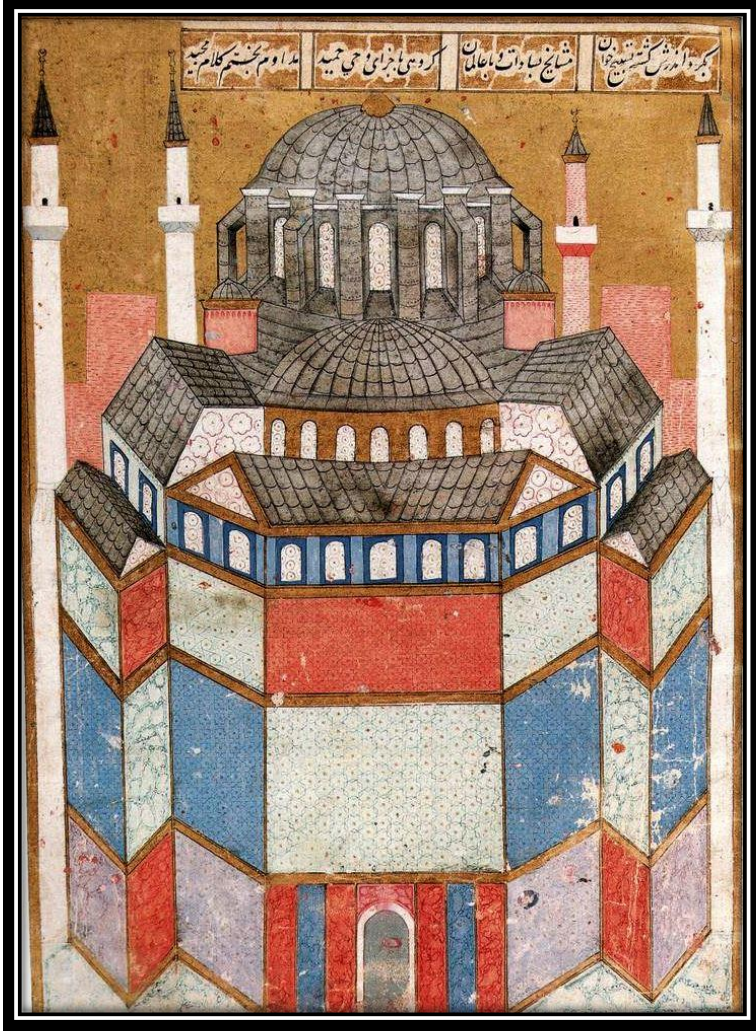


Ayasofya Müzesi Yayınları: XVII

AYASOFYA MÜZESİ YILLIĞI  
ANNUAL OF HAGIA SOPHIA MUSEUM

No:14



İstanbul 2014

**AYASOFYA MÜZESİ YAYINLARI: XVII**

AYASOFYA MÜZESİ YILLIĞI  
ANNUAL OF HAGIA SOPHIA MUSEUM

No: 14

İstanbul 2014

## AYASOFYA MÜZESİ YAYINLARI

YayınNo:17

Aralık 2014 - İSTANBUL

Tasarım ve Uygulama: Nuray Erden  
Baskı-Cilt: Yılmazlar Basım  
Adres: Topkapı - İstanbul  
Tel: 0212 565 56 82

Ön Kapak: **Ayasofya**

“Şehnâme-i Selim Hân” adlı eserden

Nakkaş Osman ve Ali Nakkaş

6 Zilhicce 988 (Ocak 1581)

Minyatür, 27 x 19 cm

İstanbul, Topkapı Sarayı Müzesi Kütüphanesi

A.3595, y. 156a.

Arka Kapak: Ayasofya Külliyesi- Fotoğraf: Güngör Özsoy - 2005

Yayın Kurulu

Prof. Dr. Zeynep AHUNBAY

Prof. Dr. Selçuk MÜLAYİM

Prof. Dr. Asnu Bilban YALÇIN

Ayasofya Müzesi Yıllığı

Yazışma Adresi: Ayasofya Müzesi Müdürlüğü

Sultanahmet/İstanbul-Türkiye

e-posta: ayasofyamuzesi@kulturturizm.gov.tr

Adress for Correspondence:

Directore of Hagia Sophia Museum

Sultanahmet / Istanbul-Turkey

e-mail: ayasofyamuzesi@kulturturizm.gov.tr

Copyright©

Yıllığın bu baskısı için Türkiye’deki yayın hakları AYASOFYA MÜZESİ’ne aittir. Her hakkı saklıdır. Hiçbir bölümü ve paragrafı kısmen veya tamamen ya da özet halinde fotokopi, faksimile veya başka herhangi bir şekilde çoğaltılamaz, dağıtılamaz. Normal ve kanuni iktibaslarda kaynak gösterilmesi zorunludur. Yıllıktaki makalelerden yazarları sorumludur.

AYASOFYA MÜZESİ YILLIĞI  
ANNUAL OF HAGIA SOPHIA MUSEUM

## İÇİNDEKİLER

Önsöz Yerine Hayrullah CENGİZ, Ayasofya Müzesi Müdür Vekili . . . . .	7
Ayasofya İçin Bibliyografya Denemesi Prof. Dr. Selçuk MÜLAYİM . . . . .	13
Aya İrini Kilisesi Deprem Performans Değerlendirmesi ve Güçlendirme Projesi Hazırlanması Prof. Dr. Mustafa ERDİK . . . . .	50
Tarihi Kaynaklar Işığında Aya Sofya'nın Altıncı Yüzyıl Süslemesine Dair Bazı Notlar Asnu-Bilban YALÇIN . . . . .	94
Ayasofya'nın Aydınlatma Analizi Doç. Dr. Mehlika İNANICI . . . . .	128
Lighting Analysis of Hagia Sophia Mehlika INANICI, Ph.D., Associate Professor . . . . .	166
Estimation of the Dynamic Behaviour of Hagia Sophia Takashi HARA- Kenichiro HIDAKA . . . . .	203
Ayasofya'nın Dinamik Hareketine İlişkin Tahmin Takashi HARA- Kenichiro HIDAKA . . . . .	215
Preliminary Report of Non-destructive Investigation of Plaster-covered Mosaics of Hagia Sophia Hitoshi TAKANEZAWA - Satoshi BABA - Kenichiro HIDAKA . . . . .	228
Ayasofya'nın Alçı Kaplamalı Mozaiklerin Tahribat İçermeyen Araştırmasına İlişkin Ön İnceleme Rapor Hitoshi TAKANEZAWA - Satoshi BABA - Kenichiro HIDAKA . . . . .	242

Environmental monitoring for conservation of Hagia Sophia Takeshi ISHIZAKI - Daisuke OGURA - Keigo KOIZUMI - Juni SASAKI - Kenichiro HIDAHA . . . . .	257
Ayasofya'nun Korunmasına İlişkin Çevresel Gözetim Takeshi ISHIZAKI - Daisuke OGURA - Keigo KOIZUMI - Juni SASAKI - Kenichiro HIDAHA . . . . .	268
Ayasofya Hattatı: Kadıasker Mustafa İzzet Efendi Talip MERT . . . . .	281
Görsel Veriler Işığında Ayasofya'nın Dönemsel ve Kaybolmuş İzleri Yrd. Doç. Dr. Hasan Fırat DİKER . . . . .	318
Ayasofya, I.Mahmud Şadırvanı 2011 Yılı Restorasyonu Esengül YILDIZ ALTUNBAŞ . . . . .	346
Ayasofya Minareleri Üzerine Gözlemler Yrd. Doç. Dr. Hasan Fırat DİKER . . . . .	366
Multi-Analytical Approach for the Diagnostic at Hagia Sophia: A 3D Multimedia Database Proposal CURA M.-PECCİ A.- MİRİELLO D.-BARBA L.- CAPPÀ M.- DE ANGELIS D.- BLANCAS J.- CRİSCİ G.M. . . . .	379
Ayasofya'da Bazı Tanı Yöntemleri Kullanılarak Elde Edilen Bulgular İçin Bir: 3D Multimedya Veritabanı Önerisi CURA M.-PECCİ A.- MİRİELLO D.-BARBA L.- CAPPÀ M.- DE ANGELIS D.-BLANCAS J.- CRİSCİ G.M. . . . .	394
The Patriarchal palace at Constantinople in the Seventh Century: Locating the Thomaites and the Makron Jan KOSTENEC - Ken DARK . . . . .	404
Yedinci Yüzyıl İstanbul'unda Patrik Odası: Thomaites ve Makron'un Yerleşimi Jan KOSTENEC - Ken DARK . . . . .	429

İmparatoriçe Eudoksia'nın Heykel Kaidesi Sefer ARAPOĞLU .....	453
Ayasofya Müzesi İkona Koleksiyonunda Yer Alan Agion Mandilion (Kutsal Mendil) İkonaları Sabriye PARLAK .....	466
Dördüncü Haçlı Seferi: Latin İstilasını Döneminde İstanbul'dan Kaçırılan Bazı Eserler ve San Marko Bazilikası'ndaki Örnekler Işın FIRATLI .....	479
Ayasofya Müzesindeki Hellenistik Ve Roma Dönemine Ait Mezar Stelleri Hüseyin ÖCÜK .....	485
Ayasofya Müzesi Yıllıkları Makale Bibliyografyası Nuray ERDEN .....	513
Ayasofya Müzesi ve Bağlı Birimleri Onarım ve Proje Çalışmaları .....	585
Ayasofya'dan Haberler - Görüntüler .....	591

## LIGHTING ANALYSIS OF HAGIA SOPHIA

Mehlika İnanıcı \*

### ABSTRACT

The exquisite lighting quality in Hagia Sophia has been a topic of interest for centuries among visitors, writers, poets, and researchers. In fact, almost all literature on Hagia Sophia includes a brief statement on its daylighting and sunlighting. In these documents lighting is defined as “poetic”, “magical” and “mystical”. Yet, there are not any comprehensive qualitative research studies on Hagia Sophia’s lighting. Sometimes it takes centuries, state-of-the-art technology, and new approaches to demystify the wisdom of the past and reveal its secrets. After a long period of restoration studies, the scaffoldings within the structure have been recently removed. Meanwhile, the computational measurement and analysis techniques that have the ability to collect and analyze per-pixel lighting values have been developed within the past decade. Therefore, 15<sup>th</sup> centuries after its construction, this seems to be the right time to perform comprehensive lighting studies in Hagia Sophia. This study utilizes High Dynamic Range (HDR) photography technique to computationally measure the luminance values under naturally occurring sky conditions; and a novel technique to extrapolate the long-term performance to perform qualitative and quantitative lighting evaluations. Daylighting in Hagia Sophia is studied in comparison with the current electric lighting installation.

### 1. INTRODUCTION

There are multitude of studies that focus on Hagia Sophia’s significance within the context of the history of Architecture and religion, its structural system, spatial composition, building elements such as the dome, mosaics, marbles, and doors, and the conservation efforts that have been going on throughout the centuries [1-12]. In almost all of these studies, luminous

---

\* Ph.D., Associate Professor/ University of Washington, Department of Architecture  
Seattle, WA, 98115, USA. inanici@uw.edu



environment in Hagia Sophia is also mentioned. It is encapsulated and abbreviated as “poetic”, “mystical”, and “magical”. There are very few studies that specifically investigate the lighting in Hagia Sophia [13-17]. However, since the methodologies used in these studies are restricted to mere observations or very limited number of illuminance measurements rather than comprehensive quantitative studies, they provide incomplete information about its lighting. The quantitative studies performed in this paper is part of an on-going research project that aims to investigate the lighting quantities, luminance distribution patterns, luminance ratios, luminance variations and contrast across time under naturally occurring sky conditions and with electric lighting installations. These detailed studies allow us to identify the factors that form the exquisite lighting composition in Hagia Sophia and to demystify its secrets.

There are two quintessential documents about Hagia Sophia that were written in the 6<sup>th</sup> Century. These two documents provide invaluable information about the original lighting as it is intended, designed, and used. They are the writings of Procopius [18] and the poems of Paul the Silentiary [19, 20]. Procopius narrates the natural lighting in Hagia Sophia as “... [it] is singularly full of light and sunshine; you would declare that the place is not lighted by the sun from ‘without’, but that the rays are produced ‘within’ itself, such an abundance of light is poured into this church....”

167

While the writings of Procopius describe the attributes of daylighting and sunlighting, Paul the Silentiary focuses on several features of the artificial lighting used at that time [translated in 20]: “No words can describe the light at night time; one might say in truth that some midnight sun illumined the glories of the temple... stretched from the projecting rim of stone... long twisted chains of beaten brass, linked in alternating curves with many windings... And beneath each chain... fitted silver discs, hanging circle-wise in the air, round the space in the center of the church. Thus these discs, pendent from their lofty courses, form a coronet above the heads of men. They have been pierced too by the weapon of the skillful workman, in order that they may receive shafts of fire-wrought glass, and hold light on high for men at night.” It is possible to deduce from these documents that there were many different vessels used to light Hagia Sophia during night time. Apart from the main chandelier that carried the oil lamps, there were other lighting devices that were hanged at different heights

yielding to lighting variations within the structure. It is noted that the lighting variations were not designed to create a hierarchical composition, and their main function was to create a dramatic lighting scheme rather than to illuminate a particular location in the building. These lamps were described as "ships of silver bearing a luminous freight". Additional floor lamps were also described with their elaborate designs, where lamps were fastened on beams between two-horn shaped iron supports [1, 14, 20, 21].

Although Paul describes the night lighting in Hagia Sophia as a powerful light source that serves as a guide for the ships in the Bosphorus and the Marmara Sea, these descriptions should be regarded as a poet's allegoric and metaphoric tactics to create a dramatic effect. It has been calculated that the 16 lamp chandelier used in 6<sup>th</sup> Century in Hagia Sophia produces less luminous flux than a 40 Watt incandescent lamp [22]. In sum, it is possible to deduce that the original artificial lighting in the building was achieved through myriad of lamps and lighting apparatus that were designed and situated in Hagia Sophia; and the artificial lighting used in nighttime has enhanced its grandeur and preeminent experiential qualities [1, 14, 20]. Various documents attest that daylighting and artificial lighting are used exclusively, not to supplement each other [18, 19]. The chandeliers added in 1849 by Fossati brothers were used with floating wick oil lamps [1, 6, 22].

168

Daylighting studies completed by few scholars give emphasis on the orientation of the main axis of the building. There are different propositions that range from religious to cosmic knowledge as the base of the reasoning that shaped the architects' decision on the orientation of the building [13-17]. Regardless of these propositions, we can list the following information as the key facts in relation to the lighting analysis in Hagia Sophia:

- The main axis of Hagia Sophia is reported between 30° to 35° South East [1, 13, 14]. The author has measured it as 32° SE. During the Winter equinox (December 21<sup>st</sup>) or Christmas (December 25<sup>th</sup>), the main axis of Hagia Sophia aligns with the azimuth of the sun (31.9° SE) during sunrise in Istanbul (41° North Latitude, 28.9 East Longitude).
- During the Summer Solstice (June 21<sup>st</sup>), the main axis of Hagia Sophia aligns with the azimuth of the sun (121 °

SW) during sunset. During the summer solstice, the sun path crosses 26 windows of the 40 windows positioned in the main dome.

The most significant effect of the orientation of the building is that the first lights of the day illuminate the apsis, and the building is designed to admit sunlight through sun catching windows from sunrise to sunset.

## **1. OBJECTIVES**

The goal of this study is to perform qualitative and quantitative lighting analysis using High Dynamic Range (HDR) photography technique that encompasses high resolution and wide field of view luminance measurements along with supplemental illuminance measurements. The specific objectives are listed as follows:

- To study the interior luminance values, luminance distribution patterns and luminance ratios under naturally occurring sky conditions: The factors that are instrumental for creating the unique and exquisite lighting conditions in Hagia Sophia are discussed.
- To study the electric lighting in conjunction with the daylighting in Hagia Sophia: The impact of electric lighting on the ambient lighting is studied during daylight hours.
- To evaluate the analysis results and to provide recommendations on the lighting scheme of Hagia Sophia to preserve the unique and exquisite lighting that was intended and designed in 6th century, and to improve the visitor experience today.

169

## **2. METHODOLOGY: MEASUREMENT, EXTRAPOLATION AND ANALYSIS TECHNIQUES**

The research is conducted in the following phases:

- Field measurements are performed;
- HDR images are assembled from multiple exposure imagery collected during the field measurements;

- A new methodology is developed to predict long term performance using daylight coefficient and extrapolation techniques; and
- Per-pixel lighting analysis techniques are utilized to evaluate the luminous environment in Hagia Sophia.

### 1.1. Field Study: Luminance Measurements With High Dynamic Range Photography

High resolution (i.e. pixel scale) luminance measurements are possible using the HDR photography technique. Traditional photography techniques are limited with the dynamic lighting range that they can record. Almost everybody must have encountered this problem when they are trying to photograph a daylit interior scene: one can either capture the interior scene properly, and the outdoor scene is washed out and overexposed; or one can capture the view through the window, and the interior looks dark and gloomy. As human beings, our visual system is capable to function over a wide dynamic range that spans between starlight and sunlight. The traditional photography techniques can capture a very limited range, which is not adequate to record light levels. Computational techniques can be used to assemble multiple exposure photographs into one HDR digital image. This method was initially developed as a photography technique [23], but previous research demonstrated that it can be used as scientifically accurate lighting data acquisition system. A calibrated HDR image can incorporate lighting values in physical units ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) ranging from starlight to sunlight [24-26].

During the field measurements in Hagia Sophia, two Canon EOS 5D and one 30D SLR cameras were used along with a Minolta LS-110 handheld luminance meter and Minolta T-1A illuminance meter. The image capturing process was automated by in-house software named *hdrscope*, developed by the author and her team [27]. The image capturing process involved taking multiple exposures at every 15 minute intervals. Since multiple exposure photography requires a relatively static scene, the general foot traffic on regular business hours would preclude a reliable data

collection process. Therefore, the data collection took place on three consecutive Mondays, when the museum is closed to public (September 17<sup>th</sup>, September 24<sup>th</sup>, and October 1<sup>st</sup>, 2012).

Interior luminance measurements were done using two different viewpoints. The data collection continued from sunrise to sunset (7:00-19:00) without any interruptions during the first and second days. The first camera (Canon EOS 5D SLR) was placed on a tripod under the main dome, parallel to the horizontal surface, facing up (Figure 1a). This camera was fitted with a Sigma 8 mm F3.5 EXDG fisheye lens enabling 180° horizontal and vertical views of the dome. The camera was slightly offset from the main axis to prevent major occlusion from the chandelier, and it allowed vast views of the dome as well as the other building surfaces (except the floor). The second camera was placed on a tripod to capture vertical views of the space. The first day of the measurements, this camera was positioned in the entrance area (inner narthex) towards the apsis (Figure 1b). The second day of the measurements, this camera was positioned to capture the building from the side gallery towards the Southern wall (Figure 1c). Measurements were done on the third day to analyze the daylighting in comparison with the current electric lighting installations.

171

As the luminance measurements inside Hagia Sophia have been collected, exterior sky conditions were simultaneously measured in a nearby structure, allowing relatively unobstructed views of the sun and the sky. Capturing the sky and the sun is a specialized field within HDR photography. In interior spaces, HDR photographs are usually taken using a fixed aperture size and varying the shutter speed. HDR fisheye images of the sky dome can be accurately recorded using a technique that incorporates multiple apertures and shutter speeds, along with neutral density filters [28]. Previous work demonstrated the accuracy of this technique for collecting per-pixel luminance values of the sun and the sky [29]. Istanbul sky data is collected for 2 days (September 17<sup>th</sup> and 24<sup>th</sup>, 2012) using a Canon EOS 5D SLR Mark II camera and Sigma 8mm F3.5 EXDG fisheye lens (Figure 1d). The sky condition

was predominantly partly cloudy on September 17th, and it was clear on September 24<sup>th</sup>.

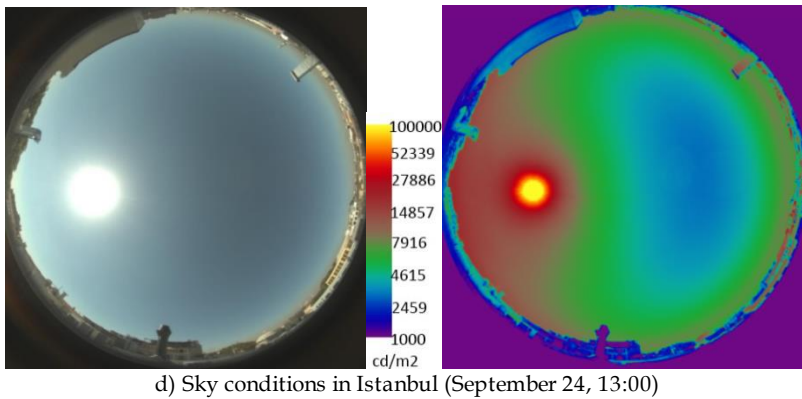
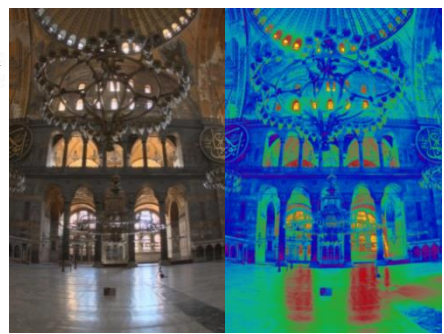
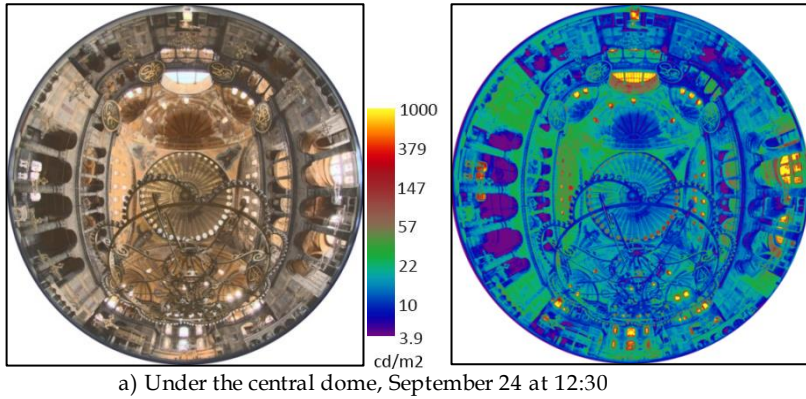


Figure 1. HDR imagery and luminance maps for selected times and dates for interior and exterior scenes (luminance values are measured in  $\text{cd}/\text{m}^2$ )

During the third day of the measurements, the focus was shifted to the comparative analyses of the daylighting and electric lighting. Different viewpoints were selected inside Hagia Sophia to study the scene with and without electric lighting under daylight conditions.

## **1.2. Creation and Calibration of High Dynamic Range Imagery**

Multiple exposure photographs taken in the scene were merged into HDR photographs using the software called *Photosphere* [30]. Computational methods were utilized to correct for the mechanical and optical aberrations (i.e. vignetting effect are accounted for and corrected).

Images with regular lenses were calibrated using a single luminance measurement from a handheld luminance meter utilizing a gray patch in a Macbeth chart. The images with fisheye lenses were calibrated using an illuminance measurement. The details of these techniques are available in previous research [24-27, 29].

173

## **1.3. Long Term Luminance Performance Predictions Using Extrapolation Technique**

Full day measurements were performed in 15 minute intervals (Figure 2). The captured lighting values inside Hagia Sophia correspond to the particular sky conditions occurring at that time. Therefore these values do not provide information about the long term performance. A more meaningful evaluation of the daylighting performance must take into consideration a wide range of naturally occurring sky conditions and sun positions. The dynamic character of daylight causes constant variability inside the buildings, which is negotiated between the outdoor conditions and the openings of the building (windows) that serve as the primary sources of illumination for the interior, along with the interreflections that serve as the secondary sources. Although time-series lighting analysis can be achieved through long term (annual) measurements, it is not feasible due to time constraints and accessibility available to the building. A more viable approach is possible through extrapolation. A recent research by the author

demonstrated a novel technique [31]: when the indoor environment and sky conditions were recorded simultaneously using HDR imagery, this information can be used to study the impact of the sky patches seen from various apertures (windows), and to extrapolate the results to other naturally occurring sky conditions using a statistics based daylight coefficient methodology.

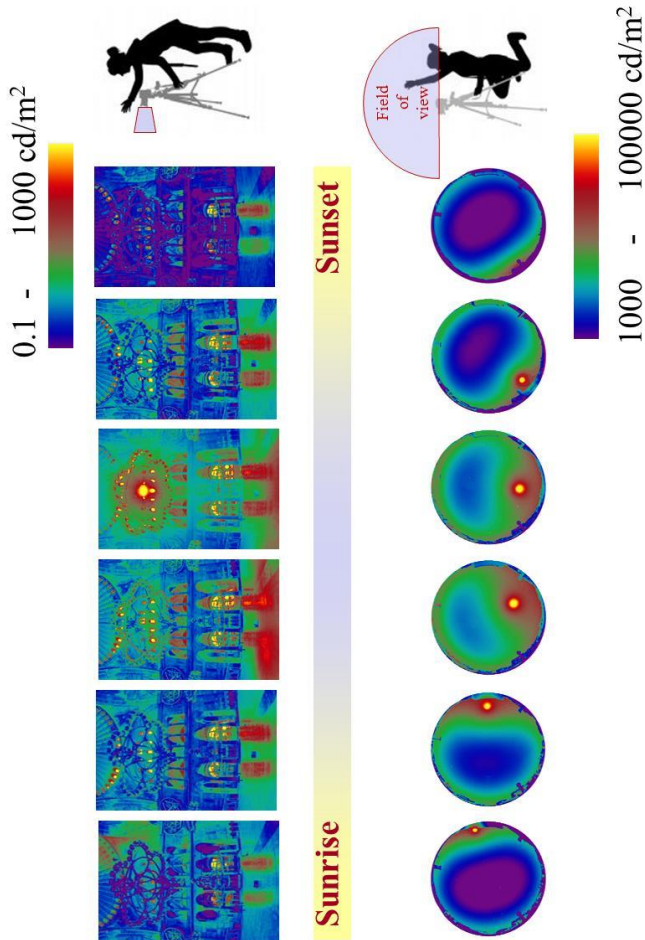


Figure 2. Selected instances from simultaneous capture of the interior and exterior lighting conditions; original data collection is performed every 15 minutes from sunrise to sunset.



## 1.4. Lighting Analysis

HDR images record luminance values at a pixel scale. Therefore, an HDR image provides luminance values (measured in  $\text{cd}/\text{m}^2$ ) at points equivalent to the image resolution (i.e. 12 million pixels in the captured photographs). Given that 12 million lighting values are collected for every 15 minutes for two whole days, this data provides unprecedented information about the luminous environment in Hagia Sophia. The data is analyzed using a variety of mathematical and statistical techniques [32-36].

One of the analysis and visualization techniques utilized in this paper is false color luminance maps. The luminance values captured in the scenes cannot be faithfully displayed through computer screens or printed productions due to the limited range of these media. Human visual system can detect luminance values spanning from starlight to sunlight in 14 logarithmic units ( $10^{-6}$  to  $10^{+8}$   $\text{cd}/\text{m}^2$ ). Conventional display units and printed media are limited to 2 logarithmic units. Therefore, the HDR imagery taken inside Hagia Sophia to record interior conditions, and the HDR imagery taken outside to record Istanbul sky conditions cannot be faithfully represented through conventional media. False color images are utilized instead to display the range of the HDR lighting data. In false color images, a range of colors is assigned to a range of luminance values. The colors in these maps vary from violet to blue, red, and yellow. Violet colors correspond to the lowest luminance ranges and yellow colors correspond to the highest values; the corresponding luminance values in  $\text{cd}/\text{m}^2$  are provided in the legends. Such analysis is useful to understand the dynamic range and to visualize the spatial luminance distributions and contrast within a space.

175

## 2. RESULTS AND DISCUSSION

### 2.1 Daylighting and Sunlighting

The lighting composition in a space is dependent on three factors: i) the geometric properties of the environment; ii) the material properties of the surfaces; and iii) the position, the spectral content and the angular properties of the light sources. The lighting defined as “poetic”, “mystical”, and “magical” in Hagia Sophia is the resultant of these factors that are composed in a unique way

that represents the intend, sensibility, and the wisdom employed during the design and construction of this exquisite structure.

The most apparent feature of the lighting in Hagia Sophia is its directionality. The windows in the domes and semi domes catch sunlight throughout the day and year. Sunlighting flows to the interior with a strong directional trajectory, and creates light pools (Figure 3).

The daylighting and sunlighting is undeniably profound in Hagia Sophia due to the number of its window and their area when compared not only to the structures of its contemporaries, but to the subsequent domed structures around the world. The sun path crosses with the 26 of its 40 windows in the main dome in Summer Solstice (June 21<sup>st</sup>) from sunrise to sunset. Some of the windows are occluded as a result of previous restorations, so this number is currently 22. When the position of the sun coincides with one of the dome windows, light pools are formed in the interior surfaces. The position of the light pools change depending on the altitude and azimuth angle of the sun (Figure 4).

176



Figure 3. Light pools from direct sunlight

The light pools formed by sunlight have much higher luminance compared to the other building surfaces. Therefore, they create highlights and points of interest in the space; and their movement accentuates the dynamic character of the lighting in the structure. Figure 5 illustrates the high luminance values of the light pools on the floor. The window that originates the light pool in this image is also apparent. Such a high contrast is quite objectionable in most of the environments (for instance, an office space) where common visual tasks are performed, as these areas of high luminance may impair the visibility of the task. However, Hagia Sophia is a spiritual space, and the dramatic lighting created by the light pools is a very important feature of the perceptual qualities of the space.

The directionality of lighting in Hagia Sophia is also dependent on the surface properties of the materials throughout the building. The Proconnesian marbles used on the floor play a particularly vital role to create directional diffuse reflections. Although the form of the windows and the position of the sun determine the location of the light pools, the Proconnesian marbles on the floor create directional diffuse reflections that accentuate the dramatic appearance of the light pools. Directional diffuse reflections can be observed in Figure 6 in a time series analysis, where the camera is oriented towards the southern wall (September 24<sup>th</sup>). Figure 7 illustrates the directional diffuse reflections from the floor in the upper southern nave. Similar reflections are observed throughout the building. Figure 8 is taken from the loge of Empress. Non-uniform and strong directional character of these reflections creates a stimulating visual environment and informs our visual perception. Extreme luminance variations in a space can create glare and visual discomfort, depending on the functionality of the space and the nature of the visual tasks. In Hagia Sophia, these variations make the environment dynamic and magical.

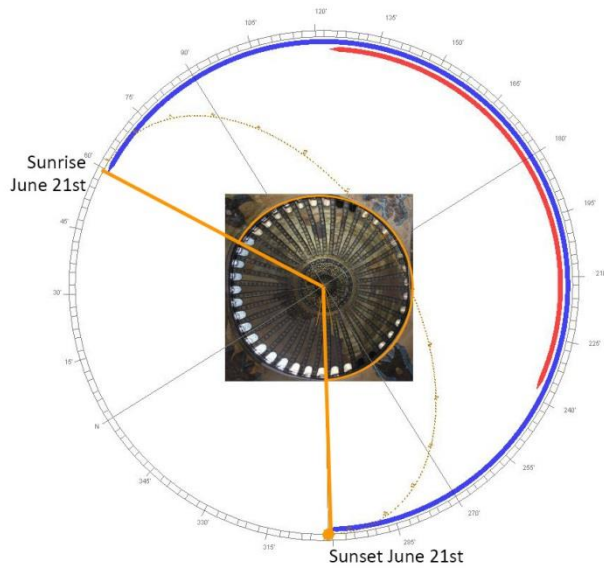


Figure 4. Sun path diagram showing the movement of the sun for the dome of Hagia Sophia (sunrise and sunset are marked for June 21<sup>st</sup>)

178

The most important feature of the exquisite lighting in Hagia Sophia is the ingenious choreography and hierarchy of the surface materials. The material properties in most of the spaces we experience in our daily lives are selected to maximize the light distribution. The generic rule of thumb for surface reflectance is 20% for the floors, 50% for the walls, and 80% for the ceiling; and the reflectance is assumed to be primarily diffuse. In Hagia Sophia, this hierarchy is inverted: the surface that has the largest reflectivity is the floor. Sources vary on the exact number, but 10 to 12 different types of marble are utilized in Hagia Sophia [14, 20]. The Proconnesian marble used as the floor material is highly reflective due to its color, specularity, and surface roughness. The translucency of the material also contributes to the complex reflections due to sub-surface scattering.

The dark colored marbles employed in vertical surfaces absorbs significant portion of the incident light; therefore, they enhance the contrast and the drama in the luminous environment. The lighting and reflectance hierarchy in Hagia Sophia is arranged in the order

of “floor, ceiling, and walls”, which is very different than the generic lighting design approach that favors the order of “ceiling, walls, and floor”. Contrast is the key to create the poetic, magical, and mystical lighting in Hagia Sophia. The directional lighting (i.e. sunlight) flowing in to the space through apertures (windows) are muted in the vertical surfaces (due to high absorption) and are amplified on the floor with directional diffuse reflections. These strong and non-uniform reflections are the physical explanations behind Procopius’s description of Hagia Sophia, where the building is not lit by the sun from “outside”, but lit from the light generated “inside”. The “bottle-bottom” glass windows used in Ottoman mosques prevents the directionality of the sunlight reaching to the interior. Equally important, the carpets used on the floors of the Ottoman mosques result in floor surfaces, where very small portion of the light is reflected back to the space; and the reflections are predominantly diffuse (non-directional). These two factors explain the vast difference of lighting between Hagia Sophia, and the Ottoman domed structures.

179

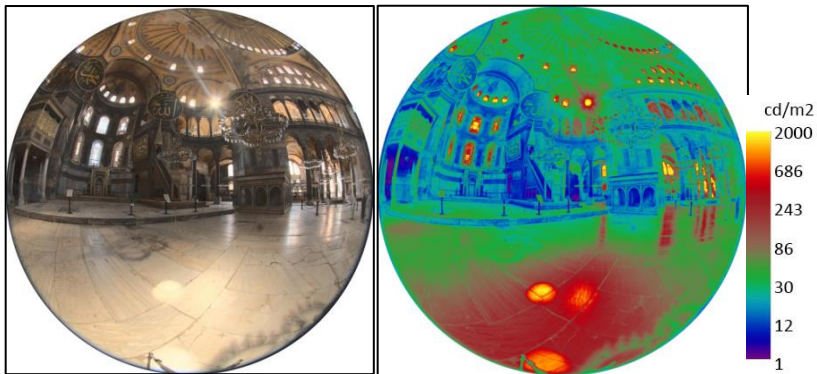


Figure 5. The window with the solar corona and the resulting light pools on the floor from direct sunlight

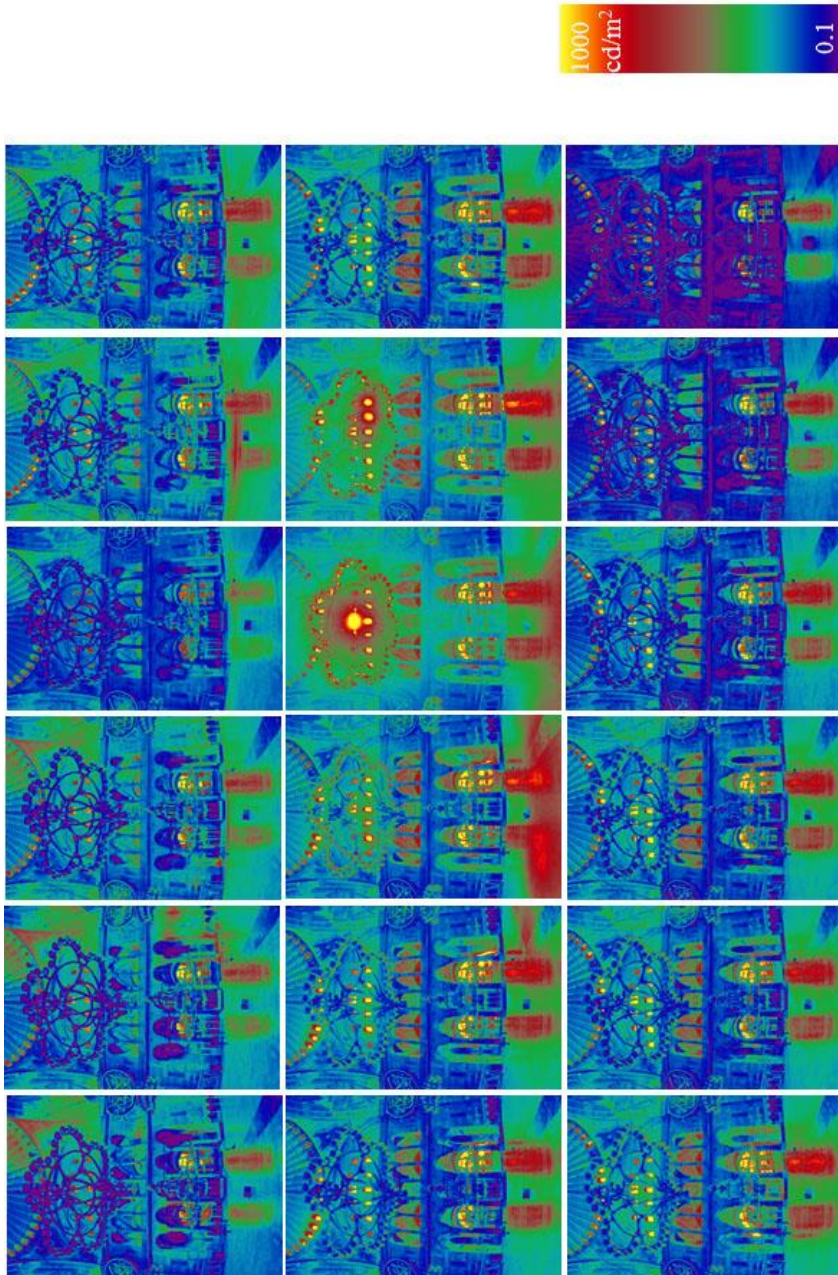
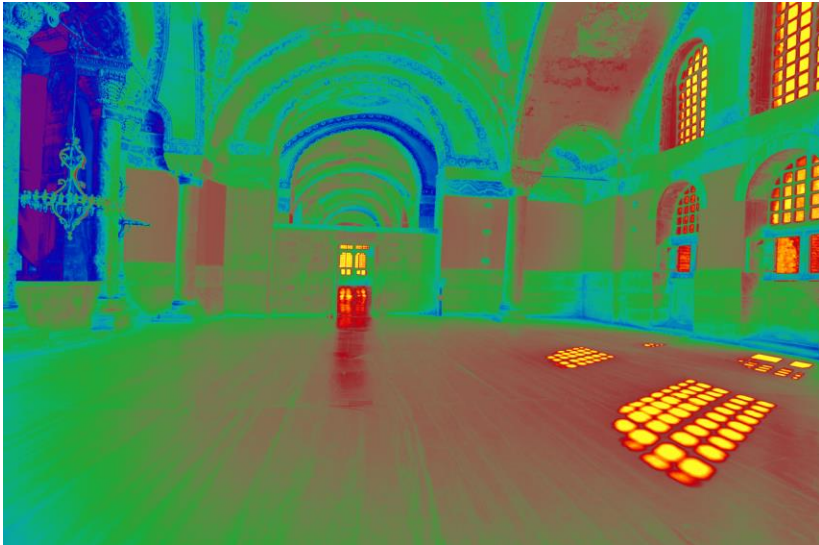


Figure 6. Variation of the luminance maps throughout the day for the scene from the gallery towards the south (24 October)



2000 685 243 85 30 12 1 Luminance (cd/m<sup>2</sup>)


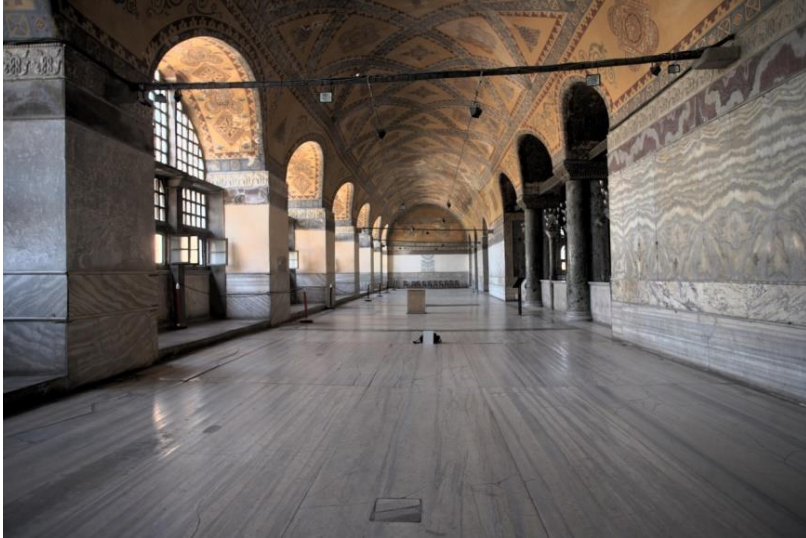


Figure 7. Upper floor nave and the luminance map (October 1, 12:50)



182

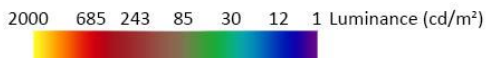
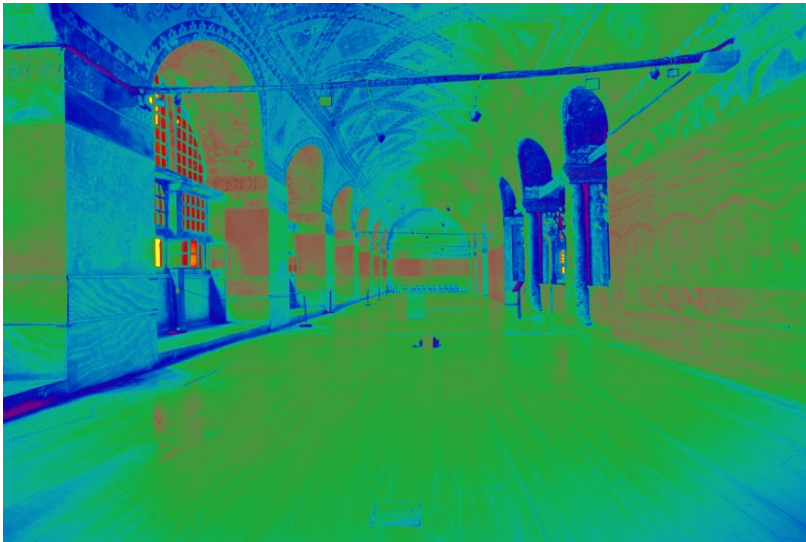


Figure 8. The log of Empress and the luminance map (October 1<sup>st</sup>, 12:47)



## 2.2. Electric Lighting

The chandeliers were added to the structure during the restoration done by the Fossati brothers in 1849 [6]. It was observed during the recent field study that these chandeliers are used with incandescent lamps that were mostly renewed in 2012, and the electric lighting is constantly used throughout the daylight hours.

The impact of the electric lighting on the overall light levels is investigated using image processing techniques. Two consecutive measurements were recorded to study daylighting and electric lighting. The first set of measurements is done with daylighting only. The second set of measurements is done when the electric lighting is on. These two measurements are completed within 1-1.5 minute intervals in order to capture relatively stable daylighting conditions. Given the fact that sun moves  $1^\circ$  every 4 minutes, it was important to perform these comparative measurements as rapidly as possible. The outside sky conditions were mostly clear (during the second and third day of the measurements); therefore it is possible to use consecutive measurements to evaluate the following conditions:

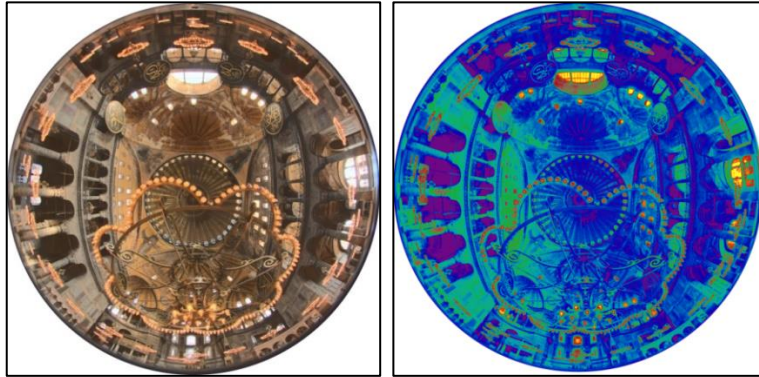
- The daylighting as the only lighting strategy in Hagia Sophia (Figure 9a);
- The combined effect of daylighting and electric lighting in Hagia Sophia (Figure 9b); and
- The electric lighting as the only strategy in Hagia Sophia (Figure 9c): the image with daylight only (Figure 9a) is subtracted from the image that includes both daylighting and electric lighting (Figure 9b).

The triple measurement and evaluation technique that includes daylighting; electric lighting; and their combination is repeated under the main dome (Figure 9), from the narthex towards the apsis (Figure 10), and from the gallery towards the nave (Figure 11). The analyses of these images reveal that:

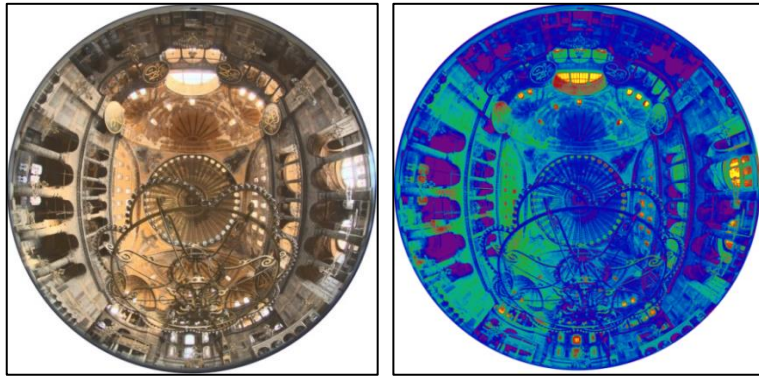
- The electric lighting mostly illuminates the surfaces of the chandelier and the floor;
- The electric lighting has minimal impact on the vertical light levels on the first floor. It has no measurable impact

on the lighting of the dome, mosaics, or the vertical surfaces in the second floor.

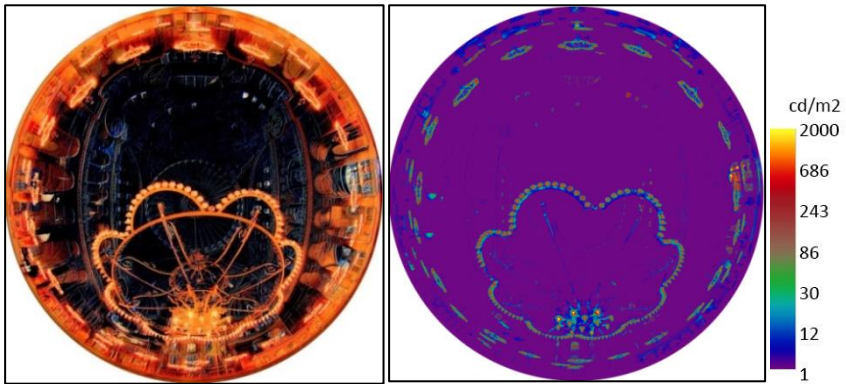
- The electric lighting used in conjunction with daylighting is detrimental to the perceptual qualities of the luminous environment in Hagia Sophia. It is contradicting with the original design intend. The documents dating back to 6<sup>th</sup> century describe daylighting as the only light source during daylight hours; and artificial lighting is used solely during night time (Section 1). It was also discussed in Section 4.1 that the most important features of the exquisite lighting in Hagia Sophia is the strong directionality of sunlight flowing into the interior and the resulting light pools and contrasts within the environment. The luminous environment is formed as a result of the unique combination of the window orientation and geometry along with the material hierarchy of the interior surfaces. The combined use of electric lighting and daylighting disrupts the luminance patterns of the light pools. The electric light sources induce yellow colored light patches on the floor, which creates new highlights on the floor. Therefore, they disturb the distinctive character of the light pools from the sunlight; and create visual noise especially on the floor.
- The chandeliers themselves cast strong shadows on the floor (Figure 12).



a) Combination of daylighting and electric lighting

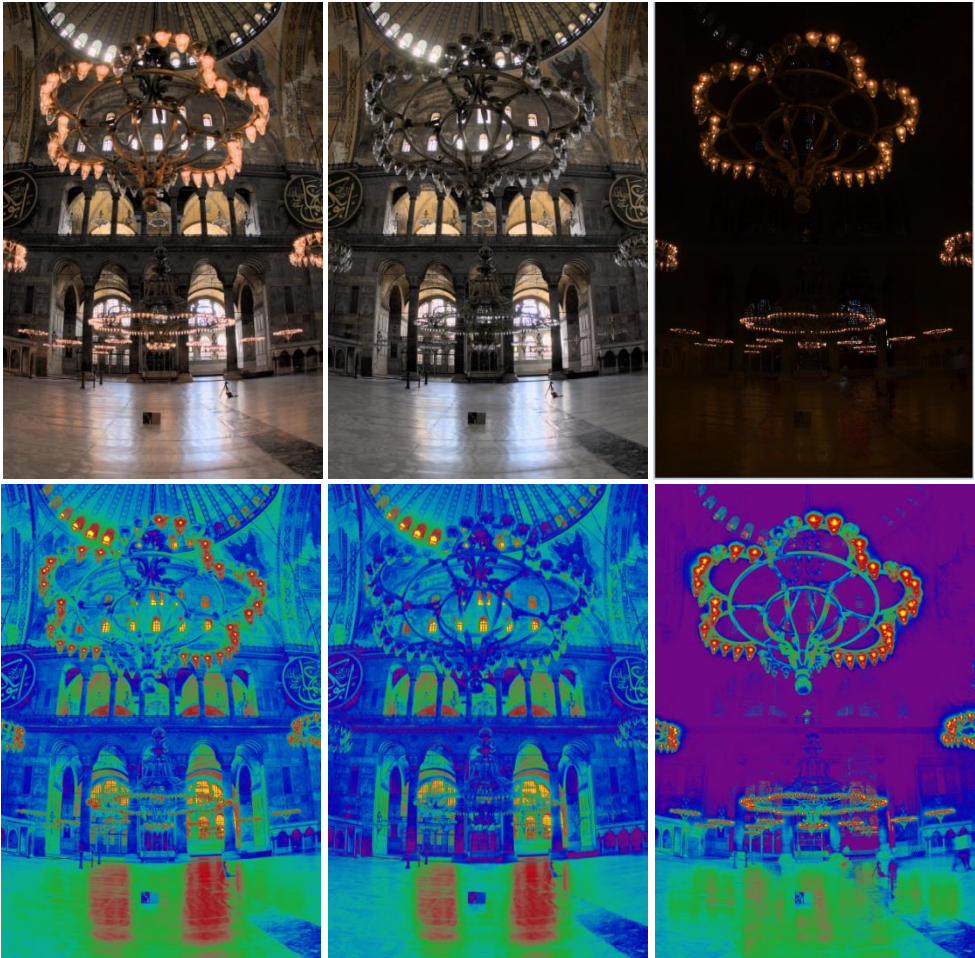


b) Daylighting



c) Electric lighting

Figure 9. Comparative analysis of daylighting and electric lighting under the main dome (September 17<sup>th</sup>, 17:10)



186

(a) Combination of daylighting and electric lighting

(b) Daylighting

(c) Electric lighting

2000 685 243 85 30 12 1 Luminance (cd/m<sup>2</sup>)

Figure 11. Comparative analysis of daylighting and electric lighting (September 24, 16:15)

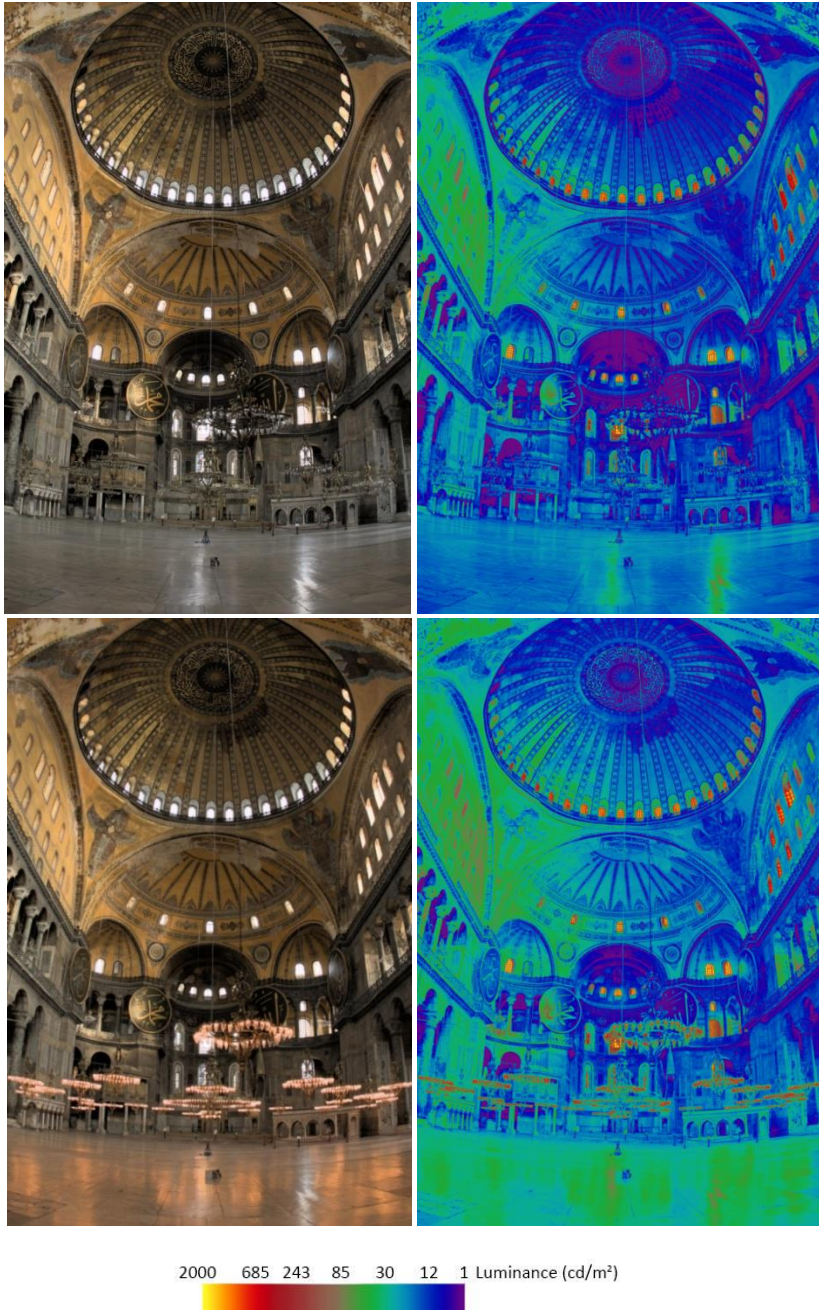
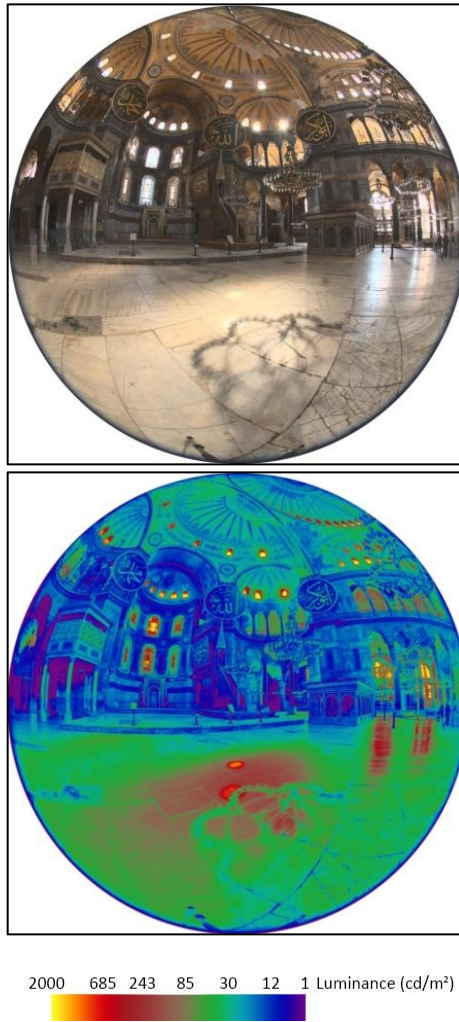


Figure 11. Comparative analysis of daylighting and electric lighting (September 17<sup>th</sup>, 10:04)



188

Figure 12. The shadow patterns of the chandeliers on the floor (October 1, 13:27)

- The light generated by the electric lighting forms new specular and directional diffuse reflections from the floor. These reflections decrease the luminance contrast in the building; and therefore, disrupt the original luminance hierarchy and damage the perceptual qualities of the interior space (Figures 12-13).
- The spectral content of the light from the electric lighting is very different than the spectral properties of daylight and

sunlight. Therefore, they introduce artificial warm colors into the environment. This discrepancy also adds to the perceived visual noise.

- From the eye level, the angular location of the chandeliers rivals with the angular location of the windows positioned in the semi domes. This can be clearly observed from the panoramic view in Figure 14. Therefore, two light sources compete with each other. A similar problem is also observed in the apsis (Figure 15).
- The main chandelier under the dome is a bulky structure. It impairs the visibility of the windows positioned in the dome when viewed from the center (Figure 16).



Figure 13. The electric lighting from the chandeliers form specular and directional diffuse reflections on the floor (October 1<sup>st</sup>, 12:42)

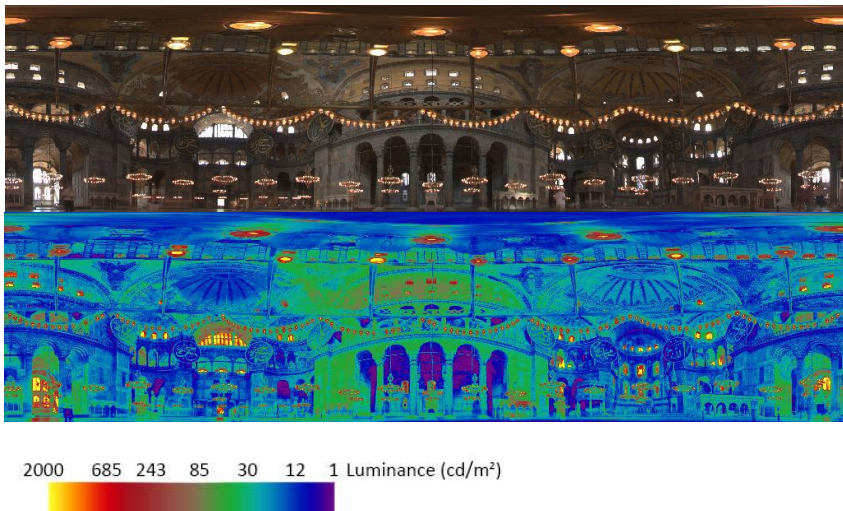


Figure 14. Panoramic view of Hagia Sophia and its luminance map



190

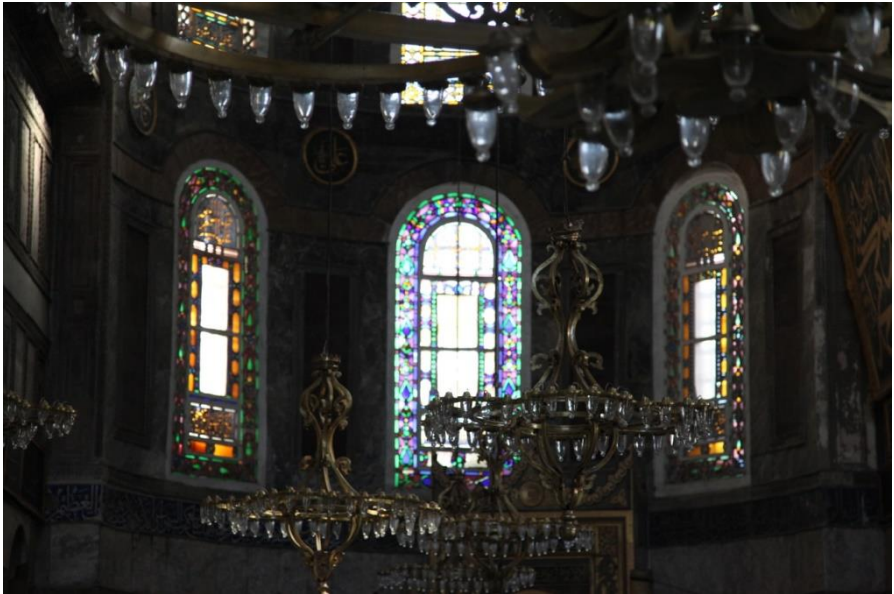


Figure 16. View towards the apsis, with and without electric lighting





Figure 16. View of the dome directly from the center of the dome and the chandelier.

The images that were taken using the fisheye lens were calibrated with a Minolta illuminance meter. These fisheye images were taken under the main dome inside the building and under an unobstructed sky in a nearby terrace. The illuminance measurements (lux) were taken every 15 minutes throughout the measurement days (September 17<sup>th</sup> and 24<sup>th</sup>) on the same plane of the surface of the fisheye lens (76 cm from the floor). The illuminance values for interior and exterior measurements for September 17<sup>th</sup> are given in Figure 17. The scale for the outdoor and indoor illuminance measurements are given on the left and right (y) axis of the graph, respectively. The units are in lux. As the sky conditions were partly cloudy throughout the day on September 17<sup>th</sup>, the outdoor illuminance values demonstrated significant variance throughout the day (shown in blue color in the graph). The interior illuminance values were relatively stable. The red measurement points were taken with only daylight; the yellow measurement points were taken with both daylight and electric

lights<sup>1</sup>. This data also illustrates that the contribution of electric lighting in the overall illuminance levels inside the building is minimal. The illuminance measurements were also repeated on September 24<sup>th</sup>, and results are shown in Figure 18.

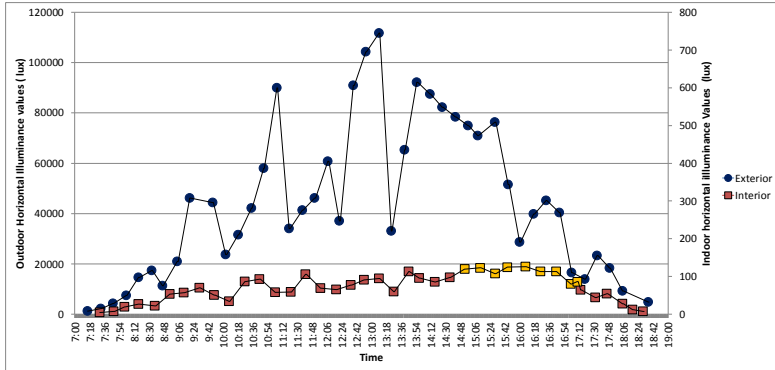
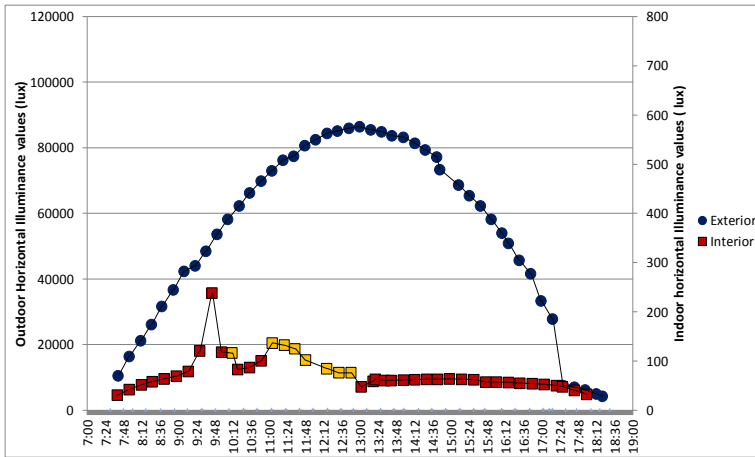


Figure 17. Horizontal illuminance measurements taken outside (recorded in a nearby terrace with minimal obstruction) and inside of Hagia Sophia under the main dome (September 17<sup>th</sup>)

192



<sup>1</sup> The data is primarily collected under daylighting; and electric lights were turned off throughout the day. However, there were instances where electric lighting was turned on due to other activities in the Hagia Sophia.

Figure 18. Horizontal illuminance measurements taken outside (recorded in a nearby terrace with minimal obstruction) and inside of Hagia Sophia under the main dome (September 24<sup>th</sup>)

The minimum recommended illuminance level for navigation in an interior space is 30 lux [37]. The target design illuminance value for religious spaces is specified as 50 lux [37]. The illuminance values in Hagia Sophia were above 50 lux with only daylighting, throughout the normal operation hours. The average illuminance was measured as 80 lux. This value is obviously specific to the daylighting conditions when the measurements were taken in September. However, these limited number of measurements could be analyzed with sporadic measurements available in other publications<sup>2</sup> to conclude that the lighting levels in Hagia Sophia could be achieved using only daylight during normal operation hours.

### 2.3. Long Term Lighting Performance Analysis

193

A computational method explained in Section 3.3 is used to extrapolate long term daylighting performance from short term measurement data. A statistic based daylight coefficient methodology [31] model is developed to correlate the internal pixel luminance values to the sky luminance patches; and the statistical model is used to extrapolate long term predictions. This technique is applied to extrapolate the daylighting conditions in Hagia Sophia for December 21<sup>st</sup> at noon, under overcast sky conditions (Figure 19). December 21<sup>st</sup> is the shortest day and the sun is lowest in the sky. Under overcast sky conditions, it provides the lowest lighting values both inside the building and outside for this location.

---

<sup>2</sup> The illuminance measurements taken under the main dome varied between 20-60 lux on October 31<sup>st</sup>, 1966 [38]. Measurements from another study [14] reveal measurements between 25-125 lux during the months of April and May in 2002. It is important to note that these measurements are expected to under-evaluate the actual values as they were taken during the restoration; and the scaffoldings inside the building must have reduced the daylight availability inside the building.

As expected, the luminance values for December 21<sup>st</sup> under overcast sky conditions are much lower than the measured data in September and October [Figure 19]. The human eye can operate with very low luminance values. When the adaptation luminance reaches 10 cd/m<sup>2</sup>, photopic mode is triggered. Therefore, even under the extreme condition of the winter solstice, that yield relatively low luminance values, human visual system would function normally under daylighting conditions inside Hagia Sophia, without the electric light supplements. However, it should be noted that the electric lighting supplement could be used sparingly under heavily overcast days during the winter months.

### 3. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Keinbauer et al. [6] argue that the interior light levels in Hagia Sophia were higher in 6<sup>th</sup> Century; and the glass that was replaced in time had caused reduction in light levels. However, Schibille [14] discusses that the opposite is more plausible. According to Schibille, the restoration done by the Fossati brothers had caused alterations in the window sections, which led to reduction in light levels.

The analysis done using the state-of-the art luminance measurement techniques employed in this study cannot offer explanations to the historical changes and restorations, but the analysis performed today reveal that the daylighting in Hagia Sophia is sufficient to light the space during normal operation hours. The documents from the 6<sup>th</sup> century and afterwards all attest that the original lighting scheme of Hagia Sophia was designed such that daylighting is used daytime and artificial lighting is reserved for nocturnal use.

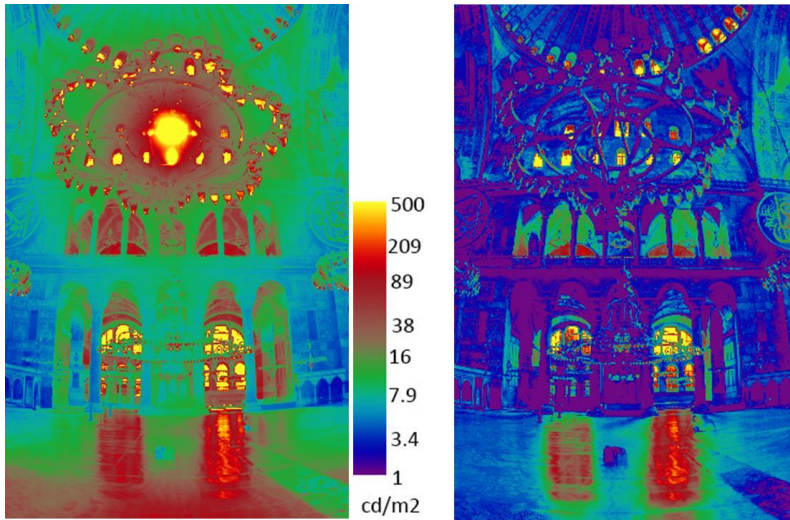


Figure 19. a) Recorded luminance values in Hagia Sophia on October 24th under clear sky conditions b) Extrapolated luminance values for the same scene for December 21<sup>st</sup> under overcast sky conditions

195

The following conclusions and recommendations are listed as the closing remarks:

- The exquisite lighting in Hagia Sophia is a unique combination of two components. The first component is the directional character of sunlight flowing into the interiors. The windows in the dome and semi dome frame the sunlight when the sun path and the window location coincide; and create playful light pools in the interior. Passage of time in Hagia Sophia is marked by the animation of these light pools.
- The second component is the hierarchy of the surface reflectances. The vertical surfaces mostly absorb the incident light, while the Proconnesian marbles on the floor become a major source of the reflected directional diffuse light.
- The contrast between the light pools and the dark surfaces create a dramatic lighting that is described as poetic, mystical, and magical.
- The electric lighting employed during daylight hours hampers the quality of daylighting and sunlighting in Hagia Sophia. The original lighting scheme in Hagia

Sophia is the result of a careful composition of i) the geometry of the space, ii) the material properties of the surface materials; and iii) the position of light sources (i.e. windows). The balance between these three factors is disturbed by the addition of electric light sources.

- The electric light sources mostly illuminate the chandeliers and the floor. They have minimal impact on the illumination of the vertical surfaces in the first floor. Their impact on other surfaces including the dome and mosaics is negligible.
- The reflections from the floor due to the electric light sources disturb the perception of the light pools formed by sunlighting and decrease the levels of contrast in the space.
- The global adaptation level determines the perceptual qualities in a luminous environment. As explained in Section 3.4, human visual system has a wide range that spans 14 logarithmic units; however, it has a limitation to detect 4 logarithmic units at once. The absolute range of the 4 logarithmic luminance varies depending on the global adaptation levels. On sunny days, the visitors of Hagia Sophia enter the narthex from very bright outdoors. Since it takes a moment to adapt to the interior adaptation levels, they may find the interior levels dim initially. However, they adapt to the interior luminance levels in a matter of seconds. During the field studies, it was observed that local tour guides requested electric lights to be turned on upon entry. This is rather an unfortunate request, as it will take a moment for the visitors to adjust and adapt to the interior light levels, and interior light levels are well above the recommended levels. In fact, one can truly enjoy and experience the unique lighting conditions in Hagia Sophia, when the electric lights are turned off.
- It is strongly recommended that the supplemental electric lighting is used only during the early morning hours and late afternoons or the short and gloomy days in winter.

**REFERENCES:**

- [1] Lethaby WR and Swainson H. *The Church of Sancta Sophia Constantinople: A Study of Byzantine Building*. London and New York: Macmillan & Co, 1894.
- [2] Mainstone RJ. *Hagia Sophia: Architecture, Structure and Liturgy of Justinian's Great Church*. Hungary: Thames and Hudson, 1998.
- [3] Nelson RS. *Hagia Sophia, 1850-1950: Holy Wisdom Modern Monument*. Chicago: The University of Chicago Press, 2004.
- [4] Krautheimer R. and Curcic S. *Early Christian and Byzantine Architecture*. New Haven: Yale University Press, 1986.
- [5] Kahler H. *Hagia Sophia*. New York: Frederick A. Praeger Publishers, 1967.
- [6] Kleinbauer WE, White A and Matthews H. *Hagia Sophia*. London: Scala Publishers, Istanbul: Archaeology and Art Publications, 2004.
- [7] Swift EH. *Hagia Sophia*. New York: Columbia University Press, 1940.
- [8] Gülekli NC. *Hagia Sophia*. Ankara: Turkish Press, Broadcasting and Tourist Department, 1952.
- [9] Mark R and Çakmak AS. *Hagia Sophia from the Age of Justinian to the Present*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [10] Van Nice RL. *Saint Sophia in Istanbul: An Architectural Survey*. Washington DC: Dumbarton Oaks Center for Byzantine Studies, 1966.

- [11] *Aya Sofya Müzesi Yıllığı*, İstanbul: Aya Sofya Müzesi Yayınları, 2010.
- [12] Mango C and Ertuğ A. *Hagia Sophia: A Vision for Empires*. İstanbul: Ertug & Kocabiyik, 1997.
- [13] Potamianos I. *Light into Architecture: Evocative Aspects of Natural Light as related to Liturgy in Byzantine Churches*. Doctoral Dissertation, University of Michigan, 1996. (UMI No. 9624708).
- [14] Schibille N. *Light in Early Byzantium: The Church of Hagia Sophia in Constantinople*. Doctoral Dissertation, University of Sussex, 2003.
- [15] Jabi W and Potamianos I. "Geometry, Light, and Cosmology in the Church of Hagia Sophia," *International Journal of Architectural Computing*, 5(2), 2007, 304-319.
- [16] Jabi W and Potamianos I. "A Parametric Exploration of the Lighting Method of the Hagia Sophia Dome," *The 7<sup>th</sup> International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, The Eurographics Association, 2006.
- [17] Schibille N. "Astronomical and Optical Principles in the Architecture of Hagia Sophia in Constantinople," *Science in Context*, 22(1), 2009, 27-46.
- [18] Procopius and Dewing HB. *Procopius*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1996.
- [19] Bell PN, Agapetos, and Paul, the Silentiary. *Three Political Voices from the Age of Justinian: Agapetus, 'Advice to the Emperor': Dialogue on political science: Paul the Silentiary', Description of Hagia Sophia*. Liverpool: Liverpool University Press, 2009.



- [20] Fletcher I and Carne-Ross: DS. "Ekphrasis: Lights in Santa Sophia, from Paul the Silentiary," *Arion: A Journal of Humanities and Classics*, 4(4), Winter 1965, 563-581.
- [21] Mango C. *The Art of the Byzantine Empire, 312-1453, Sources and Documents*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1972.
- [22] Butler LE. *The Nave Cornices of Hagia Sophia in Istanbul*. Doctoral Dissertation, University of Pennsylvania, 1989.
- [23] Debevec P, and Malik J. "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs," *Proceedings of SIGGRAPH 97, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*. Los Angeles (California), 1997, 369-378.
- [24] İnanıcı M. "Per-pixel Lighting Data Acquisition and Analysis with High Dynamic Range Photography," *Proceedings of the International Commission on Illumination (CIE) 2005 Mid-Conference*, Leon, Spain, May 18 - 20, 2005.
- [25] İnanıcı M and Galvin J. *Evaluation of High Dynamic Range Photography as a Luminance Mapping Technique*. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA. LBNL Report # 57545, 2004. Available from: eScholarship Repository, University of California, <http://repositories.cdlib.org/lbnl/LBNL-57545>, and U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information, [http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti\\_id=841925&query\\_id=0](http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=841925&query_id=0).
- [26] İnanıcı M. "Evaluation of High Dynamic Range Photography as a Luminance Data Acquisition System," *Lighting Research and Technology*, 38(2), June 2006, 123-136.
- [27] Kumaragurubaran V, and İnanıcı M. "hdrscope: High Dynamic Range Image Processing Toolkit for Lighting Simulations and Analysis," *Proceedings of the International*

*Building Performance and Simulation Association (IBPSA) 2013 Conference, Chambéry, France, August 25-28, 2013.*

- [28] Stumpf J, Jones A, Wenger A and Debevec P. 2004. "Direct HDR Capture of the Sun and Sky". 3rd International Conference on Virtual Reality, Computer Graphics, Visualization and Interaction in Africa. Cape Town, South Africa.
- [29] İnanıcı M. "Evaluation of High Dynamic Range Image-based Sky Models in Lighting Simulation," *Luekos, Journal of the Illuminating Engineering Society (IES)*, 7(2), October 2010, 69-84.
- [30] Ward, G. Photosphere. <http://anywhere.com/>
- [31] İnanıcı M. "Dynamic Daylighting Simulations from Static High Dynamic Range Imagery using Extrapolation and Daylight Coefficient Methodologies," *Proceedings of the International Building Performance and Simulation Association (IBPSA) 2013 Conference, Chambéry, France, August 25-28, 2013.*
- [32] İnanıcı M. "Utilization of Image Technology in Virtual Lighting Laboratory," *Proceedings of the International Commission on Illumination (CIE) 2003 Conference, San Diego, June 26 - 28, 2003.*
- [33] İnanıcı M. "Transformation of High Dynamic Range Images into Virtual Lighting Laboratories," *Proceedings of the International Building Performance and Simulation Association (IBPSA) 2003 Conference, Eindhoven, Netherlands, August 10 - 14, 2003.*
- [34] İnanıcı M. "Transformations in Architectural Lighting Analysis: Virtual Lighting Laboratory", Dissertation, University of Michigan. Available from: ProQuest Information and Learning, AAT 3121949, 2004.

- [35] İnanıcı M. Per-pixel Lighting Data Analysis. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA. LBNL Report # 58659, 2005. Available from: eScholarship Repository, University of California  
<http://repositories.cdlib.org/lbnl/LBNL-58659> and U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information,  
[http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti\\_id=891345](http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=891345).
- [36] İnanıcı M and Navvab M. "The Virtual Lighting Laboratory: Per-pixel Luminance Data Analysis," *Luekos, Journal of the Illuminating Engineering Society (IES)*, 3(2), Oct. 2006, 89-104.
- [37] DiLaura DL, Houser KW, Mistrick RG, and Steffy GR. *The Lighting Handbook*, 10th Ed., Illuminating Engineering Society, 2011.
- [38] Bolak O. *Camilerin Aydınlatılması Üzerinde bir Araştırma*. İstanbul Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Yayınları. No. 123, 1970.

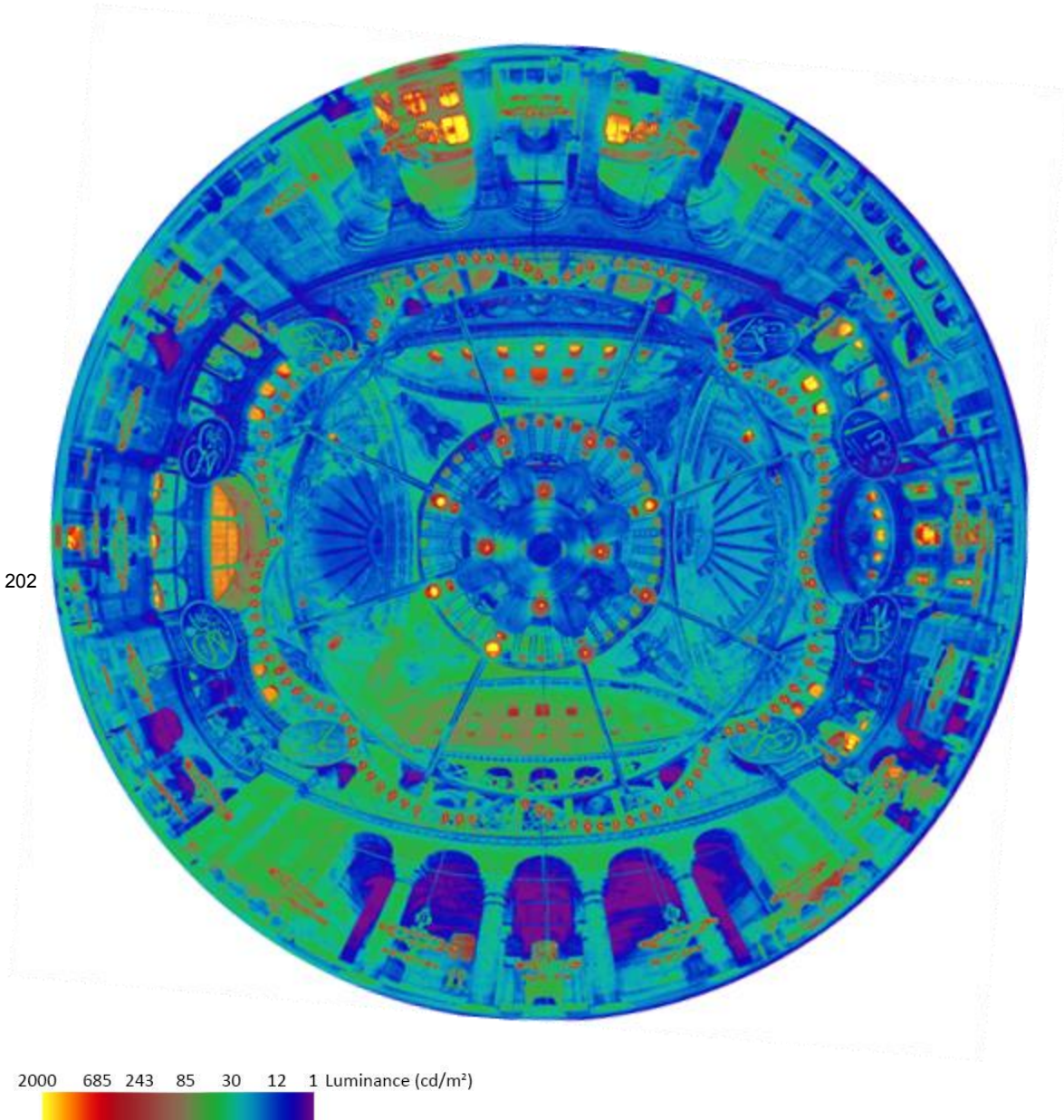


Figure 20. Luminance map of Hagia Sophia recorded on October 1<sup>st</sup> 2012 at noon under clear sky conditions

## AYA SOFYA'NIN AYDINLATMA ANALİZİ

Mehlika İnanıcı\*

### ÖZET

Aya Sofya'nın aydınlatması yüzyıllardır ziyaretçilerin, yazarların ve araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Aya Sofya ile ilgili yapılan pek çok çalışmada, binanın aydınlatması şiirsel, büyülü ve mistik olarak tanımlanır. Ancak bugüne kadar Aya Sofya'nın aydınlatması üzerine yapılan kapsamlı bir sayısal analiz çalışması bulunmamaktadır. Böyle bir çalışmanın yapılabilmesi için gerekli olan piksel boyutunda ölçüm teknikleri yakın dönemde geliştirilmiştir. Bu sebeple Aya Sofya'nın takdir edilen bu özelliğinin araştırılması ve tasarım ve yapım sürecinde gösterilen duyarlılıkların incelenmesi, ancak binanın yapımından 15 yüzyıl sonra geliştirilen yeni tekniklerle mümkün olabilmektedir. Bu makale Aya Sofya'nın Yüksek Dinamik Ölçekli (YDÖ) fotoğraf tekniği kullanarak doğal aydınlatma koşulları altında ölçülmesi ve bilgisayar teknikleri yardımı ile uzun dönem aydınlatma koşullarının ekstrapolasyon yolu ile değerlendirilmesi sonuçlarını içeren bir nicelik ve nitelik araştırması sonucunda hazırlanmıştır. Aya Sofya'nın doğal aydınlatması ve günümüzde kullanılan elektrik aydınlatması ayrı ayrı ve birlikte değerlendirilmiştir.

128

### 1. GİRİŞ

Aya Sofya'nın tarihsel ve dinsel önemini, strüktürel ve mekansal özelliklerini, zaman içindeki değişimini, konservasyon çalışmalarını, mozaik, mermer, kapı gibi çeşitli bina elemanlarını inceleyen pek çok önemli araştırma mevcuttur [1-12]. Bu çalışmaların büyük çoğunluğunda Aya Sofya'nın ışık kalitesinden de bahsedilmeden geçilmez, ama bu konuda "şiirsel", "mistik"

---

\* Doç. Dr., Washington Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, Seattle, WA, 98115, ABD  
inanici@uw.edu

yada “büyülü” kelimelerinin ardına saklanılmış ve detaylı olarak inceleme yapılmamıştır. Aya Sofya’nın aydınlatması konusunu doğrudan inceleyen çok az sayıda çalışma bulunmaktadır [13-17]. Bu çalışmalarda kullanılan metotlar sadece gözleme veya çok kısıtlı sayıda yapılmış ölçümlere dayandığından, Aya Sofya’nın ışık kalitesi konusunda ancak sınırlı bilgi edinmemizi sağlamaktadırlar. Kapsamlı boyutta yapılan sayısal analiz çalışması bize binadaki hem doğal hem de elektrikle yapılan aydınlatmanın miktarı, dağılımı, zaman içerisindeki değişimi, ve mekandaki kontrast (karşıtlık) değerleri konusunda bilgi verecek ve Aya Sofya’nın bugüne kadar “şiirsel”, “mistik” yada “büyülü” kelimeleriyle tanımlanan aydınlatmasını sayısal olarak değerlendirmemize ve bu eşsiz aydınlatmayı oluşturan faktörleri analiz etmemize yardımcı olacaktır.

Aya Sofya ile ilgili 6. yüzyıldan günümüze ulaşan iki önemli kaynak Aya Sofya’nın yapıldığı dönemdeki aydınlatma özellikleri konusunda çok değerli bilgiler içermektedir. Bu kaynaklardan birincisi tarihçi Procopius’un betimleri [18], diğeri ise Paulos Silentarios’un şiirleridir [19, 20]. Prokopius Aya Sofya’daki doğal aydınlatmayı şöyle anlatmıştır: “... görülmemiş bir aydınlık ve güneş ışığı binayı doldurmuştu; binanın dışarıdaki “güneş”ten değil, içerideki de oluşan “ışınlar” ile aydınlatıldığını söyleyebilirdiniz ki, bu kilisenin içine böyle bir ışık bolluğu aktırmaktaydı”. Procopius’un tanımları bize Aya Sofya’nın yapıldığı dönemde, değişikliklere uğramadan önceki doğal aydınlatması konusunda bilgi verirken, Paul’un şiirleri, gün ışığı ile aydınlatılması ve mekan özellikleri dışında, o dönemde kullanılan yapay aydınlatma tasarımı ile ilgili de çok önemli ipuçları içermektedir.

Paul 563 yılında yazdığı metinde [20], gece uygulanan yapay aydınlatmayı şöyle anlatmaktadır: “Gece aydınlatmasını tanımlamaya kelimeler yetmez. Gece yarısı güneşinin tapınağı övgülerle aydınlattığını söylemek mümkündür. Bükülmüş uzun pirinç zincirlere asılı, iç içe geçmiş sarmal eğriler üzerinden sarkan gümüş diskler havada daire oluşturacak şekilde kilisenin ortasında

asılı duruyordu. Bu disklerin insanların kafası üzerinde bir ta oluşturduğunu söyleyebiliriz. Diskler usta işçilerin aletleriyle delinmiş ve ierilerden ateşte pişirilmif cam şaftların geçmesi sağlanmiftr ve böylece, ışık yüksekte insanların üzerine dağıtılmiftr. " Paul'un yazdığı metinlerden kubbenin altındaki yağ kandillerini taşıyan büyük avize dışında, sarkan zincirlere asılmif gümüş tabaklar içine yerleştirilmif tekli yağ kandillerinin varlığı da anlaşılmaktadır. Bu kandiller dikey düzlemde eğriler oluşturacak şekilde farklı ykseklilere asıldığından iç mekanda farklı ışık değerlerinin elde edilmesini sağlamışlardır. Ancak, bu ışık dağılımı hiyerarşik değildir ve herhangi bir mekanı daha fazla aydınlatmaktan çok, mekan içinde ışık varyasyonu sağlamak amacı ile tasarlanmıştır. Bu kandiller "aydınlık bir yük taşıyan gümüş gemiler" olarak anlatılırlar. Paul ayrıca zemin katta ve galerilerde boynuz şeklindeki demir askıların ortalarına asılmif cam yağ kapları içeren yer kandillerinden de bahsetmektedir [1, 14, 20, 21].

130

Aya Sofya'nın gece aydınlatmasının Boğaziçi ve Marmara denizindeki gemicilere fener görevi yaptığı Paul'un tasvirleri arasında yer almaktaysa da, yapılan bir çalışmada 40 watt'lık bir akkor lambanın, 16 yağ kandili içeren bir avizeden otuz kat daha fazla ışık yaydığı hesaplandığından [22], bu tanımları bilimsel gerçeklerden çok, bir şairin dramatik etki yaratmak üzere kullandığı metaforik ya da alegorik anlatımlar şeklinde yorumlamak mümkündür. Sonuç olarak, Aya Sofya'nın özgün yapay aydınlatmasının, yağ bazlı lambalar ve şamdanlar aracılığı ile sağlandığı, çok çeşitli ve özenle tasarlanmif aydınlatma aygıtları kullanıldığı ve bu aydınlatmanın geceleri Aya Sofya'nın ihtiyaına önemli ölçüde katkıda bulunduğu çeşitli kaynaklar tarafından tartışılmış ve anlatılmıştır [1, 14, 20]. Bu çalışmalardan ve günümüze ulaşmış metinlerden [18, 19] Aya Sofya'nın aydınlatılmasında gün ışığı ve yapay aydınlatmanın aynı anda kullanılmadığını, gün ve güneş ışığının gündüz saatlerinde, yapay aydınlatmanın ise gün batımından sonra kullanıldığı anlaşılmaktadır. 1849 yılında Fossati kardeşlerin yaptıkları restorasyon kapsamında yapıya eklenen avizeler de, o dönemde

şamdanlar ve yüzen fitilli cam kandiller ile kullanılmaktaydı [1, 6, 22].

Daha yakın dönemlerde yapılan aydınlatma çalışmalarında Aya Sofya'nın ana aks yönlendirmesinin (oryantasyonun) aydınlatma açısından önemi detaylı bir şekilde tartışılmıştır [13-17]. Bu çalışmalarda, binanın mimarları Anthemios ve Isidoros'un binanın oryantasyonu konusunda göz önüne aldıkları faktörler ile ilgili ortaya atılan tezler farklıdır, ve bu tezler yön seçiminin dinsel ve kozmolojik boyutu ile farklı tartışmalar içermektedir. Binanın bugünkü konumunu inceleyerek, aydınlatma analizi açısından önemli olan bilgiler şu şekilde sıralanabilir:

- Aya Sofya'nın ana aks oryantasyonu çeşitli kaynaklarda 30° ile 35° arasında Güney Doğu (GD) yönü olarak bildirilmiştir [1, 13, 14]. Yazarın mekanda yaptığı ölçümlerde 32° GD olarak belirlenmiştir. Kış gündönümünde (21 Aralık) veya Noel'de (25 Aralık), İstanbul'da (41° Kuzey enlemi, 28.9° Doğu boylamı) güneş yaklaşık olarak 31.9° GD azimut açısı ile doğduğundan, binanın ana eksenini ile güneşin doğuş açısı bu tarihlerde yatay düzlemde çakışmaktadır.

- Yaz gündönümünde (21 Haziran) gün batımı 121° Güney Batı (GB) yönünde gerçekleşmektedir ve bu açı yapının ana aksıyla, apsisin tam ters yönünde kesişmektedir. Sonuç olarak, yaz döneminde 40 pencerenin 26'si güneşin azimut açısı ile kesişmektedir.

Binanın yönlendirilmesinin aydınlatma açısından en önemli özelliği, (güneşin doğuş açısı mevsimlere göre değişmekle birlikte) günün ilk ışıklarının öncelikle bema ve naosu aydınlatması; ve yapının gün boyunca güneş ışığı alacak şekilde tasarlanmış olmasıdır.

## 2. ÇALIŞMANIN AMACI

Bu çalışmanın amacı Aya Sofya'da "yüksek dinamik ölçekli" fotoğraf (YDÖ) tekniği ve çeşitli analiz metotları kullanılarak



yüksek çözünürlükte, yüksek dinamik ölçekte ve geniş görüş alanı çerçevesinde aydınlatma (parlaklık) ölçümü ve analizi yapmaktır. Çalışmanın içeriği aşağıda özetlenmiştir:

- Doğal aydınlatma koşullarında, yapının iç mekan aydınlatma değerleri, bu değerlerin dağılımı ve mekandaki kontrast değerleri incelenmiştir. Bu veriler ışığında Aya Sofya'nın eşsiz aydınlatmasını oluşturan öğeler tartışılmıştır.
- Elektrikli aydınlatmanın doğal aydınlatma ile birlikte kullanıldığında, yapının genel aydınlatmasına olan etkisi araştırılmıştır.
- Analiz sonuçları değerlendirilerek, binanın özgün aydınlatma kalitesini korumak ve ziyaretçi deneyimini artırmak amacı ile önerilerde bulunulmuştur.

### **3. YÖNTEM: ÖLÇÜM, EKSTRAPOLASYON VE ANALİZ TEKNİKLERİ**

132

Araştırmanın aşamaları şu şekilde belirlenmiştir:

- Alan ölçümleri;
- Bilgisayar ortamında Yüksek Dinamik Ölçekli (YDÖ) fotoğraf birleşimi ve kalibrasyon çalışmaları;
- Ekstrapolasyon yolu ile yıl boyu aydınlatma koşullarının değerlendirilmesi için gerekli tekniklerin geliştirilmesi ve doğrulanması;
- Bilgisayar ortamında piksel boyutunda aydınlatma analiz çalışmaları ve değerlendirilmesi.

#### **3.1. Alan Çalışması: Yüksek Dinamik Ölçekli Parlaklık Ölçümleri**

Yüksek çözünürlükte (örneğin piksel boyutunda) aydınlatma ölçümlerinin yapılabilmesi YDÖ fotoğraf tekniği ile mümkün olabilmektedir. Tek pozlama içeren bir fotoğraf karesi aydınlatma ölçümü için yeterli değildir. YDÖ fotoğraf tekniği, tripod üzerine oturtulan fotoğraf makinesi kullanılarak, ard arda çekilen çeşitli pozlamalar yoluyla, ışık değerlerinin en düşük seviyeden en

yüksek seviyeye kadar kaydedilebilmesini sağlamaktadır. Bu fotoğraflar daha sonra bilgisayar tekniği kullanılarak birleştirilebilmekte ve kalibre edilebilmektedir. Öncelikle fotoğrafçılık için geliştirilen bu tekniğin [23], fotoğrafı ve sonrasında bilgisayarda yapılan işlemler belirli kriter ve kalibrasyon yöntemleri çerçevesinde yapıldığında, bilimsel düzeyde doğrulukla aydınlatma ölçümleri (parlaklık (luminans) değerleri, kandela/m<sup>2</sup>) için de kullanılabilmesi daha önce yapılan detaylı çalışmalarla kanıtlanmıştır [24 - 26].

Aya Sofya'nın alan ölçüm çalışması sırasında tripod, iki adet Canon EOS 5D ve bir adet 30D SLR fotoğraf makineleri, dizüstü bilgisayar, Minolta LS-110 parlaklık ölçer (luminance meter) ve Minolta T-1A aydınlık ölçer (illuminance meter) aletleri kullanılmıştır. YDÖ fotoğraflar için gerekli çeşitli pozlamaların gün boyunca otomatik olarak her 15 dakikada bir gerçekleştirilmesi, yazar ve ekibinin geliştirdiği hdrscope isimli bilgisayar programı [27] aracılığı ile sağlanmıştır. Aynı fotoğraf karesinin ard arda çeşitli pozlamalarda çekilmesi gerektiğinden, bu ölçümlerin insan trafiğinin fazla olmadığı bir ortamda yapılması gerekmektedir. Ayasofya Müzesi'nin her zamanki ziyaretçi kalabalığı bu ölçüme elverişli olmayacağından, müzenin genel ziyarete kapalı olduğu üç ardaşık Pazartesi günü ölçümler yapılmıştır (17 Eylül, 24 Eylül ve 1 Ekim 2012).

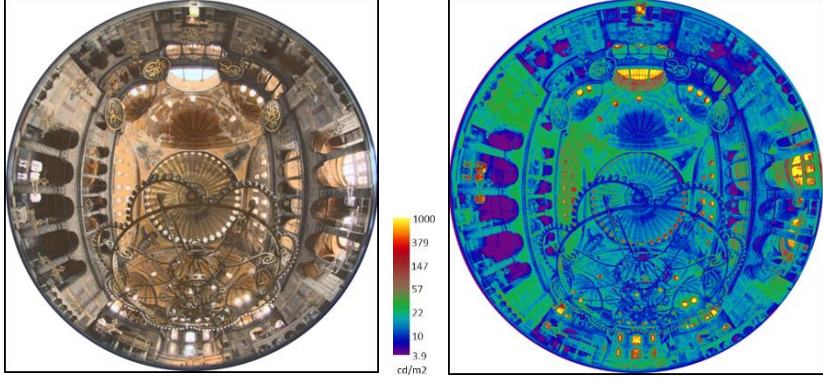
İç mekandaki ölçüm işlemi iki fotoğraf makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerin yapıldığı birinci ve ikinci günlerde ölçümler gündeğumundan gün batımına kadar (7:00 - 19:00) kesintisiz sürdürülmüştür. Birinci fotoğraf makinesi (Canon EOS 5D SLR), objektifin aksı kubbenin merkezine yakın olacak şekilde ve objektif yer düzlemine paralel olarak tripod üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 1.a). Bu fotoğraf makinesi ile yapılan çekimlerde, Sigma 8 mm F3.5 EXDG balık gözü lens kullanıldığından, 180° dikey ve yatay açısı ile hem kubbenin, hem de zemin dışındaki diğer yüzeylerin görüntüleri kaydedilmiştir.

İkinci fotoğraf makinesi, yer düzlemine 90° açı ile zemine yerleştirilen bir tripod üzerinden çalıştırılmıştır. Ölçümlerin yapıldığı ilk gün, fotoğraf makinesi ana giriş kapısına yakın olacak şekilde ve apsisine doğru yönlendirilerek çekimler yapılmıştır (Şekil 1b). Ölçümlerin yapıldığı ikinci gün, mekan yan galeriden güneye doğru fotoğraflandırılmıştır (Şekil 1c).

Ölçümler Aya Sofya'nın iç mekanında yapılırken, eş zamanlı olarak yakın bir binanın yüksek ve etrafı açık olan teras katından İstanbul'un gökyüzü koşulları, gene dinamik ölçekli fotoğraf tekniği kullanılarak tespit edilmiştir. Güneş ve gökyüzünün ışık değerlerini kapsayan YDÖ fotoğraf tekniği, iç mekanda kullanılan YDÖ tekniğinden farklıdır. İç mekanda farklı pozlamalar, tek diafram ve değişken perde hızları ile elde edilir. Dış mekanda güneş ve gökyüzü kaydedilirken ise, dinamik ölçeğin çok yüksek olmasından dolayı iki ayrı diafram, değişken perde hızları ve özel filtre kullanılmıştır [28]. Bu yöntemin güneş ve gökyüzündeki yüksek dinamik aralık içeren parlaklık değerlerini ölçme konusundaki doğruluğu daha önce yapılan çalışmada gösterilmiştir [29]. İstanbul'un gökyüzü koşullarını çalışmanın gündeğümünden gün batımına kadar sürekli devam ettiği 2 gün boyunca (17 ve 24 Eylül 2012) Canon EOS 5D SLR Mark II fotoğraf makinesi ve Sigma 8 mm F3.5 EXDG balık gözü lens kullanılarak kaydedilmiştir (Şekil 1d). 17 Eylül gününde parçalı bulutlu hava koşulları hakimken, 24 Eylül günü güneşli ve bulutsuz bir gün olmuştur.

Ölçümlerin yapıldığı üçüncü günde, özellikle doğal ve yapay aydınlatma koşulları üzerinde çalışılmış ve Aya Sofya'da çeşitli iç mekan ve açılardan fotoğraflama işlemi yapılmıştır.

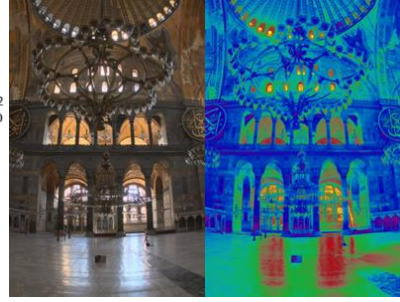
Tüm fotoğraf çekimleri sırasında, ince kalibrasyon ayarı amacı ile parlaklık (luminans) ve aydınlık (illuminans) ölçümleri de yapılmıştır. Normal lens kullanılan fotoğraflarda kalibrasyon Gretag-Macbeth renk kartı ile Minolta parlaklık ölçer aleti ile yapılırken, balık gözü lens kullanılan fotoğraflarda kalibrasyon Minolta aydınlık ölçer aleti ile gerçekleştirilmiştir.



a) Ana kubbeye bakış, 24 Eylül, 12:30



b) Girişten apsise doğru bakış (17 Eylül, 10:00)



c) Galeriden güneye doğru bakış (24 Eylül, 16:15)



d) İstanbul'da güneş ve gökyüzü koşulları (24 Eylül, 13:00)

Şekil 1. İç ve dış mekanda yapılan YDÖ fotoğraflar ve parlaklık (lüminans) dağılım haritaları (kandela/m<sup>2</sup>)

### **3.2. Bilgisayar Ortamında Ydö Fotoğraf Birleşimi ve Kalibrasyonu**

Tripod üzerine oturtulan fotoğraf makinesinin ard arda çekilen çeşitli pozlamalar yoluyla kaydedilen ışık değerleri Photosphere [30] isimli bilgisayar programı kullanılarak tek bir YDÖ imajı olarak birleştirilmiştir. Fotoğraf makinesi ve lenslerin yapısından oluşan mekanik ve optik deformasyonlar bilgisayar teknikleri kullanılarak düzeltilmiştir. İnce kalibrasyon ayarları, mekanda yapılmış olan parlaklık ve aydınlık ölçümleri ile sağlanmıştır. Bu teknikler başka kaynaklarda detaylı olarak anlatılmaktadır [24-27, 29].

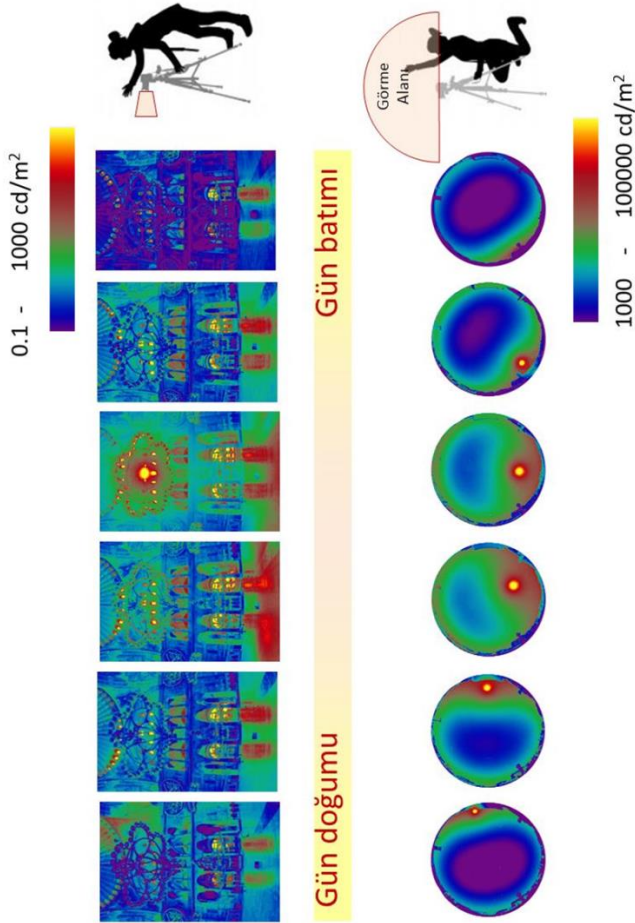
### **3.3. Ekstrapolasyon Yolu ile Uzun Dönem Aydınlatma Koşullarının Belirlenmesi**

Tüm gün süren iç ve dış mekan aydınlatma verileri eş zamanlı olarak 15 dakikalık aralıklarla toplanmıştır (Şekil 2). İç mekan verileri, ölçümlerin yapıldığı günlerdeki gökyüzü ve güneş koşulları altında ölçülen aydınlatma değerleridir. Bu sebeple bu veriler başka gün, mevsim ve gökyüzü koşulları altında pek fazla bilgi içermezler. Yazarın yaptığı bu çalışmanın bir başka amacı da, kısa dönem saha ölçüm değerleri kullanılarak uzun dönem aydınlatma koşullarının değerlendirilmesi için yeni bir bilgisayar simülasyon tekniğinin geliştirilmesiydi. Bu teknik, dinamik günışığı simülasyon tekniğinin temeli olan "günüşığı katsayısı" kavramından yola çıkarak, dış ve iç mekanda yapılan ölçümleri ve çeşitli ekstrapolasyon algoritmalarını kullanarak geliştirilmiştir. Tekniğin teorik olarak geçerliliği doğrulanmıştır [31].

### **3.4. Aydınlatma Analizi**

Yukarıda açıklanan şekilde çekilmiş, birleştirilmiş ve kalibre edilmiş YDÖ fotoğraflarda parlaklık değerleri piksel boyutunda kaydedildiğinden, her ölçüm, fotoğraf makinesinin çözünürlüğüne eşit değerde (örneğin 12 milyon pikselde) aydınlatma değerlerini kapsar ve bu değerler kandela/m<sup>2</sup> (cd/m<sup>2</sup>) biriminde kaydedilmiştir.

Gün boyunca her 15 dakikada bir çekilmiş resimlerden elde edilen 12 milyon aydınlatma değeri, Aya Sofya'daki aydınlatmayı nicelik ve nitelik açısından detaylı olarak incelememizi sağlayan ve daha önce var olan başka tekniklerle elde edilmesi mümkün olmayan bir veri tabanıdır. Bu veriler piksel boyutunda çeşitli istatistiksel ve matematiksel işlemler aracılığı ile [32-36] incelenmiştir.



Şekil 2. Eş zamanlı olarak 15 dakikalık aralıklarla yapılan iç ve dış mekan aydınlatma ölçümlerinden örnekler

Bu makalede renk ölçekli parlaklık (luminans) haritaları sıkça kullanılmıştır. Mekanda kaydedilen aydınlatma değerlerini bilgisayar ekranında ya da basılı olarak görüntülemek, bu ortamların dinamik ölçeklerinin sınırlı olması nedeniyle mümkün değildir. İnsan gözü, yıldız ışığından güneş ışığına kadar toplam 14 farklı logaritmik ölçekte parlaklık değerini algılayabilmektedir (10<sup>-6</sup> - 10<sup>+8</sup> kandela/m<sup>2</sup>). Kullandığımız bilgisayar ekranları ve basılı malzemelerde dinamik aralık yaklaşık olarak 2 logaritmik ölçeği ile sınırlı olduğundan, Aya Sofya'nın iç mekan aydınlatmasını ve İstanbul'un gökyüzü koşullarını kaydetmek için toplanan YDÖ aydınlatma değerleri, renk ölçekli parlaklık haritaları aracılığı ile incelenmiştir. Bu renk ölçekli haritalarda, renkler mor, mavi, kırmızı, sarı skalasında değişmektedir; en düşük parlaklık değerleri mor renkte, en yüksek parlaklık değerleri ise sarı renkte gösterilmektedir. Renklere karşılık gelen fiziksel parlaklık değerleri (kandela/m<sup>2</sup>) şekillere eklenmiştir. Renk ölçekli parlaklık haritaları aracılığı ile, mekandaki parlaklık değerleri, bu değerlerin dağılımı ve mekandaki kontrast değerleri incelenebilmektedir.

#### 4. ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA

##### 4.1. Gün ve Güneş Işığı Aydınlatması

Bir mekanda gözlemlenen aydınlatma, (i) mekanın formu ve forma dayalı detayları, (ii) yüzey malzemelerinin ışığı yansıtma özellikleri ile (iii) ışık kaynaklarının yerleşimi, spektral ve açısal dağılımlarının bir birleşimi sonucunda ortaya çıkan bir kompozisyonudur. Aya Sofya'daki "şiirsel", "mistik" ya da "büyülü" olarak tanımlanan aydınlatmanın sırrı da bu kompozisyonu oluşturan üç ögenin tasarımı ve binanın inşası sürecinde benzersiz bir düzenleme ile bir araya getirilmesini sağlayan anlayış, duyarlılık ve bilgeliktir.

Aya Sofya'nın aydınlatmasının bir özelliği, ışığın yönsel ya da doğrultusal olmasıdır. Işık kubbedeki ve yarım kubbelerdeki pencerelerden güçlü bir yönsel akı ile mekana ulaşır;

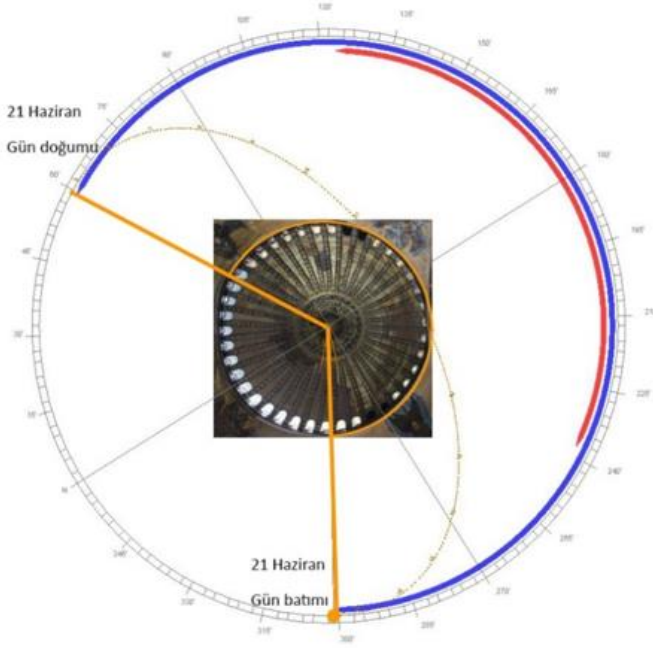
pencerelerden giren güneş ışığı çeşitli yüzeylerde ışık havuzları oluşturur; ve bu havuzlar gün içinde güneşin pencereden pencereye geçen hareketine bağlı olarak mekanda yer değiştirirler (Şekil 3). Bu özellik mekanın aydınlatmasını dinamik kılmaktadır.



Şekil 3. Güneş ışığının oluşturduğu ışık havuzları

Aya Sofya sadece yapıldığı dönemdeki diğer yapılarla değil, daha sonra da yapılan pek çok kubbeli bina ile karşılaştırıldığında, pencerelerin miktarı ve pencere yüzey alanının fazlalığı ile öne çıkan bir yapıdır. Güneş, Aya Sofya’da ana kubbeyi çerçeveleyen 40 pencerenin 26’sını, yılın en uzun günü olan yaz gündöneminde (21 Haziran), gün doğumundan gün batımına kadar teker teker aydınlatmaktadır (pencerelerden bir kısmı sonradan yapılan eklerle kapatıldığı için günümüzde bu sayı 22’ye inmiştir). Güneşin azimut açısı ile bu pencerelerden herhangi birisi çakıştığında, iç mekanda ışık havuzları oluşmaktadır. Bu ışık havuzlarının yeri güneşin yükseklik açısına (altitude) bağlı olarak yıl boyunca değişmektedir (Şekil 4).





Şekil 4. Aya Sofya kubbesi ve güneşin hareket şeması (21 Haziran)

Güneş ışığının oluşturduğu bu havuzlar, binanın diğer yüzeylerine göre çok yüksek parlaklık değerleri gösterdiğinden, mekanda parlak odaklar oluşturmakta ve böylece mekanın dinamik karakterini vurgulamaktadırlar. Şekil 5'de örneklendirilmiş analizde döşemede oluşan ışık havuzunun yüksek parlaklık değerleri açıkça görülmektedir. Ayrıca bu ışık havuzunun kaynağı olan yarı kubbedeki pencerenin yeri de belli olmaktadır. İşlevi farklı olan bir mekanda, örneğin ofis binalarında, bu ışık havuzları görmeyi zorlaştıracağından, sakıncalı bir aydınlatma şekli olarak kabul edilir. Ancak, Aya Sofya'nın aydınlatmasının önemli bir işlevi ruhani bir mekan yaratmak olduğundan, bu ışık havuzlarının varlığı mekan kalitesinde çok önemli bir unsurdur.

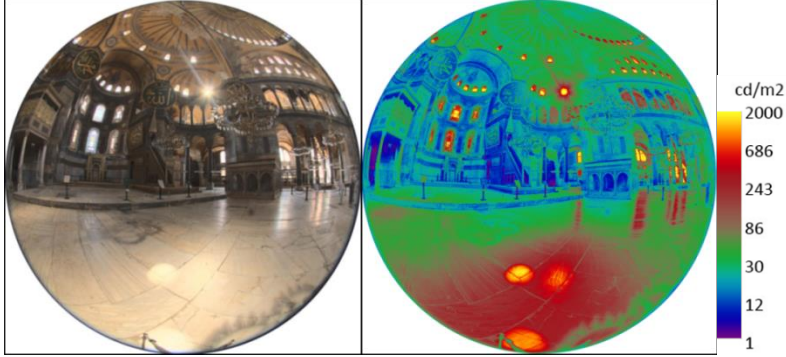
Kubbedeki pencerelerin sebep olduğu bu değişken ışık havuzlarının dışında, binanın güçlü yönsel aydınlatmasının bir diğer sebebi de, özellikle zeminde gözlemlenen "yönelmeli yaygın" (directional diffuse) ışık dağılımlarıdır. Bu ışık oyunları

sadece pencerelerin formu ve konumu sonucunda oluşmamaktadır, yüzey malzemelerinin bu etkiye katkısı çok önemlidir. Bu konu, aşağıda detaylı bir biçimde tartışılmıştır. Bu “yöneltmeli yaygın” ışık dağılımları çeşitli mekanlarda gözlemlenebilir. Şekil 6’daki fotoğraflar, kamera galeriden güneye doğru yönlendirilerek kaydedilmiştir (24 Eylül). Bu fotoğraf serisi, alt kat pencerelerin zeminde oluşturduğu “yöneltmeli yaygın” ışık dağılımlarının mekandaki ışık değişkenliğine katkısını açıkça ortaya koymaktadır. Şekil 7’de üst kat güney galeride (nef) ve Şekil 8’de üst katta İmparatoriçe locasının bulunduğu mekandaki ışık dağılımının çeşitliliği renk ölçekli parlaklık haritalarındaki renklerin değişiminden kolaylıkla gözlemlenebilmektedir. Işık dağılımının homojen değil, değişken olması, görsel sistemimizin uyarılması ve mekan algısı açısından önemi büyüktür. Işık dağılımındaki değişkenlik çok yüksek boyutlarda olduğunda (mekanın işlevine bağlı olarak) göz kamaşması yaratabilirler. Ancak Aya Sofya’daki ışık dağılımı çeşitliliği ve ölçeği, mekanı daha dinamik ve büyüleyici kılmaktadır.

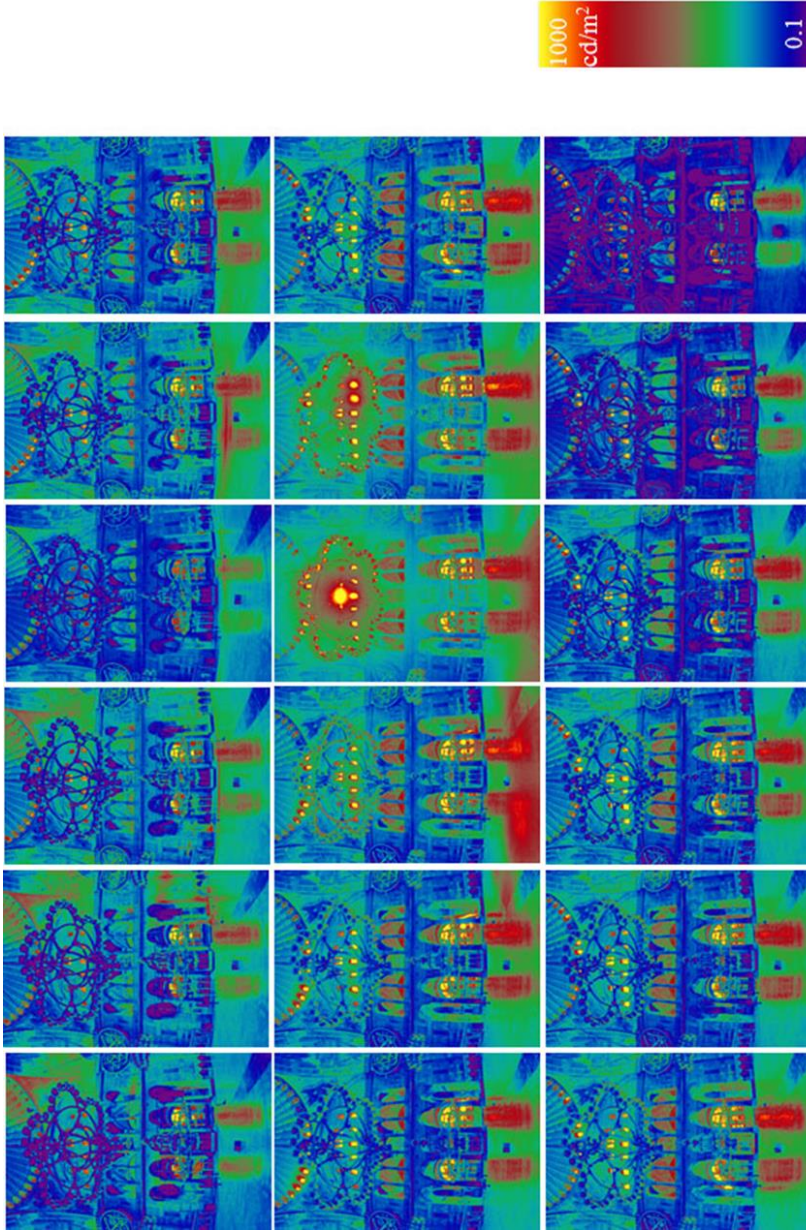
Aya Sofya’nın eşsiz aydınlatmasının, en önemli ögesi, yüzey malzemelerinin rengi ve ışığı yansıtma özellikleri ile birlikte, bu malzemelerin renk ve yansıtma açısından ustaca yerleştirilmiş kompozisyonları ve hiyerarşik düzenleridir. Günümüzde görülen pek çok mekanda, yüzey malzemeleri ışığı en verimli olarak yansıtacak şekilde düzenlenmiştir. Genel olarak zeminin %20, duvarların %50, ve tavanın %80 yayınlık yansıma (diffuse reflection) değerleri içeren malzemelerden oluştuğu gözlemlenir. Aya Sofya’da ise, ışığı en fazla yansıtan yüzey zemindir. Çeşitli kaynaklara göre, Aya Sofya’da sayıları 10 ile 12 arasında değişen farklı mermer kullanılmıştır [14, 20]. Bu mermerler arasında, zeminde kullanılan Marmara mermeri, süt beyazı rengi ve yüzey parlaklığı ile ışığı hem dağınık hem de yönlü olarak en fazla yayan ve yansıtan mermer türüdür. Ayrıca mermerin yarı saydam yüzey özelliklerinden dolayı ışık, yüzeyin altındaki tabakalardan da saçılarak, komplike ışık etkileşimleri ile yüzeye geri dönmektedir.

Dikey yüzeylerde kullanılan koyu renkli mermerler ise, ışığı büyük ölçüde emerek, bina içinde güçlü bir ışık kontrastına sebep olurlar. Aya Sofya'da ışığın yansıtılmasındaki hiyerarşi “zemin, tavan ve yatay” yüzeyler sıralamasında tanımlanabilir. Görüldüğü üzere bu hiyerarşi, pek çok mekanda gözlenen “tavan, duvar, zemin” hiyerarşisinden çok farklıdır. Kontrast, Aya Sofya'da hakim olan dramatik, şiirsel, büyü ve mistik ışığın arkasındaki fiziksel fenomendir. Aya Sofya'da ışık yönsel olarak (güneş ışığının aydınlattığı pencerelerden) mekana akmaktadır ve bu mekanda dikey yüzeyler tarafından çoğunlukla emilirken, özellikle zemin yüzeyinden aynasal ve “yönelmeli yaygın” olarak tekrar mekana yansıtılmaktadır. Procopius'un bahsettiği binanın “dışarıdaki “güneş”ten değil, içerideki “ışınlar” ile aydınlatıldığı” ifadesinin arkasında yatan fiziksel gerçek de budur. Osmanlı dönemi camilerinde ise, kullanılan şişe dibi camların bir özelliği olarak ışık yayılarak olarak mekana ulaşır ve zemin yüzeyleri de halı ile kaplandığından, çok az miktarda ve yaygın olarak mekana geri yansıtılırlar.

142



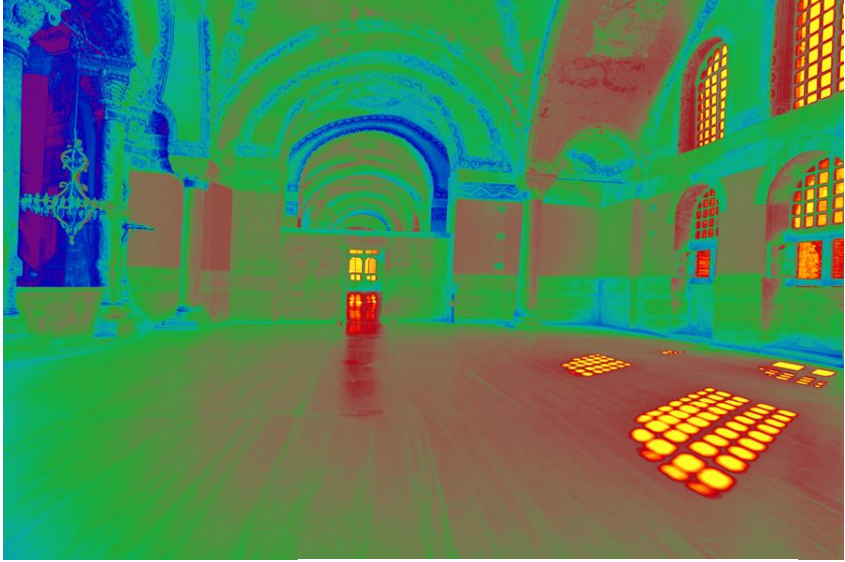
Şekil 5. Güneş ışığının oluşturduğu ışık havuzu ve yarı kubbeye güneşi “yakalayan” pencere



Şekil 6. Kameranın galeriden güneye doğru yönlendiği açıdan parlaklık haritasının gün boyunca değişimi (24 Eylül)

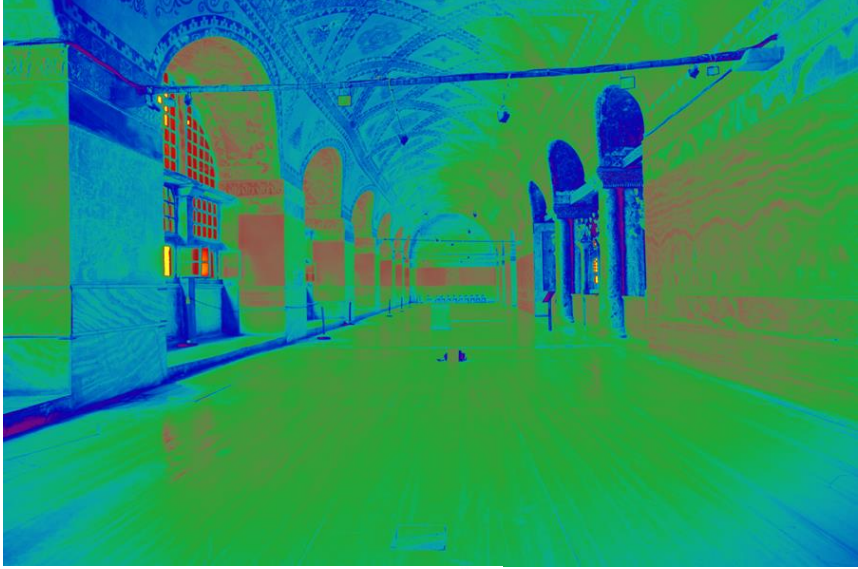
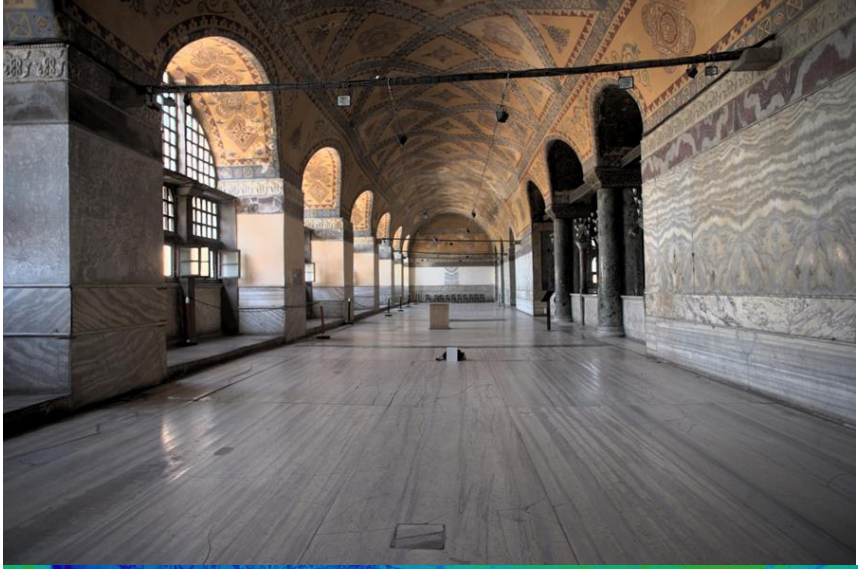


144



2000 685 243 85 30 12 1 Luminance (cd/m<sup>2</sup>)

Şekil 7. Üst kat güney galeri (nef) ve parlaklık haritası (1 Ekim, 12:50)



2000 685 243 85 30 12 1 Luminance (cd/m<sup>2</sup>)



Şekil 8. İmparatoriçe Locası ve parlaklık haritası (1 Ekim, 12:47)

#### 4.2. Elektrik Aydınlatması

Günümüzde elektrik aydınlatması olarak kullanılan avizeler, ilk olarak 1849 yılında Fossati kardeşlerin yaptığı restorasyon çalışmaları çerçevesinde yapıya eklenmiş kandillerin elektrikliğe dönüştürülmüş uygulamalarıdır [6]. Yapılan saha çalışmasında, bu avizelerde çoğunlukla 2012 yılında değiştirilen sarı ışık veren lambaların kullanıldığı ve elektrikli aydınlatmanın müzenin ziyarete açık olduğu saatlerde sürekli olarak kullanıldığı gözlemlenmiştir.

Bu bölümde elektrik aydınlatmasının binanın aydınlatma ortamına etkisi bilgisayar ortamında imaj işlemleri aracılığı ile irdelenmiştir. Yapılan saha çalışmasında, mekanda doğal aydınlatma ile elektrikli aydınlatmayı ayrıştırabilmek amacı ile ard arda ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümlerde, öncelikle sadece doğal aydınlatma ortamında parlaklık dağılım değerleri kaydedilmiştir. Sonrasında çekilen fotoğraflarda, hem doğal aydınlatma hem de elektrikli aydınlatma kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Bu iki ölçümün arasında en fazla 1-1.5 dakika fark vardır. Güneş her 4 dakikada 1° derece hareket etmektedir. Ölçümler bilgisayar yardımı ile peş peşe ve mümkün olan en kısa sürede tamamlanmıştır. Ayrıca ölçümlerin yapıldığı günlerde (özellikle 2. ve 3. günde) gökyüzü koşulları bulutsuz olduğundan, bu iki ölçüm kullanılarak aşağıdaki analizler yapılabilir:

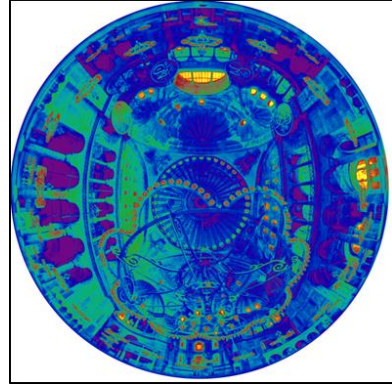
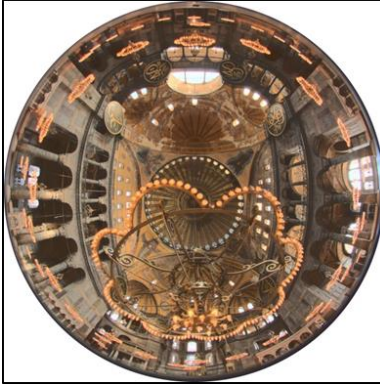
- Mekanın yalnızca doğal aydınlatma ile aydınlatılması (Şekil 9a);
- Mekanın doğal ve elektrikli aydınlatma ile birlikte aydınlatılması (Şekil 9b); ve
- Doğal ve yapay aydınlatmanın birlikte kaydedildiği imajdan (Şekil 9b) sadece doğal aydınlatmanın kaydedildiği imaj (Şekil 9a) bilgisayar ortamında çıkarılarak, mekanın yalnızca elektrikli aydınlatma ile aydınlatılması (Şekil 9c).

Bu üçlü ölçüm tekniği, ana kubbenin altında (Şekil 9), girişten apsise doğru (Şekil 10) ve yan galeriden güneye doğru

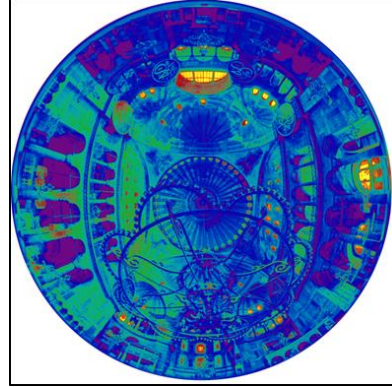
yönlendirilmiş (Şekil 11) fotoğraflarda ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bu analizler incelendiğinde ortaya şu sonuçlar çıkmaktadır:

- Elektrikli aydınlatma kullanıldığında, lambalar en fazla avizeleri ve zemin yüzeyini aydınlatmaktadırlar.
- Lambalardan yayılan ışık, birinci kattaki dikey yüzeylerin aydınlatılmasına minimal bir katkıda bulunsa da, bu ışığın ikinci kattaki yüzeyleri, kubbeyi, ve mozaikleri aydınlatması söz konusu değildir.
- Elektrik aydınlatması, Aya Sofya'nın orijinal tasarımını bozmaktadır. Daha önce de belirtildiği üzere, Aya Sofya'nın 6. yüzyıldaki orijinal halinde de, sonrasındaki yüzyıllar boyunca süren kullanımında da, gece aydınlatmasının gün batımından sonra kullanıldığı bu raporun 1. Bölüm'ünde tartışılmıştır. 4.1. bölümde ise, Aya Sofya'nın eşsiz aydınlatmasının altında yatan en önemli unsurun, pencerelerde 'çerçevesiz' ve içeri süzülen güneş ışınlarının, yapı içindeki yüzey malzemelerinin renk ve kompozisyonuna bağlı olarak, güçlü kontrast oluşturacak şekilde yapıya dağıldığı, ve ışık havuzları oluşturduğu anlatılmıştır. Şekil 12'de görüleceği üzere, avizeler kubbeden gelen güçlü güneş ışıkları altında zeminde gölgeler oluşturarak ışık karmaşası yaratmakta ve mekanın algısını negatif yönde etkilemektedirler.

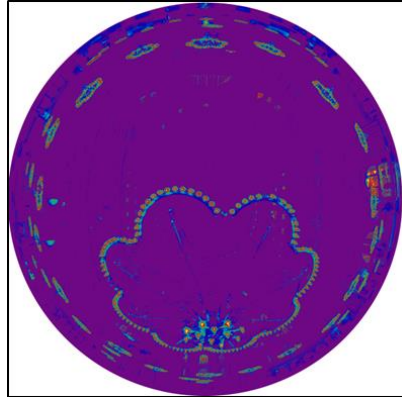




a) Elektrik ve gün ışığı ile aydınlatma

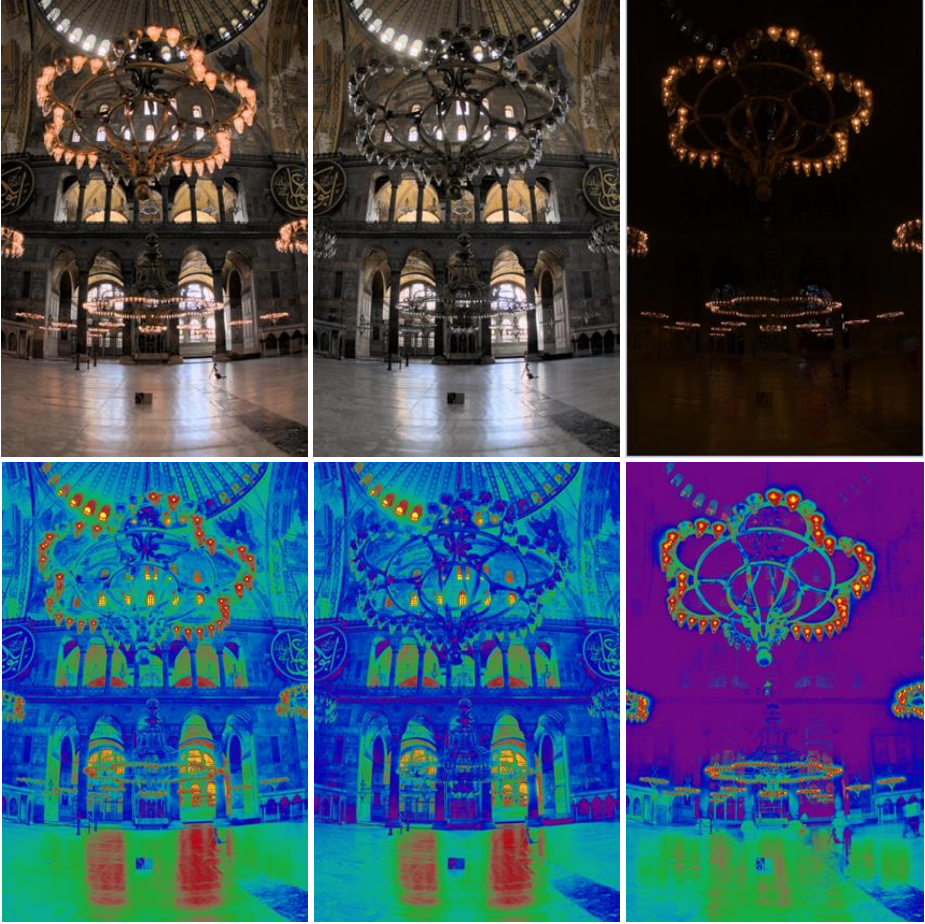


b) Gün ışığı ile aydınlatma

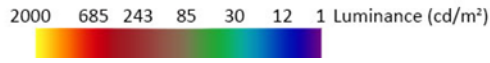


c) Elektrik ışığı ile aydınlatma

Şekil 9. Kubbenin gün ışığı ve elektrik ile aydınlatmasının karşılaştırmalı analizi (17 Eylül, 17:10)



(a) Elektrik ve gün ışığı aydınlatması (b) Günışığı aydınlatması (c) Elektrik ışığı aydınlatması




Şekil 10. Mekanın gün ışığı ve elektrik ile aydınlatmasının karşılaştırmalı analizi (24 Eylül, 16:15)



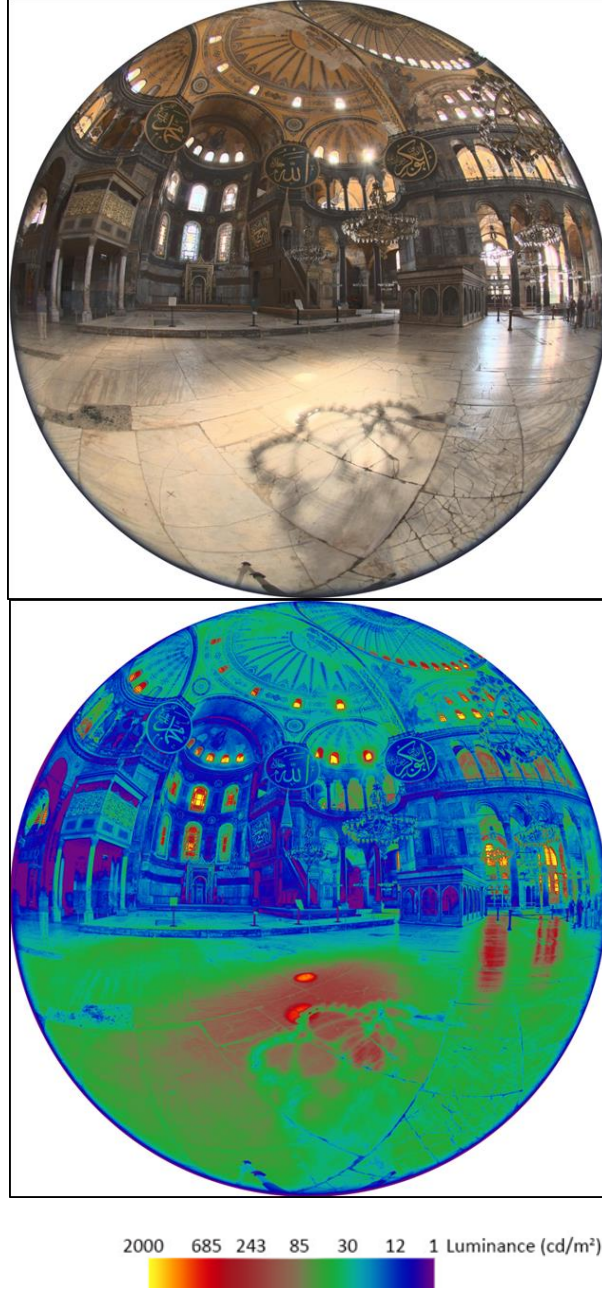
150



2000 685 243 85 30 12 1 Luminance (cd/m<sup>2</sup>)



Şekil 11. Mekanın gün ışığı ve elektrik ile aydınlatmasının karşılaştırmalı analizi (17 Eylül, 10:04)



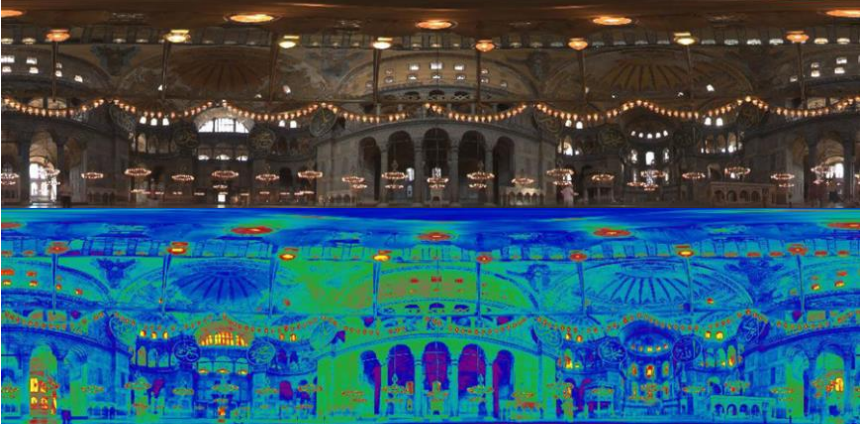
Şekil 12. Avizelerin güçlü güneş ışıkları altında zeminde oluşturduğu gölgeler (1 Ekim, 13:27)

- Avizelerden yayılan ışıklar zemin yüzeyinde yeni aynasal ve “yönelmeli yaygın” yansımalar oluşturduğundan, ışık havuzlarının algısını ve mekandaki kontrast değerlerini bozmakta ve özgün ışık hiyerarşilerini değiştirmektedirler (Şekil 12 -13).
- Ayrıca, avizelerden yayılan ışığın spektral özellikleri güneş ve gökyüzü aydınlatmasından farklı olduğundan, zeminden gelen yansımalarda ışık kirliliğini artırmaktadır.
- Mekanda çekilen balık gözü fotoğraflardan birinin panoramik açılımına bakıldığında (Şekil 14), avizelerdeki lambaların yarı kubbenin pencereleri ile benzer açılara denk geldiği, ve gene güneş ve gökyüzü aydınlatmasının algısını negatif ölçüde etkilediğini görmek mümkündür. Benzer bir hiyerarşi sorunu apsisde de gözlenmiştir (Şekil 15).
- Şekil 16'de görüldüğü üzere, ortada bulunan büyük avize kubbenin tam merkezinden bakıldığında kubbeyi ve kubbedeki pencereleri tamamıyla kapatmaktadır.

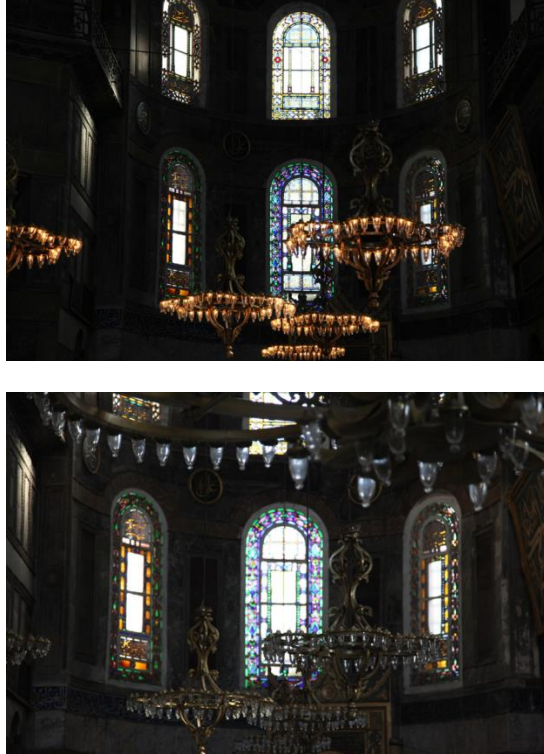
152



Şekil 13. Avizelerden yayılan ışığın zemin yüzeyinde oluşturduğu sarı tonlarda yeni aynasal ve “yönelmeli yaygın” yansımalar (1 Ekim, 12:42)



Şekil 14. Aya Sofya'nın panoramik fotoğrafı ve renk ölçekli parlaklık haritası



Şekil 15. Elektrikli aydınlatma açıkken ve kapalıyken apside bakış

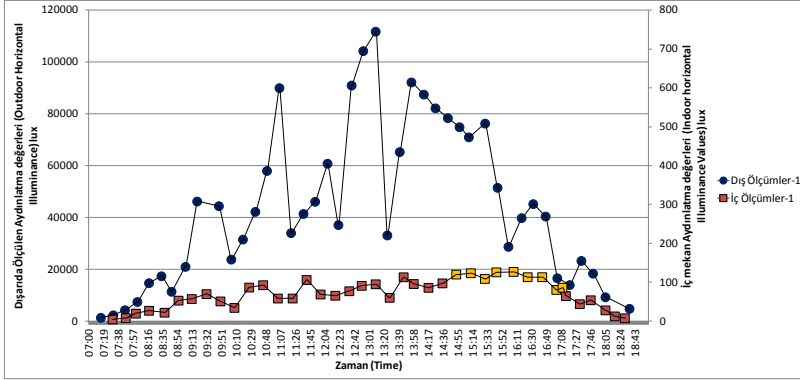


Şekil 16. Kubbenin tam merkezinden bakıldığında ortadaki avizenin fotoğrafı.

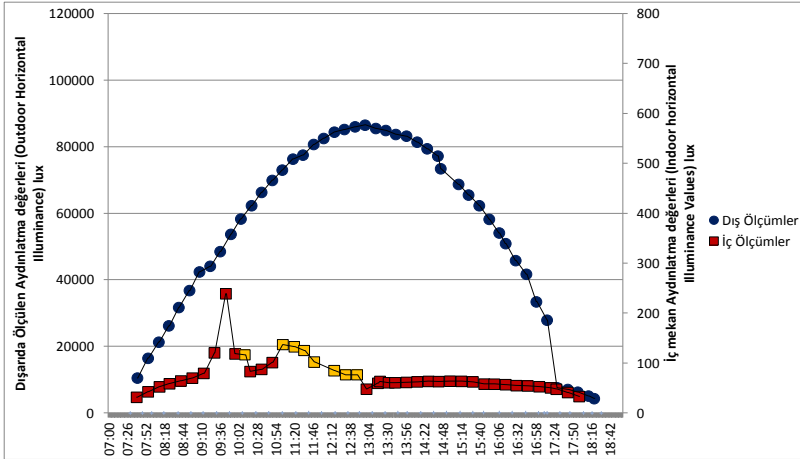
154

Tüm gün süren ölçümlerde, (17 ve 24 Eylül) iç mekandaki kubbenin altında objektifin aksı ile kubbenin merkezine yakın olacak şekilde ve objektif yer düzlemine paralel olarak zemine yerleştirilen bir tripod üzerine oturtulan fotoğraf makinesi (Canon EOS 5D SLR) ile yapılan ölçümlerin ince kalibrasyonları Minolta aydınlık ölçer aleti ile yapılmıştır. Dolayısıyla gün boyunca her 15 dakikada aydınlatma ölçümü (lüx) fotoğraf makinesinin objektifi ile aynı düzleme gelecek şekilde (yerden yükseklik 76 cm) yapılmıştır. Şekil 17'de, 17 Eylül tarihinde iç ve dış mekanda yapılan aydınlatma ölçümleri görülmektedir. Dış mekanda İstanbul'un anlık gökyüzü koşulları altında ölçülen aydınlatma değerleri grafiğin sol yanındaki aksta verilmiştir, iç mekan aydınlatma değerleri grafiğin sağ aksından okunmalıdır. İki değer de lüx birimindedir. 17 Eylül'deki hakim hava koşulları parçalı bulutludur, ve bunun etkisi net bir şekilde dış mekan ölçümlerindeki (mavi renkli noktalardaki) zikzaklarda görülmektedir. İç mekan ölçümleri (kırmızı noktalar) incelendiğinde, bu noktadan yapılan ölçümlerde dışarıdaki aydınlatma koşullarındaki büyük değişikliklere rağmen, iç mekan koşullarının sabit kaldığı gözlemlenmektedir. İç mekan

ölçümlerindeki sarı noktalar, Aya Sofya'daki elektrikli aydınlatmanın kullanıldığı ölçüm değerlerine denk gelmektedir ki, ölçümün yapıldığı noktada aydınlatma değerlerine katkısının minimal olduğu gözlemlenmektedir. Bu incelemeden de anlaşılacağı üzere, elektrikli aydınlatmanın mekandaki aydınlatma miktarına katkısı minimaldir. Bu ölçümler 24 Eylül tarihinde tekrarlanmıştır ve Şekil 18'de grafik olarak gösterilmektedir.



Şekil 17. Dış mekanda (Aya Sofya'ya yakın bir binanın etrafı açık olan teras katından) ve iç mekanda kubbenin altından 17 Eylül tarihinde yapılan aydınlatma ölçümleri (17 Eylül)



Şekil 18. Dış mekanda (Aya Sofya'ya yakın bir binanın etrafı açık olan teras katından) ve iç mekanda kubbenin altından 24 Eylül tarihinde yapılan aydınlatma ölçümleri (24 Eylül)



Bir mekanda güvenli bir şekilde hareket edebilmek için önerilen aydınlatma değeri minimum olarak 30 lüks olarak belirlenmiştir [37]. Kutsal mekanlar için önerilen tasarım hedefi olan aydınlatma değeri 50 lüxtür [37]. Aya Sofya'da ölçüm yapılan günlerde (güneşin ilk doğduğu anlar ve batışı dışında müzenin açık olduğu saatlerde), aydınlatma değerleri sadece gün ışığı ile 50 lüksün üzerinde bulunmuştur. Ölçülen ortalama aydınlatma değeri 80 lüxtür. Bu değer, ölçüm yapılan Eylül ayındaki aydınlatma koşullarına özgüdür. Ancak, bu değerlerden ve diğer kaynaklarda bulunan sporadik ölçüm bilgilerinden yola çıkarak, Aya Sofya'nın ana kubbesi altında ışık değerlerinin yalnızca doğal aydınlatma kullanarak da sağlanabileceği anlaşılmaktadır.

#### 4.3. Uzun Dönem Aydınlatma Performans Analizi

3.3. bölümde açıklandığı üzere, kısa dönem saha ölçüm değerleri kullanılarak uzun dönem aydınlatma koşulları yazarın yeni geliştirdiği bir bilgisayar simülasyon tekniği ile değerlendirilmiştir. Bu teknikte, dışarıda toplanan gökyüzü verileri iç mekan verileri birlikte değerlendirilmiş ve dinamik günışığı simülasyon tekniğinin temeli olan "günışığı katsayısı" kavramı baz alınarak geliştirilen yeni bir ekstrapolasyon tekniği ile uzun dönem aydınlatma koşulları simule edilmiştir [31]. Bu teknik kullanılarak, Aya Sofya'nın aydınlatma koşulları 21 Aralık tarihi öğlen saatlerinde ve bulutlu hava koşulları altında belirlenmiştir (Şekil 19). Kış gündönümü olan 21 Aralık tarihi yılın en kısa günüdür; güneş yılın en yatay konumundadır ve bulutlu gökyüzü koşulları göz önüne alındığında, yılın en düşük aydınlatma değerleri bu günde gözlemlenir.

Şekil 19'da görüldüğü üzere ve beklenildiği gibi, Aralık ayı ve bulutlu günler için tahmin edilen yüzey parlaklık değerleri, ölçüm yapılan Ekim ayı değerlerine göre düşüktür. İnsan gözü düşük parlaklık değerlerini ayırt edebilmektedir. Görme alanında adapte olunan parlaklık miktarının 10 kandela/m<sup>2</sup>'nin üstüne çıktığı durumlarda, gözün normal "aydınlık görme" (fotopik görme) modu tetiklendiğinden, yukarıda bahsedilen koşullar altında bile

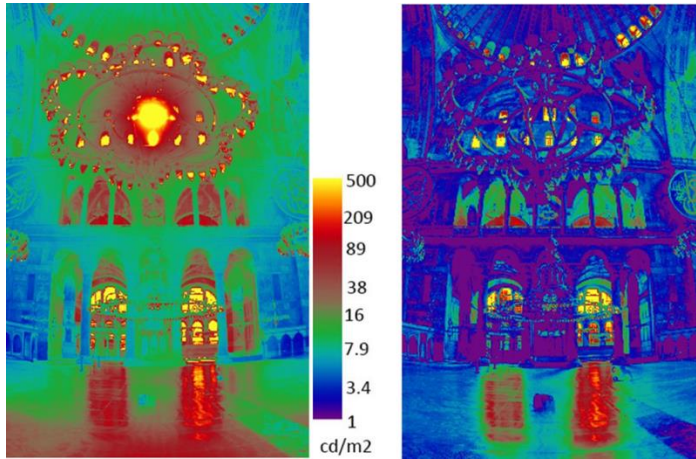
mekanın algısı mümkün olacaktır. Ancak, bu koşulların ekstrem olduğu unutulmamalıdır, ve ancak ekstrem koşullarda mekanın elektrik ışığı ile aydınlatılmasında sakınca yoktur.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Keinbauer ve diğerleri [6] 6. yy'da Aya Sofya'nın içerisindeki ışığın günümüzden farklı olduğunu, zaman içinde kaybolan renkli camların saydam camlarla yenilenmesinden dolayı ışığın o tarihlerde günümüzden daha aydınlık olduğunu savunurken, Schibille [14] bu tezin tam tersini savunmaktadır. Schibille'e göre, özellikle Fossati döneminde yapılan restorasyon sonucu günümüzde iç mekana daha az ışık ulaşmaktadır.

Bu rapor çerçevesinde yapılan analizler, tarihi değişimlere ışık tutamazlar, ancak elde edilen veriler Aya Sofya'nın sadece doğal aydınlatma ile yeterince aydınlatılabileceğini göstermektedir. Günümüze ulaşmış 6. yy'dan kalan metinler ve sonrasında yapılan bilimsel çalışmalardan gene net bir şekilde ortaya konan bir diğer bilgi de Aya Sofya'nın orijinal tasarımında ve yüzyıllar süren tarihinde yakın döneme kadar gün ışığı ile yapay aydınlatmanın aynı anda kullanılmadığıdır.

157



Şekil 19. a) Aya Sofya'da 24 Eylül tarihinde güneşli hava koşulları altında ölçülen parlaklık değerleri b) 21 Aralık tarihinde bulutlu hava koşulları altında ekstrapolasyon yolu ile simüle edilen parlaklık değerleri

Bu bilgiler ışığında çıkarılan sonuçlar ve öneriler şu şekilde özetlenebilir:

- Aya Sofya'nın eşsiz aydınlatmasının, en önemli iki ögesinden birisi ışığın güçlü bir yönsellik göstererek (doğrultusal olarak) mekana akmasıdır. Kubbede ve yarı kubbelerde bulunan pencereler güneşin azimut açısı ile çakıştıklarında, iç mekanda ışık havuzları oluşmaktadır. Bu ışık havuzlarının yeri güneşin azimut açısına bağlı olarak gün boyunca, güneşin yükseklik açısına bağlı olarak da yıl boyunca değişmektedir. Aya Sofya'da zamanın geçişi, bu dinamik ışık havuzlarının hareketi ile, özellikle vurgulanan bir niteliktir.
- Aya Sofya'nın eşsiz aydınlatmasının, en önemli diğer ögesi ise, yüzey malzemelerinin rengi ve ışığı yansıtma özellikleri ile, bu malzemelerin renk ve yansıtma açısından ustaca yerleştirilmiş kompozisyonları ve hiyerarşik düzenleridir. Dikey yüzeylerde kullanılan koyu renkli mermerler, ışığı büyük ölçüde emerken, Marmara mermerinden döşenmiş olan zemin yüzeyinden, aynasal ve "yöneltmeli yaygın" olarak tekrar mekana yansıtılmaktadırlar.
- Bu iki özelliğin sonucunda oluşan ışık kontrastı Aya Sofya'nın dramatik, şiirsel, büyülü ve mistik tanımlarının arkasındaki fiziksel fenomendir.
- Elektrikle aydınlatma gündüz saatlerinde kullanıldığında Aya Sofya'nın orijinal tasarımında sağlanan ve (i) mekanın formu ve forma dayalı detayları, (ii) yüzey malzemelerinin ışığı yansıtma özellikleri ile (iii) ışık kaynaklarının yerleşimi, spektral ve açısız dağılımlarının bir birleşimi sonucunda ortaya çıkan kompozisyonu bozmaktadır.
- Elektrikli aydınlatma kullanıldığında, lambalar en fazla avizeleri ve zemin yüzeylerini aydınlatmaktadırlar. Lambalardan yayılan ışık, birinci kattaki dikey yüzeylerin aydınlatılmasına asgari düzeyde bir katkıda bulunmaktadır. Işık kaynaklarının, şiddeti, dağılımı ve fiziksel konumları nedeniyle kubbeyi ve mozaikleri aydınlatması söz konusu değildir.

- Avizelerden yayılan ışık zemin yüzeylerinde yeni yansımalar oluşturduğundan, ışık havuzlarının algısını ve mekandaki kontrast değerlerini bozmaktadır.
- Mekan algısında gözün mekandaki dominant değerlere adaptasyonu çok önemlidir. 3.4. bölümde açıklandığı gibi, insan gözü toplamda 14 logaritmik ölçek içerecek şekilde çok geniş bir aralıkta parlaklık değerlerini algılayabilmektedir, ancak aynı mekan içinde sadece 4 logaritmik açıklıkta dinamik sistemi algılayacak kapasitedir. Bu 4 logaritmik açıklık, o anda ortama hakim olan aydınlatma değerlerinin adaptasyonuna bağlı olarak 14 logaritmik skala üzerinde değişmektedir. Aya Sofya'ya özellikle güneşli günlerde dışarıdan giren ziyaretçiler için narteksten ana kubbenin içi, henüz daha düşük seviyede olan aydınlatma değerlerine adapte olamadıkları için, loş gelebilir. Ancak bu adaptasyon için saniyeler, yada bir kaç dakika yeterlidir. Yazarın saha araştırmasını yaptığı dönemde, ışıklar kapalıyken gelen turist rehberlerinin ışıkların açılmasını istemelerinin altında yatan fizyolojik neden, henüz Aya Sofya'nın iç mekan ışıklarına adapte olmamalarıdır. Bu adaptasyon tamamlandıktan sonra iç mekan karanlık algılanmayacağı gibi, elektrikli aydınlatma olmadan mekanın kontrastı daha iyi gözlemlenecek ve ziyaretçi deneyimi olumlu yönde artırılabilecektir.
- Binanın özgün ışık kalitesini korumak ve ziyaretçilere bu deneyimi yaşatmak için ana kubbe altında elektrik aydınlatmasının sadece günün kısa olduğu kış aylarında, havanın kapalı olduğu günlerle sınırlı olarak kullanılması önerilir.

KAYNAKLAR:

[1] Lethaby WR and Swainson H. The Church of Sancta Sophia Constantinople: A Study of Byzantine Building. London and New York: Macmillan & Co, 1894.

[2] Mainstone RJ. Hagia Sophia: Architecture, Structure and Liturgy of Justinian's Great Church. Hungary: Thames and Hudson, 1998.

[3] Nelson RS. Hagia Sophia, 1850-1950: Holy Wisdom Modern Monument. Chicago: The University of Chicago Press, 2004.

[4] Krautheimer R. and Curcic S. Early Christian and Byzantine Architecture. New Haven: Yale University Press, 1986.

[5] Kahler H. Hagia Sophia. New York: Frederick A. Praeger Publishers, 1967.

[6] Kleinbauer WE, White A and Matthews H. Hagia Sophia. London: Scala Publishers, Istanbul: Archaeology and Art Publications, 2004.

[7] Swift EH. Hagia Sophia. New York: Columbia University Press, 1940.

[8] Gülekli NC. Hagia Sophia. Ankara: Turkish Press, Broadcasting and Tourist Department, 1952.

[9] Mark R and Çakmak AS. Hagia Sophia from the Age of Justinian to the Present. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

[10] Van Nice RL. Saint Sophia in Istanbul: An Architectural Survey. Washington DC: Dumbarton Oaks Center for Byzantine Studies, 1966.

[11] Aya Sofya Müzesi Yıllığı, İstanbul: Aya Sofya Müzesi Yayınları, 2010.

[12] Mango C and Ertuğ A. *Hagia Sophia: A Vision for Empires*. Istanbul: Ertug & Kocabiyik, 1997.

[13] Potamianos I. *Light into Architecture: Evocative Aspects of Natural Light as related to Liturgy in Byzantine Churches*. Doctoral Dissertation, University of Michigan, 1996. (UMI No. 9624708).

[14] Schibille N. *Light in Early Byzantium: The Church of Hagia Sophia in Constantinople*. Doctoral Dissertation, University of Sussex, 2003.

[15] Schibille N. "The Use of Light in the Church of Hagia Sophia in Constantinople: The Church Reconsidered", *Current Work in Architectural History, Papers Read at the Annual Symposium of the Society of Architectural Historians of Great Britain 2004*, yay. Haz. P. Draper, Clifford, 2005, 43-48

[16] Jabi W and Potamianos I. "Geometry, Light, and Cosmology in the Church of Hagia Sophia," *International Journal of Architectural Computing*, 5(2), 2007, 304-319.

[17] Jabi W and Potamianos I. "A Parametric Exploration of the Lighting Method of the Hagia Sophia Dome," *The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, The Eurographics Association, 2006.

[18] Schibille N. "Astronomical and Optical Principles in the Architecture of Hagia Sophia in Constantinople," *Science in Context*, 22(1), 2009, 27-46.

[19] Procopius and Dewing HB. *Procopius*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1996.

[20] Bell PN, Agapetos, and Paul, the Silentiary. *Three Political Voices from the Age of Justinian: Agepetus, 'Advice to the Emperor': Dialogue on political science: Paul the Silentiary', Description of Hagia Sophia*. Liverpool: Liverpool University Press, 2009.

[21] Fletcher I and Carne-Ross: DS. "Ekphrasis: Lights in Santa Sophia, from Paul the Silentiary," *Arion: A Journal of Humanities and Classics*, 4(4), Winter 1965, 563-581.

[22] Mango C. *The Art of the Byzantine Empire, 312-1453, Sources and Documents*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1972.

[23] Butler LE. *The Nave Cornices of Hagia Sophia in Istanbul*. Doctoral Dissertation, University of Pennsylvania, 1989.

[24] Debevec P, and Malik J. "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs," *Proceedings of SIGGRAPH 97, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*. Los Angeles (California), 1997, 369-378.

[25] İnanıcı M. "Per-pixel Lighting Data Acquisition and Analysis with High Dynamic Range Photography," *Proceedings of the International Commission on Illumination (CIE) 2005 Mid-Conference*, Leon, Spain, May 18 - 20, 2005.

[26] İnanıcı M and Galvin J. *Evaluation of High Dynamic Range Photography as a Luminance Mapping Technique*. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA. LBNL Report # 57545, 2004. Available from: eScholarship Repository, University of California, <http://repositories.cdlib.org/lbnl/LBNL-57545>, and U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information, [http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti\\_id=841925&query\\_id=0](http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=841925&query_id=0).

[27] İnanıcı M. "Evaluation of High Dynamic Range Photography as a Luminance Data Acquisition System," *Lighting Research and Technology*, 38(2), June 2006, 123-136.

[28] Kumaragurubaran V, and İnanıcı M. "hdrscope: High Dynamic Range Image Processing Toolkit for Lighting Simulations and Analysis," *Proceedings of the International Building*

Performance and Simulation Association (IBPSA) 2013 Conference, Chambery, France, August 25-28, 2013.

[29] Stumpfel J, Jones A, Wenger A and Debevec P. 2004. "Direct HDR Capture of the Sun and Sky". 3rd International Conference on Virtual Reality, Computer Graphics, Visualization and Interaction in Africa. Cape Town, South Africa.

[30] İnanıcı M. "Evaluation of High Dynamic Range Image-based Sky Models in Lighting Simulation," *Luekos, Journal of the Illuminating Engineering Society (IES)*, 7(2), October 2010, 69-84.

[31] Ward, G. Photosphere. <http://anywhere.com/>

[32] İnanıcı M. "Dynamic Daylighting Simulations from Static High Dynamic Range Imagery using Extrapolation and Daylight Coefficient Methodologies," *Proceedings of the International Building Performance and Simulation Association (IBPSA) 2013 Conference, Chambery, France, August 25-28, 2013.*

163

[32] İnanıcı M. "Utilization of Image Technology in Virtual Lighting Laboratory," *Proceedings of the International Commission on Illumination (CIE) 2003 Conference, San Diego, June 26 - 28, 2003.*

[34] İnanıcı M. "Transformation of High Dynamic Range Images into Virtual Lighting Laboratories," *Proceedings of the International Building Performance and Simulation Association (IBPSA) 2003 Conference, Eindhoven, Netherlands, August 10 - 14, 2003.*

[35] İnanıcı M. "Transformations in Architectural Lighting Analysis: Virtual Lighting Laboratory", *Dissertation, University of Michigan. Available from: ProQuest Information and Learning, AAT 3121949, 2004.*

[36] İnanıcı M. *Per-pixel Lighting Data Analysis. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA. LBNL Report # 58659, 2005. Available from: eScholarship Repository, University of*

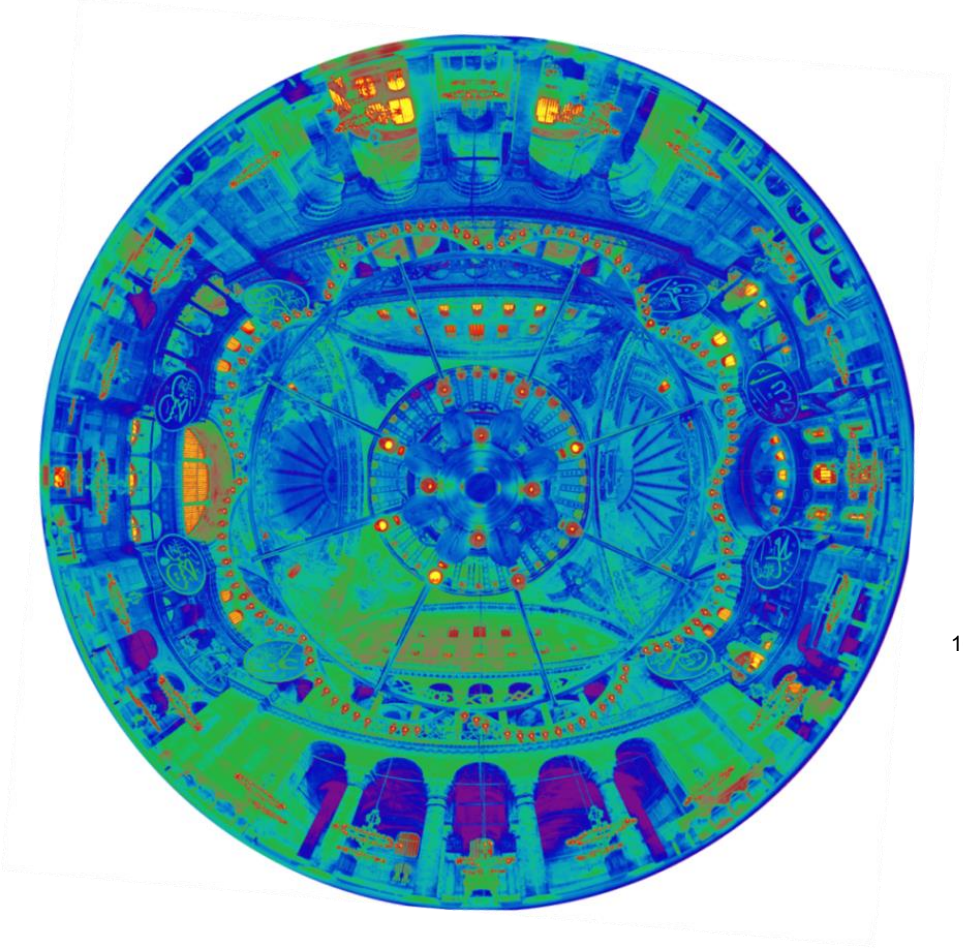


California, <http://repositories.cdlib.org/lbnl/LBNL-58659> and U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information, [http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti\\_id=891345](http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=891345).

[37] İnanıcı M and Navvab M. "The Virtual Lighting Laboratory: Per-pixel Luminance Data Analysis," *Luekos, Journal of the Illuminating Engineering Society (IES)*, 3(2), Oct. 2006, 89-104.

[38] DiLaura DL, Houser KW, Mistrick RG, and Steffy GR. *The Lighting Handbook*, 10th Ed., Illuminating Engineering Society, 2011.

[39] Bolak O. *Camilerin Aydınlatılması Üzerinde bir Araştırma*. İstanbul Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Yayınları. No. 123, 1970.



Şekil 20. Aya Sofya'nın 1 Ekim 2012 tarihinde saat 1:20'de güneşli hava koşulları altında kaydedilen parlaklık (lüminans) dağılım haritası