



Tarihi Yapıların Temel Sistemlerinin Güçlendirilmesi

Seyhan FIRAT^{1*}, Nihat S. IŞIK¹, Emine SELÇUK²

¹ Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye
² Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Seyhan FIRAT ORCID No: 0000-0003-3649-0999

Nihat S. IŞIK ORCID No: 000-0002-5104-9504

Emine SELÇUK ORCID No: 0000-0001-6358-3328

*Sorumlu yazar: sfirat@gazi.edu.tr

(Alınış: 21.06.2020, Kabul: 20.08.2020, Online Yayınlanma: 23.10.2020)

Anahtar Kelimeler

Tarihi yapılar,
Güçlendirme,
Temel sistemi,
Drenaj

Öz: Kültürel miras özelliği taşıyan yapılar tüm insanlığa aittir. Bu yapılar, zaman içinde pek çok sebeplerle meydana gelen oturma ve taşıma gücü problemleriyle karşı karşıya kalmaktadırlar. Bu yapıların gerek aldığı hasarlar, gerekse yeniden ve farklı amaçlarla kullanıma açılmaları nedeniyle onarımlarının yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmalar planlanmadan önce varsa hasar boyutları ve nedenleri tespit edilmeli, yapısal etütler, malzeme ve zemin etütleri hassasiyetle yapılmalı ve tarihi dokuya en az müdahale gerektirecek çözümler seçilmelidir. Yapılan işlemler geri alınabilir ve dönüştürülebilir olmalıdır. Temeller de tarihi yapının anatomisinin bir parçası olarak mümkün olduğu kadar korunmalıdır. Bu çalışmada tarihi yapıların temelleri, onarım ve güçlendirme nedenleri ile temel sistemlerine yapılan iyileştirmeler örnekler ışığında incelenmiştir. Ayrıca Türk Mimarlık Tarihinin önemli bir yapısı olan Gazi Mustafa Kemal Paşa Muallim Mektebi'ne drenaj amaçlı yapılan kazı çalışması Plaxis 2D yazılımında modellenmiş, yapı temeli yer değiştirmeleri ve zemin davranışı yorumlanmıştır. Farklı derinlik, farklı genişlik ve farklı zemin özellikleriyle oluşturulan senaryolar da analiz edilmiş ve yorumlanmıştır. Sonuç olarak yapılan kazı çalışmasının yapıya zararlı etkisinin olmadığı ve zeminde taşıma gücü problemlerinden önce kabarmaya bağlı yer değiştirmelerin oluştuğu gözlenmiştir.

Foundation Reinforcement of Historical Buildings

Keywords

Historical buildings,
Strengthening,
Foundation type,
Drainage

Abstract: Historical monuments are all of humanity's cultural heritage. These structures face to settlements and bearing capacity problems that occur for many reasons over time. It is necessary to make repairs for both to correct the damages and reuse them for different purposes of these buildings. Before planning these studies, damage dimensions and causes should be determined, structural, material and soil tests should be done with precision and solutions that require minimal intervention to the historical texture should be selected. Transactions should be reversible and recyclable. The foundations should be preserved as much as possible as part of the anatomy of the historical structure. In this study, the foundations of historical buildings, the reasons for repair or strengthening and improvements to the foundation systems were examined by examples. In addition, the excavation work for the drainage of Gazi Mustafa Kemal Pasha Muallim School, which is an important structure of Turkish Architecture History, was modelled in Plaxis 2D software and structure foundation displacements and soil behaviour were interpreted. Scenarios created with different depth, different width and different soil properties were also analysed and interpreted. As a result, it was observed that the effect of excavation on the structure was not dangerous and displacements due to heaving occurred before the bearing capacity problems.

1. GİRİŞ

Tarihi yapıların, sahip oldukları mimari ve mühendislik özelliklerini değiştirmeden insanlığın geleceğine sunulması önemli bir sorumluluktur. Çeşitli nedenlerle hasar gören ya da tekrar veya farklı kullanıma sunulması amacıyla bu yapılara farklı zamanlarda restorasyon ve güçlendirme çalışmaları yapılmaktadır. Tarihi yapılara yapılan bu koruma ve güçlendirme müdahaleleri, mimarisini korumaya yönelik olduğu gibi mühendislik özelliklerini de muhafaza etmelidir.

Tarihi yapılara yapılacak her müdahale mümkün olduğu kadar geri alınabilir, dönüştürülebilir, orijinal dokuya uygun fakat ondan ayrılabilir nitelikte olmalı ve köklü değişiklikler yapmaktan kaçınılmalıdır [1].

Tarihi yapıların korunması bilinci insanlık tarihi göz önüne alındığında oldukça yenidir. 18. yy sonlarında başlayan koruma bilinci daha çok şeklen yapılan, mühendislik temeli olmayan bir yaklaşımdı. Yıllar içinde koruma ve iyileştirmenin mühendislik analizleri ışığında yapılması gerekliliği anlaşılınca da zemin ve temel davranışının etüt edilmesi gerekliliği göz ardı edilmiştir.

Tarihi yapıların temelleri de diğer öğeleri gibi sahip olduğu kimliğin ayrılmaz bir parçasıdır. Temeller; çeşidi, yapım tekniği ve malzemesiyle, ait olduğu yapıya, tarihe ve coğrafyaya ait motifler taşır. Bu nedenle, tarihi yapıların temellerinin de diğer bütün öğeleri gibi özgünlüğü mümkün olduğunca korunması gereklidir. Taşıma gücünün yeterli olduğu durumlarda temeller onarılmalı, çürüyen bozulan elemanlar aslına uygun olanlarla değiştirilmelidir. Zemin kapasitesi yeterli değilse modern yöntemlerle temel veya zemin iyileştirmesi yapılabilmektedir. Bu durumda temelin boyutlarının değiştirilmesi ya da kazıklı sistemlerle desteklenmesi tercih edilebilirse de temel bölgesinde çalışmanın kısıtlı ve zor olması, bazı uygulamaları yapmanın mümkün olmaması sıkıntı oluşturmaktadır. Bu gibi durumlarda zemin iyileştirme yöntemleri ile taşıma gücünü yükseltmek hem uygulaması kolay hem de yapıya müdahale gerektirmeden yapılabileceği için tercih edilen işlemlerdir. Adı geçen yöntemlerin birkaçı genellikle bir arada uygulanmaktadır [2].

Yapı temeli açısından en büyük sorunlardan birisi temel seviyesine sızan sulardır. Temel sistemi mümkün olduğunca sudan uzak tutulmalıdır. Bazı tarihi yapılarda, suyun etkilerinden korunmak amacıyla temel çevresine galeriler yapılmıştır. Galeriler sayesinde hem temellerin havalanması, kuru kalması sağlanmış hem de duvar kılcallarında yükselen kapiler su engellenmiştir.

Suyun bir başka tehlikesi ise depremle birlikte ortaya çıkmaktadır. Bazı temiz kum ve silt tabakalarda ortaya çıkan sıvılaşma sorunu yapının yüklerini taşıyan zeminin gücünü tamamen kaybetmesine ve sıvı olarak davranmasına yol açar. Zeminin boşluklarındaki su için drenaj imkânı oluşturulursa, deprem esnasında ortaya çıkabilecek aşırı boşluk suyu basınçları azaltılmış ve olası sıvılaşma da önlenmiş olacaktır [3].

Coğrafyamız, tarihinden kaynaklanan eserleri bizlere cömertçe sunan zengin bir yerleşimdir. Bu eserler zaman içinde, pek çok nedenlerden dolayı hasarlar almış ve bazıları defalarca onarılmıştır. Vakıflar Genel Müdürlüğü, ülkemizde, 1990 yılı verilerine göre 4544 cami ve mescit, 307 zaviye, imaret ve tekke, 273 medrese, darüşşifa ve bimarhane, 410 han ve kervansaray, 1164 türbe ve 300 adet sıbyan mektebi, sebil ve şadırvan belgelemiştir [4]. Bugün ise 100.000'den fazla tarihi yapı, Kültür ve Turizm Bakanlığı'nın Korunması Gerekli Taşınmaz Kültür Varlıkları listesinde [5].

Günümüzde tarihi yapıların korunması kapsamında temellerinin ve zemininin iyileştirilmesi için pek çok klasik ve modern yöntemler kullanılmakta, konuyla ilgili akademik çalışmalar yapılmaktadır.

Restorasyon müdahaleleriyle iyileştirilmeler yapılmasına rağmen köklü mühendislik analizleri yapılmadığı için tekrarlayan deformasyonlarla karşılaşılacak pek çok yapı vardır. Bu yapılardan biri olan Küçük Ayasofya Cami, 6.yy'da kilise (Sergius ve Bacchus Kilisesi) olarak inşa edilmiş, 16. yy'da camiye çevrilmiştir. Merkezde balkabağı formu büyük kubbe ve onun çevresindeki yarım kubbelerden oluşan kemerli, kubbeli, tonozlu yığma bir yapıdır. Tüm kemerler ve kubbeler taş, tuğla ve harçtan yapılmıştır. İstanbul'daki en eski Bizans yapısı olma özelliğine sahiptir. Çeşitli dönemlerde maruz kaldığı depremler ve oturduğu zeminin yapısı nedeniyle yapıda farklı oturmalar, kubbe ve tonozlarda çatlak ve açılmalar ortaya çıkmıştır [6]. Zaman içinde yapılan yanlış restorasyon ve onarımlar da çatlakların tekrarlamasına ve büyümesine neden olmuştur. Camiye çevrildiğinde inşa edilen kurşun kaplı klasik bir külaha sahip olan minare, bilinmeyen sebeplerden dolayı 1936'da yıkılmış ve 1955 yılında tekrar yapılmıştır. Bazı yenileme çalışmalarından sonra minare, camiye doğru eğilmeye başlamıştır. Yapı içinde 2 ve dışında 4 olmak üzere 6 adet gözlem kuyusu, 3 adet sondaj kuyusu açılmış; yapı temelinin tarihi düzgün blok taşların üzerine oturduğu ve zemin özelliklerinin doğu-batı doğrultusunda değiştiği tespit edilmiştir. Binanın güneyinde açılan 3 numaralı sondaj kuyusunda sıkıştırılabilir yumuşak siltli kil ve gevşek kum tabakalarına rastlanılmış ve daha gevşek zemin özelliği olan batı yönünde yapının oturduğu gözlenmiştir [6].

Farklı oturmaları durdurmak ve depreme karşı yapıyı güçlendirmek için, tarihi yapıya en az müdahale gerektirecek şekilde iyileştirme yapılmaya karar verilmiştir. Taşıyıcı duvarlar ve sütunlar 165 milimetre çaplı eğimli mikro kazıklarla desteklenmiş, kazıklar üst kotta sürekli kirişlerle tarihi temellerle bağlanmıştır. Kiriş üst kotu tarihi döşemenin altında kalacak şekilde imal edilmiştir. Zemin iyileştirmesi için de mikro kazıkların ara bölgelerinde olmak üzere zemine çimento enjeksiyonu yapılmıştır [6].

Gevşek suni bir dolgu tabakaya inşa edilmiş, zemine çakılan kısa ahşap kazıklar ve üzerindeki ahşap ızgaranın üzerine bina edilmiş olan Ortaköy Camii, tarih içinde defalarca güçlendirme ve onarım görmüştür [2]. Ortaköy

iskelesine yanaşan vapurların neden olduğu dalgalanma, titreşim ve çalkantıların sebep olduğu ritim avlusunda çatlak ve açılmalar oluşmuştur. Temellerin güçlendirilmesi için caminin beden duvarı boyunca 64 adet, 450 mm çaplı fore kazıklar imal edilmiş, 20 m derinlikteki sağlam zemin tabakasına ulaşılmıştır. Aynı zamanda deniz tarafındaki avlunun dolgu zeminine ise 80 ton çimento enjeksiyonu yapılmıştır. Bu şekilde hem temeller güçlendirilmiş hem de zemin iyileştirmesi yapılmıştır [2].

Bosna Hersek'te 1993 savaşında pek çok tarihi eser, özellikle de Osmanlı yapısı pek çok yapı, tahrip olmuş veya tamamıyla yıkılmıştır. Bunlardan biri Banja Luka şehrinin en önemli yapısı olan Ferhat Paşa Camii'dir. Mimar Sinan'ın adı bilinmeyen bir öğrencisi tarafından 16. yy'da inşa edilmiş olan yapı, aktif bir deprem hattında olması sebebiyle zaman içinde deprem etkisiyle tahrip olmuştur. En son 1993 yılında iç savaşta patlayıcılarla tamamen yıkılmış, sadece temelleri kalmıştır. 2001 yılındaki iyileştirme çalışmasında yapının temelleri bütünüyle ortaya çıkarılmıştır. Temelleri teşkil eden düzgün şekilli taş sömellerin 9 metrelik ahşap kazıkların üzerine oturduğu tespit edilmiştir. Cami, aslına uygun olarak yeniden inşa edilirken, yapının, Bosna Hersek'in en güçlü sismik zonunda olması sebebiyle deprem etkileri göz önünde bulundurulmuş, güçlendirme projeleri yapılmıştır. Temeller açısından en büyük sorun deprem bölgesindeki yapının temel derinliğinin yeterli olmaması olarak tespit edilmiştir. Güçlendirme için taş temeller 20 santimetre çapında mikro kazıklarla desteklenmiş ve bu şekilde meşe kazıkları da dahil olmak üzere mevcut tarihi temeller aslına uygun olarak korunmuştur [7-9].

Zeminle ilgili sorunlar yaşayan bir başka yapı ise 1000 yıllık geçmişi olan Zaragoza'daki Tarihi Pılar Bazilikasıdır. Yaklaşık 100 metre uzunluğunda ve 70 metre genişliğinde dikdörtgen planlı, geniş ve karmaşık bir yığma yapıdır. Ebro Nehri kıyısında, taşıma gücü düşük alüvyon zemine inşa edilmiştir [10]. Farklı zamanlarda yapılan iyileştirme çalışmaları sonucunda yapı hayatta kalmaya devam etmiştir.

Geoteknik problemlerden etkilenen dünya üzerindeki en önemli tarihi yapılardan bir tanesi de Pisa Kulesi'dir. Yapımından itibaren zeminle ilgili problemlerle karşılaşılana ve eğilmeye başlayan kulenin inşası pek çok kez kesintiye uğramıştır. Pek çok araştırma ve çalışmaya konu olan kule, 2 m'lik organik toprak, 7 m killi ve kumlu silt tabakasından sonra, 38 m'ye kadar çeşitli özellikteki killer ile sıkı kum tabakasının üzerine oturmaktadır. Özellikle üstteki kil tabası yüksek oturma potansiyeline sahiptir. Kule temelleri zeminin 3 m altında, deniz seviyesinde ve kuzey yöndeki yeraltı su seviyesi güney yönündekinden daha yüksektir. 19,6 m'lik halka temel üzerinde yükselen kule, daha 4. kat yapılırken eğilmeye başlamıştır. 1173-1370 yılları arasında süren inşaatın sonunda, kulenin düşeyden 3° saptığı düşünülmektedir. İnşaatın tamamlanmasından sonra da eğilme devam etmiş, eğilme hızının 1945 yılında 3/yıl iken 1990'da iki katına çıktığı hesaplanmıştır. 2000'lere geldiğinde temel taban

basıncı kuzey uça neredeyse 0'a yaklaşırken güney uça tehlikeli boyutlara ulaşmış ve kule eğiminin 5,5° olduğu tespit edilmiştir. Bu durum kulenin devrilmesi kadar zemin göçmesi riskini de artırmıştır. Sonunda kulenin temelini altından kuzey yönünden, 30° eğimle sondaj kuyuları açılarak, çok yavaş bir biçimde zemin çıkarılması ve kulenin çelik kablolar ve kurşun ağırlıklarla gereken eğime gelene kadar tutulmasına karar verilmiştir. Aynı zamanda bu işlem yapılırken gözlem kuyuları yardımıyla yeraltı suyu seviyesi gözlenmiştir. Bu çalışmanın, çok yavaş bir şekilde ve kulenin eğimi güvenli seviye olan 5°'nin altına indirilene kadar devam edilmesi planlanmıştır. Kulenin bugünkü eğimi 3,97°'dir [11,12].

Zemin etütleri köklü bir şekilde yapılmadan, yapı ve zemin davranışı analiz edilmeden girişilen restorasyon ve iyileştirme çalışmaları, uzun vadede problemlerin çözümü olmamaktadır. Buna en iyi örneklerden biri Konya Alaeddin Camii'dir. Çeşitli tarihlerde farklı sorunlar yaşamış gibi görünen yapı, kısmi analizlerle tamiratlar geçirmiş ancak sorunlar tekrar etmiştir.

Selçuklu mimarisinin özelliklerini yansıtan en eski camii olan Alaeddin Camii, 17-30 metre yüksekliğindeki dolgu bir teppe üzerine, 1 metre genişliğinde ve 70 santimetre derinliğinde tekil kare temellerle inşa edilmiştir. Temelleri yer yer eski Bizans kalıntısı temeller üzerine oturmuştur. Bir dönem silah deposu olarak da kullanılan camide, 1940'lı yıllardan itibaren çok çeşitli nedenlerle insanip yumuşayan ve hacim değişikliklerine uğrayan zemin nedeniyle oturma ve çatlak sorunları yaşanmıştır. İlk çözüm olarak sütun altı temeller birbirine betonarme hatıllarla bağlanmış ancak zeminle ilgili problemler sonraki yıllarda tekrar ortaya çıkmıştır. 1956 yılında avlunun kuzeybatı duvarlarında çökme, yarıma ve eğilmeler meydana gelmiştir. 1966'da sütun temellerinde açılmalar oluşmuş, hünkâr mahfilinin çatısı bu nedenle çökmüştür. Minarede eğilme meydana gelmiştir. 1978-79 yıllarında doğu cephesi stabilitesi sağlandığında ise bu defa batı cephesinde oturma ve kaymalar meydana gelmiştir. Öncelikle, tepedeki kaçak veren su deposu ve boruları kaldırılmış, lavabolar taşınmış, çevre yeşil alanların sadece sıcak aylarda yağmurlama sistemi ile sulanmasına karar verilmiş ve camii çevresine yeni bir drenaj sistemi yapılmış, çatı akarları yenilenip drenaj sistemine bağlanmıştır. Zemin güçlendirmesi için camii'nin iç dış bölgelerine 221 adet noktadan 836,388 kilogram çimento enjekte edilmiştir. Temel güçlendirme için camii duvarlarının iç ve dış bölgelerinde 59 adet 28 milimetre çaplı mini kazık imal edilmiştir. Düşey ve eğimli olmak üzere 2 çeşit imal edilen kazıklar camii içinde sütunlar arasında, camii dışında ise duvarlar boyunca bağlantı kirişleriyle bağlanmıştır. Bağlantı kirişlerine ön germe uygulanmıştır. Temel ve taban enjeksiyonları yapılarak mini kazıklar tepenin altındaki doğal alüvyonlu zemine 1 metre girecek şekilde dökülmüştür [2, 13-15].

Bu makalede, genel olarak tarihi yapılara yapılan koruma ve güçlendirme müdahaleleri yapı temelleri açısından incelenmiştir. Gazi Üniversitesi Rektörlük Binası olarak kullanılan tarihi yapıya, 2013 yılında,

drenaj için yapılan kazı çalışmasının yapı-zemin stabilitesine etkileri analiz edilmiştir. Analizler sonucunda Gazi Muallim Mektebi'nin yapılan kazı çalışmasından etkilenmediği, zeminde taşıma gücü kaybı oluşmadığı, güvenlik faktörünün yüksek olduğu ve zeminde kazı kaynaklı bir miktar kabarma oluştuğu görülmüştür. Analizlerde farklı kazı derinliği ve genişlikleri dikkate alınarak olası farklı uygulamaların deplasmanlar üzerindeki etkisi çalışılmıştır. Drenajsız kayma dayanımı değeri daha düşük bir zeminde aynı boyutlarda bir kazının göçmeye karşı güvenlik katsayısının çok daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

2. SAYISAL MODELLEME VE ANALİZ

Geoteknik mühendisliğinde, yapım sürecinde deformasyonların ve stabilite seviyesinin tespiti için teorik ve ampirik birçok hesaplama yöntemleri kullanılır. Geoteknik çalışmaların modellenmesi yapılırken modellemelerin hızlı ve doğru olması için sayısal teknikler ile bilgisayar ortamında hesaplanmaları ve değerlendirilmeleri yapılmaktadır. En yaygın kullanılan sayısal hesaplama yöntemi, sonlu elemanlar yöntemidir. Bu çalışmada Plaxis yazılımı, çalışmanın modelleme sürecinde kullanılmıştır.

2.1. Plaxis Yazılımı

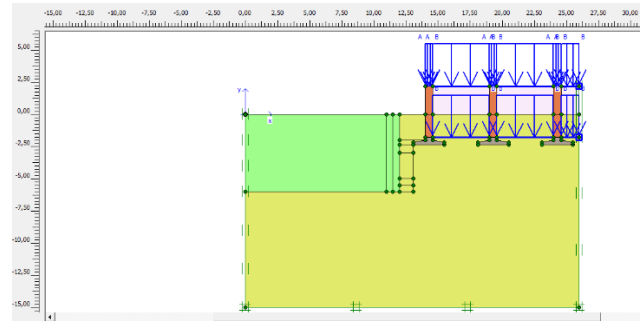
Plaxis (Finite Element Code for Soil and Rock Analysis), geoteknik problemleri sonlu elemanlar yöntemi ile çözmeye yarayan, deformasyon, stabilite, dinamik analizlerini zamana bağlı olarak çözümlenmeler yapabilen bir ticari bilgisayar programıdır. Plaxis 2D ile zemin, birbirinden bağımsız üçgen elemanlara bölünür. Program; çıktıların görselleştirilmesine, her bir zemin elemanın gerilme ve deformasyon sonuçlarını ayrıntılı elde edilmesine, zemin ve yapı etkileşimlerinin kolayca kontrol edilmesine olanak tanımaktadır. Her bir aşama kademeli olarak tanımlanabilir. Çalışmaların ayrı fazlarda tanımlanması, yapım ve hafriyat esnasında gelişecek durumların da gözlenmesine ve zamana dayalı gerçekçi bir analiz yapılabilmesine imkân verir. Kullanılan bu simülasyon yazılımı, çok fazlı bir malzeme olan zemin içinde çalışma yapılırken boşluk suyu basınç değişimlerinin de mutlaka göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Plaxis, kolay kullanım ve gerçeğe yakın modelleme ile güvenilir ve ayrıntılı analiz için imkân sağlamaktadır [16-17].

2.2. Drenaj Çalışması Modellemesi

Gazi Üniversitesi Rektörlük Binasına, temel altına sızan ve bodrum kat duvarları tarafından emilen suların yapıya zarar vermemesi için 2013 yılında yağmur suyu ve yüzeysel sulardan koruma amaçlı taban drenajı çalışması yapılmıştır. Yapının doğu, kuzey-doğu ve güney-doğu cepheleri 2 m genişliğinde ve 2 m derinliğinde binaya sıfır olarak kazılmış, temel altı seviyesine inilmiştir. Bu araştırmada gerçekte yapılan kazı profilinin yanında farklı derinlikte, genişlikte ve farklı zemin koşulunda yapılabilecek kazı senaryoları da analiz edilmiştir.

Yapı altındaki zemin Plaxis 2D yazılımında bulunan doğrusal elastik – mükemmel plastik bünye modeli kullanılarak modellenmiş, zemin dayanımı ise Mohr-Coulomb yenilme kriteri ile tanımlanmıştır. Malzeme özellikleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Binası Zemin Etüt Raporu'na göre tanımlanmıştır. En kritik sonuçlar veren malzeme özellikleri seçilmiş ve Ankara kili davranışı da göz önüne alınarak parametreler seçilmiştir.

Başlangıç geometrisi için yapının doğu-batı doğrultusunda 3 adet sürekli temel kesiti, bodrum kat taşıyıcı duvarları zemin kat ve birinci kat döşemeleri ile kazı profili tanımlanmıştır (Şekil 1). Birinci katın üzerinde kalan kısım taşıyıcı duvarlar üzerinde yayılı yük olarak tanımlanmıştır. Döşemelerin tamamı için yük değeri kendi ağırlığıyla birlikte $6,5 \text{ kN/m}^2$, birinci ve üzeri katların taşıyıcı duvarların tamamı için yük değeri 300 kN/m^2 olarak tanımlanmıştır [18].

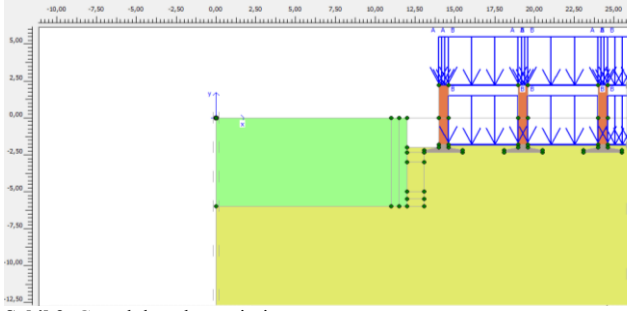


Şekil 1. Başlangıç geometrisi

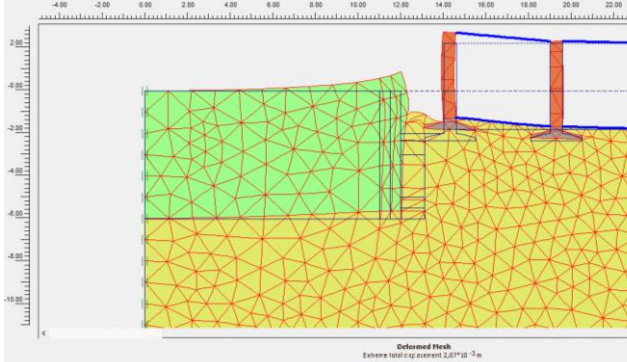
Zemin özellikleri temel altı zeminin deformasyonlarının daha iyi gözlenmesi için iki farklı şekilde tanımlanmıştır. Yapılan kazının tarihi yapı temellerine olan etkisinin analiz edilebilmesi, kazının diğer yanında kalan bölgenin yapı alanından önce yenilmemesi için bu bölge lineer elastik olarak tanımlanmıştır. Laboratuvar analizlerinde de düşük ve yüksek plastisiteli kil olarak tespit edilen zemin özellikleri, SPT sonuçları ve Ankara kilinin karakteristikleri göz önüne alınarak; elastisite modülü $E = 50.000 \text{ kN/m}^2$, drenajsız kohezyon değeri $c = 84,15 \text{ kN/m}^2$, drenajsız içsel sürtünme açısı $\phi = 0^\circ$, birim hacim ağırlığı $\gamma = 18,4 \text{ kN/m}^3$ olarak seçilmiştir [19-21].

Bodrum katında kullanılan taşıyıcı andezit duvarlar için birim hacim ağırlığı 22 kN/m^2 , elastisite modülü $4.000.000 \text{ kN/m}^2$ olarak; betonarme temelin birim hacim ağırlığı 25 kN/m^2 , elastisite modülü $20.000.000 \text{ kN/m}^2$ olarak seçilmiştir.

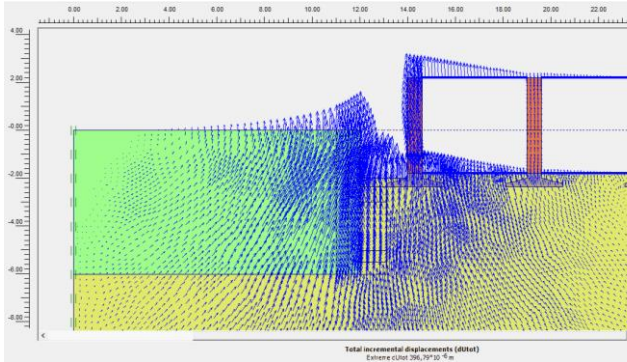
Yapılan kazı çalışması ve farklı kazı senaryoları için analizler yapılmıştır. İlk yapılan analiz yapının gerçek kazı analizidir ve yapı duvarından 2 m uzaklıkta ve zemin üst kotundan 2 m derinlikte (Şekil 2). Analiz sonuçlarına göre, yapılan kazının zemine ve yapıya önemli bir etkisi olmamıştır. Kazı ile birlikte zeminde az miktarda kabarma oluştuğu gözlenmiş, yapı temellerinin yukarı yönde zorlandığı görülmüştür. Temelin en uç noktasında yukarı ve yana yer değiştirme miktarı 1,2 mm olarak hesaplanmıştır (Şekil 3-4). En büyük yer değiştirme ise kazı tabanında ve duvarında olmuştur (Şekil 5).



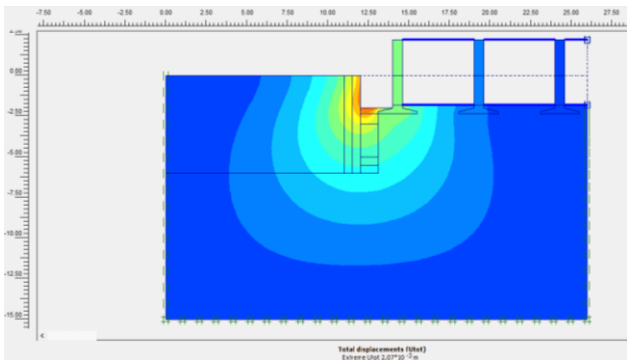
Şekil 2. Gerçek kazı benzetimi



Şekil 3. Gerçek kazı durumunda deformasyona uğramış birim elemanlar ağı (500 kez büyütülmüş deformasyonlar)



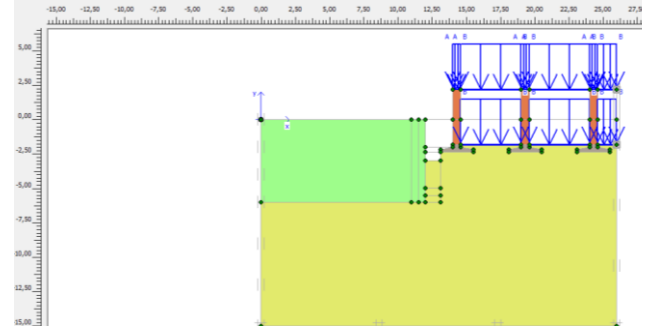
Şekil 4. Gerçek kazı toplam yer değiştirme artışları



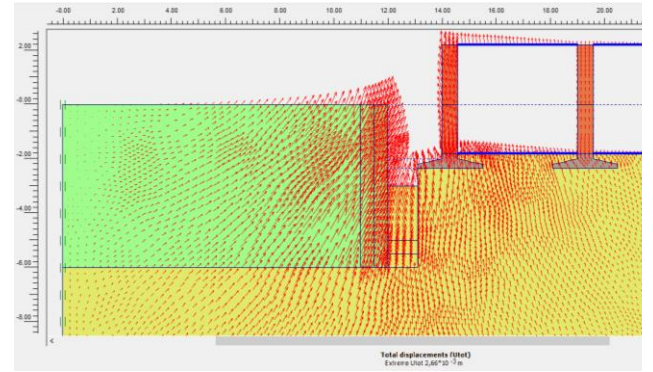
Şekil 5. Gerçek kazı için toplam yer değiştirme dağılımı

Sonraki adımda (faz 2) kazı temel kotunun altına, zemin üst kotundan 3 m derinliğe kadar devam edilmiştir (Şekil 6). Gerçekte böyle bir kazı yapılmamıştır. Bu tür bir kazı yapılması olasılığında oluşabilecek deformasyonları belirlemek amacıyla farklı durumlar analiz edilmiştir. Zeminde az miktarda kabarma oluşmuş, yapı temellerinin bu durumda da yukarı yönde zorlandığı,

yukarı ve yana doğru 1,01 mm deplasman yaptığı gözlenmiştir. En büyük deformasyon kazı tabanında ve duvarında gerçekleşmiştir (Şekil 7).



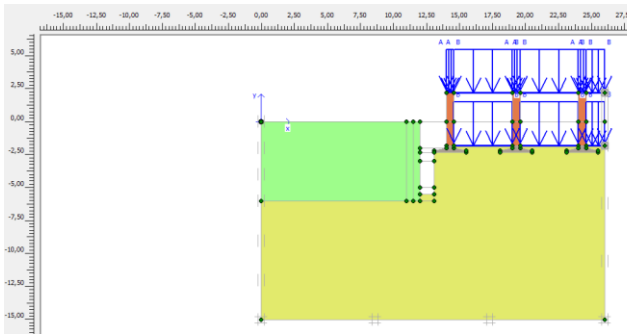
Şekil 6. Faz 2 kazı benzetimi



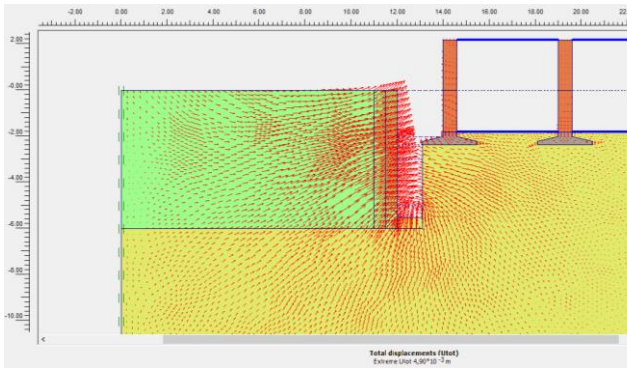
Şekil 7. Faz 2 toplam yer değiştirmeler

Gazi Üniversitesi Rektörlük Binasının oturduğu Ankara kili nispeten yüksek şişme potansiyeli olan bir yapıya sahiptir. Arazideki su muhtevası şartlarında, kazı gerçekleşmeden önce zemin tabakalarının kabarma basıncı ile örtü yükü dengededir. Kazı ile örtü yükünün kalkması sonucu kuvvetlerin dengesi bozulur ve kabarma basıncının etkisiyle zeminde bir miktar kabarma oluşur. Ankara kilinde 0,51-1,28 kg/cm² arasında şişme basıncı görülebilmektedir [19].

Sonraki adımlarda zemin üst kotundan 5,5 (faz 3) ve 6 (faz 4) m derinliklerine kadar kazıya devam edilmiştir. 5,5 m derinliğindeki kazı en kesitinde; kazı tabanındaki kabarma artarken ve yapı temellerinin yukarı yönde zorlanması çok azalmış, temel deplasmanı kazı tarafında 0,66 mm olmuştur. Kazı tabanındaki şişme 3,64 mm'dir (Şekil 8-9). En büyük deformasyon kazı dış duvarında oluşmuş, ancak buradaki malzeme lineer elastik olarak tanımlandığı için yapılan analizde bir göçme oluşmamıştır.

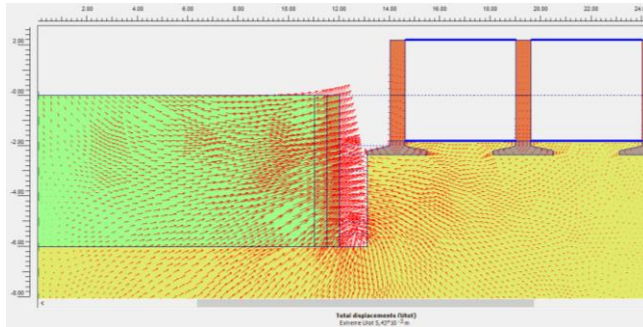


Şekil 8. Faz 3 kazı benzetimi



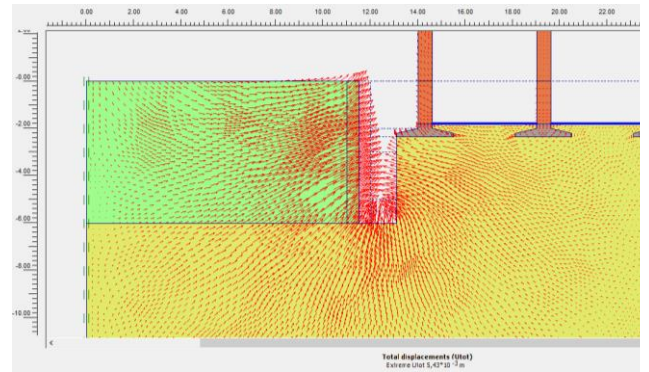
Şekil 9. Faz 3 toplam yer değiştirmeler

Kazı 6 m ye ulaştığında (faz 4) artık zemin yenilmeye ve yapı temelleri oturmaya başlamıştır. Dış temel dönmeye başlamış, ikinci ve üçüncü temeller 0,21 ve 0,32 mm oturmuştur (Şekil 9). Ancak seçilen zemin özelliği için kazı yenilmesi çok daha derin seviyelere kadar mümkün olmamaktadır. Kazı tabanındaki şişme 4,90 mm'dir. Derinlik arttıkça yani kaldırılan örtü yükü arttıkça kabarma miktarı da artmaktadır.



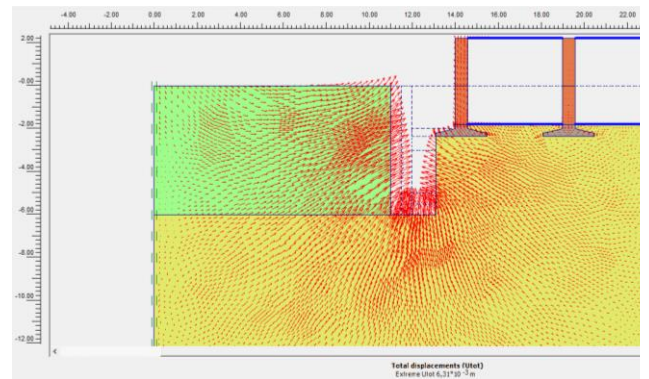
Şekil 10. Faz 4 toplam yer değiştirmeler

Son adım olarak temel alt kotundan 1 m olarak devam eden kazı 1,5 m (faz 5) ve 2 m (faz 6) olarak analiz edilmiştir. Kazı 1,5 m genişliğe ulaştığında kazı kenarındaki temelin yukarı yönlü yer değiştirmesi tekrar görülmüştür. Temelin uç noktasında 0,95 mm yer değiştirme oluşmuştur (Şekil 10).

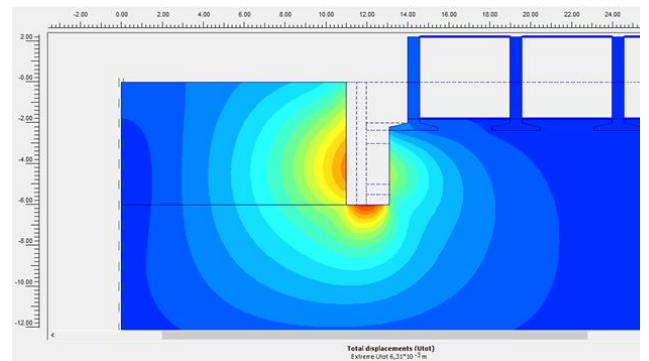


Şekil 11. Faz 5 toplam yer değiştirmeler

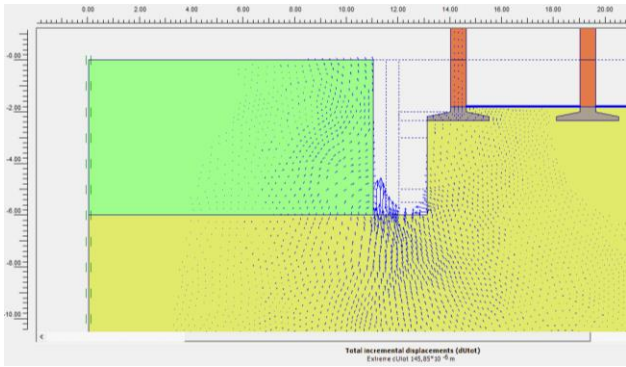
Kazı 2 m genişliğe (faz 6) ulaştığında en büyük deformasyonlar bir miktar daha artarken kazı kenarındaki temelin yukarı ve yana doğru yer değiştirmesi 1,12 mm olmuştur. Kazı kesiti genişlediğinde tabandaki kabarma miktarı da kazılan hacme bağlı olarak artmıştır (Şekil 11-12). Güvenlik katsayısı (FS) bu şekilde bir kazı da bile 2,283 olmuştur. Analizler devam ettirildiğinde güvenlik katsayısının -14 m derinliğe kadar 1'in üzerinde olduğu görülmüştür. Plastik deformasyonların ortaya çıktığı olası yenilme mekanizması; kazı kenarındaki temelin oturup, kazı tabanının tamamen yukarı yönlü hareketiyle olması şeklinde öngörülmüştür (Şekil 13).



Şekil 12. Faz 6 toplam yer değiştirmeler

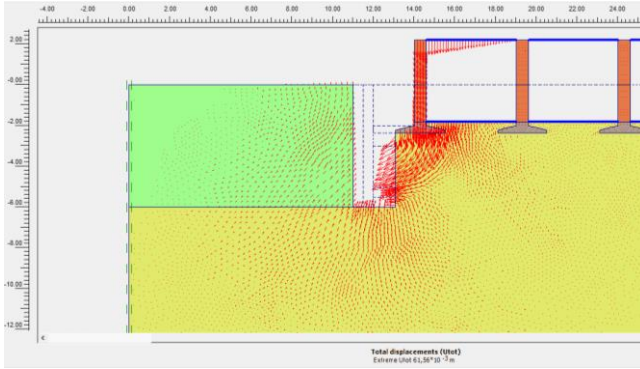


Şekil 13. Faz 6 toplam yer değiştirme alanları



Şekil 14. Faz 6 toplam deformasyon artışı

Son olarak zeminin kohezyon ve elastisite modülü değiştirilerek, aynı kazının daha zayıf bir zemin profilinde yapı temeline etkileri analiz edilmiştir. Yeni durumda elastisite modülü $E = 20.000 \text{ kN/m}^2$, drenajsız kohezyon değeri $c = 42 \text{ kN/m}^2$ olarak seçilmiştir. Nispeten daha zayıf olan zeminde oturmalar artmış, kazı kenarındaki temelin yer değiştirmesi $38,51 \text{ mm}$ 'ye ulaşmış, kazının güvenlik katsayısı (FS) $1,17$ 'ye düşmüştür (Şekil 14).



Şekil 15. Zayıf zemin profili toplam deformasyonu

Sayısal analizlerin gerçeğe yakınlık derecesi, malzeme özelliklerinin doğru tanımlanmasıyla ilişkilidir. Zemin etüdü için yapılan sondajların uygun sayıda, derinlikte ve kalitede yapılması, örselenmiş ve örselenmemiş numunelerin yeterli sayıda alınması, arazi ve laboratuvar testlerinin yapılması yani malzeme özelliklerinin doğru belirlenmesi gerekir. Zemin özelliklerinin ayrıntılı olarak tanımlanması, yapılan simülasyonla gerçeğe yakın sonuçlar bulunmasını belirlemektedir.

Ankara kili koşullarında, bu derinlikte bir kazı yapıldığında drenajsız koşullarda tarihi yapı temel sistemlerinin güvenli kaldığı görülmüştür. Ancak zemin koşulları Ankara kili kadar sert olmayan, yumuşak - orta katı bir kil tabakası özellikleri taşıdığı anda, deformasyonların zararlı boyutlara ulaştığı ve yapı güvenliğinin tehlike sınırlarına gireceği gözlenmiştir.

Mevcut zemin koşullarında, yapılan kazının, tarihi yapı temellerine çok önemli bir etkisi olmadığı, güvenli sınırlarda kaldığı görülmüş, zemindeki gerilmelerin kazı bölgesinde yoğunlaştığı ancak yapıya zarar verecek boyutlarda olmadığı görülmüştür. Sonuçlar gerçek uygulamayla örtüşmüştür.

Ayrıca mevcutta yapılan kazının farklı derinlik ve genişlikteki durumları da analiz edilmiştir. Ankara kili davranışına uygun olarak; zeminde kazı derinliği ve genişliği artmasına rağmen yenilme ve taşıma gücü kaybı görülmemiş, güvenlik katsayısı 2 'nin üzerinde kalmış, kazı bölgesinde bir miktar kabarma görülmüştür.

Ankara kili özelliklerine uygun olarak, kazı derinliği ve genişliği arttıkça yenilme mekanizmasından önce zeminin kabarma durumuyla karşılaşmıştır. Benzer özelliklerdeki zemin gruplarında kazı ve hafif yapılar için kabarma durumlarının da göz önünde bulunması gerekliliği görülmüştür.

Orta katı ve yumuşak zemin koşullarında tarihi yapı temelleri çevresinde yapılacak kazılarda, zeminle ilgili testler hassasiyetle yapılmalı, kazı güvenliği için gerekli önlemler mutlaka alınmalıdır.

3. SONUÇ

Tarihi yapıların korunarak geleceğe taşınması, tüm toplumlar için bir görev ve sorumluluktur. Bu eserlerin geleceğe aktarılması esnasında kendi mimari ve mühendislik özelliklerinin korunması gerekir. Gelecek nesillere aktarılmak üzere tüm bu türdeki yapılara bakım, onarım, restorasyon ve güçlendirme işlemleri uygulanabilir. Bunlar uygulanırken yapının diğer tüm özellikleri gibi temellerinin güçlendirilmesi de tarihi dokusu korunarak yapılmalıdır.

Gazi Mustafa Kemal Paşa Muallim Mektebi ülkemizdeki önemli tarihi yapılardan biridir. Yeni Türk Mimarisinin önemli eserlerinden biri olan yapı, zamanımıza kadar yapıma amacına uygun olarak kullanılmıştır. Büyük afetler geçirmemesi nedeniyle geniş ve büyük onarımlar görmemiştir. Günümüzde de işlevini tüm kapasitesi ile (gözlem kulesi hariç) sürdürmektedir.

Gazi Üniversitesi Rektörlük Hizmet Binası olarak kullanılan tarihi yapıda temelin altına sızan suların ve bodrum kat duvarlarının nemlenme probleminin yapıya zarar vermemesi için 2013 yılında taban drenajı çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışma sırasında yapının doğu, kuzey-doğu ve güney-doğu cepheleri kazılarak temel seviyesine inilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada hasır donatılı betonarme duvarlar yardımıyla drenaj çukurunun stabilitesi sağlanarak, yeni bir drenaj sistemi oluşturulmuştur.

Gazi Üniversitesi Rektörlük binasının oturduğu Ankara kilinden daha yumuşak, kohezyon ve elastisite modülünün daha düşük olduğu zemin modelinde yapılan kazı modellemesinde ise temel sisteminin deplasmanının arttığı, güvenlik katsayısının tehlikeli seviyelere düştüğü görülmüştür.

Tarihi yapıların korunması ve gelecek çağlara aktarılması için uluslararası kurallara ve yapının ruhuna uygun müdahale ve iyileştirmeler yapılmalıdır. Bu çalışmalar programlanmadan önce yapı ve zeminle ilgili mümkün olduğu kadar çok veri toplanmalı, deneyler ve

ölçümlerle mevcut durumun tam olarak ortaya konulması sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Uluslararası anıtlar ve sitler konseyi [İnternet]; 2019,[Son Erişim Tarihi 2019 Mart 17]. Erişim adresi: <http://www.icomos.org.tr/>
- [2] Sarı, MS. Temellerin takviyesi ve uygulamadan örnekler [Yüksek lisans tezi]. İstanbul. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2008.
- [3] Erköseoğlu, G. Kültürel mirasın depremden korunması ve turizme kazandırılması amacı ile uygulanabilecek güçlendirme teknikleri, [Uzmanlık Tezi]. Ankara. T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı Yatırım ve İşletmeler Genel Müdürlüğü; 2012.
- [4] Mahrebel, H A.. Tarihi yapılarda taşıyıcı sistem özellikleri, hasarlar, onarım ve güçlendirme teknikleri [Yüksek lisans tezi]. İstanbul. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2006.
- [5] T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü [İnternet]; 2019, [Son erişim tarihi 2019 Mart 17]. Erişim adresi: <http://www.kulturvarliklari.gov.tr/TR-44798/turkiye-geneli-korunmasi-gerekli-tasinmaz-kultur-varlig-.html>
- [6] Güler, K. Sağlamer, A. Celep, Z. and Pakdamar, F. Structural and earthquake response analysis of The Little Hagia Sophia Mosque. World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada: 2004. p.2652.
- [7] Hrasnica, M. Zlatar, M. Kulucija, S. Humo, M. and Madzarevic, M. Seismic strengthening and repair of typical stone masonry historical buildings in Bosnia and Herzegovina. 8 th International Masonry Conference, Dresden, Almanya: 2010. p. 1-10.
- [8] Hrasnica, M. and Medic, C. Seismic strengthening of historical stone masonry structures in Bosnia Herzegovina. 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal: 2012. p. 12621-12628.
- [9] Bosnian Institute [İnternet]; 2019, [Cited at 2019 June 22]. Available from: http://www.bosnia.org.uk/news/news_body.cfm?newsid=2373
- [10] Romera, LE. Hernandez, S. Reinoso, JM. Numerical characterization of the structural behaviour of the Basilica of Pilar in Zaragoza (Spain). Part 1: Global and local models. Advances in Engineering Software. 2008;39(1);301–314.
- [11] Burland, J B. Jamiolkowski, M. Viggiani, C. The stabiliation of the leaning Tower of Pisa. Soils and Foundations. Japenese Geotecnical Society. 2003;43(5);63-80.
- [12] [Rampello, S. Callisto, L. A study on the subsoil of the Tower of Pisa based on results from standard and high-quality samples. Canadian Geotecnical Journal. 2011;35(6);1074-1092.
- [13] Karadayılar, T. Durgunoğlu, T. Konya AlaeddinCamii temel zemini davranış modellemesi. 3rd National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. İstanbul. Boğaziçi University: 1990. p. 401-418.
- [14] Abicel, MR. Konya Alaeddin Camii'nde yapılan onarımlar ve zemin güçlendirme çalışmaları ile Alaeddin Tepesinin sorunları. Restorasyon ve Vakıfların Sosyal Etkileri Semineri, Ankara: 1987. p. 27-51.
- [15] Kaltakçı, MY. Temizci, S. Konya Alaeddin Camii'nde yapılan zemin iyileştirme ve temel güçlendirme çalışmaları ile Alaeddin Tepesinin sorunları. İnşaat Mühendisleri Odası İnşaat Mühendisliğinde Zemin Sempozyumu, İzmir: 1991. p. 13-25.
- [16] Plaxis [İnternet]; 2019, [Cited at 2019 September 30]. Available from: (2019). <https://www.plaxis.com/product/plaxis-2d/>
- [17] Yıldız, L. Donatıyla güçlendirilmiş şevli zemine oturan yüzeysel temel analizi [Yüksek lisans tezi], Adana. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü: 2005.
- [18] Selçuk, E. Tarihi yapıların temel sistemlerinin güçlendirilmesi, [Yüksek lisans tezi], Ankara. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü: 2019.
- [19] Yılmaz, U. Ankara kilinin (Çankaya-Ankara) sıkışma-kabarma özelliklerinin incelenmesi, [Yüksek lisans tezi], Isparta. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü: 2006.
- [20] Görmen, G. Ankara ili Yenimahalle ilçesi Gazi Üniversitesi zemin etüd raporu. Ankara. Yeni Bayındır Mühendislik Jeoteknik: 2013
- [21] Erol, AO. Çekinmez, Z. Geoteknik mühendisliğinde saha deneyleri. Ankara. Yüksel Proje Yayınları: 2014.