




Ayasofya Müzesi Zemin Yüzey Deformasyonlarının Yeraltı Radarı (GPR) İle İncelenmesi

*¹Efecan Belce, ²Tolga Bekler, ³Yunus Can Kurban, ⁴Cahit Çağlar Yalçın

¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği ABD, Çanakkale, efebelce@gmail.com, 

²Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, tbekler@comu.edu.tr, 

³ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği ABD, Eskişehir, ykurban@gmail.com, 

⁴ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çan Meslek Yüksekokulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Çanakkale, yalciner@comu.edu.tr, 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 04.01.2019

Kabul Tarihi: 01.04.2019

Öz

Tarihin ve İstanbul'un en önemli yapılarından biri olan Ayasofya geçmiş yüzyıllardan bugüne varlığını koruyarak gelmiştir. Tarihi süreçte farklı kültürlerle ev sahipliği yapan Ayasofya hem doğal hem de insan kaynaklı tahribatlara uğramıştır. Günümüzde varlığını müze olarak devam ettiren bu yapının zemininde gözlemlenen çatlakların durum tespiti amacıyla müzede, çalışma alanlarına tahribat bırakmayan yeraltı radarı (GPR) tekniği uygulanmıştır. Penetrasyon özellikleri dikkate alınarak farklı frekanslara sahip antenler kullanılarak galeri katı güney kanadı cennet kapısı önünde çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar doğrultusunda hem çatlakların tespiti hem de zayıf bölgelerin durumları tespit edilmesi hem de ince çatlakların ana çatlaklar ile bağlantısının durumu araştırılmıştır. Ayasofya Müzesi'nde galeri katında gerçekleştirilen yeraltı radarı jeofizik yöntemi çalışmaları ile üst galeri katındaki çatlak tipi deformasyonların durumu araştırılmıştır. Radargramların zemindeki çatlak ve çökmelerle birebir uyum sağladığı anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yeraltı radarı (GPR), Ayasofya, Çatlak

Investigation of Floor Surface Deformation of Hagia Sophia Museum with Ground-Penetrating Radar (GPR)

*¹Efecan Belce, ²Tolga Bekler, ³Yunus Can Kurban, ⁴Cahit Çağlar Yalçın

Abstract

One of the most important structures in history and in Istanbul of Hagia Sophia has survived for centuries to reach the present day. Housing different cultures during the progress of history, Hagia Sofia experienced both natural and human-sourced destruction. Currently acting as a museum, the non-destructive ground-penetrating radar (GPR) technique was applied to the study area in the museum with the aim of identifying fractures observed in the floor of the structure. Antennae with different frequencies were used noting the penetration features with studies completed in the south wing of the gallery floor in front of the Marble Door. In line with this study, identification of both fractures and the status of weak sections and the links between fine fractures with main fractures were researched. Crack type of deformations at the gallery floor was investigated by the ground penetrating radar monitoring. Results indicate that the radargrams strongly reflect those cracks and are compatible with some of collapse on the floor.

Keywords: Ground-penetrating radar (GPR), Hagia Sophia, Fractures

*¹Sorumlu yazar: Efecan Belce: Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği A.B.D., Terzioğlu Kampüsü, Çanakkale, efebelce@gmail.com, Tel: 05534048879

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze varlığını koruyarak gelen büyük yapılar geçmiş tarihin izlerini bugünlere taşımakla beraber önceki yüzyıllarda ortaya konan mimari, sanat ve mühendislik anlayışlarını bugünün bilim insanlarına da aktarmaktadır. Kültürel ve tarihsel dokularıyla buldukları ülkelere ve şehirlere gerek bilimsel olarak da değer kazandıran bu yapılar günümüzde varlıklarını sürdürüp gelecek nesillere de ışık tutup değer katması amacıyla günümüz mühendislik ve mimari anlayışlarıyla güçlendirme ve restorasyon işlemlerine tabi tutulmaktadır.

Günümüzde varlığını devam ettiren önemli yapılardan biri de ülkemiz sınırları içinde İstanbul'da bulunan Ayasofya Müzesi'dir (Şekil 1). Ayasofya gelişen tarihsel süreçte kilise, cami ve şimdiki haliyle müze olarak yerini almıştır. Manevi, mimari ve mühendislik bakımından çok büyük önem arz eden Ayasofya Müzesi tarihsel süreçte ayaklanmalar, savaşlar, yangınlar, depremler, fırtınalar gibi doğal ve insan kaynaklı birçok hasara maruz kalmıştır.

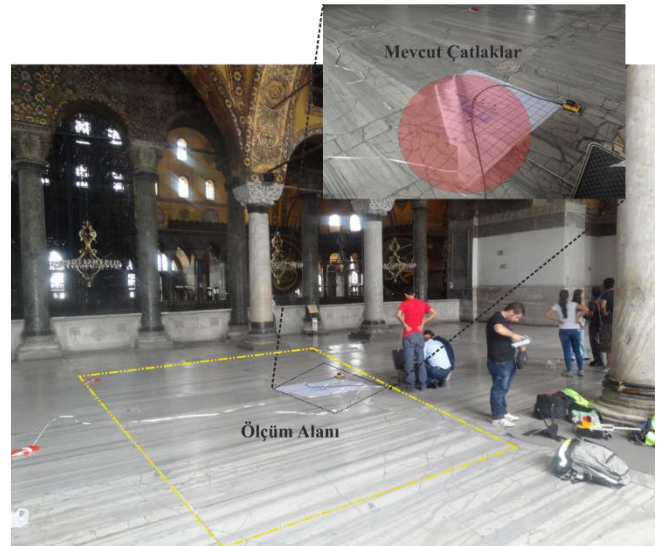


Şekil 1. Ayasofya Müzesi dış görünümü [1]

Ayasofya müzesinin ilk yapımı 4. yüzyılın ilk yarısında başladığı varsayılmaktadır [2]. İnşa edilen ilk yapıdan sonra süreç boyunca ayaklanmalar ve yangınlar neticesinde yıkılıp tekrar inşa edilmiştir. Günümüzde mevcut bulunan bu görkemli yapının inşası 537 yılında tamamlanmıştır [3]. 1453'te İstanbul'un fethi ile birlikte cami olarak kullanılmaya başlanan bu yapıya Mimar Sinan tarafından payandalar inşa edilmiştir [4]. Bu payandalara ek olarak Mimar Sinan yapıdaki deformasyonları önleme amaçlı, galeri tabanının yük taşıyıcı elemanlarını metal ve ahşap kirişlerle desteklemiştir [4].

1930'larda ise Fossati kardeşler, özellikle ana kubbenin restorasyon ve güçlendirilmesini tamamlamıştır [2]. Mimar Sinan'ın takviyesinden sonra Ayasofya'da herhangi bir yıkım olduğuna dair bir kanıt bulunmamakta olup, ancak bölgenin tarihi kayıtlarında çok sayıda deprem kaydedilmiştir. Halen yoğun olarak ziyaret edilen Ayasofya Müzesi'nde, özellikle galeri tabanındaki deformasyon ve zeminde ki çatlakların varlığı dikkat çekmektedir.

Günümüzde varlığıyla önem arz eden Ayasofya galeri zemininde görülen çatlak ve deformasyonların yapının iç kısımlarına bir zararı olup olmadığını ve güncel durumlarını inceleme amacıyla, restorasyon çalışmalarının bir parçası olarak yüksek frekanslı GPR (Ground Penetrating Radar-Yeraltı Radarı) ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Bu ölçümler ışığında belirlenen galeri katı güney kanadı cennet kapısı önünde bulunan bölgede farklı frekanslı antenlerle jeofizik çalışma yapılmıştır.



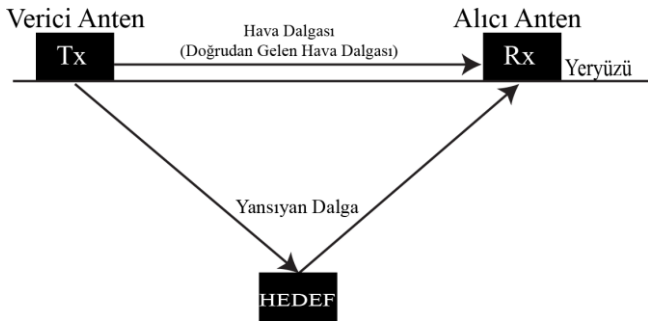
Şekil 2. Ayasofya Müzesi galeri katı çalışma sahası (büyük sarı alan) genel görünümü ve detay ölçüm alanı (daireesel alan) ve mevcut yüzey çatlakları

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Yeraltı Radarı Yöntemi

Yeraltı radarı (GPR) yöntemi gömülü cisimlerin tespitini belirleme amaçlı kullanılan, çalışma alanlarına tahribat vermeyen sıfır jeofizik bir mühendislik yöntemidir. Aynı zamanda yüksek frekanslı görüntülemeye de imkan veren ve temeli elektromanyetik yöntemlere dayanan bu yöntem yere temas eden antenin yere verdiği elektromanyetik dalgaların seyahati boyunca geçen sürenin anomali değişimlerini inceleyerek yeraltında ki yapı veya unsurların anomalileri ile o lokasyon hakkında bilgi tespitini sağlamaktadır.

GPR yöntemiyle, varlığı bilinmeyen gömülü yapıları ve/veya bozulmaları tanımlamak mümkündür [5]. GPR yöntemi, zemine gönderilen yüksek frekanslı radar sinyallerinin iletimi ve alımı arasındaki süreyi araştırmaktadır [6]. Yüzeydeki antenlerin ölçüm lokasyonuna elektromanyetik darbeler ileterek ve daha sonra sinyal gönderene kadar ve yüzeyden geri dönene kadar (iki yönlü seyahat süresi olarak adlandırılır) geçen zamanı ölçen yöntemdir [7]. Yöntemin şematik gösterimi Şekil 3 de ifade edilmiştir.



Şekil 3. Yeraltı radarı sistemindeki antenlerin şematik gösterimi (Tx: Verici Anten, Rx: Alıcı Anten) [8]

Farklı materyallerde ki geçişler ve / veya yansıma hızındaki değişiklikler, radar sinyallerinde farklı yansıma amplitüdülerine neden olur. GPR sinyalinin vericiden ayrılma ve alıcı tarafından alınma süresi hız ile ilgilidir ve derinlik kesitleri oluşturabilir [9]. Yöntem bir anomali elde etmek için tüm izleri kaydeder. Bir hattaki yüzlerce veya binlerce iz ile GPR profili farklı ölçüm aralıklarında (1-50 cm) kayıt yapar ve sonuç olarak 2 boyutlu profil oluşturur. Paralel 2 boyutlu profillerin gridlenmesiyle, yeraltı özelliklerini en iyi temsil eden 3 boyutlu bir görüntü elde etmek mümkündür [5,9]. Bu görüntüleri en doğru şartlarda tespit edebilmek için çalışılan alanın durumuna uygun ve aranan materyalin türüne göre GPR sistemine uygun anten seçimi önem taşımaktadır.

2.2. Ayasofya Müzesi Galeri Katı GPR Çalışmaları

Yeraltı radarı (GPR) çalışmalarını etkileyen iki ana unsur bulunmaktadır. Bunlardan biri, doğru anten sisteminin tespiti ve tespit edilen antenle elde edilen verilerin doğru program ve parametrelerle işlenip görüntülenmesidir. Doğru anten seçimi olmadığı takdirde veride fazla gürültü ve yanıltıcı anomaliler oluşabilir. Aynı şekilde veri işlem parametrelerinde seçimi yanlış olarak belirlenen değerler veri de yanıltıcı sonuçlara sebebiyet verebilir. Bundan dolayı uygun GPR sistemi ve veri işlem parametreleri bu tarz çalışmalarda çok büyük önem arz etmektedir.

Ayasofya Müzesi galeri katında gerçekleştirilen çalışmada yüzey çatlaklarının tespiti için Mala RAMAC ProEx GPR ve 1 GHz anten tercih edilmiştir (Şekil 4a). Bu sistem ile gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda elde edilen çatlak haritaları detaylı incelendiğinde galeri katı güney kanadı cennet kapısı önünde bulunan lokasyondaki çatlaklar önemli özellikte olup bundan dolayı o lokasyonda Mala CX radar sistemi 2.3 GHz radar anten sistemi (Şekil 4b) ile detay ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölgedeki alanlar 1 GHz anten sistemi ile 7 m x 7 m, 2.3 GHz anten sistemi ile 1.4 m x 1.4 m büyüklükte ki alanlar ile yapılan ölçümler ışığında

bölge detay çatlak haritası elde edilmiştir. Bu sistemler ile aranan unsurlar göz önünde bulundurularak uygun parametreler belirlenip ölçümler gerçekleştirilmiştir (Tablo 1).



Şekil 4. a) 1 GHz antenli Mala RAMAC ProEx GPR sistemi, **b)** 2.3 GHz antenli Mala CX Radar sistemi

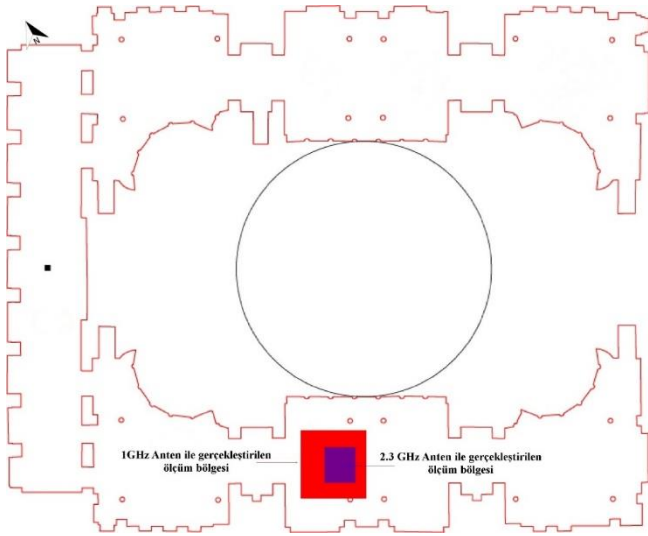
Tablo 1. GPR sistemi (1GHz ve 2.3 GHz anten) ile ölçüm parametreleri

Anten frekansı	1 GHz	2.3 GHz
İz Aralığı	0.02 m	0.004m
Örnekler	480	312
Örnekleme Frekansı	7174.6	17575
Zaman Penceresi	46.34	17.752
Profil Aralığı	0.2 m	0.1 m

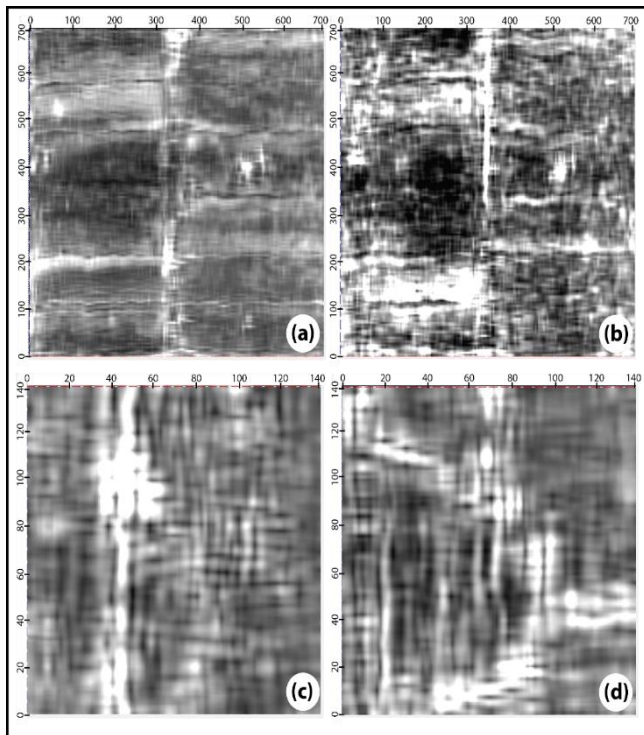
3. BULGULAR

Yeraltı radarı çalışmalarında veri işlem basamakları çok önemlidir. Çalışma yapılan alanda elde edilen veri doğru parametreler belirlenerek işlendiği takdirde aranan ve tespit edilen anomalinin çözülmesinde kolaylık sağlamaktadır.

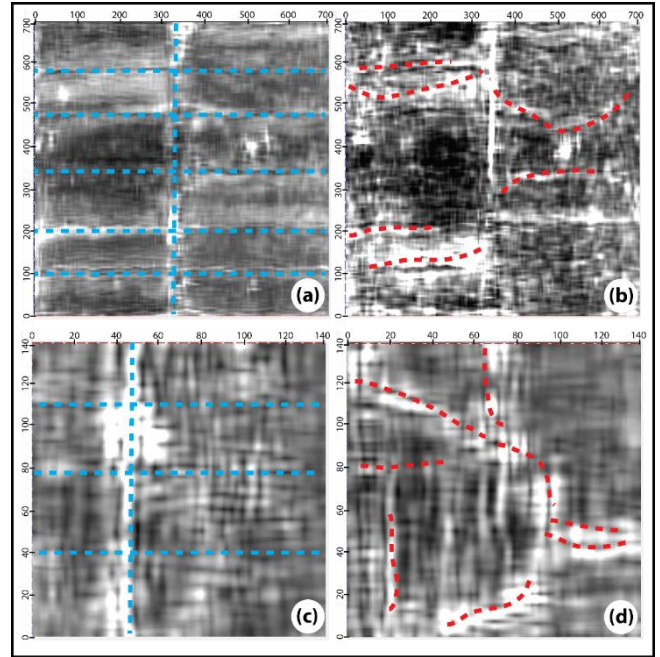
Gerçekleştirilen ölçümler neticesinde toplanan GPR verisinin yorumlanıp incelenmesinde daha iyi sonuçlar elde etmek için Reflex-W[10] ve MALA 3D Vision[11] ticari yazılımları kullanılmıştır. Her alan için uygun veri işlem parametreleri belirlenerek radar verisine uygulanmıştır (Tablo 2). Galeri katı güney kanadı cennet kapısı önünde bulunan bölgede (Şekil 5) yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen veriler ve model gösterimleri Şekil 6 ve Şekil 7 de gösterilmiştir. Şekil 6 da elde edilen veride ki derz arası boşluklar ve çatlaklar gösterilmektedir. Şekil 7 de verinin modellenmesinde düz şekilde süregelen anomalilerin derz arası boşluklar olduğu, ani değişimler ve çizgisel olmayan değişimlerin ise çatlakları ifade ettiği düşünülmektedir.



Şekil 5. Ayasofya Müzesi galeri katı ölçüm bölgesi (Kırmızı alan 1 GHz GPR anteni ile gerçekleştirilen ölçüm bölgesi, mor alan 2.3 GHz GPR anteni ile gerçekleştirilen ölçüm bölgesini göstermektedir)



Şekil 6. Çalışma alanında uygulanan GPR verileri; **a)** 1 GHz anten ölçümlerinde (700 cm x 700 cm) elde edilen derzlerin verisi, **b)** 1 GHz anten ölçümlerinde (700 cm x 700 cm) elde edilen çatlakların verisi, **c)** 2.3 GHz anten ölçümlerinde (140 cm x 140 cm) elde edilen derzlerin verisi, **d)** 2.3 GHz anten ölçümlerinde (140 cm x 140 cm) elde edilen çatlakların verisi



Şekil 7. Çalışma alanında uygulanan GPR ölçümlerinin işlenmiş verileri; **a)** 1 GHz anten ölçümlerinde (700 cm x 700 cm) elde edilen derzlerin işlenmiş verisi (Derz boşlukları mavi kesikli çizgi ile gösterilmiştir), **b)** 1 GHz anten ölçümlerinde (700 cm x 700 cm) elde edilen çatlakların işlenmiş verisi (Mevcut çatlaklar kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmiştir), **c)** 2.3 GHz anten ölçümlerinde (140 cm x 140 cm) elde edilen derzlerin işlenmiş verisi (Derz boşlukları mavi kesikli çizgi ile gösterilmiştir), **d)** 2.3 GHz anten ölçümlerinde (140 cm x 140 cm) elde edilen çatlakların işlenmiş verisi (Mevcut çatlaklar kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmiştir)

Tablo 2. Veri İşlem Parametreleri

Parametre/Anten	1 GHz Anten	2.3 GHz Anten
Sıfır Zaman Düz.	-1,9 ns	-1 ns
Dewow	1 ns	0.5 ns
Band Geçişli Süzgeç	400/800/1200/1600 MHz	800/1280/2560/3200 MHz
Genlik Azalımı	0.512	0.512
Ortalama Hız Düzeltmesi	0.12m.ns ⁻¹	0.12m.ns ⁻¹

4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Süre gelen tarihsel süreçte çeşitli tahribatlara uğrasa da Ayasofya günümüzde halen öneminden hiçbir şey kaybetmeden varlığını devam ettirmektedir. Dünyanın her yerinden on binlerce ziyaretçiyi kabul eden Ayasofya, gerek farklı yüzyıllardaki ibadet yeri olması gerek mimari bakımdan dünya kültür mirasının en önemli yapılarından biri olarak ayakta ve hayatta durmaktadır. Bu önemde bir yapının restorasyon çalışması kapsamında gerçekleştirilen GPR çalışmalarında yapıda meydana gelen çatlaklar detaylı

şekilde incelenip belirlenen lokasyonda yüzey çatlaklarının durumu yapıya hasar vermeden tespit edilmiştir.

Yüzeyde gözlemlenen çatlakların sebebini bulma amaçlı yapılan çalışmada bu doğrultu ile yüksek frekanslı iki farklı GPR anteni ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. 1 GHz antenle yapılan ölçümlerde yüzeyde gözlemlenen ince (kılcal) çatlaklar, daha büyük çatlakları takip etmiştir. Bunun yanı sıra 2.3 GHz GPR anteni ile 1.4 m x 1.4 m lik alanlarda yoğun çatlak gözlenen ölçümlerde kılcal çatlaklar tespit edilmiş ancak birçok kılcal çatlakın kaplama(mermer) altına inmediği anlaşılmıştır. Bu durum yapısal olarak oluşan ana çatlak sistemlerinin daha zayıf kuvvetler ile ziyaretçilerin sebebiyet verdiği etkilerle oluşmuştur. Kılcal çatlaklar ana çatlakların arasında gelişmiştir.

Genel olarak bölgenin sismik aktivitesi ve çevresel koşulların (tramvay hatları, ağır tonajlı araç geçişleri) mikrosismik aktiviteleri ile tarihi yapı üzerindeki kuvvetler hali hazırda zayıflamış olan galeri katı tabanının yüzeyinde ileri zamanlarda daha büyük sorunlar oluşturabilecek çatlaklara neden olabileceği açıktır. Bu çalışma sayesinde mevcut bulunan çatlak yapılarının karakteristiği ortaya konarak geçmişten gelen hasar izlerinin gelecekte alınacak önlemlere ışık tutması sağlanmıştır. Çalışmaların daha sonraki aşamalarında gerek galeri katı gerekse Ayasofya Müzesi'nin zemininde uygulanacak mikrotromör ölçümleri ile hakim titreşim periyodlarına bağlı bağlı hareketlerin kıyaslanması mevcut çalışmanın çıktılarının niteliğini arttıracaktır.

TEŞEKKÜR

Ayasofya Müzesi müdürü Hayrullah Cengiz'e (T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel

Müdürlüğü, Ayasofya Müzesi Genel Müdürlüğü) çalışmalar süresince katkılarından dolayı teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- [1] <http://ayasofyamuzesi.gov.tr/tr/foto-galeri>
- [2] Doğan S., “Ayasofya ve Fossatı Kardeşler (1847-1858)”, Nezih Başgelen, İstanbul: Arkeoloji ve Sanat Yılları, ISBN: 978-605-396-152-9, İstanbul (2011)
- [3] Akşit İ., “Hagia Sophia”, Akşit Kültür ve Turizm Yayıncılık, ISBN 9789757039075, (2004)
- [4] Mainstone R.J., “Hagia Sophia: Architecture, Structure, and Liturgy of Justinian’s Great Church (reprint edition)”, Thames and Hudson, ISBN 0-500- 27945-4, (1997)
- [5] Conyers L.B., “Ground-penetrating radar techniques to discover and map historic graves”, Historical Archaeology, 40(3):64–73,(2006)
- [6] Yalçın C.Ç., Kurban Y., Altunel E., “Research using GPR into the cause of cracks and depressions in the floor of the gallery of Hagia Sophia Museum”, Construction and building materials, 139:458-466, (2017)
- [7] Conyers, L.B., Ground Penetrating Radar for Archaeology, Altamira Press, 2426 California,USA, (2004)
- [8] Conyers, L. B., & Goodman, D., Ground-penetrating radar: An introduction for archaeologists. California: Altamira Press, (1997)
- [9] Yalçın C.Ç., “Investigation of the subsurface geometry of fissure-ridge travertine with GPR, Pamukkale, western Turkey”, Journal Of Geophysics and Engineering, 10: 035001, (2013)
- [10] Sandmeier K.J., Reflexw 4.2 Manuel Book: Sandmeier Software (Karlsruhe, Germany), (2003)
- [11] Guideline Geo Americas INC., MALA 3D Vision, ABEM&MALA