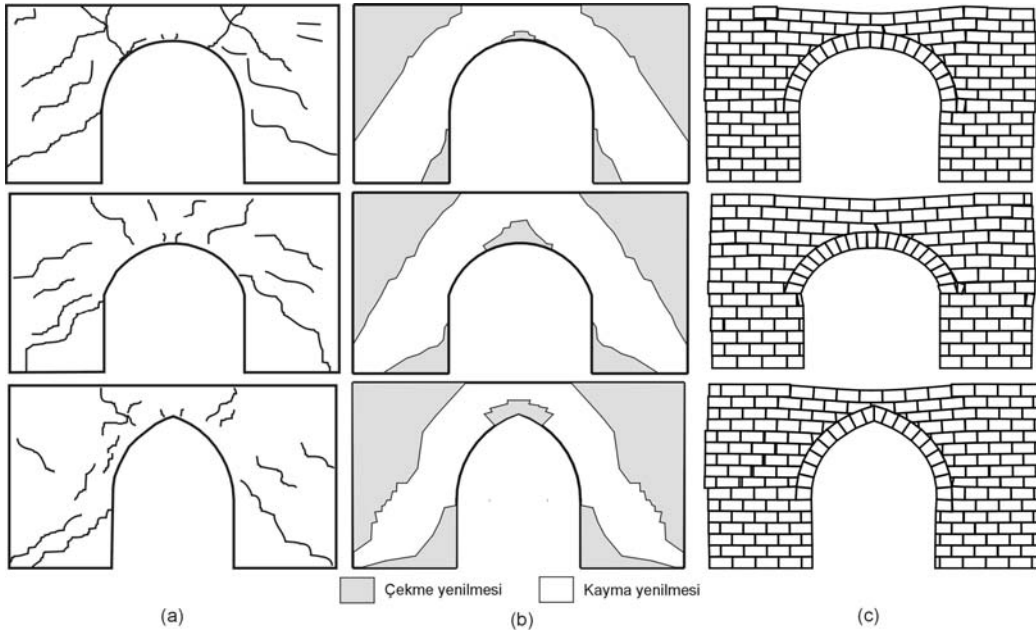
7. SONUÇLAR (RESULTS)

Tarihi yapıların korunabilmeleri ve gelecek nesillere aktarılabilmesi için restorasyon çalışmalarının doğru biçimde yapılması gerekmektedir. Bu çalışmalar sırasında yapının mekanik davranışının doğru kavranılmış olması ve uygun bir yöntemle statik ve dinamik analizlerinin yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada; değişik kemer geometrilerine sahip model yığma duvarların deneysel ve sayısal yöntemlerle mekanik davranışını belirlenmesi ve çeşitli sayısal analiz yöntemlerinin bu tür yapıların analizlerine uygunluğunun tartışılması amaçlanmıştır.

Yığma yapıların analiz edilebilmesi için bugüne kadar çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar, geometrik yük faktörü (2), doğrusal elastik sonlu elemanlar analizi, limit bloklı analizi (3), doğrusal olmayan elastik-plastik sonlu elemanlar yöntemi, ayrık elemanlar yöntemidir.

85 santimetre açıklığa sahip tam, sivri ve sepet kulpu kemer modelleri, yenilene kadar açıklık boyunca düzgülün yayılı yük ile yüklenmiş ve kemerlerde oluşan deformasyonlar yük ile birlikte kayıt edilmiştir. Deney sonuçlarına göre tam kemer 18 ton sepet, kulpu kemer 22 ton ve sivri kemer 21 ton maksimum yük taşımıştır.



Şekil 17. Model kemerlerde deney sırasında gözlemlenen çatlakların konumları, Flac3D ile belirlenen yenilme bölgeleri ve UDEC modellerinde, yenilme durumunda gözlenen deformasyonlar (Locations of fractures observed during model tests, failure zones determined by Flac3D and the deformed shape of UDEC models)

Model kemerlerin 3 boyutlu sonlu farklar analizleri ve ayrık elemanlar analizleri yapılmıştır. Blokların, harcın ve birleşim yüzeylerinin mekanik davranışı deneylerle belirlenmişse de bloklardan ve bunların birleşim yerlerinden meydana gelen yığma yapı sisteminin deformasyon modülü ve dayanım parametreleri bilinmemektedir. Bu parametreleri tahmin edebilmek amacıyla Flac3D modelleri (3 boyutlu sonlu farklar analizleri), kemerler üzerinde yapılan deney sonuçları kullanılarak kalibre edilmiştir. Buna göre yığma yapı sisteminin ortalama deformasyon modülü “ E_{50} ” 400 MPa olarak, $c = 400$ kPa, $\phi = 40^\circ$ ve çekme dayanımı 200 kPa olarak belirlenmiştir. Ayrık elemanlar analizlerinde kemeri oluşturan bloklar ve bloklar arasındaki süreksizlikler (harç-tuğla birleşim yüzeyleri) ayrıca modellenmiştir. Blokların ve süreksizliklerin mekanik parametreleri laboratuvarında yapılan deneylerden elde edilmiştir. Ayrık elemanlar simülasyonlarından elde edilen yük deformasyon ilişkileri deney sonuçlarına oldukça yakın çıkmıştır.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

E	: Ortalama elastisite modülü
σ_c	: Basma dayanımı
σ_t	: Çekme dayanımı
E_{50}	: Ortalama deformasyon modülü
τ	: Kayma gerilmesi
σ_n	: Normal gerilme
τ_{doruk}	: Doruk kayma dayanımı

$\tau_{artık}$: Artık kayma dayanımı
ϕ	: Sürtünme açısı
c	: Kohezyon
ν	: Poisson oranı
k_n	: Normal rijitlik
k_s	: Kayma rijitliği

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Toker, S., Ünay, A.İ., “Kemerli Taş Köprülerin Matematiksel Modellenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi”, **G. Ü. Fen Bilimleri Dergisi**, 2 (17), 129-139, 2004.
2. Heynman, J., “The Safety of Masonry Arches”, **International Journal of Mechanical Sciences**, 11, 363-383, 1969.
3. Orduna, A. & Lourenco, P. B., “Cap Model for Limit Analysis And Strengthening of Masonry Structures”, **Journal of Structural Engineering**, 10 (129), 1367-1375, 2003.
4. Itasca, **Flac3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions User's Guide**, USA, 2002.
5. Itasca, **UDEC Universal Distinct Element Code User's Guide**, USA, 2000.
6. Lourenco, P. B., “Guidelines for the Analysis of Historical Masonry Structures”, **Proceedings of the Diana Congress**, 2002.