

MULTİSPEKTRAL, HİPERSPEKTRAL ve KIZILÖTESİ REFLEKTOGRAFI İLE
GÖRÜNTÜLEME METOTLARI

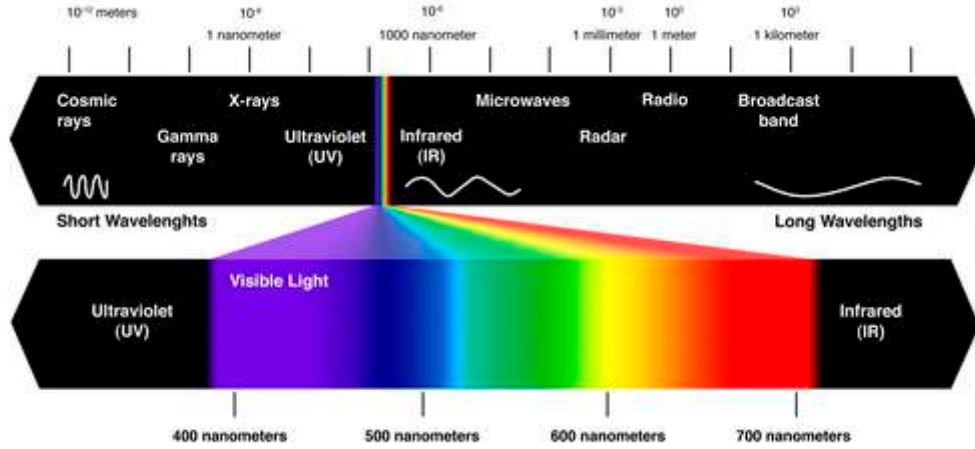
Kitap Şifahanesi ve Arşiv Dairesi Başkanlığı
Yazma Eser Uzman Yrd. Nurgül AKCEBE ve Rumeysa ÖZEN

Kültür varlıklarının görüntülemesinde kullanılan pek çok yöntem vardır. Multispektral ve hiperspektral görüntüleme, Kızılötesi reflektografi sistemleri bu yöntemler arasında en çok kullanılanlar yöntemlerdir. Bu yöntemler yalnız görüntüleme için değil tanılama için de kullanılır. Örneğin palimpsestlerde* silinen kısımların gün yüzüne çıkarılması, silinen ya da üzerine eklemeye yapılan tablolarda silinen kısımların açığa çıkarılması ve eklenen kısım ile orijinali arasındaki farkın belirlenmesi, mürekkep korozyonu yüzünden okunurluğunu kaybetmiş eserlerde görüntünün geliştirilerek okunurluğun artırılması, basit pigment tanılamasının hızlı bir biçimde yapılması gibi restorasyon, konservasyon ve sanat tarihi araştırmalarına destek olacak pek çok görüntüleme analizi bu iki yöntem kullanılarak hasarsız olarak yapılabilir.

1. Multispektral ve Hiperspektral Görüntüleme

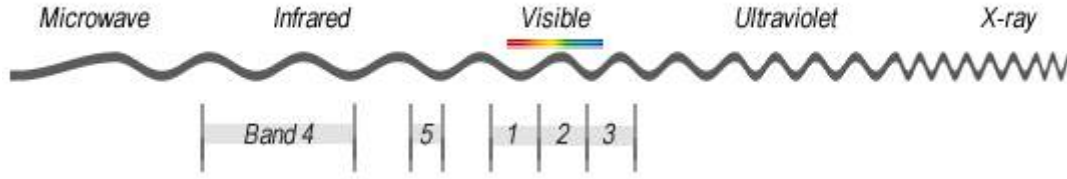
Teknik Özellikler:

Multispektral ve hiperspektral görüntülemelerde ultraviyole (UV), görünür bölge (VIS) ve kızıl ötesi (IR) bölgelerinden birden fazla dalga boyunda görüntü alınır ve bu görüntüler uygun yazılımlarla işlenerek istenen görüntüye ulaşılır. İnsanoğlu 400-700 nm aralığında görünür bölgedeki görüntüleri algılayabilirken doğadaki pek çok canlı farklı dalga boylarında görüntü algılayabilir. Bazı yılan türleri, yarasalar ve bazı böcekler kızıl ötesi bölgede görebiliyorken kedi, köpek fare gibi pek çok canlı ultraviyole bölgedeki ışınları algılayabilir.

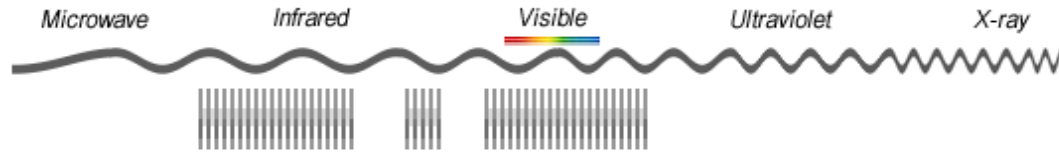


Figür 1: İnsan gözünün algılayabildiği 400-700 nm aralığındaki spektral bölgedir. Daha kısa ve daha uzun dalga boylu ışınları insan gözü algılayamaz.

Multispektralde daha geniş aralıklı ve sınırlı sayıda bant (3-10) seçilirken, hiperspektral yöntemde daha dar alanlı ve çok sayıda bant seçilerek görüntüleme yapılır. Multispektral sistemler ürettikleri her bir piksel görüntü için belirli sayıda (3-10) spesifik bölgeden aldıkları ölçümleri kullanır. Daha dar alanlı, 200 ve üstü sayıda bandın enerjisini kaydedip veriye dönüştürebilen hiperspektral görüntüleme ise çok daha ayrıntılı bilgiye ulaşmamızı sağlar. Örnek vermek gerekirse, bir uydu görüntüleme sisteminde multispektral ile ormanlık alan tespit edilebilirken hiperspektral görüntüleme bize ağaçlar hakkında da bilgi verebilir.



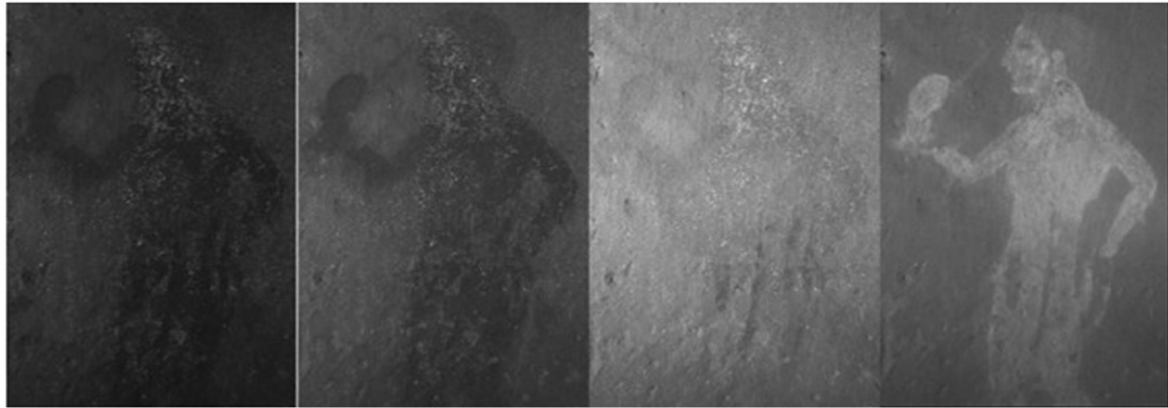
Figür 2: Multispektral örneği- geniş aralıklı 5 banttaki ışınların ölçümü alınır. <http://gisgeography.com/multispectral-vs-hyperspectral-imagery-explained/>



Figür 3: Hiperspektral örneği- çok daha dar aralıklarda çok daha fazla banttaki ışınların ölçümü alınır. <http://gisgeography.com/multispectral-vs-hyperspectral-imagery-explained/>

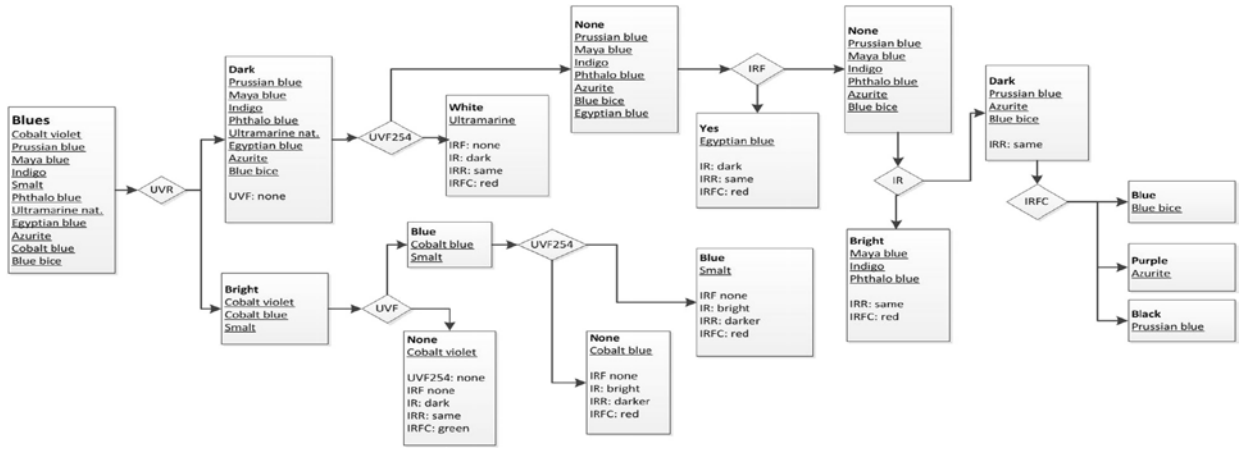
Literatür incelendiğinde multispektral ve hyperspektral görüntüleme sistemlerinden restorasyon, arkeoloji ve sanat tarihi alanında pek çok çalışmada yararlanıldığı görülmüştür.

Multispektral Görüntüleme Yöntemi ile Arkeolojik Duvar Resimlerinin İyileştirilmesi; 2013 yılında yayınlanan bu çalışmada İtalya'nın Toskana bölgesinde Siena şehri yakınlarında bir nekropolde İ.Ö 480-470 yıllarında çizildiği tahmin edilen, zamanla solarak ve silinerek insan gözüyle ayırt edilemeyecek duruma gelmiş duvar resimleri multispektral yöntem ile görüntülenmiştir^[1].



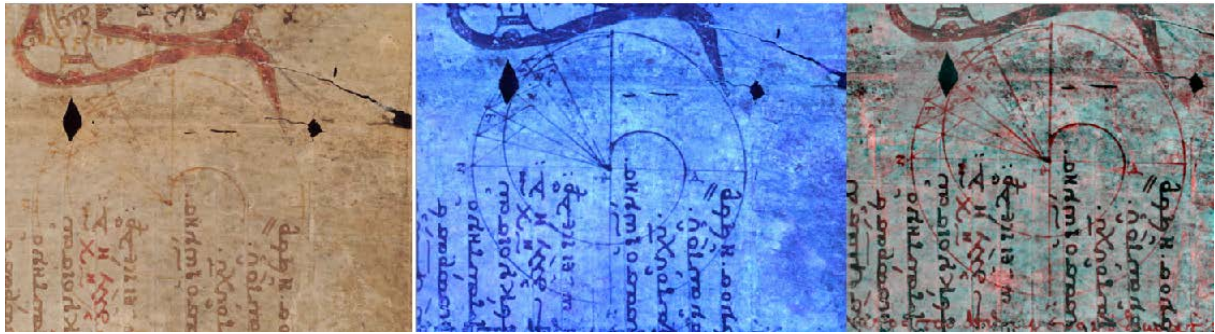
Figür 4: Soldan sağa: Mavi (450 nm), Yeşil (550 nm), Kırmızı (550 nm) ve Kızılötesi (1050 nm) görüntüleri.

Multispektral Görüntüleme Yöntemi ile Pigment Tanımlama; Pigment tanımlaması spektroskopik metotlarla yapılmaktadır. Spektroskopik metotlar ayrıntılı ve kesin sonuçlar vermesinin yanında zaman, maliyet ve emek yönünden çeşitli dezavantajlara sahiptir. Multispektral görüntüleme spektroskopik metotlar kadar yüksek kapasiteli sonuçlara varılmasa da basit, hızlı ve maliyeti düşük bir yöntem olarak pigment analizlerinde uygulanabilmektedir. Bu çalışmada 360-1700 nm arasında multispektral görüntüleme yapılarak Arap zıncığı ile birlikte kağıt zemine uygulanan tarihi pigmentlerin tanımlanmasında uygulanacak bir akış şeması ortaya konulmuştur. Bu çalışmada İsveç, Ingel Koleksiyonunda yer alan *Madonna and Child* tablosunun pigmentleri incelenmiştir^[2]. Beyaz, mavi, yeşil, kırmızı ve sarı pigmentler için ayrı ayrı şemalar hazırlanarak hangi dalga boyu aralığında hangi pigmentten nasıl görüntü alınacağına dair bir veri tabanı oluşturulmuş ve böylece yapılacak karşılaştırmalar ile başlangıç seviyesinde hızlı, pratik ve düşük maliyetli pigment analizi yapılabileceği ifade edilmiştir.



Figür 5: Mavi pigmentin multispektral yöntem ile tanımlanması için geliştirilen akış şeması

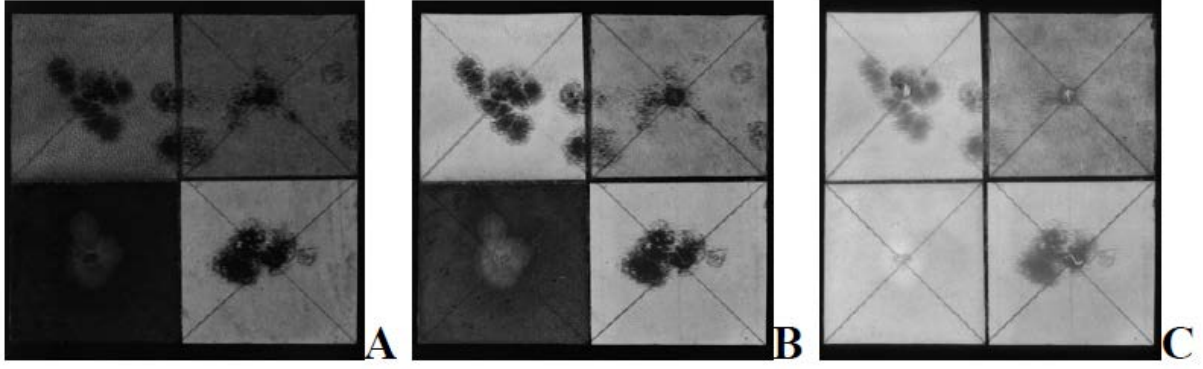
Arşimet Palimpsest Projesi; 174 folyodan oluşan Arşimet palimpsestleri Arşimet'e ait 7 bilimsel incelemeyi içermektedir. Söz konusu palimpsestler bulunduğu Yunan dilinde yazılmış bir dua kitabı halindeydi. Nisan 1299 yılında Kudüs'te tamamlanan ve euchologion*olarak adlandırılan bir tür dua kitabı olan bu parşömen el yazması aslında 10. Yüzyılın ikinci yarısında yazılmış olan ve Arşimet'in bilimsel çalışmalarını içeren parşömenlerin silinmesi ile elde edilen taşıyıcı zemin kullanılarak meydana getirilmiştir. Arşimet M.Ö 3. yüzyılda yaşamış ve kendi yazmış olduğu çalışmaları kaybolmuştur. Ancak öğrencileri tarafından kopyalanan eserleri ileriki yüzyıllara ulaşmıştır. Bu çalışmaya konu teşkil eden Arşimet palimpsestleri ise 10. Yüzyıl ortalarında Konstantinopol'de yazılmış ve Arşimet'in Gezegenlerin Dengesi, Spiral Çizgiler, Çember, Daire ve Silindirin Ölçümleri gibi pek çok farklı konuda çizim ve hesaplamalarının kopyalarının yer aldığı parşömen folyolardır. 10 yıl süren görüntüleme çalışmaları sonucunda palimpsestlerin silinmiş kısımları ortaya çıkarılmış ve Arşimet'in 2000 yılı aşkın süre önce yapmış olduğu bilimsel çalışmalar da böylece gün yüzüne çıkmıştır. Multispektral görüntüleme ve X-ray ışınları kullanılarak geliştirilen yöntemler uygulanmıştır[3].



Figür 6: Soldan sağa; Arşimet Palimpsestlerine ait bir folyonun görünür bölgede, UV ışığı altında ve false-image yöntemi ile alınan görüntüleri <http://www.pbs.org/wgbh/nova/physics/inside-archimedes-palimpsest.html>

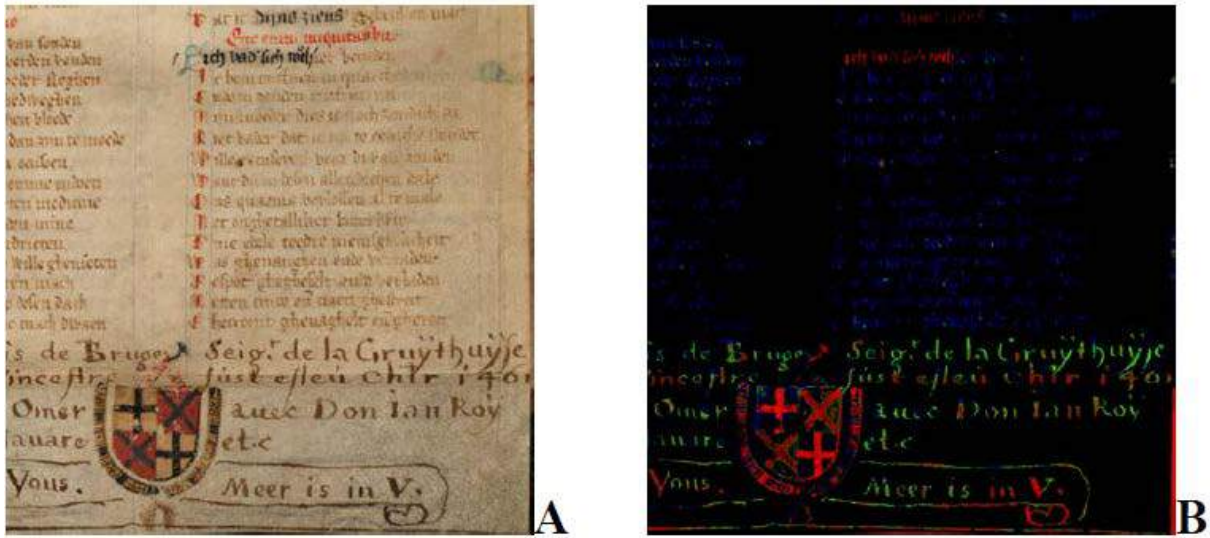
Hiperspektral Görüntüleme: Palimpsestlere Uygulanabilecek Hasarsız Analiz Yöntemi; Yunanistan Crete Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilen MUSIS adlı hiperspektral görüntüleme sistemi ile 360-1150 nm aralığında 34 farklı banttan görüntü alımı sağlamıştır. Geliştirilen bu cihaz ile ortaçağdan kalma iki farklı palimpsest incelenmiştir. İncelenen ilk palimpsest Patmos'daki St. John Theologos manastırında bulunmuştur ve 1282 tarihli bilinmeyen bir metindir. Ancak hiperspektral yöntemle altta kalan silinmiş yazı kısmı ortaya çıkarıldığında bu kısmın "Tetraevaggelio" adlı 11. Yüzyıldan kalma bir metin olduğu görülmüştür. Üzerinde çalışılan diğer palimpsest ise Vatopedi manastırından alınmıştır. 10-11. Yüzyıllarda yazılmış olduğu tahmin edilen "Porphyrogenetus" isimli metnin silinerek 13. Yüzyılda "Madonna Anthems" isimli yeni bir metin yazıldığı anlaşılmıştır^[4].

Tarihi Belgelerin Nitel Hiperspektral Görüntülenmesi; Hollanda Ulusal Arşivi 2004 yılında Art Innovation firması ile başlattıkları çalışma ile tarihi belgelerin depo koşulları ve maruz kaldıkları diğer ortam şartları neticesinde gösterdikleri yaşlanma sürecini nitel hiperspektral görüntüleme ile incelemeyi hedeflemiştir. Bu amaçla SEPIA adlı hasarsız nitel hiperspektral görüntüleme yapan ve verileri uzaysal (spatial) ve ışımsal (spektral) olarak kaydeden; kağıt, parşömen, deri, tekstil, mürekkep ve pigment gibi arşiv materyalleri üzerinde çalışmaya imkan tanıyan bir cihaz geliştirilmiştir. Bu sistem kullanılarak insan gözüyle tam olarak tespit edilemeyen arşiv belgelerindeki sararma, mürekkep yaşlanması, küf mantar gibi biyolojik oluşumların verdiği zararlar görüntülenebilir.



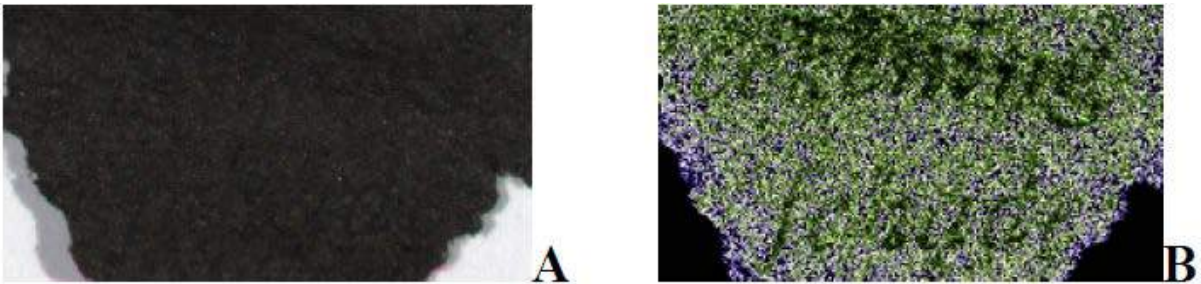
Figür 7: Küf örneklerinin spektral görüntüsü (A) 365 nm (B) 600 nm (C) 1100 nm. Parsömen (üst sol) , japon kağıdı (üst sağ), deri (alt sağ), 17. yy kağıdı(alt sol)

Hollanda Ulusal Arşivi tarafından geliştirilen bu sistem aynı zamanda paleografik ve diplomatik araştırmalar için de kullanılmıştır. 14. yy'da Alman dilinde yazılan ilk el yazması olan bir eser üzerinde yapılan paleografik çalışmalarda sayfalardan birinin altında yer alan kalkanlı armanın 15.yy'a mı yoksa 17. yy'a mı ait olduğu tartışılmıştır. Bu arma 15. yüzyıl Flemen şövalyesi Lodewijk van Gruuthuse'un armasıyla benzerlik göstermekte ancak armanın etrafındaki yazılar 17. yy'a ait olduğundan bu bilginin doğruluğu tartışmaya sebep olmuştur. Nitel hiperspektral görüntüleme sistemi ile yapılan çalışmalar sonucu kalkanlı armada kullanılan mürekkebin orijinal metin üzerinde 15. yy'da yapılan düzeltme kısmında kullanılan mürekkeple benzerlik gösterdiği ve arma etrafında yer alan 17. yy eklemelerinde kullanılan mürekkeple benzeşmediği görülmüş, bu şekilde armanın 17. yüzyıla değil 15. Yüzyıla ait olduğu doğrulanarak bu tartışma bilimsel olarak sona ermiştir^[5].



Figür 8: (A) 14. yy Gruuthuse el yazmasının real-color görüntüsü. (B) renk kodlama görüntüleme sistemi ile alınan ikinci görüntüde ise kalkan armasının etrafındaki metin (yeşil) ile olan farklılık ve orijinal 14. yy metni (mavi) üzerine 15. yy'da yapılan düzeltmeler (kırmızı) ile olan benzerlik görülüyor.

Yine bu sistem kullanılarak Hollanda Ulusal Kütüphanesinde yer alan arşiv belgelerinden çeşitli hasarlar sonucu okunurluğunu kaybetmiş bazı sayfa ve fragmanların okunurluğu yükseltilmiştir.



Figür 9: (A) karbonlaşmış ve okunurluğunu kaybetmiş bir kitap sayfasının real-color* görüntüsü (B) hiperspektral görüntüleme ile okunabilir hale gelen false-color* görüntüsü

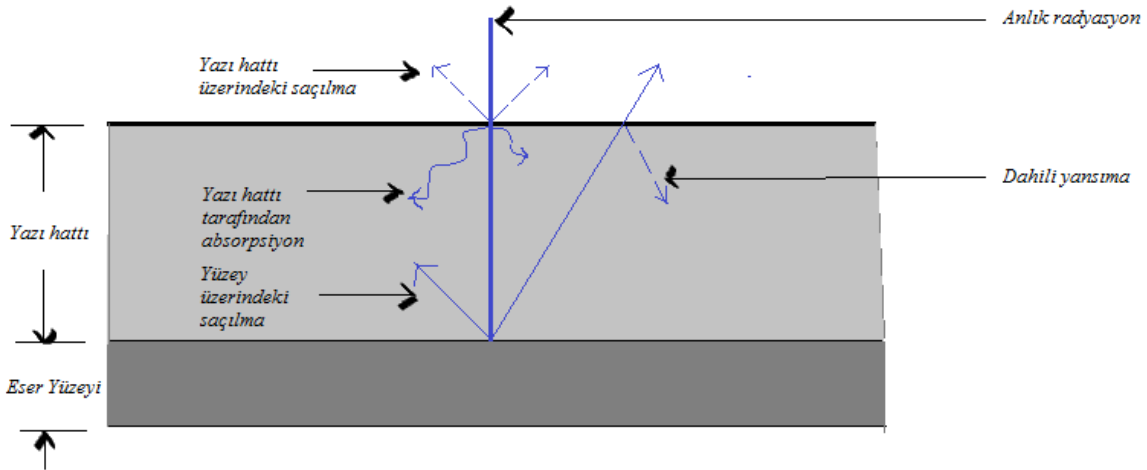
2. Reflektografi Sistemleri

Kızılötesi (infrared) görüntüleme sistemi uzun zamandır sanat tarihi ve restorasyon alanlarında kullanılmaktadır. Bu yöntem de multispektral ve hiperspektral yöntemleri gibi eserin özgünlüğünü veya anonim bir çalışmanın tarihini belirlemek için kullanılabilir. Kızılötesi radyasyon sistemi, genellikle yağlı boya tabloların alt katmanlarında gizli kalan çizim ve boyamaları ortaya çıkarmakta kullanılmaktadır. 2015 yılı itibari ile Kitap Şifhanesi ve Arşiv Dairesi Başkanlığında kızılötesi görüntülemeye dayalı reflektografi sistemi 62 ciltten oluşan ve ileri derecede mürekkep korozyonuna uğramış “Keşfü’l-beyân an sıfati’l-hayevân” isimli eser için kullanılmaktadır. Bu sistem esere zarar vermeyen bir görüntüleme yöntemidir.

Teknik Özellikler

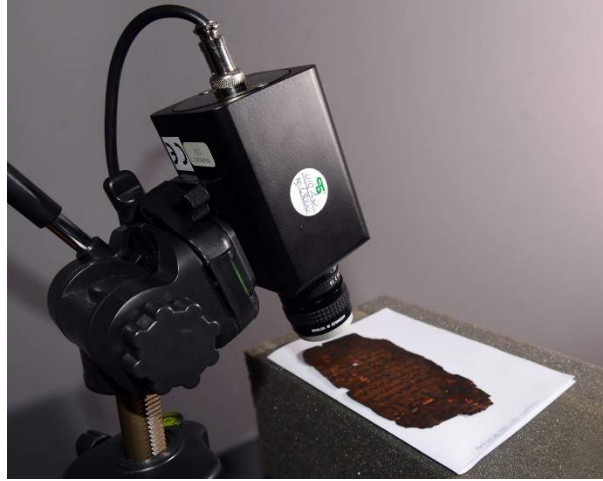
1990 lı yıllara kadar Kızılötesi (infrared) reflektografi sisteminde çoğunlukla vidikon tüpler kullanılmıştır. 1990’ların başında ise silikon CCD kameranın kızılötesi reflektografi sisteminde kullanımı başlamıştır. Vidikon sistemleri yaklaşık 2.0 mm ‘ye ulaşan bir hassasiyete sahip iken CCD sistemlerinin hassasiyeti 0.6-5.7 mm arasında değişmektedir[6].

Bir reflektografi sistemi kızılötesi radyasyona duyarlı bir televizyon kamerası ile donatılmıştır. Bu ise doğrudan dijital görüntü işleme sistemine bağlıdır ve sistemde işlenen görüntü monitöre aktarılır^[7]. Reflektografi sisteminde görüntünün alınacağı alanı aydınlatmak için kızılötesi lambalar kullanılmaktadır. Bu lambalar yoğun kızılötesi radyasyon saçarak görüntüleme alanını aydınlatmak için ışık kaynağını oluştururlar. Tungsten flamanlı ampüller ve kuvars lambaları bu görevi görmektedir. Florosan lambalar ise oldukça düşük seviyede kızılötesi radyasyon yaydıkları için fazla tercih edilmemektedir. Ampülü çevreleyen camın her zaman temiz olması, zamanla etrafında oluşacak fosfor kaplamadan dolayı yayılan radyasyon miktarının düşmesini engelleyecektir[8]. Çeşitli filtrelerin sisteme adaptasyonu görünür radyasyonu ortadan kaldırmak ve çözünürlüğü arttırmak adına büyük bir önem taşımaktadır[9].



Figür 10: Işığın Yazı hattı ve eser yüzeyi ile etkileşimi

Kızılötesi reflektografi sisteminin temeli yüzeyden ve mürekkep korozyonlu yazı hattından farklı saçılma ve yansımaların gerçekleşmesi sonucu belirgin olmayan ya da gizlenmiş yazıların ortaya çıkarılmasına dayanmaktadır. Yazı üzerine gelen ışınlar kısmi olarak saçılır ve yine kısmi olarak absorbe olur. Absorbe edilmeyen veya saçılmaya uğramayan ışınlar ise eserin yüzeyine nüfuz etmiş olur. Yazı hattı üzerine gelen ışınların saçılması ve nüfuz eden ışınların yeniden saçılması ile birlikte bir ışık düfüzyonu oluşur^[10]. Difüzyon akısı eserin yüzeyi ve sonrasında da yazı hattının alt yüzeyi tarafından yansıtıldığında bir dahili yansırma (internal reflectance) elde edilir^[11]. Çoğu çalışmada sadece kızılötesi görüntü almak hedeflemiş olsa da bazı çalışmalarda dijital görüntünün işlenmesi teknikleri ile görüntünün iyileştirilmesi söz konusu olmuştur. Eserin yüzeyinden ve yazı hattından geri yansıyan ışınların yansırma katsayıları kullanılarak karşıtlık iyileştirmesi gibi teknikler uygulanabilmekte ve elde edilen kızılötesi görüntü daha keskin bir hale getirilebilmektedir. Bu işlem sırasında temelde Kubelka-Munk teorisine dayanan dijital görüntü işleme yazılımları kullanılmaktadır^[12].



Figür11: “Keşfü’l-beyân an sıfatı’l-hayevân” görüntüleme projesi kapsamında reflektografi sistemi kullanılarak elde edilen görüntülerden örnekler.

***Palimpsest:** Eski çağlarda yazı taşıyıcısı olarak kullanılan bazı parşömenler, yazılı kısımları silinerek, kazınarak ya da yıkanarak tekrar kullanılırdı. Bu şekilde birden çok kez taşıyıcı olarak kullanılmış olan parşömenlere palimpsest denir.

***Euchologion:** Yunan Kiliselerinde ayinlerde okunan bir çeşit dua kitabı

***Real-Color Image:** *Türkçeye gerçek renk görüntüsü diye çevirebileceğimiz bu tanım, insan gözünün algıladığı görüntüyü aynen yansıtan görüntülere verilen isimdir.*

***False-Color Image:** *İnsan gözü tarafından algılanamayan dalga boylarında alınan görüntüleri insan gözü tarafından algılanabilir kılmak amacıyla belirli dalga boyu aralıklarına görebildiğimiz belirli renkler verilerek oluşturulan görüntülerdir.*

Kaynaklar

- [1] Legnaioli et al.: Recovery of archaeological wall paintings using novel multispectral imaging approaches. Heritage Science 2013 1:33.
- [2] Cosentino: Identification of pigments by multispectral imaging; a flowchart method. Heritage Science 2014 2:8.
- [3] <http://archimedespalimpsest.net/>
- [4] Rapantzikos K., Balas C., *Hyperspectral Imaging: Potential In Non-Destructive Analysis Of Palimpsests*, In Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2005), Genova, Italy, September 2005.
- [5] Padoan R., Steemers Th.A.G., Klein M.E., Aalderink B.J., de Bruin G., Quantitative Hyperspectral Imaging Of Historical Documents: Technique And Applications, 9th International Conference on NDT of Art, Jerusalem Israel, 25-30 May 2008
- [6] Walmsley,E. (et al.) Evaluation of System Performance of Near-Infrared Imaging Devices. Studies in Conservation 37, 1992.
- [7] Delaney,J.K. Examination of the Visibility of Underdrawing Lines as a Function of Wavelength. ICOM Committee for Conservation, 10th Triennial Meeting, Washington, D.C. 1993.
- [8] Walmsley,E. (et al.) Evaluation of Platinum Silicide Cameras for Use in Infrared Reflectography. ICOM Committee for Conservation, 10th Triennial Meeting, Washington, D.C., 1993.
- [9] Kossolapev,A.J. An Improved Vidicon TV Camera for IR-Reflectography. ICOM Committee for Conservation, 10th Triennial Meeting, Washington, D.C., 1993.
- [10] Asperen de Boer, J.R.J. Infrared Reflectography: A Contribution to the Examination of Earlier European Paintings. Central Research Laboratory for Objects of Art and Science: Amsterdam, The Netherlands. 1970.
- [11] Real,W.A. Exploring New Applications for Infrared Reflectography. Bulletin of the Cleveland Museum of Art, Vol. 72, 1985.
- [12] Wecksung,G. (et al.) Assembly of Infra-Red Reflectograms by Digital Image Processing Using a Portable Data Collecting System. ICOM Committee for Conservation, 8th Triennial Meeting, Sydney. 1987.

Yararlanılan Elektronik Kaynaklar;

http://www.forenscope.com/tr/icerik/products_what-does-multispectral-mean.html

<http://gisgeography.com/multispectral-vs-hyperspectral-imagery-explained/>

<http://www.extension.org/pages/40073/what-is-the-difference-between-multispectral-and-hyperspectral-imagery#.VRPKFvmsVqU>

<http://www.theguardian.com/environment/2014/mar/12/animals-powerlines-sky-wildlife>