

Szilárdtest fényforrások a múzeumvilágításban

– Szabó Ferenc, Csuti Péter, Schanda János –

Kivonat

A szilárdtest fényforrások a beltéri és közvilágítási alkalmazásokon túl napjainkban lehetséges alternatívaként jelentkeznek a műemlékek, múzeumok világítása esetén is. Felépítésüknél, működésüknél fogva számos elméleti előnyt fogalmazhatunk meg. Jelen írásban az elméleti tényeken kívül a gyakorlati alkalmazás tényezői kerülnek áttekintésre: az esztergomi vár területén található Botticellinek tulajdonított freskók reflexiós színképi eloszlásának felhasználásával a középkori freskókat színhűen megjelenítő világító dióda alapú színképi teljesítményeloszlást mutatok be.

1. Bevezetés

A világító diódák gyártói adatlapjain – csak úgy, mint az adatlapok adatai alapján készült publikációkban – gyakran olvashatunk ezen fényforrások legfontosabb tulajdonságairól úgy, mint nagy fényhasznosítás, akár 6 számjegyű (működési órában kifejezett) élettartam, karbantartás mentes működés és nagy színvisszaadási index. A használat közbeni tapasztalatok ezektől nagyban eltérhetnek, mint ahogy a valós felhasználói körülmények is eltérnek az adatlap adatait szolgáltató laboratóriumi körülményektől. A világító diódákkal szembeni követelmények rangsora teljesen átrendeződik, ha a beltéri vagy közvilágítási alkalmazás helyett műalkotások megvilágítására szeretnénk használni ezeket a fényforrásokat.

2. Irodalmi áttekintés

A múzeumvilágítás két legfontosabb követelménye a kiállított műalkotások állapotának megőrzése, valamint a látogatók

számára a kiállított tárgyak színhelyes és megfelelően látható megjelenítése.

A múzeumban kiállított műalkotások optikai sugárzás általi károsodását a CIE 89-es publikációjával ismerteti. A publikáció által megfogalmazott követelmény $R_a > 80$ általános színvisszaadási index [2], a káprázásra vonatkozó megkötés $UGR_L \sim 19$, a színképi teljesítményeloszlás UV tartalmát 420 nm alatt levágó szűrővel kell korlátozni. Az 1. táblázatban a jelenleg legelterjedtebb fényforrások színképeinek ultraibolya sugárzás tartalma látható, 1 lm kibocsátott fényáramra vonatkozóan.

Fényforrás	UV tartalom ($\mu\text{W}/\text{lm}$)
Természetes fény (Daylight)	400–1500
Izzólámpa	70–80
Halogén izzólámpa	40 – 170
Fénycső	30 – 100
Fémhalogén lámpa	160 – 700
Világító dióda (LED)	<5

1. táblázat: a jelenleg legelterjedtebb fényforrások színképeinek ultraibolya sugárzás tartalma

Ahogy az 1. táblázatban látható, a természetes (nappali) sugárzáseloszláshoz képest a hagyományos fényforrások színképeinek UV tartalma egy nagyságrenddel kisebb. A fémhalogén lámpa színképeinek UV tartalma ezeknél jóval nagyobb, így a szűrőzésnek itt fokozott jelentősége van. A fehér fényt kibocsátó világító dióda alapú fényforrások esetén a fehér fény egy rövid hullámhossztartományban (legtöbbször 440 nm – 470 nm között) emittáló nagyteljesítményű kék színű LED és a sugárzás egy részét hosszabb hullámhossztartományba (510 nm – 600 nm) átranzformáló fénypor együttes emissziójaként jön

Szilárdtest fényforrások a múzeumvilágításban

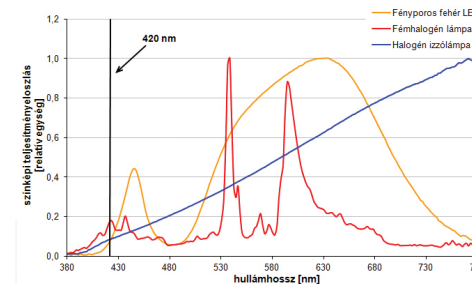
létre. Ennek köszönhetően az UV tartalom szempontjából egyedüli kritikus terület a kék LED sávzélességének függvénye. Általános esetben az ilyen fényforrások színképeinek UV tartalma a hagyományos fényforrásoknál egy nagyságrenddel kisebb, így ebből a szempontból messze a legjobb alternatíva.

A CIE 89-es publikáció 50 lx megvilágítási szintet ajánl műalkotások esetén, 2500 óra/év terhelési idővel számítva. A múzeumok megvilágítására vonatkozó szabvány nem létezik, így a munkahelyek megvilágítására vonatkozó ISO-8995-1 szabvány [3] irányelve szerint a látogató szempontjából megközelítve minimum 100 lx megvilágítás szükséges általános megvilágításként a folyosókon, 3:1 kontraszt aránnyal a folyosó és a megvilágított képek között. Ez 300 lx megvilágítást jelentene a képek felületén, amely állagmegőrzés szempontjából túlzottan nagy érték.

A múzeumban kiállított tárgyak optikai sugárzásból következő károsodását tárgyaló CIE 157-es publikáció [4] 4 kategóriába sorolja az anyagokat az optikai sugárzás általi károsodás szempontjából. Az olaj és tempera festmények illetve freskók, csontok és agancsok, valamint festetlen állatbőrök a kevésbé érzékeny anyagok kategóriájába sorolhatók.

3. Múzeumvilágítás a LED-ek nélkül és LED-ekkel

Jelenleg a múzeumokban a műalkotások megvilágításának eszközei a halogén izzólámpák és a fémhalogén lámpák. Ezek színképi teljesítményeloszlása az 1. ábrán látható. A halogén izzólámpák előnye, hogy nagy színvisszaadási index-el rendelkeznek, azonban jelentős energiát bocsátanak ki a közeli infravörös tartományban, ami a műalkotások számára hőterhelést jelent. A halogén izzólámpák fényhasznosítása 20 lm/W alatti, így az energiateljesítményük jelentős, valamint 1000-3000 óra közötti várható élettartamuk miatt a fényforrás napi 8 órás működés mellett legjobb esetben is évenkénti cserét igényel.



1. ábra: Halogén izzólámpa, fémhalogén lámpa és fényporos fehér világító dióda alapú fényforrás színképi teljesítményeloszlása.

A fémhalogén lámpák színvisszaadási indexe ugyan kisebb, de még mindig megfelelőnek mondható. Emellett 70-105 lm/W fényhasznosításuk igen hatékony működést tesz lehetővé. A 10000-20000 óra közötti élettartam akár 6-7 éves karbantartási periódust is jelenthet. A fémhalogén lámpák színképi teljesítményeloszlásukból adódóan 160-700 $\mu\text{W}/\text{lm}$ közeli ultraibolya tartományba eső sugárzást emittálnak, amely a festmények, freskók esetén fakulást idéz elő, ezért a rövid hullámhosszú sugárzást optikai szűrőkkel el kell távolítani.

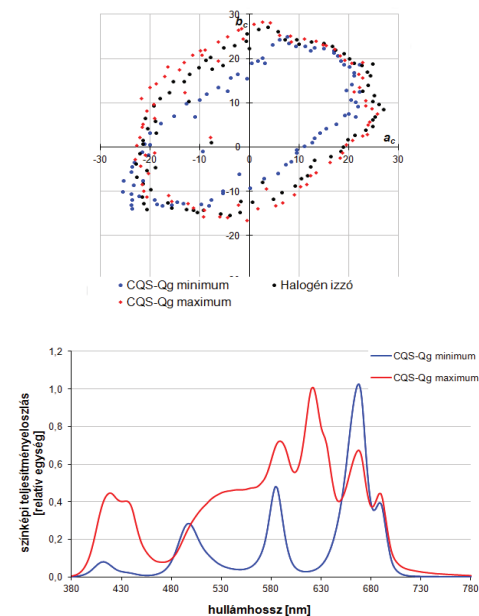
A világító dióda alapú fényforrások színvisszaadási indexe általában 70-95 közötti, fényhasznosításuk még melegfehér világító diódák esetén is 70-100 lm/W, élettartamuk legalább 50000 óra. Az eddigi szempontok szerint tehát a világító dióda alapú fényforrások a múzeumvilágításra alkalmasak lehetnek.

A világító diódák használatának következtében 440nm és 660nm csúcshullámhossz közé koncentrálnak a színképi teljesítményeloszlás, így sem az ultraibolya, sem az infravörös tartományú optikai sugárzás károsító hatásaitól nem kell tartani. A világító dióda alapú fényforrások esetén a színkép UV tartalma kiegészítő szűrők használata nélkül is minimális, egy nagyságrenddel kisebb, mint hagyományos fényforrások esetén. A szűrők nélküli alkalmazhatóság nagyobb megvilágítási szintet eredményez ugyanolyan teljesítmény esetén, vagy

Szilárdtest fényforrások a múzeumvilágításban

ugyanakkora megvilágítási szint eléréséhez kisebb teljesítményre van szükség.

A színi megjelenés a színek segítségével változtatható. Amennyiben a fehér színű fényporos világító diódákat a lámpatestben további, keskenysávú színes világító diódákkal egészítjük ki, a fényforrás színekészletének (gamut) nagyságát tudjuk befolyásolni, vagyis a festmények színeinek krómáját csökkenteni vagy növelni. A CQS Q_g metrikai[5] szerinti színekészlet csökkentő és növelő színeképeket, valamint az egymáshoz képesti színekészlet nagyságát mutatja a 2. ábra.



2. ábra: Fényforrás színekészlet növelés és csökkentés halogén izzólámpához képest színeképi optimalizáció segítségével.

A színekészletet növelő fényforrásokat már több gyártó is forgalomba hozott beltéri világítás számára. A fényforrások iránti igény abból a kísérletileg is megfigyelt eredményből[5] adódik, hogy megnövelt krómájú színeket tartalmazó jelenet a megfigyelő számára általában kedvezőbb, mint kisebb krómájú színeket tartalmazó jelenet. Múzeumvilágítás esetén figyelembe kell vennünk, hogy az egyes mű-

vészeti korszakok festőművészei (pl. Michelangelo) alapvetően telített színekkel dolgoztak, így ezek krómájának további – fényforrások általi – növelése a természetestől, a megfigyelők számára elfogadhatótól távoli színi megjelenést is eredményezhet.



3. ábra: Michelangelo: Utolsó ítélet című freskójának megjelenése fényforrás színekészlet növelés és csökkentés esetén.

Látható tehát, hogy a világítástechnikusnak múzeumvilágítás esetén kompromisszumot kell találnia a műalkotások visszafordíthatatlan károsodásának megelőzése és a technikai jellemzők – mint a látogatók számára kedvező megjelenítés és energiahatékonyság között.

A hangolható színeképi világító diódás fényforrások jó alternatívát kínálnak a műalkotások megóvására (az elhanyagolható UV és IR sugárzás tartalmú színeképi megválasztása esetén), így a világítási rendszer tervezésekor lehetőség van a látogató számára kedvező megjelenés szükségleteit is figyelembe venni.

4. A múzeumvilágítás tervezésének szempontjai

A színes festmények, freskók megjelenítésekor elsődleges igény, hogy olyan megvilágításban mutassuk be azokat, ahogy az alkotójuk látta. Egy reneszánsz freskó esetén ez nagy valószínűséggel természetes (nappali) sugárzáseloszlás. A múzeumok – leginkább az eddigi beltéri világítási megvalósítás miatt – általában ennél lényegesen melegebb fehér, 3000K és 4000K közötti korrelált színhőmérsékletű világításhoz ragaszkodnak. Ebből adódik egyik feladatunk, hogy meg-

Szilárdtest fényforrások a múzeumvilágításban

találjuk az egyes színek megfelelőit kisebb színhőmérséklet esetén. Ez a feladat korszerű színmegjelenési modellek[6] és a CAT02 színadaptációs transzformáció segítségével oldható meg.

Vizsgálataink másik célja, hogy megtaláljuk a freskóvilágításhoz ideális színhőmérsékletű világítást a 3000K–4000K színhőmérsékleti tartományban. Ezeket a vizsgálatokat a helyszínen végezhetjük színészleléshez értő kísérleti személyek (restaurátor, művész, kurátor) segítségével. A kísérletekhez hangolható színeképi teljesítményeloszlású világító dióda fényforrást használunk. A beállított színeképeknek azonos Planck görbétől való távolsággal és színvisszaadási index-el kell rendelkezniük, azonos megvilágítást kell biztosítaniuk, csak a színhőmérsékletük lehet különböző.

A reneszánsz freskók tanulmányozása alapján megtudtuk, hogy ennek a kornak az alkotói a mai festékpigmentektől lényegesen eltérő tulajdonságú pigmenteket használtak, így a mai színmintákon alapuló színminőségi metrika nem lehet alkalmas az új fényforrás színeképi teljesítményeloszlásának meghatározására.

Fontos kérdés, hogy a múzeumba telepítendő LED-es fényforrás a fényporos fehér LED-en kívül hányféle keskenysávú világító diódát tartalmazzon. Emiatt meg kell vizsgálnunk a három-, négy-, ötféle színes világító diódát tartalmazó színeképekkel – reneszánsz kori pigmentek esetén – elérhető színhűséget. Ezen kívül fontos szempont a megfelelő csúcshullámhosszon emittáló világító diódák megválasztása is, különösen a kék és vörös világító diódák esetén. A végső célunk a minimális típusú világító diódából álló, ugyanakkor szigorú színhűségi feltételeket teljesítő színeképi meghatározása.

Mivel fényporos és keskenysávú világító diódákból álló – ún. összetett – színeképi szeretnénk megvalósítani, külön kell törődnünk az ilyen típusú színeképek stabilitásával is. A probléma onnan ered, hogy a különböző csúcshullámhosszon emittáló (különböző félvezető anyagból készült) világító diódák ter-

mikus stabilitása igen különböző. A világítási rendszer üzemelésekor az egyes világító diódák színeképe különböző mértékben módosul, emiatt az eredő színeképi paraméterei jelentősen – szabad szemmel is észlelhető mértékben – megváltoznak. Vizsgálataink eredményei a hűtési rendszer tervezőinek szolgálnak információkkal.

5. Jelenlegi eredmények

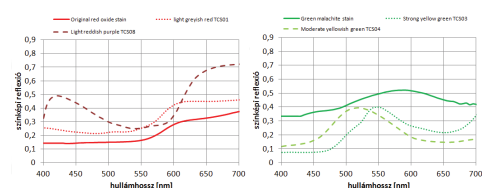
Korábbi vizsgálataink eredményeivel[7] azt mutatták, hogy a CIE jelenlegi ajánlása szerinti színvisszaadási index értéke erősen függ a számításhoz használt színmintáktól. Két azonos színű világító dióda speciális színvisszaadási indexe két metamer színminta választása esetén akár 15-20 egységgel is eltérhet. Emiatt a reneszánsz freskók megvilágítására tervezett fényforrás színeképi feltétlenül szükséges a reneszánsz korban használt festékpigmentek reflexiójával meghatározni.

Ennek érdekében az esztergomi vár területén, az egykori királyi palotában található, jelenleg restaurálás alatt álló Botticelli freskók jellemző színeiről készítettünk reflexiós méréseket.

Mivel a freskók felületét a mérések alkalmával nem érinthettük meg, ezért a mérések során a freskókat egy referencia fényforrással világítottuk meg, majd a PR-705 spektrométer segítségével mértük a jellemző felületekről visszaverődő sugárzást. Az egyes mérések után rögtön ugyanabban a mérési elrendezésben mértük a fehér etalon színeképi reflexióját, ezután a két mért színeképi hányadosa az adott felület színeképi reflexióját szolgáltatja. A vörös, zöld és sárga színű, tipikus felületek színeképi reflexióját a 4. ábrán szaggatott vonallal látható. Mindhárom esetben megkerestem a CIE 13.3 módszer szerinti színvisszaadási index számításánál használt színminták közül azokat, amelyek a legközelebb állnak a freskók színeire. A 4. ábrán ezeket szaggatott és pontozott vonalak jelölik. Ahogy a 4. ábrán látható, a reneszánsz freskókon lát-

Szilárdtest fényforrások a múzeumvilágításban

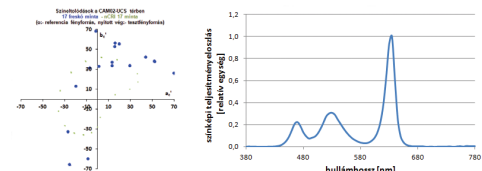
ható színes felületek a tipikus színek esetén különböznek a CIE 13.3 módszerben használt színminták reflexióitól, ezért a jelenleg érvényes színvisszaadási indexre optimalizált fényforrás színképi teljesítményeloszlás nem ad megfelelő vizuális eredményt reneszánsz freskók esetén.



4. ábra: Reneszánsz freskók jellemző reflexiós színképének összehasonlítása a CIE 13.3 módszerben [2] használt színképi reflexiókkal.

Mérési eredményeink alapján az nCRI [8] színhűségi index számításakor az eredeti 17 reflexiós színképet kicseréltük a reneszánsz freskók méréséből származó színképekre. Példaként két metamer fényforrás esetén számítottuk az nCRI értékét, fényforrásonként két különböző esetre: egyik esetben az nCRI eredeti színmintáinak használatával, a másik esetben a reneszánsz freskók színképeit is felhasználva. Így olyan színhűségi metrikához jutunk, amely a színinger leírás legmodernebb eszközeit használja fel, és csak az adott freskókra érvényes színhűségi indexet szolgáltat.

Az 5. ábra a tesztfényforrás színképi teljesítményeloszlását és a 17-17 színminta színkoordinátáinak elmozdulását mutatja a CIECAM02 a_c - b_c síkon, 3 keskenysávú világító diódából (RGB) álló színképi teljesítményeloszlás esetén.

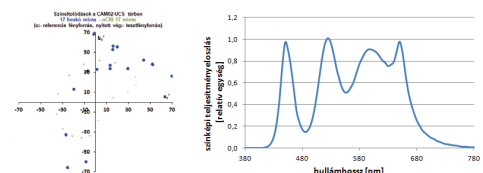


5. ábra: a, az nCRI eredeti 17 színminta és 17 reneszánsz freskó minta színkoordinátái a CIECAM02 a_c - b_c síkon. b, A tesztfényforrás színképi teljesítményeloszlása

	17 nCRI minta esetén	17 freskó minta esetén
CCT	4000 K	4000 K
duv	4.5×10^{-4}	4.5×10^{-4}
Ra, 2012	95	96
CIE Ra	95	95
CQS Qa	94	94

2. táblázat: A 6 b, ábrán látható színképi teljesítményeloszlás színmetrikai paraméterei

A 6. ábra a tesztfényforrás színképi teljesítményeloszlását és a 17-17 színminta színkoordinátáinak elmozdulását mutatja a CIECAM02 a_c - b_c síkon, egy freskóminták megvilágítására optimalizált színképi eloszlás esetén, amely fényporos fehér LED-ből és négyféle keskenysávú világító diódából áll.



6. ábra: a, az nCRI eredeti 17 színminta és 17 reneszánsz freskó minta színkoordinátái a CIECAM02 a_c - b_c síkon. b, A tesztfényforrás színképi teljesítményeloszlása

	17 nCRI minta esetén	17 freskó minta esetén
CCT	3391 K	3391 K
duv	1.2×10^{-3}	1.2×10^{-3}
Ra, 2012	59	40
CIE Ra	38	38
CQS Qa	54	54

3. táblázat: A 6 b, ábrán látható színképi teljesítményeloszlás színmetrikai paraméterei

Az 5. és 6. ábra, valamint a 2. és 3. táblázat összehasonlításából láthatjuk, hogy ha há-

Szilárdtest fényforrások a múzeumvilágításban

romféle keskenysávú (színes) világító diódából állítunk elő fehér fényt, a referencia fényforrás alatti megjelenéshez képesti színi eltolódások iránya és mértéke nagyban függ a számításokhoz használt mintáktól. Ebben az esetben az általános színvisszaadási index R_a értéke csak az eltérő tesztminta halmaz következtében akár 15-20 egységgel is különbözhet. Emiatt szükséges a megvilágító színképi teljesítményeloszlását a freskók reflexiói alapján meghatározni. Fényporos fehér LED + háromféle keskenysávú világító diódából álló fényforrás esetén nagy színvisszaadási index-el rendelkező fényforrás valósítható meg. Ebben az esetben a reflexiós minták eltolódása nem jelentős, így az elmozdulás irányának sincs nagy jelentősége.

6. Összefoglalás

A tanulmányban a múzeumvilágításra vonatkozó szabványok és irodalmi adatok alapján megvizsgáltuk a jelenleg használatos fényforrások tulajdonságait, valamint a világító dióda alapú fényforrások alkalmazhatóságának lehetőségét. Az eredmények alapján látható, hogy a világító dióda alapú fényforrások a színképi teljesítményeloszlás, fényhasznosítás és várható élettartam tekintetében a jelenleg múzeumvilágításra alkalmazott fényforrásoknál jobb tulajdonságokat mutatnak. A gyakorlati felhasználás során nagyon fontos tényező a színhűség kérdése. A bemutatott példák rámutatnak, hogy reneszánsz freskók esetén ezt a tényezőt a múzeumvilágítás tervezőjének különösen gondosan kell kezelnie.

Köszönetnyilvánítás



A kutatás a LED4ART – Minőségi és energetikakarékos LED világítás a művészet számára című, 297262 szerződésszámú EU ICT-PSP-2010-5 projekt keretében valósult meg. A szerzők köszönetet mondanak Wierdl Zsuzsanna restaurátornak a freskó reflexiós színképek meghatározásához nyújtott segítségével.