



MAGYAR
KÉPZŐMŰVÉSZETI
EGYETEM
DOKTORI ISKOLA

MULTISPEKTRÁLIS KÉPALKOTÁSI MÓDSZEREK
A MŰTÁRGYDIAGNOSZTIKÁBAN
AZ INFRAVÖRÖS LUMINESZCENS KÉPALKOTÁS ÉS A *FALSE COLOR*
KÉPSZERKESZTÉS MÓDSZERTANA ÉS GYAKORLATI ALKALMAZÁSA

Horváth Mátyás

DLA értekezés

2025

Témavezető: Dr. Galambos Éva

egyetemi docens

TARTALOM

TÉZISEK.....	10
THESES.....	12
ABSZTRAKT.....	14
ABSTRACT.....	15
BEVEZETÉS.....	16
1 CÉLKITŰZÉSEK ÉS KÉRDÉSFELVETÉSEK.....	18
2 A KUTATÁS MÓDSZERTANA.....	18
2.1 SZAKIRODALOM-FELDOLGOZÁS ÉS FORDÍTÁS, HIVATKOZÁSOK RENDSZERE	18
2.2 ESZKÖZFEJLESZTÉS.....	19
2.3 REFERENCIA-ADATBÁZIS LÉTREHOZÁSA, MIKROSKÓPOS MINTÁK ELŐKÉSZÍTÉSE	20
3 A SZAKIRODALMI ADATOK FELDOLGOZÁSA.....	21
3.1 AZ AIC GUIDE ÉS A CHARISMA USER MANUAL ÖSSZEHASONLÍTÁSA ÉS A FELDOLGOZÁSBÓL NYERT TAPASZTALATOK ÉS TANULSÁGOK	21
3.1.1 Az AIC Guide bemutatása.....	21
3.1.2 A CHARISMA User Manual bemutatása.....	22
3.2 ÖSSZEHASONLÍTÁS	23
3.3 ÉSZREVÉTELEK	24
4 KÉPALKOTÁSI TECHNIKÁK A RESTAURÁTORI GYAKORLATBAN	25
4.1 MULTISPEKTRÁLIS (MULTIBAND) KÉPALKOTÁS.....	25
4.2 KESKENY/SZŰK SÁVÚ (NARROWBAND) KÉPALKOTÁS.....	25
4.3 HIPERSPEKTRÁLIS KÉPALKOTÁS.....	26
5 A MULTISPEKTRÁLIS KÉPALKOTÁS	27
5.1 BEVEZETÉS A MULTISPEKTRÁLIS KÉPALKOTÁSBA	27
5.2 A MULTISPEKTRÁLIS KAMERÁK MŰKÖDÉSI RENDSZERE	29
5.3 FELVÉTELSOROK (KÉPKÉSZLETEK)	30
5.3.1 Reflexiós képalkotás.....	32
5.3.2 False-color képalkotás.....	33
5.3.3 Fotoindukált lumineszcens képalkotás.....	34
5.3.4 Transzmissziós képalkotás	36
5.4 FELVÉTELI MÓDOK - TERMINOLÓGIAI JAVASLAT RÖVIDÍTÉSEKRE	37
6 „SZŰRŐKISOKOS” OPTIKAI SZŰRŐTÍPUSOK.....	42
6.1 HOSSZÚHULLÁM-ÁTERESZTŐ SZŰRŐK – LONGPASS FILTERS.....	42

6.2	RÖVIDHULLÁM-ÁTERESZTŐ SZŰRŐK – SHORPASS FILTERS.....	43
6.3	SÁVSZŰRŐK - BANDPASS FILTERS	43
6.4	A LEGFONTOSABB ÜVEG- ÉS SZŰRŐGYÁRTÓK, FORGALMAZÓK.....	44
6.5	EMLEKEZTETŐ A KÖVETKEZŐ TÁBLÁZATOKHOZ.....	49
6.5.1	<i>Analitikai pontosságú multispektrális képalkotás.....</i>	49
6.5.2	<i>Állapotfelmérési célú multispektrális képalkotás.....</i>	50
7	A PHASE ONE RAINBOW MSI RENDSZER BEMUTATÁSA.....	57
7.1	A MULTISPEKTRÁLIS KÉPALKOTÁS TECHNIKAI ALAKULÁSA	57
7.2	A RENDSZER FELÉPÍTÉSE	58
7.2.1	<i>Phase One Rainbow MSI rendszer részletes bemutatása.....</i>	58
7.2.2	<i>Kamera hátfal és objektívek.....</i>	58
7.2.3	<i>Szűrőtárcsa és a szűrők.....</i>	59
7.2.4	<i>Fény- és sugárforrások.....</i>	59
7.2.5	<i>A szoftver.....</i>	60
7.3	ÖSSZEFOGLALÁS.....	60
8	KÉPKALIBRÁLÁS ÉS REFERENCIA SKÁLÁK	62
8.1	A REFERENCIA SKÁLÁK FELADATAI	62
8.2	REFLEXIÓS ÉS LUMINESZCENS SKÁLÁK	62
8.2.1	<i>Reflexiós standard.....</i>	62
8.2.2	<i>A 100%-os fényvisszaverő gömb.....</i>	63
8.2.3	<i>Digitális színillesztés a lumineszcens felvételek esetén.....</i>	64
8.3	SZÍNKALIBRÁCIÓS SKÁLÁK ÉS AZOK HASZNÁLATA NORMÁLFÉNYES FELVÉTELEK ESETÉN	66
8.3.1	<i>Szürkeárnyaltos és színes céltáblák.....</i>	66
8.3.2	<i>Céltábla RGB és Lab értékek és a színterek.....</i>	67
8.3.3	<i>RGB értékek és szürkeárnyalatok.....</i>	68
8.4	CALIBRITE COLORCHECKER® CLASSIC	68
8.5	CALIBRITE COLORCHECKER® PASSPORT	69
8.6	CALIBRITE COLORCHECKER® DIGITAL SG	70
8.7	QPCARD REFERENCIASKÁLÁK	70
8.8	DATA COLOR SPYDERCHECKR	70
8.9	IMAGE SCIENCE ASSOCIATES (ISA), OBJECT LEVEL TARGETS	71
8.10	UNIVERSAL TEST TARGET (UTT)	72
8.11	KODAK COLOR SEPARATION GUIDE ÉS GRAY SCALE.....	73
8.12	STOUFFER INDUSTRIES 21-STEP REFLECTION GUIDE.....	74
9	UV INNOVÁCIÓK: ULTRAIBOLYA FÉNYKÉPEZÉSI SZABVÁNYOK.....	75
9.1	ÉRTÉKELÉSI MÓDSZEREK: LEHETŐSÉGEK ÉS KORLÁTOK	77

10	BETEKINTÉS A FOTÓLUMINESZCENCIA VILÁGÁBA	79
10.1	A LUMINESZCENCIA FOGALMA	79
10.2	AZ ULTRAIBOLYA SUGÁRZÁS INDUKÁLTA LÁTHATÓ LUMINESZCENCIA VIZSGÁLAT RESTAURÁTORI ALKALMAZÁSBAN	83
10.3	TERMINOLÓGIA	84
10.4	AZ ULTRAIBOLYA SUGÁRZÁSSAL GERJESZTETT LÁTHATÓ LUMINESZCENS (UVVL) TECHNIKA ALKALMAZÁSI TERÜLETEIRŐL	85
10.5	NÉHÁNY PÉLDA AZ ANYAGOK JELLEMZÉSÉRE, DIFFERENCIÁLÁSÁRA	85
10.6	ÁLLAPOTFELMÉRÉS	87
10.7	A KORÁBBI BEAVATKOZÁSOK KIMUTATÁSA	87
10.8	REPRODUKÁLHATÓSÁG ÉS ÖSSZEHASONLÍTHATÓSÁG	89
10.9	KÉPALKOTÁS	89
10.9.1	<i>Ultraibolya sugárforrások</i>	<i>89</i>
10.9.2	<i>A felvét elkészítő eszköz és képfeldolgozás</i>	<i>91</i>
10.9.3	<i>Az ultraibolya és sárga szűrők együttes alkalmazása</i>	<i>93</i>
11	AZ UVVL KÉPALKOTÁS SORÁN ALKALMAZOTT SÁRGÁ SZŰRŐK RÉSZLETES BEMUTATÁSA	95
11.1	A VIZSGÁLAT MÓDSZERTANA	95
11.2	A SZŰRŐK LUMINESZCENCIÁJÁNAK MÉRÉSE	96
11.3	A SZŰRŐK TRANZMISSZIÓJÁNAK MÉRÉSE	97
11.4	ESETTANULMÁNY: ÜVEG VÁZÁRÓL KÉSZÜLT KÉP ULTRAIBOLYA SUGÁRZÁS ALATT	98
11.5	EREDMÉNYEK	98
11.6	KÖVETKEZTETÉSEK	106
11.7	GYAKORLATI TAPASZTALATOK A TÉMÁBAN	107
11.8	A KUTATÁS ALKALMAZÁSA A SÁRGÁ SZŰRŐKÖN ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK ÉS AZ AZOKBÓL LEVONT KÖVETKEZTETÉSEK	108
11.9	AZ UVVL TECHNIKAI ÖSSZEFOGLALÁSA	111
12	ULTRAIBOLYA VAGY LÁTHATÓ SUGÁRZÁSSAL GERJESZTETT INFRAVÖRÖS TARTOMÁNYÚ LUMINESZCENCIA VIZSGÁLAT	113
12.1	SUGÁRFORRÁSOK – ULTRAIBOLYA SUGÁRZÁS ÉS A LÁTHATÓ FÉNY	113
12.1.1	<i>Ultraibolya és látható LED sugárforrások és szűrőzésük az infravörös lumineszcencia vizsgálatok során</i>	<i>114</i>
12.1.2	<i>A megfelelő szűrők alkalmazása a kamerán</i>	<i>116</i>
13	LÁTHATÓ SUGÁRZÁSSAL GERJESZTETT LÁTHATÓ TARTOMÁNYÚ LUMINESZCENCIA VIZSGÁLAT	118
13.1	A TANULMÁNY SORÁN ALKALMAZOTT ESZKÖZÖK	119
13.2	LÁTHATÓ FÉNNYEL GERJESZTETT, LÁTHATÓ TARTOMÁNYÚ LUMINESZCENS KÉPALKOTÁS (VVL)	120

13.2.1	<i>Utófeldolgozás – módszertani megközelítés és értékelés</i>	122
13.2.2	<i>Az eredmények összefoglalása</i>	124
13.3	<i>AZ EREDMÉNYEK RÉSZLETES KIFEJTÉSE</i>	127
13.3.1	<i>A tanulmány összefoglalása</i>	132
13.4	<i>A KÉT VIZSGÁLT TANULMÁNY ÖSSZEFOGLALÁSA</i>	132
14	KITEKINTÉS A FALSE-COLOR KÉPALKOTÁS TERÜLETÉRE	134
14.1	TERMINOLÓGIAI PROBLÉMÁK	134
14.2	INFRAVÖRÖS-REFLEXIÓS FALSE COLOR KÉPALKOTÁS	135
14.2.1	<i>Az IrRFC képek elkészítésének módja</i>	135
14.3	AZ „ELSŐ PRÓBÁLKOZÁSOK” A MÚLT, AZ ANALÓG FILMES MÓDSZEREK	137
14.3.1	<i>A film tulajdonságai és tárolása</i>	137
14.3.2	<i>Világítás és expozíció</i>	137
14.3.3	<i>Filmfeldolgozás és kiértékelés</i>	138
14.3.4	<i>A legfontosabb megállapítások</i>	138
14.4	A DIGITÁLIS TECHNIKA MEGJELENÉSE	139
14.4.1	<i>A technika továbbfejlesztése, multi – és hiperspektrális kamerák</i>	140
14.4.2	<i>Spektrumelemzés</i>	141
14.5	A MODELLKÍSÉRLETEK ÉS ANNAK EREDMÉNYEI	144
14.5.1	<i>A referenciatáblák vizsgálatának eredményei</i>	144
14.5.2	<i>A szakirodalmi és a modellkísérlet eredményeinek összefoglalása</i>	148
14.6	ULTRAIBOLYA-REFLEXIÓS FALSE COLOR KÉPALKOTÁS	150
14.7	A KIVITELEZÉS TECHNIKA RÉSZLETEI	150
14.7.1	<i>Az UVRFC képek elkészítésének módja</i>	150
14.7.2	<i>Analóg filmes módszer</i>	151
14.7.3	<i>Digitális módszer</i>	152
14.7.4	<i>A kutatás összefoglalása</i>	154
14.7.5	<i>Az UvrFC kép elkészítésének rövid leírása</i>	154
14.8	A MODELLKÍSÉRLET ÉS ANNAK EREDMÉNYEI	155
14.8.1	<i>A referenciatáblák vizsgálatának eredményei</i>	155
14.8.2	<i>A szakirodalmi és a modellkísérlet eredményeinek összefoglalása</i>	159
15	AZ IRRFC ÉS AZ UVRFC TECHNIKA HASZNOSSÁGÁNAK BEMUTATÁSA	161
15.1	MŰTÁRGYAKON VÉGZETT VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI	161
15.1.1	<i>Következtetések</i>	168
16	MESTERMUNKA - TECHNIKAI MEGOLDÁSOK A MIKROSZKÓPOS FELVÉTELKÉSZÍTÉSHEZ	169
16.1	KEZDETI TAPASZTALATOK ÉS FEJLESZTÉSEK	170

16.1.1	<i>Reflexiók képképzés.....</i>	170
16.1.2	<i>Lumineszcencia képképzés.....</i>	173
16.1.3	<i>A végső kialakítás.....</i>	174
16.2	A LUMINESZCENCIA KÉPKÉPZÉS.....	177
16.2.1	<i>Különböző gerjesztésű infravörös lumineszcencia felvételi készítés.....</i>	177
16.3	A REFLEXIÓS KÉPKÉPZÉS.....	178
16.3.1	<i>Infravörös-reflexiók felvételi készítés.....</i>	178
16.3.2	<i>Ultraibolya-reflexiók képképzés.....</i>	179
17	SZERVETLEN PIGMENTEK LUMINESZCENCIÁJÁNAK VIZSGÁLATAI – KIFEJEZETT HANGSÚLLYAL AZ INFRAVÖRÖS TARTOMÁNYÚ LUMINESZCENCIÁRA...	181
18	A TITÁNFÉHÉR PIGMENTEK NIR TARTOMÁNYÚ LUMINESZCENCIÁJA	185
18.1	A TITÁNFÉHÉR PIGMENTEK TÖRTÉNETE RÖVIDEN	185
18.2	AZ ELSŐ ESETTANULMÁNYOK.....	186
18.3	RÉSZLETESEN A SZAKIRODALMI ÉS GYAKORLATI TAPASZTALATOKRÓL	189
18.4	A TÖBBSÁVOS KÉPKÉPZÉSI TESZTEK ÉS KIÉRTÉKELÉSÜK.....	191
18.5	IDŐFELBONTÁSOS FOTOLUMINESZCENCIA-SPEKTROSKÓPIA - TRPL	194
18.6	OPTIKAI MIKROSKÓPOS KERESZTMETSZET CSISZOLATOK ELEMZÉSE – MIKROMINTAELEMZÉS - TITÁNFÉHÉR.....	196
18.7	A MODELLKÍSÉRLETEK – TITÁNFÉHÉR-RUTIL PIGMENTEK	197
18.8	AZ UVIRALALKALMAZÁSA TITÁNFÉHÉR POLIMORFOK MEGKÜLÖNBÖZTETÉSÉRE	199
18.8.1	<i>Összefoglalás és perspektívák.....</i>	199
19	A NIKKEL-TITÁN SÁRGA PIGMENTEK NIR TARTOMÁNYÚ LUMINESZCENCIÁJA,	201
19.1	A NIKKEL-TITÁN SÁRGA PIGMENT HÁTTERE RÖVIDEN	201
19.1.1	<i>A pigment fotofizikai tulajdonságai.....</i>	202
19.2	MODELLKÍSÉRLETEK – NIKKEL-TITÁN PIGMENTEK	203
19.2.1	<i>Referenciatablák vizsgálatai – nikkeltitán pigmentek.....</i>	203
19.2.2	<i>Optikai mikroszkópos keresztmetszet csiszolatok elemzése – Mikrominta-elemzés – nikkeltitán sárgák.....</i>	204
19.3	ÖSSZEFOGLALÁS	205
20	KADMIUM TARTALMÚ PIGMENTEK NIR TARTOMÁNYÚ LUMINESZCENCIÁJA	207
20.1	A KADMIUM PIGMENTEK HÁTTERE RÖVIDEN	208
20.2	A BULK KADMIUM SZULFID ÉS KADMIUM-SZELÉNID FOTOFIZIKAI TULAJDONSÁGAI	210
20.2.1	<i>Kadmium nanodotok.....</i>	212
20.2.2	<i>Korábbi tanulmányok a kadmium pigmentek lumineszcenciájáról</i>	213

20.3	A KADMIUMPIGMENTEK SZÍNÉNEK EREDETE	214
20.3.1	<i>Szemcse és aggregátumméretek.....</i>	214
20.3.2	<i>Kémiai összetétel.....</i>	215
20.3.3	<i>A por alakú kadmium pigmentek fotofizikai tulajdonságainak jellemzése</i>	216
20.3.4	<i>A festékben lévő kadmium pigmentek fényvisszaverő képességének és lumineszcenciájának jellemzése.....</i>	217
20.4	ÖSSZEFOGLALÁS – A KADMIUM TARTALMÚ PIGMENTEK LUMINESZCENCIÁJA	217
20.5	MODELLKÍSÉRLETEK - KADMIUM PIGMENTEK	219
20.5.1	<i>Referenciatáblák vizsgálatai - kadmiumpigmentek</i>	219
20.5.2	<i>Műtárgyakon elvégzett vizsgálatok – kadmium-pigmentek.....</i>	223
20.5.3	<i>Optikai mikroszkópos keresztmetszet csiszolatok elemzése – Mikrominta-elemzés – kadmium-pigmentek.....</i>	227
20.6	KÖVETKEZTETÉSEK.....	229
21	EGYIPTOMI KÉK, HAN KÉK ÉS HAN LILA NIR TARTOMÁNYÚ LUMINESZCENCIÁJÁRÓL	231
21.1	AZ EGYIPTOMI KÉK, HAN KÉK ÉS HAN LILA PIGMENTEK TÖRTÉNETÉRŐL RÖVIDEN	231
21.2	A SZAKIRODALMI VIZSGÁLATOK	232
21.3	A VIZSGÁLATOK MÓDSZERTANA.....	232
21.3.1	<i>Mérési adatok és eredmények</i>	233
21.4	A BEMUTATOTT KUTATÁSBÓL LEVONT KÖVETKEZTETÉSEK.....	237
21.5	ÖSSZEFOGLALÁS.....	238
21.6	MODELLKÍSÉRLETEK – EGYIPTOMI KÉK ÉS A HAN PIGMENTEK	239
21.6.1	<i>Referenciatáblák vizsgálatai – Egyiptomi kék és Han pigmentek</i>	239
21.6.2	<i>Műtárgyakon elvégzett kísérletek - Egyiptomi kék és Han pigmentek.....</i>	241
21.6.3	<i>Optikai mikroszkópos keresztmetszet csiszolatok elemzése – Mikrominta-elemzés</i>	243
21.7	ÖSSZEFOGLALÁS – A HAN KÉK ÉS HAN LILA, VALAMINT AZ EGYIPTOMI KÉK ÉS ZÖLD LUMINESZCENCIÁJA	244
22	MANGÁNKÉK NIR TARTOMÁNYÚ LUMINESZCENCIÁJÁRÓL.....	246
22.1	A PIGMENT TÖRTÉNETÉRŐL RÖVIDEN	246
22.2	A MANGÁNKÉK FOTOFIZIKAI TULAJDONSÁGAI	248
22.2.1	<i>A fotofizikai eredmények összefoglalása.....</i>	250
22.3	VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK – SZAKIRODALMI PÉLDÁKKAL	251
22.3.1	<i>A szakirodalmi példa összefoglalása</i>	253
22.4	MODELLKÍSÉRLETEK – MANGÁNKÉK ÉS MANGÁNILÁ	254
22.5	ÖSSZEFOGLALÁS – A BEMUTATOTT TANULMÁNY ÉS A MODELLKÍSÉRLETEK.....	256
	ÖSSZEFOGLALÁS.....	258
	KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS	260

BIBLIOGRÁFIA	261
ÁBRAJEGYZÉK.....	266
TÁBLÁZATJEGYZÉK	279

TÉZISEK

1. tézis

A kutatás során feldolgozásra, fordításra és értelmezésre kerültek az *AIC Guide* és a *CHARISMA Manual*, fototechnikai kézikönyvek, amelyek a restaurátori dokumentáció és vizsgálatok nemzetközi alapkönyvei. Az értekezés ezek összehasonlítására és részletes kritikai értékelésére is kitér, bemutatva a hazai adaptálhatóság lehetőségeit. Az eredmények hozzájárulnak a restaurátoroktatás fejlesztéséhez és a mindennapi intézményi kutatások korszerűsítéséhez.

2. tézis

A kutatás során bemutatásra és rendszerezésre kerültek a multispektrális, keskenysávú és hiperspektrális képalkotási technikák. Az értekezés kitér működésük, előnyeik és korlátaik ismertetésére, valamint gyakorlati alkalmazhatóságukra a restaurátori diagnosztikai vizsgálatokban. Az eredmények kiegészítik a hazai módszertani ismereteket és a vizsgálatok hatékonyabb intézményi gyakorlatát is elősegítik.

3. tézis

Az értekezés kidolgozta a fotódiagnosztikai képalkotási eljárások egységes rövidítési és jelölési rendszerét, amely a spektrális tartomány, a rögzített jel típusa és a gerjesztő sugárforrás logikus sorrendjén alapul. A rendszer kritikai elemzése feltárta a nemzetközi gyakorlat pontatlanságait, és javaslatot tett egy következetesebb, hazai oktatásban és intézményi gyakorlatban is alkalmazható terminológiai keret bevezetésére.

4. tézis

Az értekezés feldolgozza és értelmezi a *false color* technikák (UV–IR) szakirodalmi alapjait, részletesen bemutatva a pigmentek felismerhetőségében betöltött szerepüket. A módszer elméleti és gyakorlati lehetőségei áttekintésre kerülnek, különös tekintettel a restaurátori alkalmazhatóságra. Az így létrejött összegzés átfogó, korábban hiányzó tudásanyagot biztosít a hazai kutatás és intézményi gyakorlat számára.

5. tézis

Az értekezés részletesen kitér az infravörös lumineszcencia technikára, ismertetve működésének alapelveit és az azonosítható pigmentek körét. A módszer bemutatása és elemzése hozzájárul a diagnosztikai eljárások bővítéséhez, és lehetővé teszi a restaurátori vizsgálatok során eddig korlátozottan alkalmazott technika hatékonyabb hazai bevezetését.

6. tézis

A vizsgálatok eredményeként létrejött egy pigmentreferencia-készlet és festett mintatáblák sora, amelyeken multispektrális felvételek és *false color* képek is készültek. Továbbá műszeres mérések (pXRF, MA-XRF, SEM_BSE képek és EDS spektrumok, valamint XRD adatok) is készültek. Az értekezés az így nyert adatokat részletesen elemzi, és összeveti a szakirodalmi példákkal, ezáltal biztosítva a módszerek érvényesítését és a kutatások gyakorlati megbízhatóságát. A megszerzett adatok segítségével egy digitális adatbázist is előkészít.

7. tézis

Az értekezés kidolgozza a multispektrális képalkotás optikai mikroszkópos keresztmetszet vizsgálatokban való alkalmazásának lehetőségét. A módszer leírása és gyakorlati megvalósítása az ultraibolya- és infravörös-reflexiós eljárások mellett külön hangsúlyt fektet az infravörös lumineszcencia rögzítésére, amely „új eszközt” biztosít a mikroszkópos restaurátori kutatásokhoz és a festett felületek részletes diagnosztikájához.

8. tézis

Az elemzés során feltárásra kerültek az infravörös tartományban lumineszcens tulajdonságú pigmentek (titánfehér-rutil, nikkel-titán sárgák, kadmiumpigmentek, mangánkék és lila, Han kék és lila és az egyiptomi kék) fizikai és kémiai sajátosságai, valamint a gerjesztés hatására létrejövő emissziós jelenségek okai. Az értekezés ezen vizsgálatok révén hozzájárul a pigmentek viselkedésének pontosabb megértéséhez, és új értelmezési szempontokat kínál a restaurátori diagnosztika számára.

THESES

Thesis 1

During the research, the AIC Guide and the CHARISMA Manual, important phototechnical handbooks for international conservation documentation and examinations, were translated, processed and interpreted. The dissertation also compares them and gives a detailed critical evaluation, showing the possibilities of adaptation in Hungary. The results contribute to the development of conservation education and to the modernization of everyday institutional research.

Thesis 2

The research presents and systematizes multispectral, narrowband and hyperspectral imaging techniques. The dissertation explains their operation, advantages and limitations, and their practical use in conservation diagnostics. The results complement methodological knowledge in Hungary and help to make institutional practice more effective.

Thesis 3

The dissertation created a unified system of abbreviations and notations for photodiagnostic imaging methods, based on the spectral range, the type of recorded signal and the excitation source in logical order. The critical analysis revealed inaccuracies in international practice and suggested a more consistent terminology that can also be used in Hungarian education and institutional practice.

Thesis 4

The dissertation processes and interprets the literature background of false color techniques (UV–IR), explaining in detail their role in pigment identification. The theoretical and practical possibilities of the method are reviewed, with special focus on conservation use. This summary provides comprehensive knowledge that was previously missing in Hungarian research and institutional practice.

Thesis 5

The dissertation deals in detail with the infrared luminescence technique, describing its basic principles and the pigments that can be identified. The presentation and analysis of the method contribute to the extension of diagnostic procedures and make possible a more effective introduction of this technique, which has so far been used only in a limited way in Hungary.

Thesis 6

As a result of the examinations, a pigment reference set and a series of painted samples were created, with multispectral and false color images. In addition, instrumental analyses (pXRF, MA-XRF, SEM-BSE images, EDS spectra and XRD data) were carried out. The dissertation analyses these data in detail and compares them with examples from the literature, thus validating the methods and ensuring the practical reliability of the research. The collected data also serve as the basis of a digital database.

Thesis 7

The dissertation develops the possibility of using multispectral imaging in optical microscopic cross-section studies. The description and practical implementation of the method put special focus, besides ultraviolet and infrared reflection techniques, on recording infrared luminescence. This provides a “new tool” for microscopic conservation research and the detailed diagnostics of painted surfaces.

Thesis 8

The analysis revealed the physical and chemical properties of pigments with luminescent behaviour in the infrared range (titanium white-rutile, nickel-titanium yellows, cadmium pigments, manganese blue and violet, Han blue and violet, and Egyptian blue), as well as the causes of the emission phenomena caused by excitation. Through these studies, the dissertation contributes to a more precise understanding of pigment behaviour and offers new viewpoints for conservation diagnostics.

ABSZTRAKT

Az értekezés a restaurátori és műtárgy-diagnosztikai anyagvizsgálatok körébe tartozó fotodiagnosztikai képalkotó eljárásokat vizsgálja, különös tekintettel a lumineszcens technikákra. A kutatás célja olyan módszertani keret kialakítása, amely világosan bemutatja a nemzetközi gyakorlatban elterjedt technikák szakszerű és reprodukálható alkalmazását a hazai környezetben. Kiemelt figyelmet kapnak a multi- és hiperspektrális, valamint, keskenysávú képalkotási eljárások, továbbá a *false color* képek és az infravörös lumineszcencia módszerei, amelyek eddig csak korlátozottan voltak jelen a hazai kutatásban. Az *AIC Guide* és a *CHARISMA Manual* fordítása, feldolgozása és kritikai értelmezése révén terminológiai, technikai és módszertani alapok váltak hozzáférhetővé, amelyek hozzájárulnak a restaurátoroktatás korszerűsítéséhez. A munka javaslatot tesz a fototechnikai vizsgálatok elnevezés- és rövidítésrendszerének revideálására. A kutatás részeként referencia pigmenttáblák és keresztmetszetek készültek, amelyek multispektrális vizsgálatai alapján spektrális adatbázis jött létre. Az eredmények között szerepel egy Zeiss polarizációs mikroszkóp átalakítása spektrálisan szelektív vizsgálatokra, amely új lehetőségeket nyitott a mikroszkópos fotódiagnosztika terén. A dolgozat a nemzetközi példák és hazai esettanulmányok összevetése alapján javaslatokat fogalmaz meg a spektrális képalkotás tudatos bevezetésére és oktatási, intézményi gyakorlatban való hasznosítására. Mindezek révén az értekezés egy korszerű, interdiszciplináris szemlélet kialakítását szolgálja, amely a művészeti, műszaki és természettudományos ismeretek integrálásával segíti a kulturális örökség megőrzését és értelmezését.

ABSTRACT

The dissertation examines photodiagnostic imaging methods used in conservation and object-diagnostic material analysis, with special attention to luminescent techniques. The aim of the research is to create a methodological framework that clearly presents the professional and reproducible application of internationally widespread techniques in the Hungarian context. Special focus is given to multi- and hyperspectral as well as narrow-band imaging methods, false color images, and infrared luminescence, which have so far appeared only in a limited way in Hungarian research. Through the translation, processing and critical interpretation of the AIC Guide and the CHARISMA Manual, terminological, technical and methodological foundations became available, which contribute to the modernization of conservation training. The work proposes a revision of the system of names and abbreviations used in phototechnical examinations. As part of the research, reference pigment charts and cross-sections were prepared, and their multispectral examinations led to the creation of a spectral database. Among the results is the modification of a Zeiss polarization microscope for spectrally selective examinations, which opened new possibilities in microscopic photodiagnostics. Based on the comparison of international examples and Hungarian case studies, the dissertation makes recommendations for the conscious introduction of spectral imaging and its use in education and institutional practice. Through all these, the dissertation supports the development of a modern, interdisciplinary approach, which, by integrating artistic, technical and scientific knowledge, helps in the preservation and interpretation of cultural heritage.

BEVEZETÉS

A dolgozat a restaurátori és műtárgy-diagnosztikai anyagvizsgálatok területére fókuszál, különös tekintettel a fotodiagnosztikai képalkotó eljárásokra. A kutatás kiemelt figyelmet fordít a szerves pigmentek fotofizikai tulajdonságainak elemzésére, valamint ezen tulajdonságok képalkotó eljárásokon keresztül történő vizsgálatára, azok diagnosztikai lehetőségeire és hatáira. A munka célja, hogy világosan bemutassa, miként alkalmazhatók szakszerűen és reprodukálható módon azok a fotodiagnosztikai vizsgálati módszerek, amelyek napjainkban világszerte és különösen a jelentős európai és amerikai közgyűjteményekben és kutatóintézetekben elterjedt, egységesített gyakorlatként működnek. E módszertani keret különös figyelmet fordít az infravörös-lumineszcenciára képes pigmentek vizsgálatára és az eredmények gyakorlati alkalmazhatóságára, mind diagnosztikai, mind restaurátori felhasználásra. A dolgozat ez utóbbit a szakirodalmi példák, modellkísérletek és esettanulmányok segítségével is bemutatja.

A vizsgálatok kiindulópontját a különböző spektrális tartományokban történő fényképezés (*multiband imaging*) adta, amely a szerző egyetemi tanulmányai, majd később a restaurátor hallgatók oktatása és saját intézményi gyakorlatai során kezdett alkalmazni és tovább fejleszteni. E kezdeti vizsgálatok során született meg az igény egy egységes módszertan kialakítására, amely a műtárgyak anyagvizsgálatában használható fototechnikai megoldásokat rendszerezi, és azok interdiszciplináris felhasználási lehetőségeit is értelmezi. A gyakorlat során világossá vált, hogy az elterjedt, hagyományosnak mondható sávonkénti szűrőzésen alapuló technikák (például látható tartományú¹ normál fényes-, infravörös-, ultraibolya-reflexiós vagy ultraibolya² sugárzással gerjesztett látható lumineszcens vizsgálatok) mellett, ezek speciálisabb változatai (infravörös lumineszcens vizsgálatok és a *false color imaging*³) is fontos szerepet játszanak a műtárgyak vizsgálatában.

¹ Az angol *visible* (látható) kifejezés esetén nincs általánosan elfogadott rövidítés. Ha szükséges rövidíteni, akkor az angolban legtöbbször a VIS használatos, de ez nem egy hivatalos rövidítés, és inkább a szövegkörnyezet határozza meg, hogy megfelelő-e. Az értekezésben ezt követően a VIS rövidítés lesz alkalmazva a látható tartományú, normál fényes felvételkedészítés esetében.

² Ultraibolya vagy ibolyántúli tartomány, vagy angol nyelven *ultraviolet*. A definíció szerint az ultraibolya sugárzás a látható fénynél (400-780 nm) kisebb, de a röntgensugárzásnál (0,01,-100 nm) nagyobb hullámhosszúságú; a 180-400 nanométeres tartományba eső elektromágneses sugárzás. A dolgozatban rendszerint a nemzetközi, és hazánkban is leggyakrabban alkalmazott és legjobban ismert rövidítés az UV kerül használatra.

³ Hazánkban „hamis színes infravörös- és hamis színes ultraibolya-reflexiós” elnevezéssel elterjedt képek, melyek alapvetően egy-egy normál fényes reflexiós és egy-egy infravörös- és UV-reflexiós felvétel RGB csatornáinak meghatározott rendszerű keveréséből áll. Az értekezés a továbbiakban a *false color* angol kifejezéssel utal vissza a technikára. Ennek pontos magyarázatát a vonatkozó fejezet terminológia szakasza tárgyalja.

Célként fogalmazódott meg továbbá, hogy az optikai mikroszkópos mintavizsgálatok területén már rutin szerűen alkalmazott képalkotási eljárások (VIS, UV- és BV⁴-lumineszcens) mellett, további reflexiós és emissziós technikák (infravörös- és ultraibolya-reflexiós és infravörös-lumineszcens) felhasználása és adaptálása is tanulmányozásra kerüljön.

A doktori kutatás keretében a rendszeres mérések és összehasonlító vizsgálatok lehetőséget teremtettek egy strukturált módszertani keret kialakítására, amely különböző esettanulmányokon keresztül mutatja be a spektrális képalkotás hazai lehetőségeit, és javaslatokat fogalmaz meg a technikai alkalmazhatóság, képfeldolgozás és adatszintézis kérdéseiben. Emellett olyan közgyűjteményi és magángyűjteményi műtárgyak is bekerültek az elemzési mintába, amelyek nemcsak anyaghasználatukban, hanem készítése technikai megoldásaikban is különleges vagy kevésbé dokumentált példák, így a módszertani eredmények nemcsak technikai, hanem művészettörténeti, attribúciós szempontból is értelmezhetők.

A dolgozatban bemutatott módszertani és technikai keretek részben a nemzetközi gyakorlatok, ajánlások és adatbázisok – például a *National Gallery, London* és *American Institute for Conservation of Historic and Artistic Works (AIC)* szervezetek publikációi – alapján kerültek összeállításra, majd a hazai feltételekhez igazítva továbbfejlesztésre. A kutatás így nemcsak a spektrális képalkotó eljárások alkalmazási lehetőségeit tárja fel, hanem javaslatokat is megfogalmaz arra, hogyan lehet e technikákat tudatosan, egységes rendszerben bevezetni és hasznosítani a magyarországi restaurátori gyakorlatban. Az összeállított módszertani keretrendszer alapját képezheti egy jövőbeni, magyar nyelvű referenciaadatbázisnak, amely különböző spektrális tartományokban dokumentált kép- anyaggal, valamint anyagvizsgálati eredményekkel támogatja a restaurátorokat, művészettörténészeket és muzeológusokat a műtárgyak értelmezésében. Ennek alapváltozata a disszertációval párhuzamosan készül el, kiegészítve az értekezés példáit, valamint a kidolgozott vizsgálati és értelmezési protokollokat.

Mindezek révén a dolgozat célja egy olyan korszerű, interdiszciplináris diagnosztikai szemlélet megerősítése, amely képes ötvözni a művészeti, műszaki és természettudományos ismereteket a kulturális örökség megőrzése és értelmezése érdekében.

⁴ BV, azaz angolul *blueviolet*, magyar nyelven nem kifejezetten van megfelelője. A restaurátori gyakorlatban rendszeresen „BV gerjesztés”-ként ismert, ez a kék-lila gerjesztési tartományt, általános gyakorlatban megfeleltethető egy szűk sávú látható tartományú gerjesztésnek. Ezt részletesen a későbbi fejezetek tárgyalják.

1 CÉLKITŰZÉSEK ÉS KÉRDÉSFELVETÉSEK

1. Tisztázható-e a fotódiagnosztikai vizsgálatok elemeinek elnevezésében tapasztalható magyar nyelvi bizonytalanság? Létrehozható-e magyar vagy angol nyelven egy olyan rövidítésrendszer, amely képes rendszerezni a jelenlegi, nem egységes gyakorlatot, és egyértelműsíteni a technikák megnevezését? Elfogadtatható-e ez a revideált, részben új terminológiai szisztéma az korábbi szakmai generációkkal, és bevezethető-e a restaurátori oktatás rendszerébe?
2. Milyen tanulságokat vonhatunk le a szerves pigmentek infravörös lumineszcenciájával kapcsolatos nemzetközi szakirodalom feldolgozásából? Ezek alapján milyen mértékben határozható meg pontosan, hogy mely pigmentek kimutatására alkalmas ez az eljárás? Továbbá: kutatás tárgyát képezheti-e az eddig nem dokumentált, de műtárgyakon előforduló pigmentek vagy anyagok lumineszcenciája, amelyek vizsgálata még nem került az anyagkutatások látóterébe?
3. Mely szerves és szerves pigmentek pontosabb meghatározását teszik lehetővé a *false-color* képek előállítása és összehasonlító elemzése?
4. Megvalósítható-e technikailag egy hagyományos polarizációs mikroszkóp olyan mértékű átalakítása, amely lehetővé teszi, hogy a felhasználóbarát módon kezelhető rendszerrel különböző spektrális tartományokban – reflexiós és lumineszcens módokban egyaránt – vizsgálhassunk keresztmetszet-csiszolatokat?

2 A KUTATÁS MÓDSZERTANA

2.1 Szakirodalom-feldolgozás és fordítás, hivatkozások rendszere

A kutatás egyik alapvető módszertani eleme a kapcsolódó szakirodalom feldolgozása és – szükség esetén – fordítása. Ahogy Galambos Éva 2007-es értekezésében⁵ is rámutatott, a szerves pigmentek vizsgálatával kapcsolatos szakirodalom magyar nyelven csak korlátozottan érhető el. Munkája jelentős fordulópontot jelentett e téren, hiszen számos releváns forrást dolgozott fel és tett elérhetővé a hazai restaurátor kutatók számára. Az azóta eltelt időben ez az anyag alapvető hivatkozási ponttá vált a terület kutatóközösségében.

A kutatás szempontjából továbbra is elengedhetetlen a főként angol és német nyelvű szakirodalom feldolgozása. Nemzetközi szinten kiemelt kutatási irány maradt a szerves pigmentek vizsgálata, mind mikroszkópos analitikai, mind pedig fototechnikai

⁵ Éva Galambos, *A restaurátori vizsgálatok és egyéb tudományterületek kapcsolata: A szerves pigmentek polarizációs vizsgálatának szerepe* (DLA értekezés, Magyar Képzőművészeti Egyetem, Doktori Iskola, Budapest, 2007).

szempontból. Az utóbbi témában meghatározó jelentőségű az AIC (American Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, Washington DC) által kiadott *The AIC Guide to Digital Photography and Conservation Documentation*,⁶ című munka. A kézikönyv a 2011-es első kiadást követően két alkalommal is frissítve lett, utoljára 2017-ben jelent meg egy harmadik, jelenleg is használt kiadása.

Szintén alapvető referencia a National Gallery, London által, a CHARISMA projekt⁷ keretében 2013-ban kiadott felhasználói kézikönyv, *Multispectral Imaging in Reflectance and Photo-induced Luminescence Modes: A User Manual* címmel⁸ (továbbiakban *CHARISMA User Manual*). Ez a dokumentum is pontról pontra ismerteti a multispektrális fototechnikai vizsgálatok módszertanát, és ajánlásokat tesz azok egységes, reprodukálható alkalmazására.

Ezeknek a kiadványoknak a fordítása és részletes értelmezése szerves részét képezi a kutatásnak, mivel elengedhetetlen alapot nyújtanak a vizsgálatok szakszerű és nemzetközi sztenderdek szerinti megvalósításához.

A hivatkozások esetében olyan megoldás került alkalmazásra, hogy amennyiben egy fejezet vagy alfejezet tartalmának alapját egy konkrét forrás adja – anélkül, hogy szó szerinti idézetként szerepelne –, a hivatkozási szám a fejezetcím mögé került elhelyezésre. Ez azt jelenti, hogy az adott fejezet egy meghatározott forrás szempontrendszerére, felépítésére vagy adatanyagára épül, így annak tartalmát áthatja az adott szakirodalom. Azokban az esetekben, amikor konkrét idézet került felhasználásra, a hivatkozás a szöveg megfelelő pontján rövidítve külön szerepel. A hivatkozások formátuma a nemzetközileg elismert, a bölcsészet-, társadalom- és művészettudományok területén széles körben alkalmazott *Chicago Notes and Bibliography* típusú rendszer szerint került kialakításra.

2.2 Eszközfejlesztés

A kutatás külön figyelmet fordít egy gyárilag polarizációs mikroszkópként működő Zeiss-rendszer átalakítására oly módon, hogy az alkalmas legyen spektrálisan szelektív

⁶ Jeffrey Warda, ed., with Franziska Frey, Dawn Heller, Dan Kushel, Timothy Vitale, and Gawain Weaver, *The AIC Guide to Digital Photography and Conservation Documentation*, 3rd ed. (Washington, DC: American Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 2017).

⁷ CHARISMA (Cultural Heritage Advanced Research Infrastructures: Synergy for a Multidisciplinary Approach to Conservation/Restoration) az Európai Unió 7. Keretprogramja által finanszírozott kutatási projekt volt (2009–2014), amelynek célja a kulturális örökség vizsgálati és konzerválási módszereinek fejlesztése és a kutatási infrastruktúrák hálózatba kapcsolása volt. A projekt keretében készült el a National Gallery (London) gondozásában a 2013-as *Multispectral Imaging in Reflectance and Photo-induced Luminescence Modes: A User Manual*.

⁸ Joanne Dyer, Giovanni Verri, and John Cupitt, eds., *Multispectral Imaging in Reflectance and Photo-induced Luminescence Modes: A User Manual* (London: National Gallery / CHARISMA Project, 2013).

fotódiagnosztikai vizsgálatokra. Az átalakítás során szűrőblokkok és szűrőváltó egységek kerültek integrálásra, miközben az eredeti halogén és ultraibolya fény- és sugárforrásokat változatlanok maradtak, így a rendszer kezelhetősége nem sérült. A szűrőtechnikai megoldásoknál a német SCHOTT gyártó és az Edmund Optics termékei – fotográfiai szűrők, sávszűrők, zárószűrők és polarizációs szűrők – lettek alkalmazva, biztosítva a megfelelő optikai minőséget és kompatibilitást.

A rendszer képrögzítő eszközei a gyárilag illeszkedő Zeiss Axiocam 506 color és mono kamerái voltak. Ezek segítségével az ultraibolya (UV), a látható (VIS) és az infravörös (IR) tartományú felvételek rögzítése, reflexiós és lumineszcens módban egyaránt megvalósítható volt. Ezáltal – minimális eszközszintű módosítás mellett – lehetővé vált a mikroszkópos vizsgálatok spektrális kiterjesztése, valamint a különböző fényforrási technikák integrált alkalmazása.

2.3 Referencia-adatbázis létrehozása, mikroszkópos minták előkészítése

A kutatás egyik legfontosabb és legidőigényesebb része a mikroszkópos és fototechnikai vizsgálatokhoz szükséges referenciaanyagok felkutatása és beszerzése volt. Ez magában foglalta egyrészt a referencia-táblák elkészítését és ezek multispektrális felvételeit, másrészt a táblákra festett pigmentmezőkből vett mintákból – keresztmetszet formájában – készült, ráeső fényes mikroszkópiára alkalmas preparátumok előkészítését. A referenciaanyagok elkészítése kulcsfontosságú, mivel a fotolumineszcens vizsgálatok során kizárólag azok a minták adnak pontos eredményt, amelyekben nem jelentkezik másodlagos lumineszcencia, például a kötőanyagból eredően. Ez utóbbi ugyanis jelentősen megnehezítheti, vagy akár lehetetlenné is teheti a kiértékelést.

Az így létrehozott referenciaadatbázis a 2007-ben Galambos által összeállított „pigmentkönyvtárhoz” képest eltérő szemléletben és célrendszerben készült, így kiegészítheti és korszerűsítheti az azóta oktatási anyagként alkalmazott rendszert. A cél egy olyan spektrális alapú vizsgálati adatbázis létrehozása volt, amely mikroszkópos és fotódiagnosztikai szempontból egyaránt hasznosítható a pigmentek tulajdonságainak értékelésében.

3 A SZAKIRODALMI ADATOK FELDOLGOZÁSA

3.1 Az *AIC Guide* és a *CHARISMA User Manual* összehasonlítása és a feldolgozásból nyert tapasztalatok és tanulságok

A „kézikönyvek” olyan, korábban félreértelmezett ismeretekre hívták fel a figyelmet, amelyek alapvetően megváltoztatták a fototechnikai vizsgálatokhoz való hozzáállást. A hazai gyakorlatban sokáig az volt az elterjedt felfogás, hogy a normál spektrumban való felvételkészítéshez kereskedelmi forgalomban kapható általános fényképezőgépek alkalmazhatók, míg az infravörös vagy ultraibolya tartományban történő képalkotáshoz *full spectrum* átalakítású kamerák szükségesek. A nemzetközi szakirodalom azonban egyértelművé tette, hogy a nyugati iránymutatásokat korábban félreértették: a széles spektrumban érzékeny, *full spectrum* kamerák megjelenésétől kezdve a különböző technikai felvételeket a megfelelő szűrők és a szükséges megvilágítási feltételek kombinációjával rögzítik, a hullámhossz-specifikus dokumentálás követelményeihez igazodva.

Fontos történeti kiegészítés, hogy a 2000-es évek elején az MKE Restaurátor Tanácsán olyan fejlesztések zajlottak, amelyek során infravörös fotózásra átalakított DSLR kamerákat szereztek be. Ezek a készülékek beépített infravörös szűrővel működtek, így nem voltak alkalmasak teljes spektrumú használatra. Bár ez a fejlesztés korszerű és előremutató lépésnek számított, a berendezések korlátozott spektrális alkalmazhatóságáról szóló egyértelmű kommunikáció hiánya félreértésekhez vezetett, és hozzájárult ahhoz, hogy összezemosódott a *full spectrum* rendszerek és a szűkebb tartományra korlátozott eszközök fogalma.

Mindez hangsúlyossá teszi, hogy a spektrális tartományok pontos definiálása és az alkalmazott eszközök egyértelmű kommunikálása elengedhetetlen, mivel ennek hiánya nemcsak technikai, hanem értelmezési bizonytalanságokhoz is vezethet.

3.1.1 Az *AIC Guide* bemutatása

Az *AIC Guide* elsősorban a digitális fotódokumentációhoz kapcsolódó alapismereteket, gyakorlati tanácsokat és standardokat nyújt a műtárgyvédelem, restaurálás, illetve muzeológia területén dolgozó szakembereknek. Az útmutató részletesen tárgyalja a digitális fotózás alapvető lépéseit, eszközeit és technikai részleteit, külön kitérve a szinte az összes képalkotási technikákra, beleértve a reflexiós, transzmissziós és emissziós felvételezést is. Gyakorlatias szemlélet jellemzi, célja, hogy a szakemberek számára érthető módon

tegye elérhetővé és integrálhatóvá a digitális fotózást a mindennapi dokumentációs folyamatokba. Ne felejtjük el az első kiadás a digitális rendszerek elterjedésével majdnem párhuzamosan jelent meg.

Szerkezete klasszikus kézikönyvszerű, jól tagolt, fejezetekre és alfejezetekre bontott. A szöveg mellett sok igényes ábra, fotó és diagram segíti a megértést. Az eszközök használatára, technikai beállításokra és képfeldolgozásra adott tanácsok jól követhetők, az információk gyakorlatiasak és könnyen alkalmazhatók.

Fókuszában a digitális fotózás általános gyakorlata áll, beleértve a képfeldolgozási szoftverek, fájlformátumok, színekalibráció, élességállítás, expozíciós beállítások ismertetését. Ideális mindennapi dokumentációra, restaurátori műtermekben és múzeumi munkák során, alapvetően könnyen hozzáférhető eszközök és szoftverek használatával. Felhasználóbarát és széles körűen alkalmazható útmutató, amely kiválóan alkalmas múzeumi dokumentációs gyakorlatok szabványosítására, kevésbé igényel előzetes mély szakmai háttérrel. Egyértelmű lépések, konkrét példák segítik a könnyű alkalmazást.

Külön kiemelő, hogy jelentős hangsúlyt fektet a látható tartományú képalkotás különböző változataira, mint például a hagyományos reflexiós felvételkészítés vagy a különböző sűrűfényes megvilágítási megoldások. Továbbá a látható tartományú- és az infravörös tartományú transzmissziós képalkotásnak is külön fejezetet szentel. Mi több, olyan speciális technikákat is bemutat, mint a reflektancia-transzformációs képalkotás (Reflectance Transformation Imaging - RTI). Tanácsokat ad az elkészült felvételek megfelelő metaadatolásához és archiválási módszerekre is számtalan megoldást nyújt.

3.1.2 A *CHARISMA User Manual* bemutatása

Ez a munka kifejezetten multispektrális képalkotási technikák (pl.: reflexiós, fotoindukált lumineszcens) részletes technikai útmutatóját nyújtja, magas szintű, tudományosan megalapozott, kutatási célokat szolgáló felhasználással. Elsődleges célcsoportja kutatók, restaurátorok, természettudósok, régészek, akik komplex, mélyreható, műszeres vizsgálatokat végeznek a kulturális örökség tárgyain. Az útmutató különös figyelmet szentel a szabványosított eljárásoknak, hogy biztosítsa az eredmények összevethetőségét és reprodukálhatóságát.

Jellegében tudományosabb, szakmailag magasabb szintű dokumentáció. Részletesen kifejti a képalkotási módszerek mögött meghúzódó elméleti háttérrel, fizikai jelen-

ségeket, kémiai kölcsönhatásokat. A technikai leírások pontosak, tudományosan megalkotottak, és tartalmazzák a képfeldolgozás elméleti, matematikai hátterét is. A struktúrája bonyolultabb, az anyag mélyebb, részletekbe menő.

Specifikusan a multispektrális képalkotásra koncentrálnak, részleteiben ismerteti a fotoindukált lumineszcencia módszereket (UV-indukált lumineszcencia, látható-indukált látható lumineszcencia, infravörös lumineszcencia). Egyértelmű előnye, hogy a dokumentumhoz kapcsolódóan ingyenes szoftveres megoldásokat is kínál, amelyek segítségével standardizált módon lehet képeket rögzíteni, feldolgozni, így elősegítve az intézményközi együttműködést és eredmények összehasonlíthatóságát. Magas szintű kutatási projektekhez ajánlható, ahol fontos a módszertani precizitás és reprodukálhatóság.

Tehát kifejezetten kutatókat, szakmai felhasználókat céloz meg, akik már jártasak a digitális képalkotásban, illetve az optikai, fizikai jelenségek megértésében. Komplexitása miatt a kézikönyv alkalmazása nem magától értetődő, hanem előzetes szakmai ismereteket feltételez. A tartalom feldolgozása és gyakorlati hasznosítása nem alapulhat pusztán tapasztalati úton szerzett „ráérzésen”, hanem tudatos, elméleti háttérismeretekre épülő megközelítést kíván. Ez teszi kevésbé közvetlenül használhatóvá a dokumentumot a laikus számára, ugyanakkor biztosítja a módszertani precizitást és a reprodukálható eredmények elérését, ami magas szintű kutatási projektek esetében elengedhetetlen.

3.2 Összehasonlítás

Az *AIC Guide* sokkal inkább olyan módon mutatja be a különböző képalkotási technikákat, hogy azok első sorban a tárgyak állapotának és készítése technikájának a megismerésére és rögzítésére koncentrálnak. Természetesen ettől függetlenül a felvételek olyan módon készülnek el, hogy azok alkalmasak anyagösszetételi következtetések levonására is. Ezzel szemben a *CHARISMA User Manual* olyan módon foglalkozik a multispektrális képalkotással, hogy a fókusz az analitikai megközelítésre irányul. Ennek következményeképpen, nem véletlen, hogy a PhaseOne és a *CHARISMA User Manual* szerzői együttműködésének köszönhető, hogy a PhaseOne Rainbow MSI rendszere fejlesztésre került. A rendszert részletesen a 7. fejezet mutatja be.

Ha cél tehát egy általános, könnyen érthető dokumentációs rendszer kialakítása, amelyet széles körben használhatnak múzeumi munkatársak, restaurátorok, az *AIC Guide* az optimális választás. Ha pedig specifikus, mélyreható műszeres vizsgálatokat szükséges elvégezni, és cél az eredmények maximális pontossága, reprodukálhatósága, intézmények

közötti összehasonlítása, akkor a *CHARISMA User Manual* módszereit érdemes követni és integrálni.

Együtt alkalmazva a két útmutató kitűnően kiegészíti egymást: az *AIC Guide* általános dokumentációs gyakorlatot nyújt a készítéstechnikai jellegzetességek és a tárgyak állapotának vizsgálatára és rögzítésére, míg a *CHARISMA User Manual* technikailag fejlett, precíz és standardizált kutatási módszereket kínál a tárgyakat felépítő anyagok minél alaposabb, előzetes meghatározására.

3.3 Észrevételek

Jól látszik mindkét publikáció esetében, hogy a kiadás és az újra kiadás ellenére olyan képalkotási technikákat melyek még ma is csak elvétve alkalmaznak a kutató restaurátorok és természettudományos szakemberek, mint például az látható fény indukálta látható tartományú lumineszcens felvételkészítési eljárások, csak részben, felületesen tárgyalják. Valamint, az is említésre méltó, hogy az infravörös lumineszcens képalkotás terén nem tesznek különbséget a látható és az ultraibolya gerjesztést alkalmazó eljárások között. Ez valószínűleg annak köszönhető, hogy csak később jelentek meg olyan kutatások, amelyek bemutatják ennek létjogosultságát (ezzel részletesen az 12. fejezet foglalkozik).

Jelentős különbségként ki lehet emelni még, hogy amíg az AIC a nyilvánvaló előzetes kamerabeállítások (automatikus gamma, szín korrekciók inaktíválása, megfelelő fohéregyensúly beállítás stb.) követően elkészült felvételeken „csak” utólagos módosításokat javasol és mutat be, addig a CHARISMA előzetes kalibrációkat (*focus and alignment*⁹, *flat filed correction*¹⁰, *exposure compensation*¹¹) is bemutat. Továbbá egy jelentős különbség még az utómunka tekintetében, hogy a *CHARISMA User Manual* az ultraibolya sugarakkal gerjesztett látható lumineszcens felvételek esetén a *pigment-binder effec*¹²t-re kidolgozott korrekciót is végrehajtja, ami jelentős eltérést eredményez végeredményben.

⁹ A kamera és a vizsgált tárgy pontos fókuszálását és geometriai illesztését jelenti, amely különösen fontos az UV–VIS–IR tartományban készített felvételek esetén a képélesség és a spektrális összehasonlíthatóság biztosításához. Forrás: *CHARISMA User Manual*

¹⁰ A flat-field korrekció célja a kamera fotometriai válaszáinak kiegyenlítése: a minta és referencia felvétel arányából számítják ki a reflektancia-értékeket, a sötétáram hatásának levonásával. Elsősorban teljes képkockás szenzor esetén fontos, mert csökkenti az objektív vignettálás és a nem egyenletes érzékenység okozta torzításokat. Forrás: *CHARISMA User Manual*

¹¹ A fényképezés során alkalmazott korrekció, amely a kamera által beállított expozíciós értékeket módosítja annak érdekében, hogy a felvétel ne legyen túl sötét vagy túl világos, hanem a vizsgálati célhoz optimális fényességű képet adjon. Forrás: *CHARISMA User Manual*

¹² A pigment–köttőanyag kölcsönhatás olyan optikai jelenség, amely során a lumineszcens anyagok (például szerves köttőanyagok vagy színezékek) emisszióját a környező, nem lumineszkáló pigmentek elnyelése és szóródása torzítja. Ez a felvételeken a valódi emissziók és a kölcsönhatásból származó látszólagos emissziók összeadódásához vezet,

4 KÉPALKOTÁSI TECHNIKÁK A RESTAURÁTORI GYAKORLATBAN

A fotódiagnosztikai eljárások, mint a hiperspektrális, multispektrális vizsgálatok és a keskeny/szűk sávú képalkotás, egyaránt az optikai képalkotás speciális formái, amelyek a fény spektrumának különböző tartományaiban történő rögzítésére és elemzésére összpontosítanak. Ezek az eljárások mind a műtárgyak diagnosztikai kutatásában, mind a restaurálás előkészítésében fontos szerepet játszanak, mivel olyan rejtett részleteket és anyagokat tárnak fel, amelyek más módszerekkel nem láthatók.

4.1 Multispektrális (*multiband*) képalkotás

A multispektrális képalkotás olyan technológia, amely több, általában 3-10 különböző tartományú hullámhossz sávban rögzíti a fényt vagy sugárzást, amelyek mindegyike az elektromágneses spektrum egy-egy szűkebb tartományára esik (például 400–700 nanométer között, teljes szélességben). A műtárgyakat így különböző spektrális tartományokban lehet megvizsgálni (pl. látható fény, infravörös vagy ultraibolya sugárzás). Magában foglalja a reflexiós, transzmissziós és lumineszcens technikákat is. A multispektrális képalkotás képes a felszíni anyagok, például festékek és pigmentek megkülönböztetésére, valamint az átfestett vagy retusált területek nyomainak észlelésére.

4.2 Keskeny/Szűk sávú (*narrowband*) képalkotás

A keskeny/szűk sávú képalkotás hasonló a multispektrális módszerhez, de a tárgyról visszaverődő fényt vagy sugárzást csak egy-egy rendkívül szűk tartományban érzékeli, így egy-egy specifikus hullámhosszra koncentrálva vizsgálja a műalkotásokat. Főként reflexiós technika, az ultraibolyától a láthatón át, a közeli infravörösig terjed. A besugárzás, megvilágítás és a rögzített felvétel is csak egy szűk (akár csak pár nanométeres) tartományt fed le. Ezt az eljárást ma már gyakran használják a restaurálás során, például olyan esetekben, ahol a „széles spektrumú” (400–700 nanométer), látható tartományú reflexiós felvételeken, szinte azonos színűnek látszó, ezért egymástól alig vagy egyáltalán nem elkülöníthető festékfoltokat kívánunk megkülönböztetni az eltérő infravörös reflexiós spektrumok alapján (például, vörös alapszínen egy többnyire vörösesbarna szignatúra).

amelyet matematikai korrekcióval (Kubelka–Munk-modell, γ függvény) lehet helyreállítani. Forrás: *CHARISMA User Manual*

4.3 Hiperspektrális képalkotás

A hiperspektrális képalkotás lényege, hogy egyetlen felvételen a különböző hullámhosszú sugarakból vagy fényből rengeteg adatot gyűjtünk össze. Ez a technológia sokkal több spektrális sávot rögzít, mint a multispektrális képalkotás, amely általában csak 3-10 sávot használ (pl. vörös, zöld, kék, és esetleg néhány ultraibolya és infravörös sáv). A hiperspektrális kamera viszont akár több száz spektrális sávot is képes rögzíteni, és nemcsak a látható tartományban (400–700 nanométer), hanem a közeli-infravörös (NIR, 700–1000 nanométer), közép-infravörös (MIR, 1000–2500 nanométer) és az ultraibolya (UV, 200–400 nanométer) tartományban is. Így a felvételen egy részletes spektrális információ jelenik meg minden egyes képponthez, amely segít a különböző anyagok, pigmentek és rétegek pontosabb azonosításában.

Tehát a technika kifejezetten a reflexiós spektrumok rögzítésére szolgál. Ez azt jelenti, hogy itt az anyagok visszavert jelét rögzítjük, ami részletes spektrális információkat ad az anyagok összetételéről és struktúrájáról. Az elektromágneses spektrum számos különböző sávján történő adatgyűjtés során a használt sugárzás vagy fény nem szándékolta kelt emissziós választ a mintákból, nem cél a gerjesztés és a lumineszcencia rögzítése. Bár technikai képes rögzíteni ezt egyfajta reflexiós válaszként, de nem ez a célja.

A fotodiagnosztikai eljárások alkalmazása a műtárgy-restaurálásban tehát azzal a céllal történik, hogy olyan részletekhez jussunk, amelyek segítenek meghatározni a műalkotás eredeti állapotát, az anyagok típusát és eloszlását, valamint a későbbi beavatkozásokat (például restaurálás vagy konzerválás). Az értekezés nem tárgyalja a hiperspektrális képalkotást, csak a multispektrális technikára összpontosít, és a keskeny sávú felvételek készítés területére is csak rövid kitekintést tesz.

5 A MULTISPEKTRÁLIS KÉPALKOTÁS¹³

Az utóbbi időben a multispektrális képalkotó technikák egyre inkább részévé váltak azoknak a vizsgálati és elemzési módszernek, amellyel a restaurátorok vagy a műtárgyak vizsgálataival foglalkozó szakemberek rendelkezésére álltak. Ezek olyan technikák, amelyek magukban foglalják az indukált, azaz lumineszcens (kibocsátott sugárzással készülő) képalkotási módszereket (ultraibolya sugárzás által indukált látható tartományú lumineszcencia, látható fény vagy UV sugárzás indukált infravörös lumineszcencia és látható fény indukált látható lumineszcencia), valamint számos kapcsolódó széles- és keskenysávú reflexiós képalkotási módszereket, (látható-, az infravörös- és az ultraibolya-reflexiós) vizsgálatokat. Ma már nemcsak kimondottan anyagvizsgálattal foglalkozó kutatók használják, hanem a felhasználók sokkal szélesebb köre is igyekszik alkalmazni őket, beleértve a restaurátorokat és konzervátorokat, régészeket és művészettörténészeket. Változatosabb és a kivitelezésben nagyobb kihívást jelentő körülmények között is, mint például egy állapotfelmérés, vagy terepen végzett vizsgálatok alkalmával. Azonban bár vonzó, minőségi, nem invazív és gyakran viszonylag olcsó és hordozható eszközökkel megoldható, hogy bizonyos anyagok vagy anyagtípusok azonosítására, korábbi beavatkozások térbeli lokalizálására próbát tegyünk, viszont a berendezések, a képek rögzítése és feldolgozása – különösen a lumineszcencia képalkotásban használtak esetében – általában nagymértékben függenek egymástól. Az egyéni felhasználók különböző szokásai és az általuk alkalmazott különféle eszközök, nagyon megnehezítik a különböző feltételek közt készült akár egy azonos tárgyról készült felvételek összehasonlítását.

5.1 Bevezetés a multispektrális képalkotásba

Ez a fejezet a leggyakrabban alkalmazott multispektrális képalkotási technikákat ismerteti, amelyek jelenleg a kutatók, restaurátorok, műemlékvédők, régészek és művészettörténészek rendelkezésére állnak a műalkotások noninvazív vizsgálatához. Bemutatásra kerülnek azok a képkészletek, valamint az elkészítésükhöz javasolt szűrők és sugárforrások, amelyeket az *AIC Guide* és a *CHARISMA User Manual* ajánl. Emellett részletesen tárgyalásra kerülnek azok a megoldások is, amelyek a kutatás során a felvételek elkészítésére analitikai és állapotfelmérési célra a legmegfelelőbbnek és könnyen elérhetőnek bizonyultak.

¹³ Marcello Picollo, Maartje Stols-Witlox and Laura Fuster-López, eds., *UV-Vis Luminescence Imaging Techniques. Conservation* (Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València, 2020).

Kiemelt szempont a megfizethető és széles körben elérhető berendezések alkalmazásának bemutatása, ugyanakkor ismertetésre kerül egy professzionális és költséges rendszer (Phase One Rainbow Multispectral Imaging Solution) is, amely jelentős mértékben megkönnyíti a kutatók és azoknak az intézményeknek a munkáját, amelyek nagy mennyiségben végeznek ilyen típusú műtárgyvizsgálatokat és műtárgy-digitalizálást. A fejezet célja továbbá a multispektrális technikákkal előállított felvételek természetének értelmezése, valamint azoknak a technikai előnyöknek és korlátoknak a bemutatása, amelyek szükségessé tették a képjavítási és utófeldolgozási eljárások alkalmazását.

Az **analitikai pontosságú multispektrális képalkotás** olyan eljárás, amely nemcsak a műtárgy állapotának dokumentálására, hanem az azt felépítő anyagok összetételének meghatározására is alkalmas, az elektromágneses spektrum kiválasztott hullámhossztartományainak felhasználásával. Ezek magukban foglalják mind az emberi szem számára érzékelhető, mind azon túli tartományokat. A kutatás elsősorban azokra a hullámhossztartományokra koncentrál, amelyek kereskedelmi forgalomban kapható általános kamerákkal, illetve azok módosított változataival rögzíthetők. Ezek a készülékek jellemzően szilícium alapú érzékelőket tartalmaznak, amelyek érzékenysége körülbelül 200 és 1200 nanométer közé esik. Ez a teljes tartomány azonban kizárólag átalakítással válik elérhetővé, mivel a normál felhasználásra gyártott berendezések belső szűrői a spektrumot érthető módon a látható fény tartományára (400–700 nanométer) korlátozzák.

Míg az analitikai pontosságú multispektrális képalkotás célja a műtárgy anyagainak és szerkezeti jellemzőinek mélyreható vizsgálata, addig a kizárólag **állapotfelmérési céllal készített felvételek** elsősorban a tárgy jelenlegi fizikai állapotának rögzítésére, a károsodások, sérülések, szennyeződések és restaurálási beavatkozások dokumentálására szolgálnak. Ez utóbbi esetben a hangsúly kevésbé a spektrális pontosságon és a kvantitatív mérhetőségen, sokkal inkább a konzisztens, ismételhető vizuális megjelenítésen van. Az állapotfelmérési célú képalkotás tehát kisebb technikai igényű lehet, mivel nem feltétlenül szükséges a teljes spektrumra kiterjedő érzékelés vagy a szigorú standardizálás; ugyanakkor alapvető szerepet játszik a műtárgy dokumentációjában, a változások nyomon követésében, és előkészíti a terepet az analitikai pontosságú vizsgálatok számára.

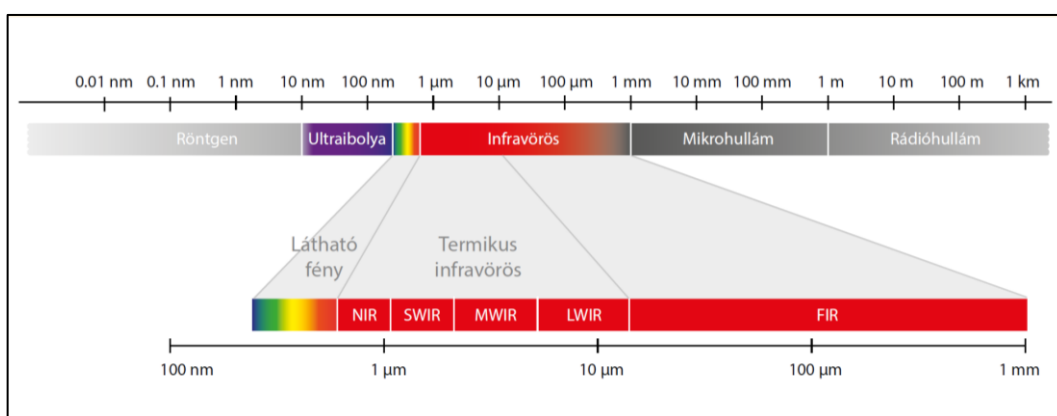
A mintegy 700-1700 nanométer-es infravörös sugárzást is rögzíteni képes, például InGaAs¹⁴ típusú szenzorokon alapuló kamerákat is rendszeresen alkalmaznak a múzeumok és az azokat támogató intézmények, de tanulmány ezt az eszközt és technikát nem tárgyalja.

5.2 A multispektrális kamerák működési rendszere

A multispektrális képalkotás általános beállítása három fő összetevőből áll:

1. A felvételkedzéshez használt sugárzás, amelyet egy sugárforrás hoz létre és a tárgy felé halad;
2. A tárgy, amely kölcsönhatásba lép a használt sugárzással;
3. A visszaérkező sugárzás, amely az alkalmazott sugárzás és a tárgy kölcsönhatását követően arról, a fényképezőgépbe érkezik.

Mind az alkalmazott sugárzás, mind a tárgyról visszaérkező sugárzás jellemzően a következő három tartomány egyikébe esik: ultraibolya sugárzás (UV 200-400 nanométer), látható fény (VIS 400-700 nanométer) és az infravörös sugárzás (IR 700-1700 nanométer).



1. ábra - Hullámhossz ábra. Forrás: Horváth 2025, 188–192.

Az, hogy ez a felhasznált sugárzás milyen mértékben hatol át a vizsgált tárgyon, annak hullámhosszától és a tárgyat alkotó anyagok abszorpció és transzmissziós tulajdonságaitól (összetétel, sűrűség, rétegvastagság) függ, általában a hosszabb hullámhosszú

¹⁴ Az InGaAs szenzorral működő infravörös kamera olyan képalkotó eszköz, amelynek érzékelője indium-gallium-arzenid (InGaAs) félvezető anyagból készül. Ez a típusú detektor különösen érzékeny a közeli infravörös (NIR) és rövidhullámú infravörös (SWIR) tartományban (~900–1700 nm). Ilyen szenzorral működik például az OPUS Instruments, Osiris és Apollo kamerája is. Forrás: Horváth Máttyás, „Felvételkedzés az infravörös tartományban,” in *MS mester és kora*, ed. Gábor Endrődi, Alexandra Kocsis, Manga Pattantyús, and Emese Sarkadi Nagy (Budapest: Szépművészeti Múzeum, 2025), 188–192.

sugárzás képes mélyebb rétegek alá behatolni. Például egy festmény vizsgálatakor a rövidebb hullámhosszú sugárzást (például az ultraibolyát) gyakran könnyen elnyelik a külső rétegek (általában lakkok, de akár egy szennyeződés réteg is), míg a hosszabb hullámhosszúak átjuthatnak a lakkon, és kölcsönhatásba léphetnek a festékrétegekkel, és az alatta lévő alárajzzal vagy alapozással.

Ebből kifolyólag a műtárgy bármely pontját elérő sugárzás lehet:

1. **elnyelődő** (abszorpciós);
2. **visszaverődő** (reflexiós);
3. elnyelődő (abszorpciós) és lumineszcenciaként hosszabb hullámhosszon **kisugárzó** (emissziós) és/vagy
4. **átható** (transzmissziós) tulajdonságú.

Minden felvétel egy hatalmas információ halmazt hoz létre, amely az adott pontra jellemző információkat szolgáltat. Így a megvilágítási és érzékelési tartományok meghatározott kombinációinak kiválasztásával betekintést nyerhetünk a vizsgált objektumban lévő anyagok eloszlásába és milyenségébe. Így eljárás kvalitatív és kvantitatív, azaz mennyiségi és minőségi információkkal is szolgálhat.

5.3 Felvételsorok (képkészletek)

Ebben a részben kerülnek bemutatásra azok a felvételtípusok, amelyek a korábban ismertetett megvilágítási feltételek mellett alkalmazhatók. A terminológiai konzisztencia érdekében az elnevezési javaslatok mellett a szakirodalomban fellelhető terminológiai ajánlások és példák is ismertetésre kerülnek. A módszertani keret teljessége érdekében a klasszikus képalkotási technikák közé a röntgen-radiográfiás eljárás is besorolásra került, noha az összes többi tárgyalt eljárás egyetlen berendezés segítségével is kivitelezhető.

1. csoport: Az ultraibolya sugárzás visszaverődése esetén rögzített UV-reflexiós és az UV sugárzással indukált lumineszcens felvételek, mely esetében a kibocsátott sugárzás eshet a látható és infravörös tartományba is. Az összes lumineszcens technikára vonatkozóan hasonlóak a szabályok, az anyagok egyes esetekben elnyelik a felhasznált gerjesztő sugárzást és annak hatására a látható vagy az infravörös tartományban emittálnak.

2. csoport: A látható sugárzással létrehozott normál, súrló, tükröződő és átmenő és a látható fénnel indukált lumineszcens felvételek, ahol a kibocsátott sugárzás eshet a látható és az infravörös tartományba is.
3. csoport: Az infravörös sugárzás segítségével létrehozott infravörös-reflexiós és transzmissziós, (mivel nagyon kevés az eset az infravörös sugárzás által kiváltott lumineszcenciáról, az értekezés ezt nem tárgyalja).
4. csoport: A röntgen sugárzás áthatolásával létrehozott transzmissziós felvételek.

Az elkészült képek tehát három kategóriába sorolhatók:

1. **reflexiós képalkotás (és ezek felhasználásával létrehozott *false color* képek)**
2. **fotoindukált lumineszcens képalkotás**
3. **transzmissziós képalkotás**

A következő táblázat a fent ismertetett multispektrális képalkotási technikák összességét szemlélteti saját példákon keresztül. Fontos hangsúlyozni, hogy ezek a módszerek egymást kiegészítve alkalmazhatók, mivel az egyes spektrális tartományok a vizsgált tárgy eltérő komponenseiről szolgáltatnak információt. Az így létrehozott felvételhalmaz összehasonlító elemzése és értelmezése nyújthat átfogóbb és egységesebb képet a műtárgy szerkezetéről és állapotáról. Konkrét tárgyokról készült multispektrális felvételek részletes vizsgálatára ebben a fejezetben nem kerül sor, azok bemutatása az értekezés esettanulmányaihoz kapcsolódik.

A terminológiai szakaszt és a szűrőtípusok részletes ismertetését követve olyan táblázatok kerülnek ismertetésre, amelyek a két releváns szakirodalmi forrás ajánlásait tartalmazzák a kamerák, fény- és sugárforrások, szűrők és referencia-skálák alkalmazására vonatkozóan. A feldolgozott szakirodalom alapján a bemutatás nem pusztán technikai felsorolásra szorítkozik, hanem **módszertani szempontból is különválasztja az állapotfelmérési célú képalkotási technikákat az analitikai, feltételes anyagvizsgálati szintű eljárásoktól**. Ez a distinkció a gyakorlatban is hasznos iránymutatást ad, mivel világossá teszi, hogy a különböző vizsgálati célok eltérő eszközparkot, dokumentálási szintet és értelmezési keretet igényelnek.

5.3.1 Reflexiós képalkotás

A reflexiós felvételek esetében a tárgyra érkező és arról visszaverődő sugárzás hullámhossz-tartománya megegyezik. A továbbiakban felsorolt felvételi típusok a legjellemzőbbek, de más fajták és léteznek, amelyekről korábban szó esett (Szűk/keskeny sávú képalkotás).



Látható (normál) fényes reflexiós képalkotás

Ezek a felvételek megfelelnek a szabványos fényképezésnek, a visszavert fényt a 400-700 nanométeres látható tartományban rögzítik.



Látható (súrló fényes) reflexiós képalkotás

Ezek a felvételek a látható tartományban rögzülnek ugyan, de a megvilágítás módja, iránya nem a szokványos (normál 25-45 fokos szöget bezáró), hanem egyoldalú- súrló vagy szándékosan olyan szögben készül, mely segítségével tükröződés hozható létre.



Infravörös reflexiós képalkotás

A felvételek elkészítéséhez infravörös sugárzást használunk, melynek a tárgyról való visszaverődését rögzítjük, a 700-1200 nanométeres tartományban. Hullámhossztól, a rétegek összetételétől, sűrűségétől és rétegvastagságától függve vizsgálat anyag több, kevesebb mértékben elnyeli vagy visszaveri az infravörös sugarakat, de az infravörös sugarak át tudnak hatolni a rétegeken és azok alól visszaverődve képet alkotni.



Ultraibolya reflexiós képalkotás

Az UV reflexiós felvételek a felületről visszavert UV sugárzást rögzítik, a 200-400 nanométeres tartományban. A technikai hasznos lehet a bevonatok felületi eloszlásának, vastagságának jellemzésére, mivel az UV sugarak áthatólképessége alacsony, így már a felületen reakcióba lép az anyaggal, ami elnyeli vagy amiről visszaverődik. Számos pigment egyedi megjelenése alapján következtethetünk annak összetételére.

5.3.2 *False-color* képalkotás

Ez a technika olyan képeket hoz létre, ahol a színek nem a valódi vizuális megjelenést tükrözik, hanem valamilyen fizikai vagy spektrális tulajdonságokat emelnek ki, például az infravörös vagy az ultraibolya sugárzás visszaverődését.

A *false color* képek a látható reflexiós felvételek az infravörös vagy az ultraibolya-reflexiós felvételek és a normál felvételek komponenseinek kombinációjából elkészült trikromatikus képek. A színcsatornák meghatározott kombinációi jellegzetes, fals színeket eredményeznek, melyek segíthetik az anyagok jellemzését és megkülönböztetését.



Ultraibolya-reflexiós *false color* képalkotás

Az ultraibolya reflexiós *false color* képek úgy készülnek, hogy a normál felvétel vörös, zöld, és kék (RGB) csatornákra választják szét, a kék és zöld komponenseket a zöld és a vörös sávba tolják el, majd az UvR felvétel kék csatornáját másolva, felülírják a normál felvétel kék sávját.



Infravörös-reflexiós *false color* képalkotás

Az infravörös reflexiós *false color* kép előállítása pedig úgy működik, hogy a színes, normál felvétel csatornákra (RGB) bontása után a vörös és zöld csatornákat a zöld és a kék sávokba toljuk, majd az IrP felvétel vörös sávját másolva, felülírjuk a normál felvétel vörös sávját.

Figyelembe kell venni, hogy „helyes” színes infravörös felvételek és készíthetők, három különböző tartományú infravörös-reflexiós felvétel elkészítésével (IrP1 700-800 nanométer, IrP2 800-900 nanométer és IrP3 900-1000 nanométer) és azokat egy színes kép RGB csatornáinak felülírásával, cseréjével kék, zöld, és vörös sorrendben.

5.3.3 Fotoindukált lumineszcens képalkotás

A fotoindukált lumineszcens felvételeknél a belépő, beérkező sugárzás és a kiváltott sugárzás hullámhossz-tartománya eltérő. Az ilyen jelenségekre vonatkozó fizikai szabályok szerint a kilépő sugárzás energiája alacsonyabb, hullámhossza nagyobb, mint a tárgya érkező sugárzásé. A bejövőt gerjesztésnek, gerjesztő sugárzásnak, míg a kilépőt emisszióknak, emittált sugárzásnak vagy ismertebb nevén fluoreszcenciának, lumineszcenciának is nevezzük. A következő felvét elkészítési módok a leggyakrabban használt fotoindukált lumineszcens eljárások.



Ultraibolya sugárzással (365 nanométer) indukált látható tartományú lumineszcens képalkotás

Az ilyen típusú felvételeken rögzíthetjük az ultraibolya (UV-A) sugárzás által kiváltott látható tartományban (400-700 nanométer) eső lumineszcenciát. A technikát általában lumineszcens anyagok, például lakkok (gyanták, viaszok, műgyanták) eloszlásának, egyes szerves színezékek és pigmentek jelenlétének jellemzésére; továbbá egyes szerves pigmentek azonosítására (cink-oxid, kadmium tartalmú pigmentek stb.) azonosítására is használják. Az anyagok előző összetétele, kora, stb. miatt a technika a későbbi beavatkozások (retusok, átfestések, injektálások, konzerválószeresek, kiegészítések stb.) kimutatására is alkalmas lehet.



Ultraibolya sugárzással (254 nanométer) indukált látható tartományú lumineszcens képalkotás

Ebben az esetben a rövidhullámú ultraibolya (Uv-C) sugárzás vált ki emissziót a vizsgált felületen, amely a látható tartományban (400–700 nanométer) rögzíthető. A módszer érzékenyebb számos szerves anyag kimutatására, mint a hosszabb hullámhosszon (365 nanométer) végzett vizsgálatok, mivel a rövidhullámú sugárzás nagyobb energiájú, így intenzívebb lumineszcenciát idézhet elő. Ennek következtében alkalmas lehet különböző gyanták, lakkok, viaszok és más organikus bevonatok, illetve bizonyos színezékek és pigmentek (például nedv zöld/sárga, kármin, néhány fehérítő- vagy optikai adalék) detektálására. Rövid hullámhossza miatt ez a technika gyakran nagyobb kontrasztot biztosít az egymástól eltérő anyagok között, így hatékony eszköz lehet a beavatkozások (átfestések, retusok, ragasztások, kiegészítések) feltárására is.



Látható fénnel indukált infravörös lumineszcens képalkotás

Ezekkel a felvételekkel rögzíthető, azaz infravörös tartományba eső lumineszcencia, amit a látható fény vált ki a műtárgyon lévő anyagból. Az ilyen felvételeken többek között az olyan pigmentek térbeli eloszlását jellemezhetjük, mint az egyiptomi kék, Han kék és lila és a kadmium tartalmú pigmentek, valamint a mangánkék és lila. Az eljárás nagyon érzékeny, az említett pigmentek egy „szemcsényi” jelenlétét is képes lehet kimutatni.



Ultraibolya sugárzással (365 nanométer) indukált infravörös lumineszcens képalkotás

Ezekkel a felvételekkel rögzíthető, azaz infravörös tartományba eső lumineszcencia, amit az ultraibolya sugárzás vált ki a műtárgyon lévő anyagokból. Az ilyen felvételeken többek között az olyan pigmentek térbeli eloszlását jellemezhetjük, mint a titán fehér (rutil) és a cinkfehér egyes változatai, valamint enyhén, de a látható fénnel indukált infravörös lumineszcens technikával kimutatható anyagok is. Az eljárás nagyon érzékeny, az említett pigmentek egy „szemcsényi” jelenlétét is képes lehet kimutatni.



Látható fénnel indukált látható tartományú lumineszcens képalkotás

A látható tartományú fénnel gerjesztett lumineszcencia esetén (500-700 nanométer), a gerjesztő sugárzás a 400-500 nanométer közé esik. Ilyen típusú felvételek például az optikai mikroszkópos vizsgálatoknál is használtak, alkalmazott BV-lumineszcens képalkotási módszer. A technika hasznos lehet a vörös és sárga színezékek eloszlásának jellemzésére vagy például a cinkfehér pigmentek kimutatására.

5.3.4 Transzmissziós képalkotás

A transzmissziós képalkotás olyan eljárás, amely során a vizsgált tárgyon keresztül világítva vagy sugározva készítenek felvételt. A képalkotáshoz használt sugárzás (látható fény, infravörös vagy röntgen) a tárgy anyagain áthatolva részben elnyelődik, részben áthalad, (mértékeltén vissza is verődhet a sugárforrás felé) így a keletkező kép a belső szerkezet vagy a rétegek különbségeit is tükrözheti.



Látható fényes transzmissziós képalkotás

A tárgy mögé fényforrást helyeznek, a kamera pedig a fényforrás irányával szemben helyezkedik el. Leginkább átlátszó vagy félig áttetsző anyagoknál használható, mint például vékony festett vászon, papír, pergamen vagy üveg. Megfigyelhetővé válhatnak például: a festő által tett kompozíciós módosítások (pentimento), átfestések, repedések, papírrostok, feliratok esetleg alárajzok vagy vízjelek.



Infravörös transzmissziós képalkotás

Jellemzően a 850–1100 nanométer tartományban alkalmazzuk, mivel az IR-sugárzás jobban áthatol egyes festékrétegeken, alapozókon az alárajzok vagy aláfestések, alávázolások, rétegek közötti jelenségek is megjelenhetnek. Csak akkor alkalmazható hatékonyan, ha a hordozó vagy a festékrétegek részben áteresztők az infravörös tartományban.



Röntgen transzmissziós képalkotás (radiográfia)

Nagy energiájú röntgensugarakat bocsátanak át a tárgyon, és a mögé helyezett detektor vagy film rögzíti az elnyelést. A kép az anyag sűrűség- és vastagságkülönbségeit mutatja meg. Különösen hasznos: a festett tárgyak hordozóinak (például vászon vagy fa) vizsgálatánál, fém pigmentek, szegek, sérülések kimutatására, rejtett kompozíciók vagy korábbi változatok feltárására.

Az illusztrációkhoz felhasznált festmény a Szépművészeti Múzeum, Magyar Nemzeti Galéria, Festészeti Osztályának gyűjteményébe tartozó műalkotás: Schäffer Béla, *Csendélet Eissler Fanni szobrával*, 1845, olaj-vászon, 56 x 34,5 cm, FEO_FK6554. Saját felvételek.

5.4 Felvételi módok - terminológiai javaslat rövidítésekre

A képinformációk elnevezése és leírása összetettebbé válik, amennyiben az alkalmazott képalkotási módszerek köre bővül. A reflexió, transzmisszió és lumineszcencia alapján készített felvételek egyértelmű megnevezése, valamint a használt fény- és sugárforrás, illetve a rögzített spektrális tartomány pontos megadása érdekében a szakirodalom meghatározott sorrendet javasol a képinformációk megjelölésében. E szempontrendszerhez igazodik a gyakorlatban is alkalmazható javasolt terminológiai keret:

- **A rögzített spektrális tartomány** (szükség esetén nano- vagy mikrométerben, -tól, -ig értékkel megadva, alsóindexben), ezt követően gondolatjellel elválasztva,
- **a rögzített jel típusa** (pl.: R: mint reflexió és L, mint lumineszcencia), majd alsó vonallal elválasztva,
- **a fény- vagy sugárforrás spektrális tartománya, a rögzített tartomány vagy a gerjesztés hullámhossza** (alsóindexben).

Ez egy rövidítést eredményez, például a látható tartományú, normál megvilágítás esetén, ahol a rögzített spektrális tartomány a látható tartomány (Vis), a rögzített jel típusa reflexió (R) a fényforrás spektrális tartománya a láthatóba esik, tehát: **Vis-R_Vis**.

A rögzített spektrális tartomány	A rögzített jel típusa	A rögzített tartomány vagy gerjesztés hullámhossza
----------------------------------	------------------------	--

Bonyolultabb esetben egy 365 nanométeres ultraibolya (UV) gerjesztéssel kiváltott, látható tartományú (VIS) lumineszcenciának (L) a rögzítésekor pedig a következőt eredményezi: **Vis-L_Uv365**.

A technikák folyószövegben történő említésekor azonban célszerű kerülni a bonyolult, nehézkes kódolásokat, ezért az 1. táblázat egy közérthető, ugyanakkor pontos és szakmailag elfogadott rövidítési rendszer kerül bemutatásra.

A nemzetközi szakirodalomban a „UVL” rövidítés hagyományosnak tekinthető, ám terminológiai szempontból nem pontos, mivel jelentése félrevezető lehet: nem utal egyértelműen a rögzített spektrális tartományra, és logikai inverziót tartalmaz. Míg például az „UVR” rövidítés egyértelműen az ultraibolya sugárzással végzett reflexiók felvételét jelöli (a tárgy felszínéről visszaverődő UV sugárzás rögzítése), addig az „UVL” olyan

jelentést sugallhat, mintha a detektált sugárzás is az ultraibolya tartományba esne. Valójában azonban az eljárás során a látható tartományba eső lumineszcencia kerül rögzítésre, amelyet ultraibolya sugárzás vált ki. Ennél fogva pontosabb megnevezés az „ultraibolya sugárzással gerjesztett látható lumineszcencia felvétel”, azonban ennek teljes formájában történő alkalmazása ritka, mivel a rövidített alak gyakorlati okokból előnyben részesül.

A rövidebb formák elterjedése részben történeti konvenciókkal magyarázható. Az „UVF” például eredetileg az *ultraviolet fluorescence* kifejezést rövidítette, amely az UV-gerjesztésre adott látható emissziót fedte le. Később, amikor a szakirodalom a *luminescence* terminust kezdte előnyben részesíteni – mivel ez a fluoreszcenciát és a foszforeszcenciát egyaránt magában foglalja – a rövidítés formája gyakran változatlan maradt, jelentése azonban tágult. Emellett a gyakorlatban a tudományos közeg rendszerint az egyszerűbb, közismert rövidítéseket preferálja, még akkor is, ha azok logikai szempontból nem mindenben következetesek. Így alakult ki, hogy a pontosabb, ám terjedelmesebb alakok, mint például az UVIVL (*Ultraviolet Induced Visible Luminescence*), ritkán kerülnek használatba.

Egy rövidítési gyakorlat ugyan megkönnyíti a hétköznapi használatot, ám sok esetben túlzott egyszerűsítéshez vezet, amely nem mindig szolgálja a terminológiai pontosságot. Például a széles körben elterjedt „VIL” rövidítés (visible-induced infrared luminescence) sem teljesen egyértelmű, mivel a VIRL forma – csupán egy betűvel hosszabb változatként – világosabban rögzítené a rövidítés tartalmát. Hasonlóképpen, az „UVIL” egyértelműbbé válhatna „UVIRL”-ként, hiszen az „I”, mint infravörös önmagában nem feltétlenül egyértelmű, míg az „IR” egyértelműen az infravörösre utal.

További problémát okoz hogyha a hazai területre szánt rövidítésrendszer kidolgozásakor figyelembe vesszük a nemzetközi rövidítéseket. Ugyanis az ultraibolya angolul *ultraviolet*, az ebből eredő rövidítés került átvételre, ami az „UV”. Ha ezt alkalmazzuk az ultraibolya sugarakkal gerjesztett, látható tartományban rögzített lumineszcens felvétel-leírásakor akkor a következő megoldás születik: UVVL. Ebben az esetben az egymást követő kapitális „V” betűk zavaróan hatnak, így az ultraibolya rövidítésére – kizárólag a technika összetett rövidítése alkalmával – a következőt javaslom: Uv. A következetesség érdekében ezáltal a „VIS” helyett is „Vis”, az „IR” helyett „Ir” és a „TR” helyett is „Tr” javasolt a rövidítések alkalmával.

Az így kialakított rendszer feloldása hasonló logikát követ, mint a részletes és hosszú képaláírásokban vagy hivatkozásokban alkalmazott jelöléseké. Például egy ultra-

ibolya sugárzással gerjesztett, a látható tartományban rögzített lumineszcens felvétel rövidítése az UvVL, amely a következőképpen értelmezhető: „Uv” (ultraibolya sugárforrás), „V” (látható – visible, a detektált jel tartománya), „L” (lumineszcencia, a rögzített jel természete). Bizonyos esetekben az „F” betű is alkalmazásra kerülhet, a fluoreszcencia rövidítéseként, mivel a szakirodalomban és egyes nyelvterületeken ennek használata elterjedt.

Összességében megállapítható, hogy a rövidítési konvenciók alakulását egyszerre befolyásolják történeti hagyományok, a nemzetközi szakirodalom gyakorlata és a gyakorlati egyszerűség iránti igény, ám a terminológiai pontosság megőrzése érdekében indokolt lehet a következetesebb és egyértelműbb jelölések előnyben részesítése.

Az alábbi táblázatok az általánosan alkalmazott típusfelvételek rövidítésrendszerét mutatják be, magyar és angol nyelven, kiegészítve a röntgen-radiográfiás vizsgálattal.

1. táblázat - Reflexiós képalkotás		
	Képalírás vagy lábjegyzet	Folyószöveg
látható tartományú (normál fényes) reflexiós képalkotás – visible light reflectance imaging	Vis-R_Vis ₄₀₀₋₇₀₀	VIS
látható tartományú (súrló fényes) reflexiós képalkotás – raking light imaging	RL	RL
infravörös reflexiós képalkotás – infrared reflectance imaging (photography/reflectography)	Ir- R_Ir ₈₃₀₋₁₁₀₀ ¹⁵ vagy Ir -R_Ir ₉₀₀₋₁₇₀₀ ¹⁶ vagy Ir- R_Ir ₁₅₁₀₋₁₇₀₀ ¹⁷	IrP vagy IrR
ultraibolya-reflexiós képalkotás – ultraviolet reflectance imaging	Uv-R_Uv ₂₅₄ vagy Uv-R_Uv ₃₆₅	UvR
infravörös-reflexiós <i>false color</i> képalkotás – infrared reflectance false color imaging	IrRFC	IrRFC
ultraibolya-reflexiós <i>false color</i> képalkotás – ultraviolet reflectance false color imaging	UvRFC	UvRFC

Az infravörös-reflexiós felvételek esetében javaslok külön választani a hagyományos (CCD, CMOS) fotográfiai elven alapuló felvételkedészítés során készített felvételeket, a nem hagyományos (InGaS) rendszerű képalkotástól, ezzel is megkülönböztetve a két rögzíthető tartomány között eltérést: IPR: 700-1200 nanométer és IRR 900-1700 nanométer.

¹⁵ Ebben az esetben az általános, sokszor infravörös fotográfiaként, vagy angolul *infrared photography*-ként (IRP) emlegetett képalkotás során használandó ez a rövidítés. Ekkor egy átalakított kereskedelmi forgalomban is kapható kamera érzékenységi tartományát jelöljük meg egy pl.: 830-nanméteres zárószűrő alkalmazása mellett. Ezt az esetet alapértelmezettnek is lehetne venni, mivel a legtöbb esetben ez a felvétel készül el, de sajnos változó, hogy milyen szűrőt alkalmaz a vizsgálatot készítő személy (pl.: 700/720, 830/850 vagy 950), így helytállóbb a pontos megjelölést.

¹⁶ Ez az eset egy Opus Osiris vagy Apollo infravörös kamerával (InGaS), záró szűrő nélkül elkészített felvételt írja le; rögzítve így a szenzor teljes érzékenységi tartományát.

¹⁷ Itt az előző esetben használt professzionális rendszer szűrővel kombinált változatát leírata, amikor az 1510 nanométeres LWP (*longwave pass*) szűrő kerül alkalmazásra. Mivel a kamerarendszer érzékelője érzékenységeinek végpontja tisztázott (1700 nanométer) így megadható a rögzített tartomány, annak ellenére, hogy nem sávszűrő (BP – *bandpass*; pl.: 1250-1510 nanométer) lett alkalmazva.

2. táblázat - Lumineszcens képalkotás		
	Képalírás vagy lábjegyzet	Folyószöveg
ultraibolya sugárzással gerjesztett látható tartományú lumineszcens képalkotás – ultraviolet-induced visible luminescence imaging	Vis-L_Uv ₃₆₅ vagy Vis-L_Uv ₂₅₄ ¹⁸	UvVL
látható tartományú sugárzással gerjesztett látható tartományú lumineszcens képalkotás – visible light-induced visible luminescence imaging	Vis-L_Vis ¹⁹	VVL
ultraibolya sugárzással gerjesztett infravörös lumineszcens képalkotás – ultraviolet radiation induced infrared luminescence	Ir-L_Uv ₃₆₅	UvIrL
látható tartományú sugárzással gerjesztett infravörös lumineszcens felvétel – visible light induced infrared luminescence	Ir-L_Vis	VIrL

3. táblázat - Transzmissziós képalkotás		
	Képalírás vagy lábjegyzet	Folyószöveg
látható fényes transzmissziós képalkotás – visible transmitted imaging	Vis-Tr_Vis	VTr
infravörös transzmissziós képalkotás – infrared transmitted imaging	Ir-Tr_Ir ₈₃₀ vagy Ir-Tr_Ir ₈₃₀₋₁₁₅₀	IrTr
röntgen sugaras transzmissziós (radiográfiás) képalkotás – X-ray transmitted imaging	Xr	Xr

¹⁸ Abban az esetben amikor a besugárzás nem UV-A tartományban, 365 nm-en; hanem UV-C tartományban, 254 nm-en történik.

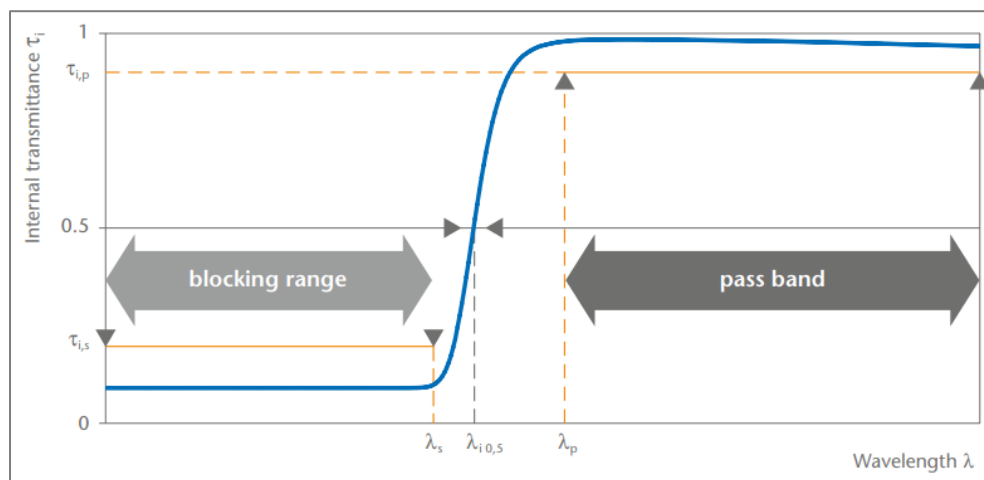
¹⁹ Leggyakoribb esetben az optikai mikroszkópos vizsgálatok esetén alkalmazott BV (*blueviolet*) sugárzással gerjesztett látható tartományú lumineszcens felvételekre kell gondolni, de gyakorlatilag ezen az elven több látható sávval is gerjeszthető lumineszcencia, mely technikával az elmúlt években gyakran lehet találkozni.

6 „SZŰRŐKISOKOS” OPTIKAI SZŰRŐTÍPUSOK

A következő fejezetekben azok az optikai szűrőtípusok kerülnek bemutatásra, amelyek eltérő funkciót töltenek be: bizonyos esetekben a sugárforrásnál, máskor a képrögzítő rendszer optikai elemeire helyezve kapnak szerepet. Tekintettel arra, hogy a szűrők jellemzői és alkalmazhatósága szoros összefüggésben áll spektrális viselkedésükkel, az eligazodást segítő az alábbi összefoglaló áttekintés nyújt támpontot. Az optikai szűrők spektrális áteresztő tulajdonságaik alapján több kategóriába sorolhatók, amelyek közül a restauratori és műtárgydiagnosztikai képalkotás szempontjából releváns típusok kerülnek részletes ismertetésre. Az elemzés kizárólag ezen szűrőosztályokra korlátozódik, míg az általános kémiai, gyártástechnológiai vagy egyéb tulajdonságok tárgyalása nem képezi a vizsgálat tárgyát. A bemutatást követően kitér a legfontosabb szűrőgyártók és forgalmazók áttekintésére is.

6.1 Hosszúhullám-áteresztő szűrők – Longpass filters

A hosszú hullámhosszú sugarak képesek áthaladni a hosszúhullám-áteresztő szűrőn. A hosszúhullám-áteresztő szűrőre jellemző, hogy a rövid hullámhossztartományban egy alacsony áteresztésű (blokkoló/*blocking range*) tartomány, az úgynevezett blokkolási sáv kapcsolódik egy nagy áteresztésű (áteresztési/*pass band*) tartományhoz a hosszú hullámhossztartományban (2. ábra). Tipikusan Schott GG400 vagy B+W 021 sárga színszűrők, melyek a rövid hullámhosszú ultraibolya és kék-lila látható sugarakat blokkolják, de a hosszabb hullámhosszú látható és az infravöröst áteresztik.

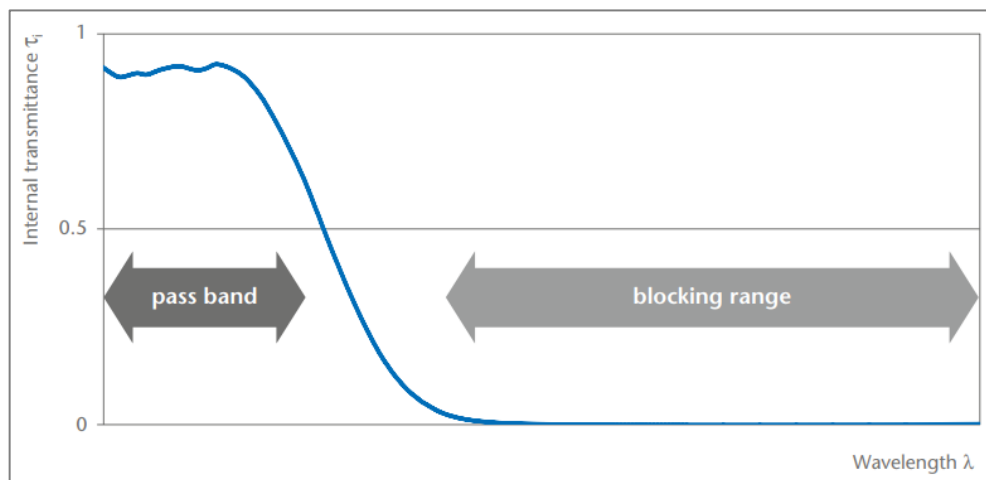


2. ábra - hosszúhullám áteresztő szűrők magyarázó ábrája.

Forrás: Schott optical filter glass pocket catalog 2020 (imprint)

6.2 Rövidhullám-áteresztő szűrők – Shortpass filters

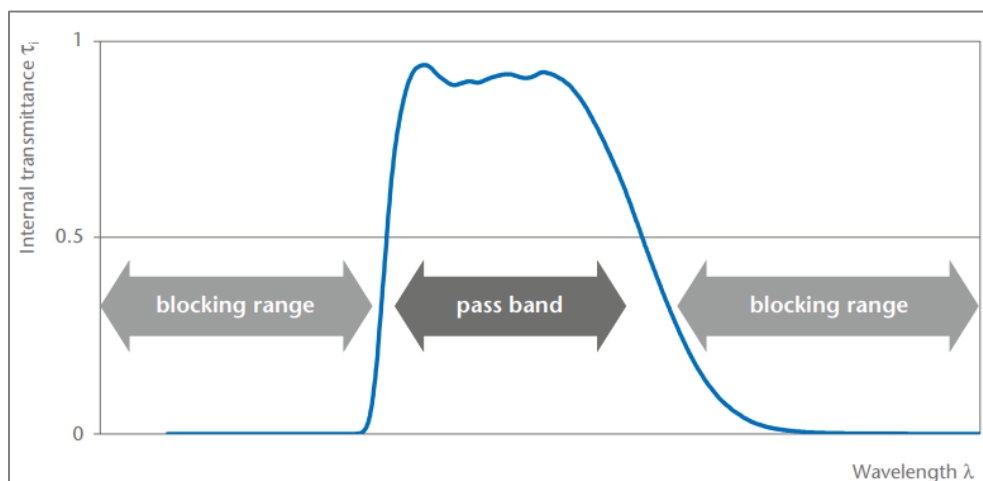
A rövid hullámhosszúságú sugarak képesek áthaladni a rövidhullám-áteresztő szűrőkön, míg a hosszabb hullámhosszúságú komponenseket a szűrő blokkolja. Általánosan elmondható, hogy az áteresztési sáv és a blokkolási tartomány közötti átmenet meredeksége – azaz a spektrális görbe lejtése – jellemzően sokkal meredekebb a hosszúhullám-áteresztő szűrők esetében, mint a rövidhullám-áteresztő szűrőknél (3. ábra). Tipikusan például a Schott BG38-as szűrő mely blokkolja az infravörös sugarakat, de a láthatót és az ultraibolyát átengedi.



3. ábra - a rövidhullám áteresztő szűrő magyarázó ábrája
Forrás: Schott optical filter glass pocket catalog 2020 (imprint)

6.3 Sávszűrők - Bandpass filters

A sávszűrők egy meghatározott hullámhossztartomány szelektív áteresztésére szolgálnak. Jellemzőjük, hogy egy magas áteresztésű tartományt (áteresztési sáv/*pass band*) kapcsolnak össze két szélső, alacsony áteresztésű zónával, amelyek a rövidebb és hosszabb hullámhosszok felé helyezkednek el (blokkolási tartományok/*blocking range*) (4. ábra). Tipikusan például a Schott UG11 vagy B+W 403, ami egy klasszikus UV sávszűrő, körülbelül 260-380 nanométer közötti sugarakat engedi át, és a látható, valamint az infravörös sugarakat hatékonyan blokkolja. Az áteresztési sáv szélei általában meredek emelkedésűek, ritkán hosszú elnyúlásúak.



4. ábra - a sávszűrők magyarázó ábrája.

Forrás: Schott optical filter glass pocket catalog 2020 (imprint)

6.4 A legfontosabb üveg- és szűrőgyártók, forgalmazók²⁰

A **Schott AG** az optikai ipar egyik legmeghatározóbb szereplője, amelyet 1884-ben alapítottak Jénában Carl Zeiss, Ernst Abbe és Otto Schott közreműködésével. A vállalat története szorosan összefonódik a modern optikai üveggyártás fejlődésével. A második világháborút követően a Schott két részre szakadt: az NDK területén Jénában maradt gyár és a nyugati zónába, Mainzba telepített részleg külön fejlődött tovább. A Schott máig világszinten elismert optikai és technikai üvegek gyártója, különös tekintettel a színszűrő üvegekre, mint például a GG (sárga), OG (narancs), BG (kék-zöld) és RG (vörös) sorozatok. Ezeket az üvegeket számos iparág használja, beleértve a spektroszkópiát, mikroszkópiát, fényképezést és úripari alkalmazásokat is. A szűrőüvegeket homogén, színezett tömbüveggént gyártják, amelyeket precízen csiszolnak, políroznak és adott esetben bevonattal is ellátnak. A Schott üvegei szolgálnak alapanyagként több szűrőgyártó, például a B+W, Heliopan vagy Baader Planetarium termékeihez is.

A **B+W** szűrőmárkát 1947-ben alapították Németországban (Bertele & Willmann), és ma a Schneider-Kreuznach optikai cégcsoport részeként működik. A cég kiváló minőségű fényképezőgépszűrőket kínál, köztük UV, IR, ND (semleges szürke) és polarizációs szűrőket, amelyek a professzionális fotográfia és videózás eszköztárának alapdarabjai. A

²⁰ Schott AG – <https://www.schott.com>; Schneider-Kreuznach / B+W Filters – <https://schneiderkreuznach.com>; Hoya Filters – <https://hoyafilter.com>; Edmund Optics – <https://www.edmundoptics.com>; Baader Planetarium – <https://www.baader-planetarium.com>; Zeiss Archives (historical optics and filter usage): <https://www.zeiss.com>; Kolar Vision – <https://www.kolarivision.com>; STC Optical and Chemical – <https://stcoptics.com>; MaxMax (LDP LLC) – <https://www.maxmax.com>; PECA Products – <https://www.pecaproducts.com>; Lee Filters – <https://leefilters.com>; IR-RECAMs GmbH – <https://www.irrecams.de>

B+W szűrők gyártása során kizárólag németországi gyártású, finomcsiszolt Schott üveget alkalmaznak, amelyeket többféle felületkezeléssel (pl. egyrétegű MRC vagy többretegű Nano bevonatokkal) látnak el. A gyártás során nagy hangsúlyt fektetnek az optikai síkfelületre, a hullámfront-torzítás elkerülésére és a tartós, sárgarézből készült menetes foglalatokra. A legismertebb B+W szűrők közé tartoznak a 010 UV-Haze, a 091 IR-pass, valamint a Kaesemann polarizátorok és a különböző erősségű ND szűrők.

A **Kodak Wratten szűrők** története az 1870-es évek végére nyúlik vissza, amikor Frederick Wratten színezett zselatinszűrőket kezdett gyártani fotográfiai célokra. Ezeket a szűrőket később az Eastman Kodak Co. vásárolta fel és fejlesztette tovább. A Wratten szűrők áttetsző zselatinlapok, amelyeket pontos spektrális áteresztés szerint színeztek, és sok esetben üveglapok közé lamináltak. Jelölésük a Wratten-számokon alapul (például 8, 15, 25, 47, 87 stb.), amelyek különböző szűrési tulajdonságokat jelölnek: a Wratten 8 például egy sárga szűrő, a 25 egy vörös, míg a 87 egy infravörös-áteresztő változat. Ezek a szűrők a 20. század első felében alapvető szerepet játszottak a fekete-fehér fotográfiában, színeskorrekcióban és spektroszkópiai alkalmazásokban, mára azonban kiszorították őket a tartósabb és hőállóbb optikai üvegszűrők.

A **Heliopan** egy német szűrőgyártó, amely Münchenben működik, és különösen a prémium minőségű fotószűrők piacán vált ismertté. A Heliopan termékei szintén Schott üvegre épülnek, amelyeket rendkívül precíz megmunkálással, finom csiszolással és alacsony reflexiójú bevonatokkal látnak el. A foglalatok általában sárgarézből készülnek, amely stabil menetes rögzítést biztosít, és kevésbé hajlamos az elferdülésre. A Heliopan kínálatában megtalálhatók a klasszikus UV, IR és ND szűrők mellett a polarizációs, meglejtő (KR-sorozat) és keskenysávú szűrők is. A SH-PMC (*Super-High-Performance Multi-Coating*) technológia különösen népszerű a tükröződéscsökkentés terén.

A **Zeiss** név elsősorban az optikai precizitás és az objektívgyártás területén vált ismertté, azonban a cég történetileg szűrőket is gyártott saját rendszereihez, például a Contarex objektívekhez. A Zeiss szűrők szintén Schott üvegből készültek, és minőségük megfelelt a cég egyéb termékeihez támasztott szigorú elvárásoknak. Bár a Zeiss sosem volt a szűrőgyártás vezető szereplője, termékei jól illeszkedtek a professzionális Zeiss optikai rendszerekhez. Ma már a cég nem gyárt tömegesen szűrőket, inkább a lencsék, mikroszkópok és ipari optikai rendszerek piacára koncentrált.

A **Baader Planetarium** egy német cég, amely 1966 óta gyárt optikai eszközöket csillagászati felhasználásra. A cég különösen elismert a kiváló minőségű, interferencia-alapú szűrői miatt, amelyeket bolygó- és mélyég-megfigyeléshez, asztrofotográfiához és spektroszkópiához is használnak. A Baader által használt üvegek döntően Schott eredetűek, amelyeket saját fejlesztésű bevonatokkal látnak el – ezek közé tartoznak az UHC-S (általános csillagászati keskenysávú), az OIII, H α és H β vonalra szűrő típusok, valamint a Solar Continuum napmegfigyeléshez. Különleges termékük a Venus szűrő, amely ultraibolya-tartományban engedi át a sugarakat, miközben hatékonyan blokkolja a látható és infravörös sugárzást. A Baader szűrők kiemelkednek alacsony hullámfront-torzításukkal, így tudományos célokra is alkalmasak.

Az **Edmund Optics** (EO) az egyik legismertebb angolszász optikai alkatrészgyártó, amely optikai komponensek, lencsék, prizmák, tükör- és szűrőrendszerek széles választékát kínálja a tudományos, ipari és oktatási célú felhasználás számára. A cég 1942-ben alakult az Egyesült Államokban, és mára globális jelenléttel rendelkezik. Szűrőik között megtalálhatók a hagyományos színszűrők, keskenysávú interferenciaszűrők, dikroikus és ND szűrők, valamint UV és IR blokkoló szűrők. Az Edmund Optics termékei az ipari és laboratóriumi alkalmazásokra vannak optimalizálva, de elérhetők standard optomechanikai méretekben, így integrálhatók kísérleti rendszerekbe is. Az EO szűrők gyártása több helyszínen történik: az USA-ban, Németországban és Szingapúrban is működnek fejlesztő- és gyártóegységeik. Bár a gyártott szűrők egy része Schott üvegre épül, számos esetben saját fejlesztésű réteg- és bevonattechnológiát alkalmaznak, különösen az interferenciaalapú optikák esetében.

A **PECA Products** egy amerikai székhelyű cég, amely elsősorban optikai és tudományos célú szűrőkre specializálódott. A vállalat legismertebb termékei közé tartoznak az infravörös szűrők, különösen az *IR-pass* és *IR-cut* típusok, valamint a digitális képalkotás és tudományos fényképezés területén használt speciális optikai anyagok. A PECA nem maga gyártja az üveganyagot, hanem különböző forrásokból (köztük valószínűleg Schott vagy más ipari beszállítóktól) szerzi be, és azokat saját foglalatban, saját szűrőjelöléssel kínálja. A PECA IR-szűrők különösen elterjedtek a digitális kamerák spektrális módosításához, például, ha valaki egy érzékelőt *IR sensitive* módra alakít át. Emellett a cég fényképezőgép-előtéteket, szűrőtartókat és mérés technikai optikai kiegészítőket is forgalmaz, és gyakran szolgál ki orvosi, ipari és kutatási célokat. A PECA termékek tipikusan az

USA-ban készülnek, és megbízható választást jelentenek, ha precíz hullámhossz-szűrésre van szükség, különösen a 650–1000 nanométer közötti tartományban.

A **Lee Filters** egy ikonikus brit cég, amelyet 1967-ben alapítottak, és mára a világ egyik legismertebb fényformáló és színszűrő gyártójává vált. A cég elsősorban fotográfiai, filmes és színpadi világítástechnikai szűrőiről ismert. A Lee szűrők anyaguk szerint jellemzően színezett poliészter fóliák, amelyeket optikai minőségben gyártanak, pontosan kalibrált színértékekkel (például színhőmérséklet korrekció, színhatás, *natural density* (ND), *diffusion* és a többi). A termékeket nagy lapméretben (pl. 100 × 100 mm vagy 100 × 150 mm) kínálják, és egy moduláris szűrőtartó rendszerhez (*Lee Filter Holder System*) illeszthetők. A Lee különösen népszerű a tájfotósok és filmesek körében, de színházi és világítástechnikai környezetben is standard eszköznek számít. A gyártás eredetileg Angliában zajlott (Andover, Hampshire), a céget később a Panavision-csoport vásárolta fel. Bár nem üvegszűrőket gyártanak, pontosságuk és sokféleségük miatt a Lee szűrők komoly szerepet játszanak a fényformálás és színtkorrekció terén.

A **MaxMax** (Spectral Instruments, Inc. – korábban LDP LLC) egy amerikai vállalkozás, amely a digitális képérzékelők spektrális módosítására szakosodott. A cég kínálatának középpontjában a kifejezetten módosított kamerák állnak, amelyek például ultraibolya, infravörös vagy multispektrális fényképezésre vannak átalakítva. A MaxMax nem klaszikus szűrőgyártó, de termékkínálatukban megtalálhatók az általuk kifejlesztett IR-pass, UV-pass és multispektrális szűrők, amelyeket gyakran saját fejlesztésű érzékelőmódosított gépekkel kombinálnak. A szűrőikhez használt optikai üveg forrása nem mindig nyilvános, de gyakran alkalmaznak Schott és Hoya típusokat, valamint interferenciaszűrőket is. A MaxMax egyik különlegessége, hogy készít *full spectrum* kamerákat (azaz a gyári IR-blokk eltávolítása után a teljes érzékelőspektrumon érzékeny eszközöket), amelyekhez egyéni szűrőszetteket is kínálnak a felhasználó céljainak megfelelően. Emellett készítenek ultraibolya-szűrőzést detektáló kalibráló céltárgyakat, valamint számos tudományos és forenzikus eszközt.

Az **STC Optical & Chemical** egy viszonylag fiatal, de technológiailag igen előremutató vállalat, amelynek székhelye Tajvanon található. A cég innovatív szűrőtechnológiáiról vált ismertté, különösen a klipszes belső szűrők (*clip filter*-ek) fejlesztése révén, amelyeket közvetlenül a fényképezőgépek érzékelője elé lehet helyezni – különösen népszerűek

a Canon, Nikon, Sony, Fuji, és Olympus MILC és DSLR gépeket használók körében. Az STC különféle célú szűrőket kínál, például *IR-cut*, *UV-cut*, *astro nightscape*, *ND*, *light pollution* (LPS) és multispektrális szűrőket. Termékeik között megtalálhatók üvegalapú szűrők (többnyire Schott vagy Hoya üvegfelhasználással), de az igazi különlegesség az általuk alkalmazott nano-bevonat technológia, amely kiváló tükröződéscsökkentést és vízlepergető, karcálló tulajdonságokat biztosít. A vállalat külön figyelmet fordít arra, hogy a szűrők torzításmentes, alacsony vastagságú kivitelben készüljenek, így nem rontják a képminőséget még nagy felbontású szenzorokon sem. Az STC termékeit nemcsak a táj- és csillagfotósok kedvelik, hanem a spektrális kutatással vagy légköri fényjelenségek vizsgálatával foglalkozó felhasználók is.

A **Kolari Vision** egy amerikai vállalat, amely az érzékelőmódosítások és spektrális szűrés egyik legismertebb szakértője a digitális képalkotás világában. A cég New Jersey-ben működik, és fő profilja az, hogy DSLR és tükör nélküli fényképezőgépeket alakít át különféle spektrális tartományokra érzékeny rendszerré, legyen az infravörös, ultraibolya, teljes spektrumú vagy multispektrális. A Kolari kínál egyedi tervezésű *IR-pass*, *UV-pass*, *hot mirror* (*IR-cut*), *full spectrum*, valamint *dual-band* és *quad-band* interferenciaszűrőket, amelyeket a módosított kamerákhoz optimalizálnak. Ezek a szűrők rendkívül pontos spektrális határértékekkel dolgoznak, tipikusan 590, 665, 720, 850 nanométer körüli infravörös tartományban, de kínálnak 300–400 nanométer közötti ultraibolya-tartományra hangolt megoldásokat is. Az általuk alkalmazott üveg jellemzően ipari minőségű interferenciaszűrő, saját bevonatfejlesztéssel és szenzor-specifikus optimalizálással. A Kolari emellett saját optikai minőségellenőrzési rendszert alkalmaz, és minden szűrőt egyedileg mér és dokumentál. A Kolari Vision különleges státuszt vívott ki magának a restaurátorok, tudományos kutatók és kreatív fotósok körében, mivel lehetővé teszik a kamerák olyan spektrális átalakítását, amely a gyári konfigurációban nem érhető el.

Az **IRRECAMS GmbH** egy németországi vállalat, amely kifejezetten spektrális és multispektrális képalkotó rendszerek fejlesztésére és gyártására szakosodott. A cég székhelye Berlin közelében található, és tevékenysége elsősorban a tudományos kutatás, a kulturális örökség vizsgálata, a kriminalisztika és az ipari anyagvizsgálat területeire koncentrál. Az IRRECAMS kínálata olyan komplett képalkotó rendszerekből áll, amelyek képesek ultraibolya, látható, közeli infravörös és akár rövidhullámú infravörös (SWIR) tartományban működni, beleértve a multispektrális reflektográfiát is.

A cég rendszeresen használ moduláris szűrőváltó egységeket, szenzorspecifikus szűrőket, valamint különféle spektrális tartományokra optimalizált objektíveket. Bár az IRRECAMS nem maga gyárt szűrőüveget, az általuk alkalmazott szűrők többsége jól ismert gyártók – például Schott, MidOpt, vagy más ipari optikai cégek – termékein alapul. Az IRRECAMS egyik erőssége, hogy egyedi igényekhez igazított szűrőkonfigurációkat, kalibrált megvilágítórendszereket (például LED-alapú multispektrális fényforrásokat) és szoftveres feldolgozást kínál integrált rendszerként. Termékeiket gyakran használják művészeti és régészeti tárgyak nem-invazív vizsgálatára, ahol a különböző spektrális tartományok eltérő információkat nyújtanak a festékrétegek, retusok, aláfestések vagy szöveti szerkezetek azonosításában. Az IRRECAMS rendszerei nemcsak a spektrális szűrők és szenzorok integrációjában, hanem azok tudományos célú alkalmazásának támogatásában is kiemelkedőek, hiszen oktatási és kutatási partnerekkel is szorosan együttműködnek, többek között múzeumokkal és egyetemekkel Európa-szerte. Ezzel a profiljukkal a céget a tudományos és restaurátori képzőkötés egyik progresszív európai szereplőjeként tartják számon.

6.5 Emlékeztető a következő táblázatokhoz

6.5.1 Analitikai pontosságú multispektrális képzőkötés

Az analitikai pontosságú multispektrális képzőkötés célja a műtárgy anyagainak, festékrétegeinek, kötőanyagainak és egyéb szerkezeti jellemzőinek tudományos igényű vizsgálata. Ennek érdekében a felvételek rögzítése szigorúan szabványosított környezetben, ellenőrzött fényforrások és kalibrált szűrők alkalmazásával történik. A hangsúly a teljes spektrum lehető legnagyobb lefedésén, a mérési paraméterek reprodukálhatóságán, valamint az adatok mennyiségi kiértékelhetőségén van. Az így előállított képek nem csupán vizuális dokumentumként szolgálnak, hanem spektrális adatbázisként is, amelyekből a pigmentek emissziós és reflexiós tulajdonságai, a rétegfelépítés és az esetleges beavatkozások azonosíthatók. Ez a megközelítés tehát nagy műszeres és időbeli ráfordítást igényel, viszont alkalmas a műtárgy anyaghasználatának mélyreható és megbízható vizsgálatára.

6.5.2 Állapotfelmérési célú multispektrális képalkotás

Az állapotfelmérési célú multispektrális képalkotás ezzel szemben a műtárgy aktuális állapotának gyors, konzisztens és vizuálisan jól értelmezhető dokumentálására szolgál. Elsősorban a felületi sérülések, repedések, szennyeződések, elszíneződések és korábbi restaurálások nyomon követése a feladata. Ilyen esetben elegendő lehet egyszerűbb kamera-rendszerek és szűrők alkalmazása, a spektrális tartomány szűkebb lefedésével, alacsonyabb dinamikatartomány mellett. Bár ezek a felvételek nem minden esetben alkalmasak pontos anyagazonosításra, a változások vizuális követéséhez és a restaurátori döntések megalapozásához nélkülözhetetlenek.

A fentiek értelmében került kialakításra kettő (7. és 8. táblázatok) némileg különböző táblázat.

4. táblázat - AIC GUIDE					
Felvételkészítési módok	Sugárforrások	Szűrők a fényforráson	Szenzor	Szűrők a kamerán	Referencia skála
REFLEXIÓS ELJÁRÁSOK					
látható fényes reflexiós képalkotás	izzólámpák (halogén), kvarchalogén, LED, elektronikus vaku, HID vagy HMI és fény-csővek	esetleg polarizációs szűrő vagy UV szűrő fólia	átalakított CMOS ²¹	Schott BG38 és cirkuláris polarizációs szűrő (ez utóbbi opcionális)	Image Science Associates (ISA) célok Calibrite ColorChecker Universal test target (UTT) Spydercube
infravörös-reflexiós képalkotás	izzólámpa (halogén)	-	átalakított CMOS	Kodak Wratten szűrők (pl.: 89B, 87C, 87A) vagy v. Schott RG830 v. B+W 093	Image Science Associates (ISA) targets Calibrite ColorChecker Universal test target (UTT) Spydercube
ultraibolya-reflexiós képalkotás	UVA vagy UVC sugárforrás (higanygőz, HID vagy HMI, fénycsővek, LED)	-	átalakított CMOS	Schott BG38 és Kodak Wratten 18A vagy B+W 403 opcionális: Baader Plan. UV Venus szűrő, PECA 900, B+W 403, Hoya U-330, MaxMax X-nite 330	Image Science Associates (ISA) targets Calibrite ColorChecker Universal test target (UTT) Spydercube
súrló és tükröződő fényes képalkotás	Halogén, LED, vaku	-	átalakított CMOS	-	-
LUMINESZCENS ELJÁRÁSOK					
látható fénnel gerjesztett IR lumineszcens képalkotás	elektronikus vaku, kamerába beépített vaku, száloptikás sugárforrás, LED	Corning 9780 ²²	átalakított CMOS	Kodak Wratten szűrők (eg.: 89B, 87C, 87A) Schott RG830 B+W 093	Image Science Associates (ISA) targets Calibrite ColorChecker Universal test target (UTT) Spydercube
ultraibolya sugárzással gerjesztett látható tartományú lumineszcens képalkotás	UVA vagy UVC sugárforrás (higanygőz, HID vagy HMI, fénycsővek, LED)	-	átalakított CMOS	Kodak Wratten 2E, B+W 021, PECA 918	Image Science Associates (ISA) targets Calibrite ColorChecker Universal test target (UTT) Spydercube
látható fénnel gerjesztett látható tartományú lumineszcens képalkotás	-	-	-	-	-
TRANSMISSZIÓS ELJÁRÁSOK					
látható fényes transzmissziós képalkotás	Halogén, LED, vaku	-	átalakított CMOS	Schott BG38 és cirkuláris polarizációs szűrő opcionális	-
infravörös transzmissziós képalkotás			átalakított CMOS	Kodak Wratten szűrők (pl.: 89B, 87C, 87A) Schott RG830 B+W 093	-
FALSE-COLOR ELJÁRÁSOK					
infravörös-reflexiós <i>false color</i> képek	mindkét esetben a már elkészült és utómunkán átesett látható és infravörös- vagy ultraibolya-reflexiós felvételek csatornáink a meghatározott módon való cseréjével				
ultraibolya-reflexiós <i>false color</i> képek					

²¹ CMOS – *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*

²² Egy speciális kavarcüveg mely elnyeli az infravörös sugarakat, de kimagasló transzmissziós tulajdonságokkal bír a látható tartományban. Forrás: Corning Incorporated. *HPFS® 7980 Fused Silica: Product Information*. Corning Advanced Optics, 2023. <https://www.corning.com/advancedoptics>

5. táblázat - CHARISMA User Manual					
Felvételkészítési módok	Sugárforrások	Szűrő(k) a fényforráson	Szenzor	Szűrők a kamerán	Referencia skála
REFLEXIÓS ELJÁRÁSOK					
látható fényes reflexiós képalkotás	látható/infravörös fény/sugárforrás (pl.: tungsten halogén, LED, Xenon vakuk)	nincs	általános vagy átalakított CMOS	látható sávszűrő (például Baader Planetarium IDAS_UIBAR ²³)	Calibrite ColorChecker®, Spectralon® diffúz referenciaskála
infravörös-reflexiós képalkotás	látható/infravörös fény/sugárforrás (pl.: tungsten halogén, LED, Xenon vakuk)	nincs	általános vagy átalakított CMOS	ultraibolya sugárzást és látható fényt blokkoló szűrő (pl.: Schott RG830)	Spectralon® diffúz referenciaskála
ultraibolya-reflexiós képalkotás	ultraibolya sugárforrás (pl.: wood lámpák ²⁴ , UV LED-ek)	infravörös sugárzást és látható fényt blokkoló szűrő (pl.: DUG11x)	általános vagy átalakított CMOS	ultraibolya sávszűrő (pl.: Schott DUG11x ²⁵)	Spectralon® diffúz referenciaskála
súrló és tükröződő fényes képalkotás ²⁶	-	-	-	-	-
LUMINESZCENS ELJÁRÁSOK					
látható fénnel gerjesztett IR lumineszcens képalkotás	látható fényforrás (pl.: LED fényforrások)	nincs	általános vagy átalakított CMOS	ultraibolya sugárzást és látható fényt blokkoló szűrő (pl.: Schott RG830)	Spectralon® diffúz referenciaskála
ultraibolya sugárzással gerjesztett látható tartományú lumineszcens képalkotás	ultraibolya sugárforrás (pl.: wood lámpák, UV LED-ek)	infravörös sugárzást és látható fényt blokkoló szűrő (pl.: DUG11x)	általános vagy átalakított CMOS	ultraibolya sugárzást blokkoló szűrő (pl.: Schott KV418 és IDAS_UIBAR)	Calibrite ColorChecker®, Spectralon® diffúz referenciaskála
Látható fénnel gerjesztett látható tartományú lumineszcens képalkotás	látható fényforrás (pl.: kék LED fényforrások)	nincs	általános vagy átalakított CMOS	kék látható fényt blokkoló szűrő (pl.: Lee No. 16 vagy 22), látható sávszűrő	Calibrite ColorChecker®, Spectralon® diffúz referenciaskála
TRANZMISSZIÓS ELJÁRÁSOK					
Látható fényes transzmissziós képalkotás	-	-	-	-	-
Infravörös transzmissziós képalkotás	-	-	-	-	-
FALSE COLOR ELJÁRÁSOK					
Infravörös-reflexiós <i>false color</i> képek	mindkét esetben a már elkészült és utómunkán átesett látható és infravörös- vagy ultraibolya-reflexiós felvételek csatornáink a meghatározott módon való cseréjével				
Ultraibolya-reflexiós <i>false color</i> képek					

²³ Az IDAS (*Imaging Denial of Atmospheric Scattering*), más néven UIBAR filter, egy UV-IR cut szűrő, melyet speciális fotózási technikákhoz fejlesztettek ki, különösen DSLR vagy modifikált kamerákhoz. Ma a Baader UV/IR-Cut / L-Filter – CMOS *optimized* néven található meg. https://www.baader-planetarium.com/en/baader-uv-ir-cut-l-filter-cmos-optimized.html?utm_source=chatgpt.com

²⁴ A Wood-lámpa egy hosszúhullámú ultraibolya (UV-A) sugárzást kibocsátó lámpa, amely általában kb. 320–400 nm között működik, leggyakrabban 365 nm-es csúccsal. Nevét Robert W. Wood fizikus után kapta, aki az UV-sugárzással és fluoreszcenciával kapcsolatos kutatásairól ismert. – chatgpt.com – 2025.06.16.

²⁵ A Schott UG1 és Schott UG11 szűrők speciális változata.

²⁶ A *CHARISMA User Manual* ezt a képalkotási módszert nem tárgyalja.

6. táblázat - PHASE ONE RAINBOW MSI (Multiband)					
Felvételkészítési módok	Sugárforrások	Szűrő(k) a fényforráson	Szenzor	Szűrők a kamerán	Referencia skála
REFLEXIÓS ELJÁRÁSOK					
látható fényes reflexiós képalkotás	dedolight® DLED7 daylight	Schott BG39	full spektrum CMOS	látható sávszűrő (Baader Planetarium IDAS_IUBAR)	Calibrite ColorChecker®, Spectralon® diffúz referenciaskála
infravörös-reflexiós képalkotás	dedolight® DLED7 IR 860	nincs	full spektrum CMOS	ultraibolya sugárzást és látható fényt blokkoló szűrő (Schott RG830)	Calibrite ColorChecker®, Spectralon® diffúz referenciaskála
ultraibolya-reflexiós képalkotás	dedolight® DLED7 UV365	Schott UG11	full spektrum CMOS	ultraibolya áteresztőszűrő (Schott UG1)	Calibrite ColorChecker®, Spectralon® diffúz referenciaskála
Súrló és tükröződő fényes képalkotás	-	-	-	-	-
LUMINESZCENS ELJÁRÁSOK					
ultraibolya sugárzással gerjesztett infravörös lumineszcens képalkotás	dedolight® DLED7 UV365	Schott UG11	full spektrum CMOS	ultraibolya sugárzást és látható fényt blokkoló szűrő (Schott RG830)	Calibrite ColorChecker®, Spectralon® diffúz referenciaskála
látható fénnel gerjesztett infravörös lumi- neszcens képalkotás	dedolight® DLED7 daylight	Schott BG39, Baader Planeta- rium	full spektrum CMOS	ultraibolya sugárzást és látható fényt blokkoló szűrő (Schott RG830)	Calibrite ColorChecker®, Spectralon® diffúz referenciaskála
ultraibolya sugárzással gerjesztett látható tar- tományú lumineszcens képalkotás	dedolight® DLED7 UV365	Schott UG11	full spektrum CMOS	ultraibolya áteresztőszűrő (Schott UG1)	Calibrite ColorChecker®, Spectralon® diffúz referenciaskála
látható fénnel gerjesztett látható tartományú lumineszcens képalkotás	-	-	-	-	-
TRANZMISSZIÓS ELJÁRÁSOK					
látható fényes transzmissziós képalkotás	-	-	-	-	-
infravörös transzmissziós képalkotás	-	-	-	-	-
<i>FALSE COLOR</i> ELJÁRÁSOK					
infravörös-reflexiós <i>false color</i> képek	mindkét esetben a már elkészült és utómunkán átesett látható- és infravörös- vagy ultraibolya-reflexiós felvételek csatornáink meghatározott módon való cseréjével				
ultraibolya-reflexiós <i>false color</i> képek					
Előzetes kalibrációk, beállítások (melyek ér- vényesítve vannak az automatikus utómunka során)	<i>focus and alligment</i> korrekció, <i>flat-field compensation</i> és fehéregyensúly beállítás, expozíció kompenzáció és korrigálja a <i>pigment-binder effect</i> -et is a tátható tartományú lumineszcens felvételek esetén				

7. táblázat - SAJÁT GYAKORLAT (analitikai set-up)					
Felvételkészítési módok	Sugárforrások	Szűrő(k) a fényforráson	Szenzor	Szűrők a kamerán	Referencia skála
REFLEXIÓS ELJÁRÁSOK					
látható fényes reflexiós képalkotás	dedolight® DLED7 daylight	Schott BG38 és Lee polárszűrő fólia	full spektrum CMOS (SONY)	látható sávszűrő (B+W 486 és B+W cirkuláris polarizációs szűrő)	Calibrite ColorChecker®, Spectralon® diffúz referenciaskála
infravörös-reflexiós képalkotás	dedolight® DLED7 IR 860	nincs	full spektrum CMOS (SONY)	ultraibolya sugárzást és látható fényt blokkoló szűrő (B+W 093)	Calibrite ColorChecker®, Spectralon® diffúz referenciaskála
ultraibolya-reflexiós képalkotás	dedolight® DLED7 UV365	Schott UG11	full spektrum CMOS (SONY)	ultraibolya áteresztőszűrő (B+W 403)	Calibrite ColorChecker®, Spectralon® diffúz referenciaskála
súrló és tükröződő fényes képalkotás	dedolight® DLED7 daylight	Schott BG38 és Lee polárszűrő fólia	full spektrum CMOS (SONY)	látható sávszűrő (B+W 486 és B+W cirkuláris polarizációs szűrő)	-
LUMINESZCENS ELJÁRÁSOK					
ultraibolya sugárzással gerjesztett IR lumineszcens képalkotás	dedolight® DLED7 UV365	Schott UG11	full spektrum CMOS (SONY)	ultraibolya sugárzást és látható fényt blokkoló szűrő (B+W 093)	Calibrite ColorChecker®, Spectralon® diffúz referenciaskála
láthatófénnyel gerjesztett IR lumineszcens képalkotás	dedolight® DLED7 daylight	Schott BG38	full spektrum CMOS (SONY)	ultraibolya sugárzást és látható fényt blokkoló szűrő (B+W 093)	Calibrite ColorChecker®, Spectralon® diffúz referenciaskála
ultraibolya sugárzással gerjesztett látható tartományú lumineszcens képalkotás	dedolight® DLED7 UV365	Schott UG11	full spektrum CMOS (SONY)	B+W 486 és B+W 021 sárga	Calibrite ColorChecker®, Spectralon® diffúz referenciaskála
Látható fénnyel gerjesztett látható tartományú lumineszcens képalkotás	kék LED fényforrás	-	full spektrum CMOS (SONY)	Kodak No. 12	Calibrite ColorChecker®, Spectralon® diffúz referenciaskála
TRANZMISSZIÓS ELJÁRÁSOK					
látható fényes transzmissziós képalkotás	dedolight® DLED7 daylight	-	full spektrum CMOS (SONY)	látható sávszűrő (B+W 486 és B+W cirkuláris polarizációs szűrő)	-
infravörös transzmissziós képalkotás	dedolight® DLED7 IR 860	-	full spektrum CMOS (SONY)	ultraibolya sugárzást és látható fényt blokkoló szűrő (B+W 093)	-
FALSE COLOR ELJÁRÁSOK					
infravörös-reflexiós <i>false color</i> képek	mindkét esetben a már elkészült és utómunkán átesett látható- és infravörös- vagy ultraibolya-reflexiós felvételek csatornáink meghatározott módon való cseréjével				
ultraibolya-reflexiós <i>false color</i> képek					

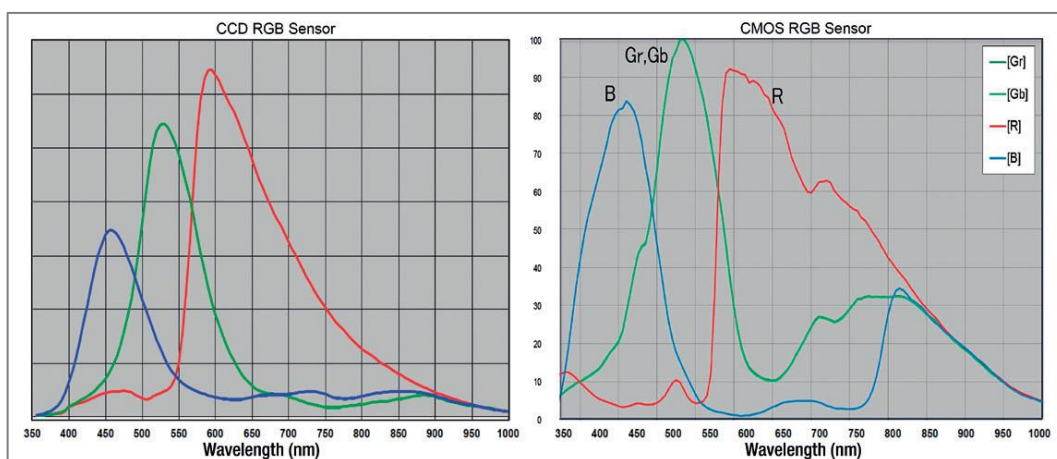
8. táblázat - SAJÁT GYAKORLAT (állapotfelmérő set-up)					
Felvételkészítési módok	Sugárforrások	Szűrő(k) a fényforráson	Szenzor	Szűrők a kamerán	Referencia skála
REFLEXIÓS ELJÁRÁSOK					
látható fényes reflexiós képalkotás	egyszerű halogén vagy LED fényforrás	Lee polárszűrő fólia	általános CMOS	B+W cirkuláris polárszűrő	Calibrite ColorChecker®
infravörös reflexiós képalkotás	egyszerű halogén sugárforrás	nincs	full spektrum CMOS	ultraibolya sugárzást és látható fényt blokkoló szűrő (B+W 093)	Calibrite ColorChecker®
ultraibolya-reflexiós képalkotás	ultraibolya sugárforrás (pl.: kis- vagy nagy-nyomású higanygőz lámpák, UV fénycsővek vagy vakuk, UV LED-ek)	nincs	full spektrum CMOS	ultraibolya áteresztőszűrő (B+W 403)	Calibrite ColorChecker®
súrló és tükröződő fényes képalkotás	egyszerű halogén vagy LED fényforrás	Lee polárszűrő fólia	általános CMOS		-
LUMINESZCENS ELJÁRÁSOK					
ultraibolya sugárzással gerjesztett IR lumineszcens képalkotás	ultraibolya sugárforrás (pl.: kis- vagy nagy-nyomású higanygőz lámpák, UV fénycsővek vagy vakuk, UV LED-ek)	nincs	full spektrum CMOS	ultraibolya sugárzást és látható fényt blokkoló szűrő (B+W 093)	Calibrite ColorChecker®
látható fénnel gerjesztett IR lumineszcens képalkotás	-	-	-	-	-
ultraibolya sugárzással gerjesztett látható tartományú lumineszcens képalkotás	ultraibolya sugárforrás (pl.: kis- vagy nagy-nyomású higanygőz lámpák, UV fénycsővek vagy vakuk, UV LED-ek)	nincs	általános CMOS (SONY)	B+W UV szűrő és B+W 021 sárga szűrő	Calibrite ColorChecker®
látható fénnel gerjesztett látható tartományú lumineszcens képalkotás	-	-	-	-	-
TRANZMISSZIÓS ELJÁRÁSOK					
látható fényes transzmissziós képalkotás	egyszerű halogén vagy LED fényforrás	-	általános CMOS (SONY)	B+W cirkuláris polárszűrő	-
infravörös-transzmissziós képalkotás	egyszerű halogén vagy LED fényforrás	-	full spektrum CMOS (SONY)	ultraibolya sugárzást és látható fényt blokkoló szűrő (B+W 093)	-
FALSE COLOR ELJÁRÁSOK					
infravörös-reflexiós <i>false color</i> képek	mindkét esetben a már elkészült és utómunkán átesett látható- és infravörös- vagy ultraibolya-reflexiós felvételek csatornáink meghatározott módon való cseréjével				
ultraibolya-reflexiós <i>false color</i> képek					

7 A PHASE ONE RAINBOW MSI RENDSZER BEMUTATÁSA

7.1 A multispektrális képalkotás technikai alakulása

A többsávós képalkotás kifejezést a technikai, digitális képalkotás sajátos alkalmazásaként használják, ami a már említett, 2013-ban megjelent *CHARISMA User Manual* kiadványban leírt szabványokból következik, itt különbséget teszünk, a többsávós (keskeny sávú) képalkotás (*Narrowband*) és a multispektrális képalkotás (*Multiband*) között, amely-e helyett több keskeny sávú szűrőt használ a spektrális képek előállításához (*Multiband and Narrowband imaging*).

Az analóg technikai fotózás valahol 1970 körül kezdődött. A filmanyagok lehetővé tették az ultraibolya, látható és infravörös képek analóg rögzítését, valamint az infravörös-reflexiós *false color* képszerkesztést. A képek digitális rögzítése az 1990-es években indult el és pontosította a többsávós képalkotást, mivel minden paraméter szabályozhatóvá és gyorsan optimalizálhatóvá vált. A komplementer fém-oxid (CMOS) érzékelők legújabb generációja jobb érzékenységének és a LED-es fényforrások elérhetőségének köszönhetően immár lehetőség nyílik a térbeli felbontás szempontjából is jobb minőségű digitális képek rögzítésére, akár 150 megapixeles (Phase One Rainbow MSI) digitális képek formájában, javított jel-zaj aránnyal és spektrális felbontással (5. ábra).



5. ábra - A CCD-érzékelő (bal oldali panel) és a CMOS-érzékelő (jobb panel) relatív érzékenysége és spektrális felbontása. Forrás: *CHARISMA User Manual*

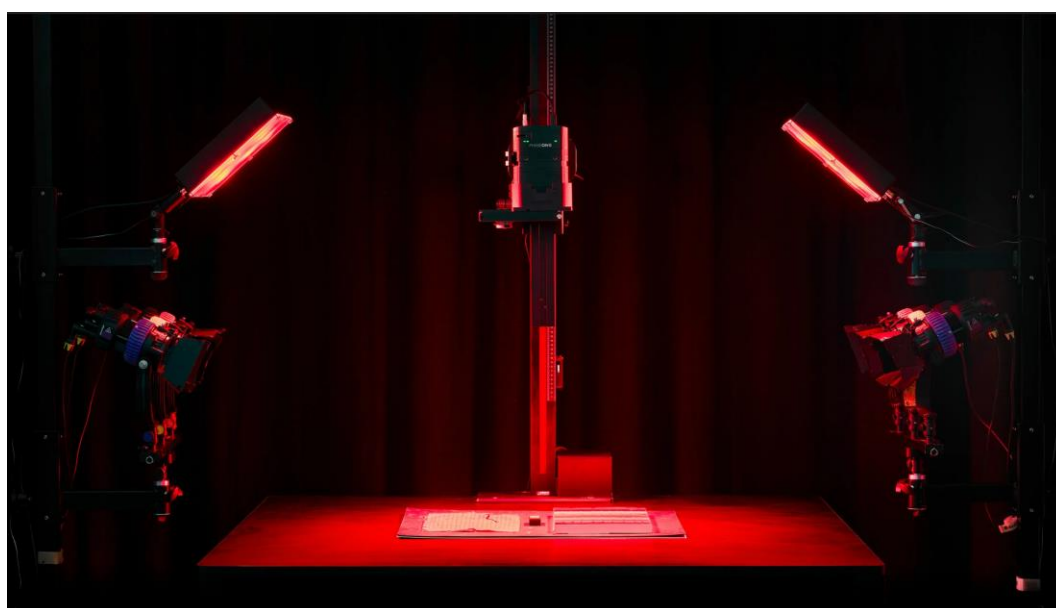
Különféle mérföldkövek figyelhetők meg a többsávós képalkotás fejlesztésében és alkalmazásában a restaurátori vizsgálatok technikai fényképezésében: 2005-ben egy hamisszínes ultraibolya reflexiós módszert fejlesztettek ki, majd 2007-ben az egyiptomi kéket látható fénnel indukált infravörös lumineszcenciával is azonosították. A széles

körben használt *CHARISMA User Manual* dokumentum 2013-ban jelent meg, majd ezt 2015-ben a Getty Conservation Institute *Organic Materials in Wall Painting Project*²⁷ megjelenése követte. 2017-től pedig a látható tartományú lumineszcenciával kapcsolatos kutatások sora jelent meg.

7.2 A rendszer felépítése

7.2.1 Phase One Rainbow MSI rendszer részletes bemutatása

A Phase One Rainbow Multispectral Imaging Solution rendszer egy nagy felbontású, automatizált, multispektrális képalkotó megoldás, amelyet kifejezetten műtárgykutatásra, restaurálási dokumentációra, tudományos célú vizsgálatokra és kriminalisztikai alkalmazásokra fejlesztettek ki. A rendszer moduláris felépítésű, és lehetővé teszi a spektrum ultraibolyától az infravörös tartományig terjedő, több széles- és keskenysávú képalkotást, nem invazív módon, színhelyesen és reprodukálható paraméterekkel.



6. ábra – A Phase One Rainbow MSI rendszere. Forrás: <https://www.phaseone.com/solutions/heritage-solutions/complete-solutions/multispectral-imaging/>

7.2.2 Kamera hátfal és objektívek

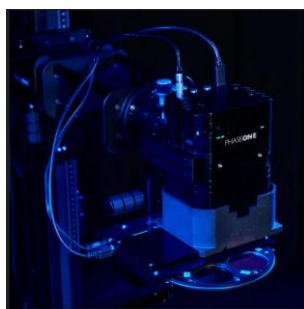
A rendszer központi eleme egy nagy érzékenységű, széles spektrumban működő digitális hátfal, amely jellemzően a Phase One iXG 100 MP vagy az iXH 150 MP *Wide Spectrum*

²⁷ Francesca Piqué and Giovanni Verri, eds., *Organic Materials in Wall Paintings: Project Report* (Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2015). Elérhető PDF-formátumban a Getty weboldaláról: https://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/omwp_report.pdf?utm_source=chatgpt.com

CMOS érzékelővel van felszerelve. Ezek a hátfalak 14 vagy 16 bites RAW formátumban rögzítenek, és kivételes részletgazdagságot nyújtanak. Érzékenységi tartományuk 200-1000 nanométer közé tehető. A kamerákhoz Schneider Kreuznach RS objektívek csatlakoztathatók – jellemzően 72 vagy 120 milliméteres változatban –, melyek cserélhető UV/IR-cut szűrőkkel és beépített PPI-mérővel rendelkeznek. A rendszer zárszerkezete szárnyas (*leaf shutter*) típusú, amely akár egymillió expozícióra is képes, emellett a hátfal elektronikus zár beállítással is működtethető.



7. ábra – a hátfal és az objektív. Forrás: <https://www.phaseone.com/solutions/heritage-solutions/complete-solutions/multispectral-imaging/>



8. ábra - a kamera a szűrőtárcsával. Forrás: <https://www.phaseone.com/solutions/heritage-solutions/complete-solutions/multispectral-imaging/>



9. ábra - fény- és sugárforrások. Forrás: <https://www.phaseone.com/solutions/heritage-solutions/complete-solutions/multispectral-imaging/>

7.2.3 Szűrőtárcsa és a szűrők

A multispektrális képalkotásban kulcsszerepet játszik a szűrőkerék, amely USB-vezérlésű, és legalább öt pozíciót kínál különböző szűrők elhelyezésére. A rendszer szűrői között megtalálható például a Schott UG1 látható fényt blokkoló ultraibolya szűrő, a Schott BG38 és BG39 típusú UV-IR-cut szűrők, valamint az Schott RG830 jelű infravörös long-pass szűrő. Ezeket kiegészítheti a Baader UV/IR Cut-L szűrő, amely gyakori az asztrofotózásban is. A rendszer kialakítása lehetővé teszi bármilyen 2 collos optikai szűrő elhelyezését a kerékben, így kellően rugalmas a kutatási célokhoz való igazításhoz.

7.2.4 Fény- és sugárforrások

A megvilágításról kétféle professzionális LED-es világítómodul gondoskodik. A multi-band dedolight® rendszer hat LED-et tartalmaz: két UV (365 nanométer), két látható fényű és két közeli infravörös (választható 860 és 960 nanométer) LED-del felszerelt világítási konfigurációban. Ennél jóval specifikusabb megközelítést kínál a narrowband Eu-

rekaLight modul, amely 16 különálló, keskenysávú LED-del rendelkezik, 365–940 nanométer közötti hullámhosszokon. Ez utóbbi különösen ideális spektrális anyagazonosításhoz és spektrálisan szelektív elemzésekhez. Mindkét világítási rendszer vezérelhető a Rainbow MSI szoftveren keresztül, és szükség esetén a multiband lámpaszett optikai szűrővel, például Schott UG11, és Schott BG38 egészíthető ki.

7.2.5 A szoftver

A Rainbow MSI rendszer központi vezérlőfelülete a Phase One által fejlesztett Rainbow szoftver, amely teljes mértékben automatizálja a képalkotás folyamatát. A szoftver egyetlen kattintással képes összehangolni a kamera, a szűrőkerék és a világítás működését, miközben biztosítja a szükséges expozíciós beállításokat, a fókuszkalibrálást, az expozíciós kiegyenlítést, valamint az az előkészített felvételeket, a *stack*-et. A rendszer kompatibilis a CHARMISA User Manual, *Metamorfoze*, *FADGI* és *ISO 19264* szabványokkal, így lehetőséget nyújt a legmagasabb szintű örökségvédelmi dokumentációs eljárások követésére is.

A szoftverrel készített képek feldolgozása több szinten történhet. A multiband módban készült felvételek jellemzően RGB + UV + IR csatornákból álló TIFF fájlok, amelyek tartalmazzák a gyakori reflexiós és lumineszcens felvételeket is (8 sáv). Narrowband módban 16 különálló monokromatikus kép keletkezik, amelyekkel statisztikai feldolgozás és spektrális elemzés végezhető. A beépített analitikai eszköztár lehetővé teszi többek között a PCA (főkomponens-analízis), ICA (független komponens-analízis) vagy K-means klaszterezési eljárások alkalmazását, továbbá spektrális leolvasás is elvégezhető egy-egy pont vagy régió alapján.

A képek exportálására TIFF és RAW formátum is rendelkezésre áll, és az adatok egyszerűen integrálhatók külső analitikai platformokba, mint például az *ENVI*, *ImageJ*, *Matlab* vagy *Paleo Toolbox*. A szoftver export menüje kifejezetten támogatja a narrowband *stack*-ek tudományos célú további feldolgozását.

7.3 Összefoglalás

A Phase One Rainbow MSI rendszert számos intézmény használja műtárgyvizsgálatra és örökségvédelmi dokumentáció elkészítésére. Ismert alkalmazási példa egy Brueghel-festmény infravörös reflexiós felvétele, ahol a felirat és a készítési évszám az infravörös felvételen vált láthatóvá. Más kutatásokban kéziratok és dokumentumok nehezen olvasható

szövegeit rekonstruálták UV–IR felvételek segítségével. Kriminálisztikai környezetben például lövedéknyomokat vagy testlenyomatokat lehet azonosítani fotó-indukált infravörös lumineszcencia alapján.

A rendszer egy teljes, előkonfigurált csomagként is elérhető, amely tartalmazza a kamerát, szűrőkereket, állványozott LED-világítást, USB-vezérlőt, valamint egy nagy teljesítményű számítógépet (jellemzően Dell Precision i9 CPU-val, 64 GB RAM-mal és 1 TB SSD-vel). A Phase One 3 év garanciát és dedikált technikai támogatást biztosít, valamint szakmai tréningeket, helyszíni beüzemelést és rendszeres frissítéseket is nyújt.

Összességében a Rainbow rendszer egy integrált, nagy precizitású multispektrális képalkotó megoldás, amely képes a látható, az ultraibolya és az infravörös tartományban végzett vizsgálatok teljes körű lefedésére. Automatizált működésével és szabványkövető architektúrájával ideális választás a restauratori, múzeumi vagy tudományos célú dokumentáció és elemzés számára.

8 KÉPKALIBRÁLÁS ÉS REFERENCIA SKÁLÁK²⁸

A szűrők és a lencsék visszaverési és átengedési viselkedésének, a kamera érzékelője spektrális érzékenységének és a megvilágítás emissziós spektrumának ismerete központi szerepet játszik a többsávós képalkotásban. A képellenőrzés és a reprodukálhatóság érdekében szabványos feldolgozást kell végezni, megfelelő reflektancia és lumineszcencia skálákat használva. A képrögzítéshez szükséges teljes készletre tett nemzetközi és gyakorlati tapasztalatból származó javaslatokat az következő fejezetek mutatják be. Az alábbiakban a referenciaskálák röviden, típusonként kerülnek tárgyalásra.

8.1 A referencia skálák feladatai

A felvételek ellenőrzéséhez és megfelelő kalibrálásához szükség van ellenőrző, referencia skálákra. Ezeknek a skáláknak képesnek kell lenniük e három különböző feladat elvégzésére:

- a lumineszcencia felvételek szempontjából különösen kritikus berendezések (kamera, fényforrások, szűrők) teljesítményének ellenőrzésére és optimalizálására
- összehasonlíthatóság referencia anyagokkal, például pigmentekkel és kötőanyagokkal
- a képek kalibrálása (a reprodukálhatóság biztosítása érdekében)

A skáláknak tehát alkalmasak kell lenniük a reflexió, az abszorpció, a lumineszcencia és az transzmisszió vizsgálatára. A következőkben a felhasznált anyagok és a kidolgozott kombinációk kerülnek bemutatásra a különböző képalkotási eljárásokkal kapcsolatosan.

8.2 Reflexió és lumineszcencia skálák

8.2.1 Reflexió *standard*

A reflexiót optikai poli-tetrafluor-etilén (PTFE) alapú standardokkal lehet ellenőrizni. Ezek a PTFE optikai szemcsékből készült skálák különböző visszaverőképességgel (2-99% visszaverés a 200-2500 nanométer tartományban) rendelkeznek a szén különböző

²⁸ Annette T. Keller, Roland Lenz, Alessia Artesani, Sara Mosca, Daniela Comelli, and Austin Nevin, „Exploring the Ultraviolet Induced Infrared Luminescence of Titanium White Pigments,” in *UV-Vis Luminescence Imaging Techniques*, ed. Marcello Picollo, Maartje Stols-Witlox, and Laura Fuster-López (Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València, 2019), 201–232.

koncentrációjának hozzáadása alapján. Reflexiójuk a Lambert-törvényt²⁹ követi, ezért a fény különböző beesési szögben is észlelhető. Segítségükkel lehetőség van reflexiós felvételek, valamint a digitálisan (utómunkával) előállított ultraibolya *false color* (UvRFC) és infravörös *false color* (IrRFC) képek reflexiós értékeinek a becslésére.



10. ábra – A Labsphere Spectralon® referenciája. Forrás: www.labsphere.com



11. ábra - A Labsphere Spectralon® egy szürke referenciája – www.labsphere.com



12. ábra – A Labsphere Spectralon® referenciája – www.labsphere.com

8.2.2 A 100%-os fényvisszaverő gömb

A 100%-os reflexiós mező egy csiszolt tükörgömbből áll, amely lefedi egy *full spectrum* kamera érzékenységeinek a teljes tartományát (kb.: 200 – 1150 nanométer). Minden reflexiós felvételnél dokumentálható a lámpák helyzete, de a nem kívánt szórt fény forrása is.

A közel 100%-os abszorpció érdekében gyakran fénycsapdát is használnak. Ügyelni kell arra, hogy az abszorpció a kamera teljes érzékenységi spektrumára kiterjedjen. A 100%-os abszorpció megközelítő méréshez a 2%-os visszaverésű PTFE nem alkalmas. A diffúz reflexió értékelésére (100%-os visszaverődés és a 100%-os abszorpció), a kutatók előnyben részesítik az egyedi referencia eszközöket, melyek szükség szerint bárhol elhelyezhetők a felvételen. A Datacolor kereskedelmi forgalomban kapható Spyder cube terméke³⁰ hasonló feladatot lát el, de nem tartalmaz egyben jól definiált optikai PTFE skálát és kis reflexiós félgömböt.

²⁹ A Lambert–Beer-törvény (nevezik Bouguer–Lambert–Beer-törvénynek is, de az irodalomban megtalálható a három név szinte minden variációja) egy optikai tapasztalati összefüggés, amely a fény abszorpciója és azon közeg tulajdonságai között teremt kapcsolatot, melyben a fény terjed. A törvény szerint exponenciális összefüggés van a T transzmitancia (az anyagon áteső fény hányada) illetve az anyag α abszorpciós együtthatójának és a fény által az anyagban megtett l távolságnak (a fényút hosszának) a szorzata között. Az abszorpciós együttható felírható az elnyelő közeg ϵ moláris abszorpciós együtthatójának és az abszorbeáló részecskék c koncentrációjának szorzataként, vagy mint az abszorbens σ abszorpciós keresztmetszetének és N (szemcse) sűrűségének szorzata. (<https://hu.wikipedia.org/wiki/Lambert%E2%80%93Beer-t%C3%B6rv%C3%A9ny> – 2022.10.06)

³⁰ <https://www.datacolor.com/spyder/products/spyder-cube/>

Az UVVL és IRL felvételek tisztán fizikai alapon történő kalibrálása továbbra is kihívást jelent. Ahhoz, hogy kép színekalibrálásánál referencia skálát használhassunk, pontos ismeretekre van szükségünk a kamera előtti blokkoló szűrő spektrális áteresztéséről, valamint a lámpa spektrális kibocsátásáról. A nem lumineszcens felületekről visszaverődő gerjesztő sugárzásnak nem szabad áthaladnia a kameraoldali szűrőn, csak lumineszcencia juthat át rajta. Ez ellenőrizhető a 100%-ban visszaverő gömb segítségével. A gerjesztő sugarforrásnak a gömbön lévő visszaverődése nem lehet látható a képen. Ilyen speciális esetekben, mint a lumineszcens felvételek szükség lehet egyedileg készített referencia standardokat tartalmazó céltárgyak elkészítésére. Erre egy jó példa (13. ábra) egy tanulmányban (Annette Keller et al .2019) bemutatott egyedi eszköz.



13. ábra - Az említett egyedi referencia skála és elrendezése. 1-5: diffúz reflexió 2-99%-os PTFE felületei, 6: 100%-os elnyelő felület fénycsapdával, 7: 100% reflexiós felület, polírozott félgömb, 8: lumineszcens felület, lumineszkáló fehér pigment bevonat. A skálát Roland Lenz, ABK Stuttgart készítette.

Forrás: (Annette T. Keller 2019)

8.2.3 Digitális színillesztés a lumineszcens felvételek esetén

Az egyes készülékkomponensek (kameraszűrő és szűrővel ellátott lámpák) optimalizálása után át lehet lépni a UVVL felvételek digitális színillesztésére. A színillesztés a digitális fehéregyensúly segítségével történik a legvilágosabb PTFE mezőn (99%). A relatív fényerő beállításához lumineszcens pigmentek is használhatók

Napjainkban léteznek kereskedelmi forgalomban kapható referencia skálák a fehéregyensúly beállítására, valamint a fényerő kalibrálására, a különböző nem fluoreszkáló és fluoreszcens pigmentek keverékével (*UV Innovations™ ~ Ultraviolet Photography Color Standards for Visible Fluorescence*, www.uvinnovations.com – a 9. fejezet részletezi). A kutatók nagy része azonban előnyben részesíti a fent leírt, egy anyagon alapuló, diffúz reflexiójú és fényességű kalibrációs módszert a vegyes anyagú skálák helyett, mivel az előbbi kalibrációs módszer lehetővé teszi a vizsgált felület fizikai tulajdonságainak vizsgálatát.

Infravörös lumineszcens felvételek készítésekor a színekorrektúra kimarad, mivel a képek szürkeárnyalatban jelennek meg. Mindazonáltal felmerül a kérdés, hogy milyen

fényerőre kalibrálható a releváns és elhanyagolható jelek megkülönböztetése érdekében. A nem fluoreszkáló PTFE mezők alkalmazása csak akkor lehetséges, ha a lámpa és a kameraszűrő kiválasztása kizárja a gerjesztő sugárzást. Emiatt további mezőkre van szükség.

Erre a célra az előre, alapos gondossággal kiválasztott pigmentekkel ellátott egyedi mezőket használnak, amelyek a szokásos vezérlőfelületekhez hasonlóan integrálhatók a felvételbe. Az ebben a részben bemutatott pigmentmezőket az ABK Stuttgartban gyártottrák egyedi gyártásban. Az VIrL esetében ezek az egyiptomi kék, a kadmium vörös és a kadmium sárga. Az UvIrL esetében szintén az egyiptomi kék, kadmium vörös és sárga, valamint titán-dioxid (rutil változat, bevonat nélkül, szulfátos eljárás). Ellentétben más adatbázisokkal, amelyek csak a kísérlet után és a felvételtől elkülönítve teszik lehetővé a korrelációt, amennyiben a képek azonos környezeti paraméterekkel készültek (14. ábra).



14. ábra - xy. ábra - Egyiptomi kék pigmentminta, balról jobbra Vis-R_Vis, Ir_R_Ir, IrFC_Uv-R_Uv₃₆₅, UvFC, Ir-L_Vis és Ir-L_Uv₃₆₅ - (Annette T. Keller 2019)

A festékrétegek fényáteresztése kritikus szerepet játszik a képalkotásban. A festmények és a felületi bevonatok vizsgálatánál a gerjesztő sugárzás gyakran áthatol a festékrétegen, és visszaverődik az alatta lévő rétegről vagy az alapozóról. A lumineszcencia értékelése során fontos figyelembe venni az alsóbb rétegek visszaverő képességét. Valójában ugyanaz a pigment különböző alapozásra felhordva eltérő lumineszcenciát mutathat, a festékréteg vastagságától függően. Különösen az UV áteresztő képességű pigmentekkel készült (például az ultramarin és az titán-dioxid anatáz változata) vékony festékrétegek esetében az alsó réteg játszik fontos szerepet a lumineszcencia kialakításában. Ez a szempont különösen lényeges a lumineszcens jelenségek értelmezése során, valamint a festékrétegek egymásra épülő sorozata által generált lumineszcencia összehasonlító elemzésekor. Fontos figyelembe venni, hogy a festmények rétegszerkezete a gyakorlatban ritkán áll egységes, tiszta pigmentekből; sokkal gyakoribbak a pigmentkeverékek, illetve a

töltőanyagokat is tartalmazó változatok. Mindezeken túlmenően a kötőanyagok saját lumineszcenciás viselkedése jelentős mértékben befolyásolhatja a detektált emisszió értelmezhetőségét és a felvételek kiértékelhetőségét.

A pigment skálák használata nem új találmány, és néhány már megvásárolható (például a Pigment Checker a www.chsopensource.org weboldalon vagy a Phase One cég saját referencia skálája). A skálák a többsávós felvételekhez való felvételére vonatkozó ajánlások ellenére továbbra is sok skála nélküli felvételt tesznek közzé, ami gátolja a kalibrálhatóságot és súlyosan korlátozza a felvételek összehasonlítható célú felhasználhatóságát. Ahogy fent említésre került, a szubsztrátum és a megfelelő kötőanyag fontos szerepet játszik – különösen a lumineszcencia értékelésében.

A bemutatott pigment skálák a következők szerint készültek: kalcium-karbonát őrlemény, Tylose MH 300 5%-os vizes oldata és kis mennyiségű tiszta akril diszperzióban (K9) kötve; fekete vonal szénfekete pigment, Tylose 300 5%-os vizes oldata és kis mennyiségű tiszta akril diszperzióban (K9) kötve és a festett pigment mezők, Tylose MH 33 5%-os vizes oldatával: fedő 1:4 arányban, transzparens 3:4 arányban.

A pigmentcélok felhasználása a felvételkészítésben hatékony módja annak, hogy a kalibrációs információk közvetlenül kapcsolódjanak a felvételekhez. Az IRL-felvételek kalibrálásához a referencia skálák alkalmazása elengedhetetlen, mivel nélkülük nem biztosítható a nyomon követhető és reprodukálható kalibrálás. A céltárgyak a képen rögzíthető Lab (L^* a^* b^*) színértékek dokumentálására is alkalmasak, ami a gyenge jelek tisztább elkülönítését és értelmezését támogatja. A jövőbeni kutatásokban a céltárgyakon alkalmazott pigmentek szélesebb választékának tesztelése, valamint a többsávós képalkotás kiterjesztése további keskeny sávú gerjesztésekre (pl. B (kék) $\rightarrow$ 430 nm, G (zöld) $\rightarrow$ 580 nm, R (vörös) $\rightarrow$ 630 nm) indokolt.

8.3 Színkalibrációs skálák és azok használata normálfényes felvételek esetén³¹

8.3.1 Szürkeárnyaltos és színes céltáblák

A restaurátori dokumentációk felvételein érdemes szürkeárnyaltos és – ha lehetséges – színes céltáblát is elhelyezni. A céltáblák technikai metaadatként működnek azáltal, hogy ismert RGB értékeket biztosítanak a képen belül. Emellett vizuális referenciaértéket is nyújtanak a néző számára. Bár gyakran előfordul, hogy a céltáblákat levágják a képekről

³¹ Warda, *The AIC Guide*, 2017.

prezentációkhoz vagy terjesztéshez, a mesterfájlban vagy a konzerválási nyilvántartásban meg kell őrizni ezt a fontos referenciát a kép keretén belül.

A szabványosított szürkeárnyalatos céltáblák az expozíció és a fehéregyensúly ellenőrzésére szolgálnak, mivel a foltoknak ismert RGB értékei vannak (egy adott szintérhez viszonyítva). Emellett könnyen ellenőrizhető, hogy a fehéregyensúly konzisztens-e egy kezelési fényképsorozatban, ha megnézzük egy szürke folt semlegességét a felvételen.

Ha nem kromatikus műtárgyakat (például ezüst-zselatin nyomatokat) fényképezünk, a céltábla színfoltjainak szerepeltetése segíthet vizuális támpontként a néző számára, hogy a kép színes. A szabványosított színes céltáblák használhatók bizonyos nagyon szigorúan ellenőrzött munkafolyamatokban a nagyobb színhelyesség elérése érdekében, például kameraprofilok létrehozásakor.

Az alábbiakban bemutatott céltáblák közül néhány elég kicsi ahhoz, hogy a képen belül használható legyen, valamint profilok létrehozásához is alkalmas; mások nagyobb méretűek, és úgy tervezték őket, hogy kitöltsék az egész képkeretet.

Minden céltáblát tisztán kell tartani, és amikor nincs használatban, fénytől védett helyen szükséges tárolni. Javasolt pl.: mágnesek használata vagy más nem állandó rögzítési rendszeré, hogy a céltáblát könnyen el lehessen távolítani és sötét helyen tárolni, amikor nincs használatban. A céltábla foltjait megérintését kerülni kell. A céltáblák cseréje indokolt, ha szennyezettek vagy kopottak lesznek.

8.3.2 Céltábla RGB és Lab értékek és a szinterek

A céltáblákhoz megadott RGB értékek mindig egy adott szintértől függenek. Az alábbiakban szereplő RGB értékek mind az Adobe RGB (1998) szintér³² alapján vannak meghatározva. Más szinterek használata esetén, például ProPhoto RGB-t, ezek az értékek eltérhetnek.

Sok gyártó az Lab ($L^*a^*b^*$)³³ értékeket adja meg a céltábláihoz az RGB értékek helyett vagy azok mellett. A munkafolyamatban használt szintér RGB értékei az Lab ér-

³² A szintér egy matematikailag definiált modell, amely a színek numerikus leírására és reprezentációjára szolgál. Segítségével a színek mérhetően és reprodukálhatóan jeleníthetők meg különböző eszközökön (például monitoron, nyomtatón, kamerán). Példák: RGB, CMYK, CIE $L^*a^*b^*$. Forrás: https://en.wikipedia.org/wiki/Color_space 2025.08.22.

³³ Az $L^*a^*b^*$ (vagy CIE $L^*a^*b^*$) szintér a Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság (CIE) által 1976-ban bevezetett színleíró rendszer, amely az emberi színérzékelést közelíti. Három koordinátával írja le a színeket: L^* a világosságot jelöli (0 = fekete, 100 = fehér), a^* a vörös–zöld tengelyt (pozitív érték = vörös, negatív = zöld), b^* a sárga–kék tengelyt (pozitív érték = sárga, negatív = kék). A rendszer előnye, hogy közel egyenlő színingereket közel egyenlő távolságban

tékekből is meghatározhatók olyan kalkulátorok segítségével, mint például *Bruce Lindbloom "CIE Color Calculator"* eszköze, amely elérhető a következő címen: <http://www.brucelindbloom.com> (2025.08.06.)

A céltáblák RGB értékei attól függenek, hogy melyik színtérben kerültek meghatározásra. A leggyakrabban használt színterek a sRGB, az Adobe RGB (1998) és a ProPhoto RGB. Mivel a színtér határozza meg az RGB értékek jelentését, fontos, hogy a céltáblán feltüntetett RGB értékekhez a megfelelő színtér is tartozzon.

Fontos szempontok a céltábla RGB értékeinek kiválasztásakor:

- Az RGB értékek és a színtér mindig együtt legyenek megadva, mivel ugyanazok az RGB számok különböző színterekben eltérő színeket eredményezhetnek.
- Az Adobe RGB (1998) színtér szélesebb színtartománnyal rendelkezik, mint az sRGB, ezért professzionális fotódokumentáció esetén előnyösebb lehet.
- Az sRGB színtér alkalmasabb a webes és általános megjelenítésre.
- A ProPhoto RGB színtér még szélesebb tartományt fed le, de csak olyan munkafolyamatokban ajánlott, ahol a színkezelés teljes mértékben biztosított.

8.3.3 RGB értékek és szürkeárnyalatok

A nem kromatikus (fekete, fehér, szürke) foltok esetében az R, G és B értékek azonosak kell, hogy legyenek az adott színtéren belül: fekete: (0, 0, 0); semleges szürke (középszürke): (128, 128, 128); fehér: (255, 255, 255). Színcélok (példa az sRGB színtérben): vörös: (255, 0, 0); zöld: (0, 255, 0); kék: (0, 0, 255); sárga: (255, 255, 0); cián: (0, 255, 255) és bíbor: (255, 0, 255).

A céltáblákon szereplő RGB értékeket mindig a gyártó határozza meg, és ezek az értékek ideálisan a céltáblán vagy a kísérő dokumentációban vannak feltüntetve, hogy a későbbi felhasználók is pontosan tudják, milyen színmegjelenést kell elérniük.

8.4 Calibrite ColorChecker® Classic

Ez a céltábla előnyös választás, mivel megfelel a fentiekben ismertetett specifikációknak, és széles körben használják a professzionális fényképészek. Fontos azonban megjegyezni, hogy a ColorChecker® fehér foltja nem teljesen semleges. A teljes méretű ColorChecker® Classic mérete 8,25 x 11 hüvelyk (20,9 x 27,9 cm) (15. ábra). 2011-től az

ábrázol, így alkalmas a színkülönbségek számszerű összehasonlítására és dokumentálására. Forrás: https://en.wikipedia.org/wiki/Color_solid 2025.08.22.

X-Rite megszüntette a ColorChecker® Mini (16. ábra) gyártását (2,25 x 3,25 hüvelyk, azaz 5,7 x 8,2 cm), amely most a ColorChecker® Passport része (17. ábra). A teljes méretű táblázat nagyobb műtárgyakhoz ajánlott, míg a mini táblázat közeli fényképezéshez vagy kisebb művekhez használható.



15. ábra - Calibrite ColorChecker® Classic (korábban a Gretag Macbeth és X-rite gyártotta) - <https://calibrite.com/us/>



16. ábra - Calibrite ColorChecker® Mini (korábban a Gretag Macbeth és X-rite gyártotta) - <https://calibrite.com/us/>

8.5 Calibrite ColorChecker® Passport

A ColorChecker® Passport (17. ábra) tartalmazza a megszüntetett Mini ColorChecker® egy változatát, azonban most egy kemény műanyag tokban található, amely további foltokat is tartalmaz, például egy *Photo Enhancement* készletet és kétnagyobb foltot a fényképezőgépen belüli fehéregyensúly beállításához. Ez nem feltétlenül az a típusú céltábla, amelyet közvetlenül a fényképeken helyeznénk el a műanyag tok miatt, de használható a mellékelt profilkészítő szoftverrel, vagy a RAW képek fehéregyensúlyának beállításához.



17. ábra - Az Calibrite ColorChecker® Passport tartalmazza a szokásos ColorChecker® foltokat, valamint egy Photo Enhancement foltkészletet és két nagyobb fehéregyensúly mezőt egy kemény műanyag tokban. Forrás: <https://calibrite.com/us/>



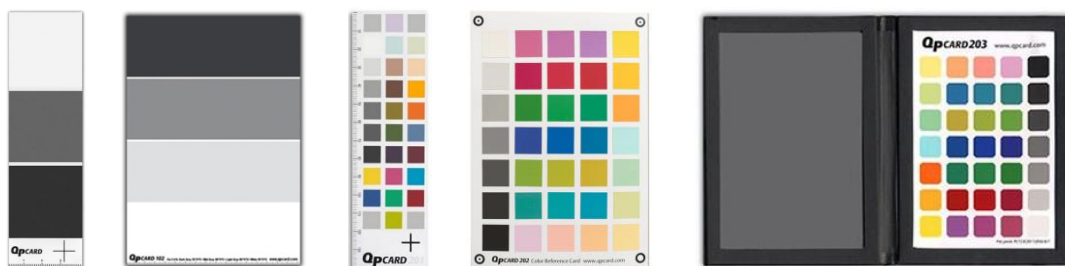
18. ábra - Calibrite ColorChecker® Digital SG (korábban a Gretag Macbeth és az X-rite gyártotta). Forrás: <https://calibrite.com/us/>

8.6 Calibrite ColorChecker® Digital SG

Ez egy nagyobb méretű céltábla, amelyet elsősorban kamera profilozásra terveztek, bár nagyobb tárgyak restaurátori dokumentációs képeinél is használható, illetve fehér-egyensúly beállítására is alkalmas (18. ábra). A táblázat 140 foltot tartalmaz, beleértve az eredeti ColorChecker® szabványos 24 foltját, valamint 17 semleges szürke foltot és 14 bőrszín-tónust. Az SG (*semi-glossy*) foltok félfényesek, szemben a szabványos ColorChecker® matt felületű foltjaival. A félfényes felület szélesebb színgamutot³⁴ biztosít a matt felületekhez képest. Fontos megjegyezni, hogy bár a ColorChecker® eredeti 24 foltja szerepel ebben a céltáblában, a referencia-adatkészlet nem cserélhető fel. A táblázat mérete 8,25 x 11 hüvelyk (20,9 x 27,9 cm).

8.7 QPcard referenciaskálák

Az eredeti QPcard 101 közepszürke foltja nem volt semleges. Ezt a problémát a QPcard 101 v2 verzióval és a nagyobb, 4 foltos QPcard 102 változattal orvosolták. A cég egy QPcard 201, 202 és 203 nevű színes céltáblákat is gyárt (19. ábra). A QPcard kártyák nem olyan tartósak, mint az ColorChecker®, ezért gyakrabban cserére szorulhatnak. Ugyanakkor megfizethető alternatívát kínálnak, és sikeresen használhatók expozíció- és fehér-egyensúly-beállításra. A QPcard színes céltáblákhoz mellékelt szoftverével színkorrekció is elvégezhető.



19. ábra - QPcard referenciaskálák (balról jobbra 101, 102, 201, 202 és 203). Forrás:

<https://specular.com.au/shop/copy-reproduction/colour-resolution-targets/colour-cards-targets>

8.8 Datacolor SpyderCheckr

Ez a termék hasonló a ColorChecker® Passport-hoz, de körülbelül négyszer nagyobb méretű. Tartalmaz egy nagyobb szürkeárnyalatos foltosort, egy fakulásellenőrző monitort,

³⁴ A gamut egy színreprodukciós kifejezés, amely azt a teljes színtartományt jelenti, amelyet egy adott eszköz (például monitor, nyomtató vagy fényképezőgép) képes megjeleníteni vagy rögzíteni. <https://en.wikipedia.org/wiki/Gamut> 2025.08.22.

valamint lehetőséget biztosít cserélhető kártyák megvásárlására. A rendszerhez csatlakoztatható a SpyderCube fekete csapdával is. A SpyderChecker elsősorban profilozásra és fehéregyensúly beállítására szolgál (20. ábra).



20. ábra – A Datacolor SpyderChecker és SpyderChecker 24. Forrás: <https://www.datacolor.com/spyder/products/spyder-checker/>

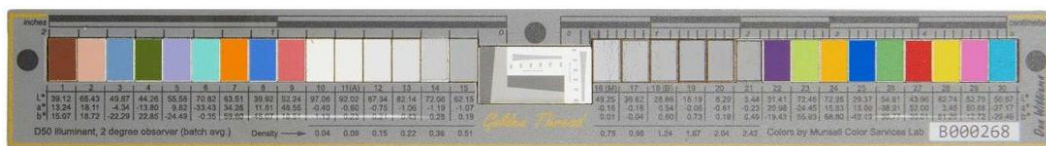
8.9 Image Science Associates (ISA), Object Level Targets

Bár ezek a céltáblák drágábbak, mint más hasonló eszközök, néhány értékes további funkcióval rendelkeznek. Tartalmazzák az Calibrite ColorChecker® 18 színes foltját, valamint 12 semleges foltot (a szokásos hat helyett). A céltáblák önmagukat leíróak, vagyis minden folt tényleges *Lab* értéke fel van tüntetve közvetlenül a folt mellett. Ezen kívül tartalmaznak metrikus és angol vonalzót, továbbá olyan foltokat, amelyek lehetővé teszik a térbeli felbontás mérését.

A céltáblák keskeny csíkként készülnek, így könnyen elhelyezhetők a fényképezett tárgy egyik oldalára. Három méretben érhetők el: Object-Level 2X Target: 18,5 x 1,75 hüvelyk (46,9 x 4,4 cm), Object-Level Target: 9,25 x 1 hüvelyk (23,5 x 2,5 cm) Object-Level 0.5X Target: 4,625 x 0,625 hüvelyk (11,75 x 1,58 cm) (21. ábra).

A Micro-Check Color Palette Kit még kisebb céltáblákat tartalmaz közeli fényképezéshez és fotomakrográfiához. Ezek a céltáblák csak színes foltokat tartalmaznak, méret- vagy felbontásjelölések nélkül, és külön elemző szoftverrel érkeznek. Az opcionális GoldenThread Analysis szoftver képes mérni a mintavételi arányt (dpi), a felbontást, a színt, a tónust és a zajt, ha Object-Level céltáblákkal használják. Alternatív kiértékelési eszköz a ColorGauge Classic Analyzer szoftver, amely a 24 foltos Calibrite ColorChecker® alapján értékeli a képminőséget, míg a ColorGauge SG Analyzer a nagyobb Calibrite ColorChecker® Digital SG táblázatot használja.

Az ISA ezen kívül egy nagyobb Device-Level Target céltáblát is kínál. Ezt kifejezetten nagyobb látómező mérésére tervezték, például lapolvasókhoz. A GoldenThread szoftverrel használva képes értékelni a megvilágítás egyenletességét, a térbeli torzítást és a térbeli felbontást.



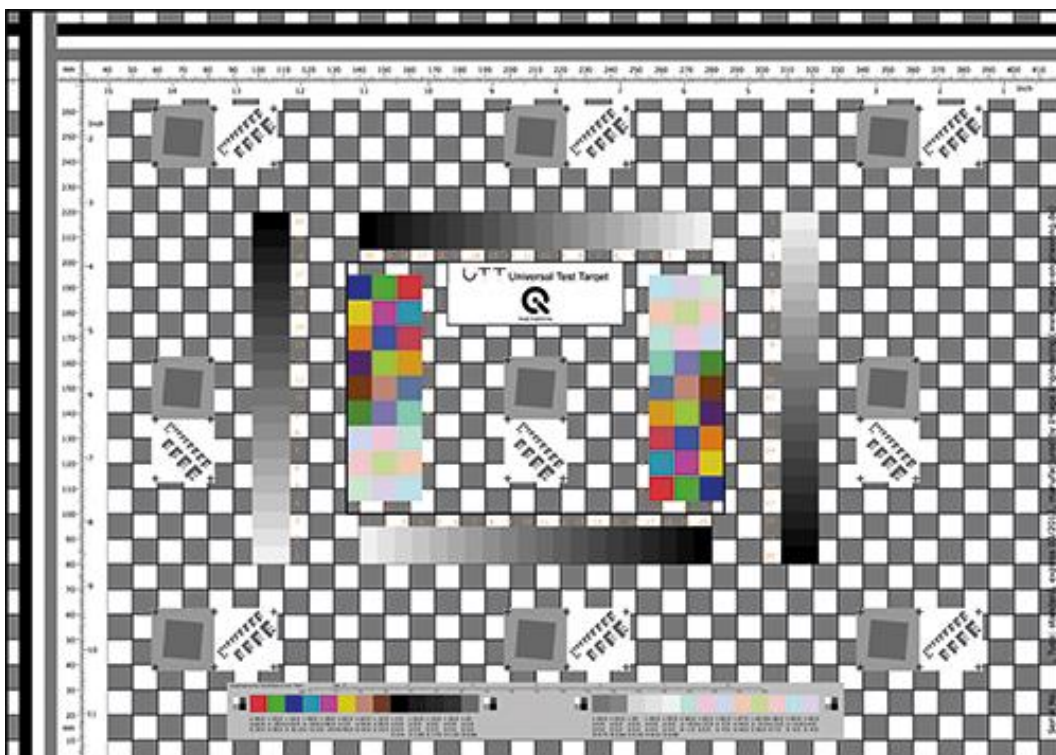
21. ábra - xy. ábra - Image Science Associates, Object-Level 0.5X Target. Golden Thread. Forrás: <https://specular.com.au/isa-object-level-target-0-5x>

8.10 Universal Test Target (UTT)

Az UTT egy technikai céltábla, amelyet digitális fényképezőgépek és szkennerek képminőségének értékelésére terveztek; általában digitalizálási projekteknél használják (22. ábra). Jelenleg az Image Engineering gyártja, de mivel nyílt szabvány, más gyártók is készíthetik.

A céltáblát tintasugaras nyomtatóval állítják elő, és fotográfiai nyomatokkal van kiegészítve. Az alacsonyabb gyártási költségek fenntartása érdekében bizonyos mértékű spektrális nem-semlegességet elfogadnak a foltok specifikációjában, amelyek kissé eltérnek a szabványos Calibrite ColorChecker® 24-foltos és Calibrite ColorChecker® *Digital SG* céltábláktól.

Az *Image Engineering iQ-Analyzer* szoftver a UTT vagy más céltáblák használatakor képes mérni a térbeli felbontást, a színhűséget, a megvilágítás egyenletességét, a tónust, a zajt és a lencsetorzítást (többek között). Az Image Engineering egy olcsóbb, különálló Color Module modult is kínál, amelyet népszerű színcélok értékelésére használnak, például a Calibrite ColorChecker® Digital SG, a Standard ColorChecker® és más szabványos színcélok esetében.



22. ábra - Universal Test Target (UTT) az Image Engineering gyártásában

<https://heritage-digitaltransitions.com/product/universal-test-targets-and-software-utt/>

8.11 Kodak Color Separation Guide és Gray Scale

A Kodak színes és szürkeárnyaltos útmutatói hosszú ideig a filmes fényképezés szabványos útmutatóinak számítottak, és évtizedeken keresztül szinte kizárólagosan használták őket fotósok és restaurátorok (23. ábra). A digitális fényképezés fejlődésével azonban számos korlátozás vált nyilvánvalóvá a Kodak útmutatóival kapcsolatban

A Color Separation Guide eredetileg a színleválasztó nyomtatáshoz készült referenciaanyagként szolgált. A foltok cián, bíbor, sárga és fekete festékekből vannak nyomtatva. Ezek a foltok nem stabilak fény hatására, nem mindig konzisztens értékűek a különböző kártyák között és a gyártó nem biztosít RGB vagy *Lab* értékeket a foltokhoz. A többi, ebben a fejezetben bemutatott céltáblával ellentétben a Color Separation Guide nem szabványosított referencia céltábla, ezért nem ajánlott a konzerválási dokumentációs fényképezéshez. Bár korábban széles körben alkalmazták filmes dokumentációban, a digitális fényképezéshez sokkal megfelelőbb színcél alternatívák állnak rendelkezésre.

A Q-13 és Q-14 Kodak Gray Scale céltábla legtöbb foltja lehet semleges, de a gyártó nem garantálja a foltok közötti konzisztenciát, ezért vannak jobb alternatívák a konzerválási dokumentációs fényképezéshez. A kártya egyik előnye azonban, hogy nagyon széles szürkeárnyaltos skálát kínál 20 értékkel.

Ha lehetősége van a Q-13 kártya foltjainak mérésére, hogy ismerje a megfelelő RGB vagy *Lab* értékeket, akkor a kártya használható a képek tonális görbéjének beállításához, valamint a fehéregyensúly és expozíció beállításához.

Fontos megjegyezni, hogy ezeket a termékeket most a Tiffen gyártja Tiffen Color Separation Guide with Color Control Patches and Gray Scale néven. A nem Kodak által gyártott céltáblák nem ajánlottak, mivel a gyártási eltérések miatt nem megbízhatóak.



23. ábra - Kodak Color Control Patches és Gray Scale (jelenleg a The Tiffen Company gyártja)
<https://flysteadicam.tiffen.com/products/tiffen-q-13>

8.12 Stouffer Industries 21-Step Reflection Guide

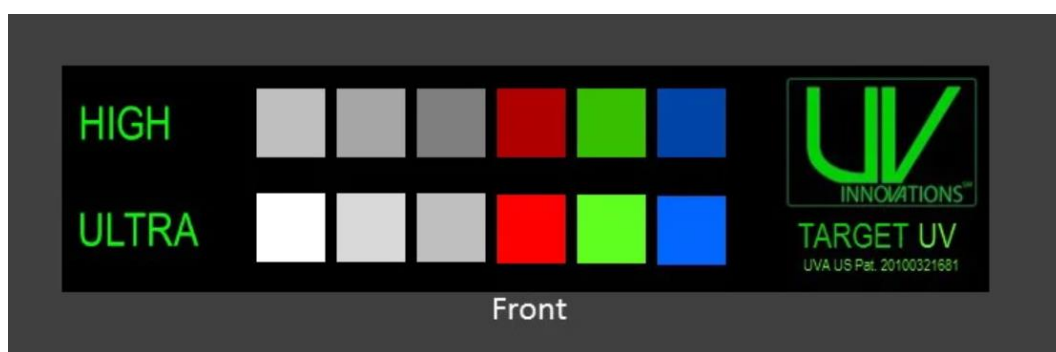
A Stouffer egy 21 foltos szürkeárnyaltos céltáblát (24. ábra) kínál, amely megjelenésében hasonlít a Kodak Q-13 Gray Scale céltáblára. A céltábla gyantabevonatú ezüst-zselatin fényképpapírra van nyomtatva, mérete 0,75 x 7,25 hüvelyk (1,9 x 18,4 cm). A Stouffer folyamatosan ellenőrzi a semlegességet, és a színkalibrált változat esetében *Lab* értékeket is megad. A cég széles körben ismert különféle átlátszósági lépcső értékei miatt is, amelyeket gyakran használnak szkennerekkel.



24. ábra - Stouffer Industries 21-Step Reflection Guide - <https://www.stouffer.net/index.html>

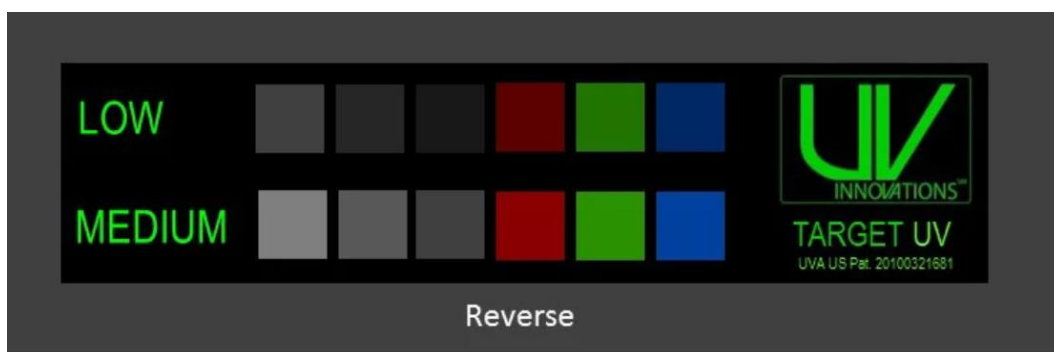
9 UV INNOVÁCIÓK: ULTRAIBOLYA FÉNYKÉPEZÉSI SZABVÁNYOK³⁵

A kulturális örökség tárgyain végzett UvVL (ultraibolya sugarakkal gerjesztett látható tartományú lumineszcencia) vizsgálatainak reprodukálhatóságával és összehasonlíthatóságával kapcsolatos kihívások megoldására irányuló újabb erőfeszítés az UV Innovations Target-UV 2017-es kifejlesztése volt. A céltábla– amely egy referencia skála – kidolgozásának motivációi között szerepeltek a megismételhető és konzisztens eredmények, amelyek elismerik a referencia skálát, mint technikai metaadatok és egy képen látható vizuális hivatkozás fontosságát, valamint a restaurátori dokumentációhoz rendelkezésre álló UvVL szabványokat. A technika és a skála használatának szabványosítása lehetővé tenné a különböző felhasználók által, különböző helyeken, más időpontban készített képek értelmes összehasonlítását. A Target-UV-t kalibrációs referenciaként írják le az UV-A sugárzás által kiváltott látható lumineszcencia színének és intenzitásának szabályozására. A Target-UV-t kíséri az UV-Gray, egy szürke kártya, amely a kamera fehéregyensúlyának beállítására szolgál az UvVL képalkotáshoz. A skálának két oldala van, mely tartalmaz összesen négy intenzitási szintet (alacsony, közepes, magas és ultra), és mindegyik intenzitási szinthez három szürke, valamint egy vörös, zöld és egy kék mező tartozik. A skálát a képalkotás dokumentált tárgy látómezőjébe kell beilleszteni. A foltok és színek az intenzitás szabályozására szolgálnak az UV-A-sugárzással történő képalkotásnál, különösen azoknál a forrásoknál, amelyeknél a fő emissziós csúcsok 360-370 nanométer körül vannak.



25. ábra - Target UV előoldal - <https://www.uvinnovations.com/target-uv>

³⁵ Annette Keller et al. 2019.



26. ábra - Target UV hátoldal - <https://www.uvinnovations.com/target-uv>

A Target-UV fejlesztés bemutatását követően – beleértve a kutatás-fejlesztés főbb céljait – a célok között szerepelt stabil, lumineszkáló pigment megtalálása a skálák számára, a lumineszcencia intenzitásának kezelése (három intenzitási szint felvétele a skálára), a változók (kamera érzékenysége és szűrése, sugárzási források, képfeldolgozás, felhasználói észlelés) azonosítása és szabályozása, a lumineszcencia intenzitásának definiálása, semleges szürke, *executing round robin testing*³⁶ és a célpontok előállítása érdekében. A bemutatást követő tartóssági vizsgálatok azt mutatták, hogy a Target-UV-hoz használt anyagok stabilak.

A korábbi tapasztalatok azt mutatták, hogy az UvVL dokumentációs protokollok és munkafolyamatok világszerte változatosak, ám a Target-UV és a vele járó munkafolyamat jelentősen csökkentené a változékonyságot. A RAW-beállításokat, a fehéregyensúlyt, a kép kiértékelést és a különböző képszerkesztő szoftverek (*Adobe Lightroom és Photoshop, Capture One*) használatával végzett fájlkezelést lefedő beállítási és rögzítési munkafolyamatok elérhetők az UV Innovations webhelyén. Ezek a munkafolyamatok a Target-UV-val megpróbálják szabályozni néhány változót, hogy következetesebb és összehasonlíthatóbb eredményeket születhessenek.

A Target-UV, UV Innovations munkafolyamata továbbá igazodik a reflexiós fotózáshoz használt referencia skálákhoz és munkafolyamatokhoz, amelyeket jelenleg rutinszerűen használnak a restaurátori dokumentációban. Ez egy ismerős munkafolyamatot biztosít, amely könnyebben adaptálható, és olyan módszereket követel meg, amelyek már használatban vannak. A leírás lépésenkénti útmutatókat tartalmaz munkafolyamatokhoz, a beállításhoz és a képernyőfelvételeket, amelyek egyértelműen jelzik az eszközöket és

³⁶ A *round robin testing* olyan összehasonlító vizsgálati módszer, amikor ugyanazt a feladatot vagy mérési protokollt több, egymástól független laboratórium vagy kutatócsoport végzi el, majd az eredményeket összevetik. Célja: a módszer reprodukálhatóságának és megbízhatóságának ellenőrzése, a mérési eltérések (különböző műszerek, beállítások, kezelők miatt) feltárása, valamint egy standardizált, egységes protokoll kialakítása.

beállításokat. A megadott munkafolyamatok mellett a webhely ajánlásokat és referenciákat is tartalmaz a berendezésekhez, beleértve a beszállítók listáját és a GYIK oldalt.

Míg a skálák és a munkafolyamatok megfelelnek az UvVL-eredmények reprodukálhatóságának és összehasonlíthatóságának javítására irányuló igényeknek, még mindig vannak kihívások. A Target-UV ára 875 dollár, ami bizonyos restaurátori laboratóriumok és intézmények számára komoly kiadást jelent. A skála nem működik olyan jól az alacsony intenzitású képeknél, ami szintén visszajelzés volt a tesztek során. Egy másik kihívás, hogy a Target-UV-eredmények nem feltétlenül egyeznek a vizuális észleléssel vagy a korábbi UvVL eredményekkel.

Ebben a részben korábban tárgyaltam azokat a tényezőket, amelyek befolyásolják a reprodukálhatóságot és az összehasonlíthatóságot. Még ennek a skálának és a munkafolyamatnak a használata esetén is előfordulhatnak eltérések a sugárforrások, az emberi látás különbségei és a kamera típusának eltérései miatt. A skálákat egy UV-A sugárforrással kalibrálták, amelynek egyetlen csúcsa körülbelül 368 nanométer-en van, és ezzel a sugárforrással semlegesnek tűnik; azonban van egy sor ultraibolya sugárforrás, amelyeknek az ultraibolya csúcskibocsátása és a látható tartományú kék fény kibocsátása is változik. Mivel ilyen eltérések vannak az ultraibolya források között, előfordulhat, hogy a skála nem minden ultraibolya-forrás esetén semleges. A forráson kívül eltérések mutatkoznak a kamera érzékenységében, az emberi érzékelésben és a feldolgozó szoftverben is.

9.1 Értékelési módszerek: lehetőségek és korlátok

A többsávós képalkotás tehát különböző hullámhossz-tartományokban (200 - 1100 nanométer között) készülő képalkotáson alapul. A kalibrálás és a szerkesztés után a több darabból álló felvételsorozatot ki kell értékelni, majd össze kell vetni a képrögzítés során használt referencia skálákkal. Egy hibásan kalibrált felvétel a pigment vagy egyéb anyag téves azonosításához vezethet. Mind ezek ellenére óvatosan kell eljárni, ha a felvételek alapján konkrét pigment meghatározására törekszünk, mert a tapasztalatok alapján – annak ellenére, hogy a szóban forgó módszer adott anyagok azonosítására egyértelműen működik – keverékek esetén, a kötőanyagoktól függően, az öregedés hatásai miatt nagymértékben változhat a lumineszcencia spektrális viselkedése. Ezért ajánlatos minden esetben a vizsgálatot más tudományos módszerekkel kiegészíteni (pl.: XRF, SEM-EDS és optikai mikroszkópos mintaanalízis).

A többsávos képalkotás nagy előnye, hogy a felületek látható tartományban hasonló reflexiót és/vagy lumineszcenciát mutathatnak, de eltérően viselkedhetnek az infravörös és ultraibolya tartományokban. A képalkotási eredmények interdiszciplináris értékelése után megfogalmazható a festmény további tudományos vizsgálatokat igénylő specifikus kérdései, területei és ennek következtében a mintavételek száma a minimálisra csökkenthető.

Összefoglalva: a kérdések szűkíthetők és a többsávos képalkotás eredményeiből új kérdések merülhetnek fel. Ezek általában további kutatásokat, interdiszciplináris eszmecserét és új képértelmezési megközelítéseket igényelnek. Erre jó példa a titándioxid és cinkfehér pigmentek vizsgálata, melyeket az értekezés 18-es fejezete tárgyalja.

10 BETEKINTÉS A FOTOLUMINESZCENCIA VILÁGÁBA³⁷

Jelen fejezet célja, hogy néhány alapfogalmat adjon meg a lumineszcencia jelenségével kapcsolatban. Továbbá tisztázza a fennálló félreértéseket, elnevezési hibákat és technikai tévedéseket, melyek kifejezetten ennél a vizsgálati típusnál fordulnak elő.

10.1 A lumineszcencia fogalma

A fluoreszcencia a lumineszcencia jelenségkörének egyik alcsoportjaként értelmezhető. Akkor jön létre, amikor bizonyos anyagok külső energiabevitel – például elektromágneses sugárzás, hőmérsékletváltozás, kémiai vagy biokémiai reakció – hatására gerjesztett állapotba kerülnek, majd az így felvett energiát részben elektromágneses sugárzás formájában bocsátják ki. A gerjesztési energia leadása két alapvető úton történhet: sugárzó (radiatív) vagy nem sugárzó (nem-radiatív) folyamatok révén. A fluoreszcencia intenzitása ezen energiavesztési útvonalak egymáshoz viszonyított arányától függ. Amennyiben az energia túlnyomó része nem sugárzó módon disszipálódik (szétszóródik), például hő formájában, a fluoreszcencia gyenge marad. Ha azonban a nem sugárzó folyamatok háttérbe szorulnak, és a felvett energia nagyobb hányada fénykibocsátás útján távozik, erőteljes fluoreszcencia figyelhető meg.

Közérthetően megfogalmazva: a fluoreszcencia tulajdonképpen nem más, mint amikor egy anyag elnyel energiát, majd annak egy részét fényként visszasugározza; a jelenség erőssége attól függ, hogy mennyi energia alakul hővé, és mennyi marad meg fény formájában.

Az elmúlt évszázadokban a lumineszcens anyagok mágikusnak tűnő tulajdonságai széleskörű tudományos érdeklődést váltottak ki, de csak 1852-ben írták le szilárd tudományos alapon a lumineszcencia fogalmát, amikor bevezették a fluoreszcencia kifejezést az ásványi fluorpát³⁸ (CaF_2) fénykibocsátásának jelzésére, továbbá megfigyelték, hogy a

³⁷ Mauro Bacci, „Hints on the Luminescence Phenomena Theory,” in *UV-Vis Luminescence Imaging Techniques / Técnicas de Imagen de Luminiscencia UV-Vis*, ed. Marcello Picollo, Maartje Stols-Witlox, and Laura Fuster-López, *Conservation 360°*, no. 1 (Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València, 2019).

³⁸ A fluorit, más néven fluorpát vagy folypát, a nevét az alapján kapta, hogy olvasztáskor általában folyósítószerként használták. Rendkívül széles színválasztéka miatt (pl.: rózsaszín, bíbor, zöld, kék, sárga) és mert egyásványon belül akár többféle színárnyalat is előfordulhat, egy érdekes drágakő. A fluorit színeit besugárzással meg lehet változtatni. Sokszor a fluoritra hegyikristály felsőrészt ragasztottak, hogy védje a karcolásoktól. Annak ellenére, hogy rideg, lehet faragni és különlegesen fényesre polírozni. A fluorit a halogenidek osztályába tartozik. Lengyel Béla – Papp Gábor (szerk.): *Ásványhatározó*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 2004.

kibocsátott fény mindig hosszabb hullámhosszú, mint a gerjesztő sugárzás (Stokes-törvény³⁹). Sőt, maga Stokes adott hasznos útmutatást a fluoreszcencia megfigyeléséhez, két különböző szűrő használatát javasolva, az egyik a gerjesztő sugárzás kiválasztására, a másik pedig a lumineszcens fény elkülönítésére.

Fenomenológiai szempontból a fluoreszcencia azon lumineszcenciajelenség, amely közvetlenül a gerjesztő sugárzás jelenlétében figyelhető meg. Ezzel szemben a foszforeszcencia kifejezést azokra az emissziós folyamatokra vonatkozik, amelyek a gerjesztő sugárzás megszűnése után is fennmaradnak. A két jelenség közötti alapvető különbséget tehát elsősorban az emisszió (kibocsátás) időtartama határozza meg.

A kétféle lumineszcencia fizikai eredete az elektronállapotok spin⁴⁰-multiplicitásán alapul, amelyek között az emissziós átmenetek végbemennek. Fluoreszcencia esetén a kibocsátás azonos multiplicitású⁴¹ állapotok – jellemzően szingulett–szingulett⁴² – közötti átmenet során következik be. Foszforeszcencia esetén a sugárzás különböző multiplicitású állapotok között – leggyakrabban a legalacsonyabb gerjesztett triplett állapotból⁴³ a földi szingulett állapotba – történik. Az emisszió időtartama szorosan összefügg azzal, hogy az adott elektronátmenet kvantummechanikailag megengedett (*allowed*) vagy tiltott (*forbidden*). A fluoreszcens emisszió megengedett átmenet révén jön létre, ezért jellemzően nagyon rövid élettartamú, a nanomásodperc tartományban. A foszforeszcencia ezzel szemben tiltott átmenet eredménye, emiatt az emisszió lassabb, hosszabb időtartamú és élettartama a mikro- vagy akár másodperc-tartományba is eshet.

A lumineszcencia sokféle anyagban előfordulhat, a szerves kristályoktól a szerves anyagokig, még akkor is, ha a kibocsátott sugárzás gyakran nagyon gyenge, és ezért nagy érzékenységu detektorokat és/vagy nagyon intenzív gerjesztő forrásokat, például lézereket igényel. Sőt, figyelembe kell venni, hogy az egyes anyagok emissziója más vegyületek jelenléte mellett gyengül, ezek elősegítik az alapállapotba való visszatérést nem sugárzó folyamatokon keresztül, és ennek megfelelően csökkentik a lumineszcencia által

³⁹ A Stokes-törvény (Stokes law) a lumineszcens jelenségek, különösen a fluoreszcencia kapcsán figyelhető meg, és azt írja le, hogy: A kibocsátott lumineszcencia fény hullámhossza (azaz energiája) mindig hosszabb (azaz alacsonyabb energiájú), mint a gerjesztésre használt fény hullámhossza. Ez a jelenség a Stokes-eltolódás (Stokes shift) néven ismert. Budó Ágoston: *Kísérleti fizika III. – Hidrodinamika, hőtan, statisztikus fizika*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1975.

⁴⁰ A spin az elemi részecskék belső impulzusmomentuma, kvantummechanikai eredetű tulajdonság, amelynek nincs klasszikus megfelelője. Czeglédi Elemér – Szalay Sándor: *Bevezetés a kvantummechanikába*. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2003.

⁴¹ sokszorozás, gyakoriság

⁴² elektronállapot-átmenet

⁴³ olyan gerjesztett elektronállapot, amelyben két elektron párhuzamos spinnel rendelkezik; emiatt az alapállapotba való visszatérés spin-tiltott, így hosszabb élettartamú (foszforeszcencia forrása). Nagy Sándor, *Kvantummechanika és spektroszkópia*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 1998.

kibocsátott energiát. Ezért ugyanaz a fluorofor⁴⁴ a kémiai környezetétől függően eltérő fluoreszcencia-élettartamot (és ennek következtében eltérő emissziós intenzitást) mutat.

A műalkotásokat tekintve a felhasznált anyagok sokfélesége miatt a helyzet különösen bonyolult. Valójában sok az alkotási folyamat során használt anyag (tempera- és olajkötőanyagok, lakkok, színezékek, pigmentek stb.) ami fluoreszcenciát mutathat. A szerves pigmentek bonyolíthatják a fenomenológiát, mert bizonyos esetekben a pigmentek erősen fluoreszkálóak (a látható tartományban), például a cinkfehér (cink-oxid, ZnO) vagy a kadmium sárga pigmentek (kadmium-szulfid és kadmium-szulfo-szelenid, CdS – CdSSe), míg más pigmentek (például a vas- és egyes rézalapú pigmentek) gátolják a fluoreszcencia kialakulását. Ezenkívül figyelembe kell venni, hogy a régi lakkrétegek eleve elnyelhetik a gerjesztő sugarakat, de a keletkezett fluoreszcenciát is részben elfedhetik, és így a különböző pigmentek (vagy színezékek) emisszióit nehéz egyértelműen észlelni, vagy mérni. Például a cinkfehér és az ólomfehér eltérő fluoreszcenciája egy régi lakkréteggel elfedhető, és csak a bevonateltávolítási eljárás után válik egyértelműen láthatóvá. Vagy éppen magának a kötőanyagnak a lumineszcenciája az, ami átvilágítja a rétegben lévő pigmenteket és töltőanyagokat, ami azt a hatást kelti, mintha a festékanyag lumineszkálna, főleg, amelyeket könnyebben át lehet világítani, az alacsonyabb törésmutató miatt (például ultramarin kék, kobalt kék, szerves vörösek egy része).

Valójában, ha egynél több anyag járul hozzá a fluoreszcenciához, mint a festmények esetében, az emissziós spektrum nem más, mint az egyes anyagok emissziós spektrumainak összege. Ezért az emissziós csúcs általában eltolódik az egyes referencia csúcsokhoz képest. Fontos figyelembe venni, hogy néha, amikor erős gerjesztő forrásokat használnak, a Raman-effektus⁴⁵ miatti további emisszió hozzáadhat a fluoreszcens sugárzáshoz. Anélkül, hogy részleteznénk a Raman-effektust, gyakorlati szempontból fontos szem előtt tartani, hogy a Raman-sugárzás követi a gerjesztő sugárzást, míg más esetekben az emissziós csúcs nem változik a gerjesztő sugárzás megváltoztatásakor, így könnyen megkülönböztethető a két hatás⁴⁶.

⁴⁴ A fluorofor (vagy fluorokróm, hasonlóan a kromoforhoz) egy fluoreszcens kémiai vegyület, amely fénygerjesztésre képes újra kibocsátani a fényt.

⁴⁵ A Raman-effektus egy olyan szórási jelenség, amelynek során a fény a molekulákkal kölcsönhatásba lépve energiát cserél, így a visszaszórt fény frekvenciája megváltozik. Ez a változás a molekula rezgési és forgási energiaszintjeiről ad információt, és alapját képezi a Raman-spektroszkópiának. Lengyel Béla: *A lézerspektroszkópia alapjai*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1981.

⁴⁶ „A fluoreszcencia emissziós maximuma független a gerjesztő sugárzás hullámhosszától, míg a Raman-szórás csúcsai a gerjesztő sugárzással együtt tolódnak el, mivel azok az adott gerjesztési energiából levont vagy ahhoz hozzáadott

Bonyolult esetekben a gerjesztési spektrumok alkalmasak lehetnek a fluoreszcenciát eredményező különféle anyagok megkülönböztetésére. Az ilyen eljárás az egyik kibocsátott hullámhossz kiválasztása és rögzítése (általában a maximumnak megfelelő), és ennek intenzitásának rögzítése monokromátorral⁴⁷, miközben a gerjesztő sugárzást változtatjuk. Ily módon nemcsak a leghatékonyabb gerjesztési hullámhosszokról kapunk információt, hanem a vizsgált fluoreszcenciához hozzájáruló különböző kromoforok⁴⁸ jelenlétéről is. A közelmúltban javasoltak egy innovatív fluoreszcens élettartam képalkotás (FLIM) technikát, amely kifejezetten alkalmas a különböző kromoforok megkülönböztetésére és térbeli eloszlásuk kétdimenziós térkép segítségével történő megjelenítésére. A technika a fluoreszcencia intenzitás exponenciális csökkenésére épül, közvetlenül a gerjesztés után. Azokban az esetekben, amikor a különböző anyagok hasonló emissziós spektrummal rendelkeznek, az élettartam további eszközt jelent a fluoroforok megkülönböztetésére.

Óvatosan kell eljárni a fluoreszkáló anyagok színének mérésekor. Valójában ilyen esetben az érzékelt szín a visszavert sugarak és a kibocsátott fluoreszcens sugárzás additív keverékének eredménye. A színt a CIE háromstimulus értékekkel (X, Y és Z)⁴⁹ írják le, amelyeket a reflektancia (vagy jobb sugárzás) tényezővel számítanak ki, amely a minta által szórt sugárzás és a fehér standard által szórt sugárzás aránya, mint például a BaSO₄ vagy egy Spectralon® referencia, miközben pontosan ugyanolyan körülmények között világítanak. A nem fluoreszcens anyagok reflexiós tényezője független a meghatározásához használt forrástól, míg a fluoreszcens anyagok esetében ez a tényező a mintát besugárzó forrás spektrális teljesítményeloszlásától függ. Valójában ez utóbbi esetben a fluo-

rezgési energiakülönbségeket tükrözik. Például egy festékanyag mindig 580 nanométer körül bocsát ki, függetlenül attól, hogy 365 vagy 405 nanométeres fényt gerjesztette)

⁴⁷ A monokromátor (görög „monos” = egy, „chroma” = szín) egy optikai eszköz, amely fehér fényt vagy több hullámhosszból álló sugárzást bont fel, és abból egy szűk hullámhossztartományt (kvázi egyszínű fényt) enged át. Fő feladata, hogy adott időben csak egy adott hullámhosszú fényt bocsásson ki a kimenetén, miközben a többi hullámhosszt elnyomja vagy eltéríti. A monokromátor általában a következő fő alkotóelemekből áll: egy bemeneti rés, egy diszperzív elem (pl. prizma vagy diffrakciós rácsos fénytörésre alapozva), és egy kimeneti rés, amelyen keresztül csak a kívánt hullámhossz jut tovább. A kimeneten megjelenő spektrum az eszköz sávzélességétől függ: minél szűkebb, annál „monokromatikusabb” a kimeneti fény. Parker, Sybil P., ed. *McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms*. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

⁴⁸ A kromofor egy olyan molekularészlet (funkciós csoport), amely felelős az adott anyag színéért, mivel elnyeli a fényt látható tartományába eső hullámhosszait, és így meghatározza a vegyület színét. <https://en.wikipedia.org/wiki/Chromophore> 2025.08.22.

⁴⁹ CIE háromstimulus értékek (X, Y, Z): a színínger numerikus leírására szolgáló mennyiségek, amelyeket a Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) 1931-ben vezetett be. Az X, Y és Z értékek a színíngerhez tartozó három alapszín (ún. tristimulus) súlyát adják meg, amelyekből minden látható szín meghatározható. A Y komponens a színínger fényességét is reprezentálja. Forrás: Schanda János: *Színmérés*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980.

reszcencia intenzitása, amely hozzáadódik a szórt sugárzáshoz, a megvilágító forrás megváltoztatásával változhat. Következésképpen az erősen fluoreszkáló anyagok a fluoreszcens komponensük hozzájárulása miatt a ténylegesnél nagyobb reflexiót is mutathatnak.

Végül egy másik szempontot is figyelembe kell venni a kísérleti eredmények megfelelő értelmezéséhez, amikor összetett anyagokat vizsgálunk. Valójában, ha egy nem fluoreszcens vegyület a fluoreszcens vegyületet gerjesztő spektrális tartományban vagy a fluoreszcens emisszió spektrális tartományában elnyel, (abszorbeál), a fluoreszcencia csökkenése vagy akár teljes kioltása is bekövetkezhet, ha mindkét anyag egyszerre jelen van. Ennél még bonyolultabb eset, ha gerjesztett fényt részben elnyeli és visszaveri, azaz teljesen kevert hullámhosszú sugárzás, fény keletkezhet, egy összetett festékrétegben.

10.2 Az ultraibolya sugárzás indukálta látható lumineszcencia vizsgálat restaurátori alkalmazásban⁵⁰

Különböző anyagok lumineszkálnak ultraibolya sugárzás hatására. Ez a tulajdonság a kulturális örökséghez tartozó tárgyak vizsgálatának és dokumentálásának eszközeként használható – anyagok jellemzésére és megkülönböztetésére, egy tárgy állapotának felmérésére, valamint a korábbi kezelések helynek meghatározásához. Az anyagokat az ultraibolya sugárzók 1925 körül kereskedelmi forgalomba kerülése óta vizsgálják ultraibolya sugárzással, a fluoreszcenciaanalízis korai publikált példáival ennek okán már a 20. század közepén találkozhatunk és a kulturális örökség kutatása területén való felhasználásával is.

A korábbi alkalmazások óta technikát rutinszerűen kezdték alkalmazni a restaurátori beavatkozásokat megelőzően. Az ultraibolya sugárzók gyors, megfizethető és könnyen hozzáférhető vizsgálati eszközök voltak, amelyek emiatt általánosan elérhetők a restaurátori műtermekben. A restaurátori gyakorlatban főleg a hosszúhullámú UV-A sugárzást kibocsájtó (320-400 nanométer) lámpákat használják a leggyakrabban, bár van néhány példa rövidhullámú UV-C sugárzás kibocsájtó (185-280 nanométer) lámpák alkalmazására is. Az ibolyántúli sugárzás roncsolásmentesnek tekinthető, és lehetővé teszi nagy felületek vizsgálatát mintavétel nélkül. Az ultraibolya sugárzással gerjesztett látható

⁵⁰ E. Keats Webb, „UV-Induced Visible Luminescence for Conservation Documentation / Luminescencia Visible Inducida por UV para la Documentación en Conservación,” in *UV-Vis Luminescence Imaging Techniques / Técnicas de Imagen de Luminescencia UV-Vis*, ed. Marcello Picollo, Maartje Stols-Witlox, and Laura Fuster-López, *Conservation 360°*, no. 1 (Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València, 2019).

lumineszcencia közvetlen vizuális vizsgálattal vagy fényképezéssel rögzíthető. A fényképes dokumentáció állandóságot és nagyobb érzékenységet biztosít, mint az emberi szem megfigyelése. A digitális fényképezés további előnyöket biztosít a felhasználó számára, beleértve az eredmények azonnaliságát, az érzékenység különbségét, valamint a színhelyesség ellenőrzését és fenntartását.

10.3 Terminológia

Ez a fejezet megvizsgálja az ultraibolya sugárzás indukált látható lumineszcencia alkalmazását a restaurátori diagnosztikában és a restaurátori dokumentációkban, és tárgyalja a technika fejlődését és korlátait, beleértve a szabványosítás szükségességét és a célkitűzéseket.

Számos kifejezést használtak az ultraibolya sugárzással és a képalkotás átfogó kategóriájával kapcsolatos technikák tárgyalásakor, amelyeket nem mindig alkalmaznak következetesen. A korai hivatkozások a fluoreszcenciára és az ultraibolya sugárzás használatára vonatkoztak. Korábban a fluoreszcenciaanalízist, később pedig a fluoreszcenciát és az ultraibolya fényt használták. A közelmúltban az *AIC Guide* ultraibolya terminológiával foglalkozó részében egyértelművé tették, hogy az elektromágneses spektrum látható részén (400-700 nanométer) a fény, az ultraibolya és infravörös esetében pedig sugárzás kifejezést kell használni. Továbbá az ultraibolya sugárzás helyett ultraibolya besugárzást, ultraibolya fluoreszcencia (Magyarországon elterjedt: UV lumineszcencia) helyett pedig ultraibolya által kiváltott látható fluoreszcenciát/lumineszcenciát javasoltak.

Az American Institute of Conservation (*AIC*) folyóiratában megjelent cikkek szigorúan követik az *AIC Guide* ajánlásait, és ultraibolya indukált látható fluoreszcenciát vagy UV-VIS-t használnak, akárcsak más közelmúltbeli hivatkozások.

Ezenkívül a lumineszcenciát és a fluoreszcenciát gyakran felcserélve használják. Néhány újabb publikáció a lumineszcenciát használta a fluoreszcencia helyett. Mivel a foszforeszcencia és a fluoreszcencia közötti különbség nem mindig nyilvánvaló, a „lumineszcencia” általános kifejezést javasolják, ha egy vegyület fotolumineszcencia időtartama nem ismert.

Még a képalkotás átfogó kategóriája, amely magában foglalja az ultraibolya technikákat sem rendelkezik egységes terminológiával. Számos kifejezést használnak, beleértve a többsávú, a szélessávú spektrális képalkotást, a multimodális, a multispektrális képalkotást, műszaki és törvényszéki fényképezést is.

A következetesség kedvéért a továbbiakban is fluoreszcencia helyett, lumineszcencia szerepel a gerjesztés hatására kiváltott emissziók esetében.

10.4 Az ultraibolya sugárzással gerjesztett látható lumineszcens (UvVL) technika alkalmazási területeiről

A technikát széles körben használják a restaurátori munkák során, bizonyos anyagok jellemzésére és megkülönböztetésére, állapotfelmérésre, valamint a tárgyak korábbi kezeléseinek feltárására, számos anyag feltételes meghatározására. Ez a rész ezeket az alkalmazásokat tekinti át és korábbi tanulmányokra hivatkozik, amelyek bemutatják az UvVL segítségével dokumentált és elemzett anyagok körét.

Az UvVL-t számos anyag dokumentálására és elemzésére használták már. Az anyagok és alkalmazások ezen körére példaként az alábbi témakörök említhetők: a múzeumi, restaurátori munka mellett, a mezőgazdaság; bakteriológia; növénytan; építőanyagok és üveg, fémek stb.; kábítószeres; élelmiszerek és élelmiszertermékek; orvosi és biológiai tudományok; ásványok és drágakövek; stb. Érdeemes megjegyezni a témakörök szélességét, mivel sok műtárgy – legyen az képző- vagy iparművészeti - e különböző forrásokból származó anyagok kombinációját tartalmazza.

10.5 Néhány példa az anyagok jellemzésére, differenciálására

Az UvVL nem használható önállóan az anyagok végleges azonosítására, kiegészítő analitikai technikák alkalmazását igényli, ennek ellenére széles körben használják az anyagok jellemzésére és megkülönböztetésére. Különféle anyagoknak van jellegzetes lumineszcenciája ultraibolya sugárzás hatására, ami a jellemzést segítő információkkal szolgálhat. A látható fényben hasonlónak tűnő, különböző korú és összetételű anyagok eltérően reagálhatnak ultraibolya sugárzás hatására, ezért lehet az UvVL az anyagok megkülönböztetésének egyik eszköze.

A festmények vizsgálatára és dokumentálására használt ultraibolya sugárzás felhasználható a lakkok és pigmentek jellemzésére és megkülönböztetésére. A lakkoknak jellegzetes lumineszcenciája van, a természetes gyanták általában zöldes fluoreszcens színűek, a sellak ettől eltérő narancssárgán lumineszkál, a szintetikus gyanták pedig tejszerű világos lumineszcenciával rendelkeznek. Egyes pigmentek is sajátos lumineszcenciával bírnak, amely információkat szolgáltat az anyag meghatározásához. Például, a cinkfe-

hér világos sárgán, sárgás-zölden, az ólomfehér olaj kötőanyagban sárgás-fehéren, a kadmium sárgák vörösen és egyes kadmium-vörösek vörös-barnás megjelenésűek, míg az ultramarin és kobalt kékek (valamelyest a cölin kék és a mangánkék is) kékes lumineszcenciát mutathatnak.

A festmények anyagainak meghatározását vizsgáló tanulmányok közé tartozik a festék és lakkok lumineszcenciájának tanulmányozása, az olajfestményekre összpontosítva, természetesen számos olyan eset van, ahol publikus vagy nem publikált formában, de konkrét műtárgyakat, vagy életművek vizsgálatát végezték el ilyen módon.

Papír- és pergamentárgyak esetében az ultraibolya sugárzás felhasználható a tinták megkülönböztetésére, valamint a kifakult vagy elhomályosodott részletek javítására.

A vasgallusz tinta „átlátszó” az infravörös sugárzásban, de elnyeli az ultraibolya sugárzást, ami lehetővé teszi a tinták közötti (szerves és szervetlen színezőanyagú) különbségtételt, és javítja a vasgallusz tintával írt fakult részleteket. Szakirodalmi példa az Archimedes-palimpszeszt-ek⁵¹ eredeti szövegének továbbfejlesztett kimutatási módszerét mutatta be, a korábbi, két tintát megfejtő multispektrális képalkotáshoz képest. Az UV-sugárzás segítségével készült felvételeken javíthatunk a fakult részleteken, amikor a pergamen lumineszkál, de a tinta elnyeli a sugárzást, növelve a kontrasztot a pergamen és az írás között.

Az ultraibolya sugárzás elősegítheti az üvegtárgyak anyagainak és a kiegészítések megkülönböztetését⁵². Rövid- és hosszuhullámú ibolyántúli sugárzás (UV-A és UV-C) segítségével kimutatható a nem eredeti üvegdarabok egy restaurált tárgyon. A lumineszcencia a kontinentális eredet indikátoraként szolgálhat, mivel az ólomüveg és a nátrium-mészüveg eltérő lumineszcenciával rendelkezik. Az ólomüveg UVA sugárzás hatására zölden, UVC sugárzás hatására kéken lumineszkál⁵³, az uránüveg UVA sugárzás hatására élénk sárgán-zölden⁵⁴.

⁵¹ A palimpszeszt azoknak a kéziratoknak a neve, melyekben az eredeti szöveget gondosan kivakarták, vagy átragasztották, hogy helyébe másikat lehessen írni - <https://hu.wikipedia.org/wiki/Palimpszeszt> - 2024.02.16.

⁵² John A. Reilly and Margaret Mortimer, „The Care and Conservation of Glass Chandeliers,” *Journal of the American Institute for Conservation* 37, no. 2 (1998): 149–72, <https://doi.org/10.1179/019713698806082886>.

⁵³ Jeffrey Warda et al. 2017

⁵⁴ Miles S. Grant, *The Use of Ultraviolet Induced Visible-Fluorescence in the Examination of Museum Objects, Part II* (Washington, DC: National Park Service, Department of the Interior, 2000).

További UV-sugaras példák közé tartozik, amikor a sugárzást madártollak dokumentálására és a bennük található biopigmentumok⁵⁵ azonosítására használják⁵⁶, valamint a színezék és a nem irizáló szerkezeti szín megkülönböztetésére. Használták már a dagerrotípiák felületi elszíneződésének jellemzésére is⁵⁷, vagy a festőbuzér vizsgálatára és jellemzésére kerámián⁵⁸, valamint a szobrászati anyagok jellemzésére és a kiegészítéshez használt régi és új anyagok megkülönböztetésére is⁵⁹.

10.6 Állapotfelmérés

Az UvVL – ahogy az a fentiekben is említettem – a műtárgyak állapotának dokumentálására is szolgál, információt ad az anyagokról a restaurálási folyamatok előtt, közben és után is. Az ultraibolya-sugárzás használata olyan anyagokat, jellemzőket vagy körülményeket tárhat fel vagy különböztethet meg, amelyek látható fényben esetleg nem figyelhetők meg. Itt is fontos újra kiemelni, hogy a technikát egyéb képalkotó technikákkal (látható fényes reflexiók, infravörös-reflexiók stb.) szükséges párosítani és együtt értékelni, a tárgyak általános állapotának vizsgálata és dokumentálása esetén is. Tehát a tárgyak állapotfelmérésére kifejezetten jól használható technikáról van szó. Ez az egyetlen eset, ahol alapvetően elhagyható a korábban kifejtett módszertan, mert a tárgyakon elvégzett beavatkozások nagy része akkor is jól elkülöníthető az eredeti felületektől, ha az így kapott felvételek nem megfelelően szűrőzött fényforrások, kamerák és referencia skálák segítségével készültek el.

10.7 A korábbi beavatkozások kimutatása

Az ultraibolya sugárzást széles körben használják a festmények korábbi konzerváló kezeléseinek feltárására. A korábbi beavatkozások azonosítása szorosan összefügg az anyagok jellemzésével és differenciálásával. A beavatkozások során általában nem eredeti

⁵⁵ szerves színezékek

⁵⁶ Rolf Riedler et al., “A Review of Color-Producing Mechanisms in Feathers and Their Influence on Preventive Conservation Strategies,” *Journal of the American Institute for Conservation* 53, no. 1 (2014): 44–65, <https://doi.org/10.1179/1945233013Y.0000000020>.

⁵⁷ Laurie Daffner, Diane Kushel, and James M. Messinger, “Investigation of a Surface Tarnish Found on 19th-Century Daguerreotypes,” *Journal of the American Institute for Conservation* 35, no. 1 (1996): 9–21, <http://doi.org/10.1179/019713696806124584>.

⁵⁸ David A. Scolf and Michael Schilling, “The Pigments of the Canosa Vases: A Technical Note,” *Journal of the American Institute for Conservation* 30, no. 1 (1991): 35–40, <http://doi.org/10.1179/019713691806373259>.

⁵⁹ J. A. Radley and J. Grant, *Fluorescence Analysis in Ultra-Violet Light*, 4th ed., ed. E. H. Tripp (London: Chapman & Hall Ltd., 1959).

anyagokat használnak a restaurátorok, amik eltérően reagálhatnak az ultraibolya sugárzásra, ezáltal lehetővé téve a beavatkozások elkülönítését, kimutatását. A modern időkben a festmények restaurátori kezeléseit (tömítés, aláfestés, retus) gyakran lakkréteggel választják el az eredeti festékfelülettől, így sok esetben ez is kimutatható, sőt legtöbb alkalommal ez segíti azok egyértelmű elkülönítését az eredeti ecsetvonásoktól.

Ahogy azt korábban is említettem ultraibolya sugárzás alatt vizsgálva a lakk lumineszkál, valószínűleg a retus összetételéből kifolyólag, a legtöbb esetben elnyeli a sugárzást, sötétben jelenik meg a felvételen, így láthatóvá válik ilyen körülmények között.

Sok ragasztásra, lakkozásra, konzerválásra használt műgyanta is hajlamos lumineszkálni, így azok ultraibolya sugárzás hatására nyilvánvalóvá válnak a felületen. Kitöltések, kiegészítések és tömítések esetén a töltőanyagnak is valószínűleg más lesz a lumineszcenciája, mint az eredeti anyagé. Több kutatás (Grant, 2000) is példákat közölt a ragasztók jellegzetes lumineszcenciájára: „epoxi gyanták (világos sárgásfehér); poli(vinilacetát), például Elmer’s Glue® (kékes tejszerű fluoreszcencia); sellak (élénk narancs); cellulóz-acetát, például UHU® (tejfehér fluoreszcencia); és cellulóz-nitrát, például DUCO® (zöldessárga). Szakirodalmi példák alapján a cellulóz-nitráttal kezelt régészeti kerámiák is vizsgálhatók az eljárással. A cellulóz-nitrát élénksárga lumineszcenciával rendelkezik, amely lehetővé teszi a ragasztó láthatóságát, és a cellulóz-nitrát eltávolításának és cseréjének nyomon követését⁶⁰.

További példák is vannak az elvégzett beavatkozások kimutatására, például az olyan tárgycsoportokat bemutatva mint, a dagerrotípiák és a fonott kosarak. Egy tanulmányban, amely a dagerrotípiákon előforduló szennyeződések elemzését és jellemzését vizsgálta, bemutatták az UV-C használatát a foltok megfigyelésére, ami a korábbi kezelések jele lehet (Daffner et al. 1996). Az ibolyántúli sugárzást használták már arra, hogy megkülönböztessék a kosarak szerkezeti javításait az eredeti anyagoktól⁶¹. Az UvVL technikát számos esetben „diagnosztikai eszközként írják le, a tárgyak felületi eltéréseinek megatározására”, amely mind a korábbi kezelések, mind a hamisítások megfigyeléséhez releváns. A korábbi kezelések feltárása és a hamisítványok felderítése annyiban hasonló, hogy mivel általában nem eredeti anyagok alkalmazására támaszkodnak, azok is eltérően reagálnak az ibolyántúli sugárzás hatására az eredeti anyagokhoz képest. A

⁶⁰ M. Neiro, “Adhesive Replacement: Potential New Treatment for Stabilization of Archaeological Ceramics,” *Journal of the American Institute for Conservation* 42, no. 2 (2003): 237–44, <https://doi.org/10.1179/019713603806112822>.

⁶¹ T. de Alarcón, R. O. Hern, and E. Pearlstein, “Case Studies in Basketry Repair: Two Abenaki Splint Baskets,” *Journal of the American Institute for Conservation* 51, no. 2 (2013): 123–43, <https://doi.org/10.1179/019713612804860374>.

különböző anyagok és alkalmazások bemutatásakor számos példát hoznak a hamisítások felderítésére. A múzeumi munkában előforduló hamisítások kimutatására a lumineszcencia segítségével, ideértve a kőületek és maradványok utánzásával és javításával kapcsolatos eltérő lumineszcencia-válaszokat; régi és frissen vágott márvány vagy alabástrom; felületi elváltozások kerámia tárgyakon; tinták és pigmentek papíron, beleértve a javításokat és a hamisításokat. A múzeumi alkotásokról szóló rész mellett több írás tartalmaz egy olyan fejezetet a jogi és kriminológiai alkalmazásokról is, amelyek az UvVL-nek a hamisítások, írások eltávolítására és módosítások kimutatására való felhasználását tárgyalták (Radley and Grant 1959).

10.8 Reprodukálhatóság és összehasonlíthatóság

Számos tanulmány az ultraibolya sugárzást vagy az UvVL technikát olyan vizsgálati módszerek egyikeként említi – beleértve más képalkotó technikákat és analitikai módszereket is – ahol egyes esetekben alig vagy egyáltalán nincs tájékoztatás a módszerrel kapcsolatos beállításokról, a felvételkedzésről vagy az elkészült felvételek feldolgozásáról. A legtöbb esetben nem a technika áll az írás középpontjában. Bár az ilyen számú előfordulás azt mutatja, hogy az eljárást széles körben használják, és a kutatási, restaurátori dokumentációk eszközeként szinte állandóan szerepel, ez a fókusz és a módszerrel kapcsolatos információk hiánya azt is jelezheti, hogy szükség van a szabványosításra és a módszer reprodukálhatóságának és összehasonlíthatóságának növelésére. Bár az UvVL-t gyorsnak, megfizethetőnek és hozzáférhetőnek tartják, és ultraibolya sugárzókat a legtöbb konzerváló/restaurátor műteremben találnak, vannak olyan tényezők, amelyek korlátozzák a technika analitikai képességeit, beleértve a reprodukálhatóságot és az összehasonlíthatóságot.

Ezek a tényezők közé tartozik még a vizsgált anyag, az ultraibolya sugárzás forrása, valamint a rögzítő eszköz és a képfeldolgozás módszertana is befolyásolják a vizsgált és dokumentált lumineszcencia eredeti színét és intenzitását.

10.9 Képalkotás

10.9.1 Ultraibolya sugárforrások

Ma már az ultraibolya-sugárforrások széles skálája áll rendelkezésre, amelyek a hullámhossz-kibocsátásban (csúcs és eloszlás), a forrás szűrésében, valamint az eredő szint és a

lumineszcencia intenzitását befolyásolóan változnak. Az ultraibolya sugárforrás kimenete tartalmazhat széles vagy szűk hullámhossz-tartományt, és néha az ibolyántúli tartományon kívüli más tartományba eső (látható és infravörös) szórt sugárzást is. A különböző hullámhosszok befolyásolhatják a keletkező lumineszcenciát, a szórt sugárzás pedig akadályozhatja bizonyos lumineszcencia szín tényleges megfigyelését.

A sugárforrások alapvetően két fő típusba sorolhatók: folyamatos és villanó (vaku) üzemű forrásokra. A restaurátori gyakorlatban az ultraibolya tartományban működő folyamatos fényforrások alkalmazása lényegesen elterjedtebb, mint a villanóforrásoké. Bár egyes elektronikus vakuk képesek ultraibolya sugárzás kibocsátására, sok esetben ezek a készülékek gyárilag beépített ultraibolyaszűrővel rendelkeznek, amely jelentősen korlátozza, vagy teljes mértékben kizárja alkalmazhatóságukat lumineszcencia-alapú képalkotás során. Léteznek ugyan szűrő nélküli, kifejezetten ultraibolya tartományban működő vakuk is, azonban ezek használata a műtárgyrestaurálás területén ritkának mondható.

A folyamatos ultraibolya sugárforrások közé tartoznak a nagynyomású és alacsony nyomású higanygőz lámpák és LED típusú sugárzók is. A nagynyomású higanygőz lámpák vagy a nagy intenzitású kisülési (HID⁶²) lámpák domináns csúcsa 365 nanométer (UV-A), széles sávja körülbelül 325 és 400 nanométer között van, bár – ahogy már többször említésre került – van kibocsátás/emisszió a látható és az infravörös tartományban is.

Az alacsony nyomású (fluoreszkáló) sugárforrásokat (fekete-kék - BLB⁶³ fénycsövek) is lehet UV-A sugárforrásként használni. Ezek kisebb intenzitásúak, mint a nagynyomású lámpák, és jelentős látható tartományú fénykibocsátásuk is lehet, de nem igényelnek transzformátort, hosszú felmelegedési időt, és könnyebben be- és kikapcsolhatók. Léteznek olyan alacsony nyomású fényforrások, melyek domináns csúcsa 254 nanométer-en van, és UV-C-forrásként használják, foszforbevonat nélkül és szűrővel próbálják eltávolítani a látható hullámhosszokat. Sajnos ezek a fényforrások a legtöbb esetben méretük és alakjuk miatt tovább nem szűrőzhetők

⁶² High Intensity Discharge – Nagy intenzitású gázkisülésű fényforrások. Működési elvét tekintve a fény emissziót (a higanylámpákhoz hasonlóan) ívkisüléses gerjesztés hozza létre egy nagynyomású gázokkal és fém sókkal töltött kerámia vagy kvarc üveg kisülő csőben. https://en.wikipedia.org/wiki/High-intensity_discharge_lamp 2025.08.22.

⁶³ BLB – Black light blue fénycsövek https://www.lighting.philips.com/prof/conventional-lamps-and-tubes/special-lamps/colored-and-blacklightblue--blb-/BLB_SU/category 2025.08.22.

Ma már kiváló minőségű UV-A-tartományban sugárzó fénykibocsátó diódák (LED-ek) kaphatók és ultraibolya forrásként használatosak. Ezeket szélesebb körben alkalmazták ibolyántúli sugárzók formájában. Restaurátori területre példának okáért a Deffner und Johann® osztrák cég gyárt és forgalmaz nagy teljesítményű ultraibolya LED reflektorokat, valamint kézi anyagvizsgáló lámpákat (UV-A-365 nanométer). Komolyabb tanulmányokban és laboratóriumi körülmények között a kimondottan kriminológiai területre készített Horiba® CrimeScope⁶⁴ eszközöket használják. A PhaseOne a Rainbow rendszeréhez pedig az amerikai dedolight® cég kiváló teljesítményű és méretéből adódóan, jól szűrőzhető, 365 nanométeres ultraibolya LED sugárzóit használja.

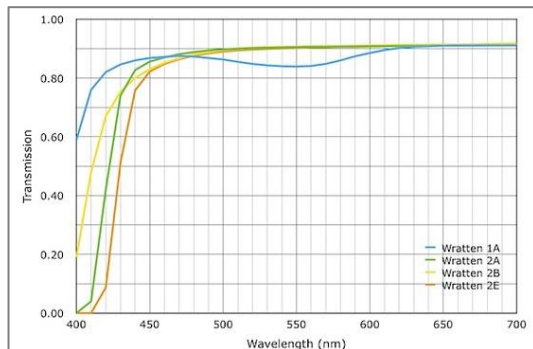
10.9.2 A felvételkedítő eszköz és képfeldolgozás⁶⁵

A képrögzítő eszköz és a képfeldolgozás befolyásolja a végső képalkotást és az eredmények értelmezését. Az általános forgalomban is kapható digitális fényképezőgépekben található szilícium-érzékelők eredendően érzékenyek az ultraibolya és infravörös sugárzásra, de általában infravörös blokkszűrővel rendelkeznek az érzékelő előtt, a látható tartományú, színes fényképezés optimalizálása érdekében. Ezeknek a digitális fényképezőgépek érzékenysége típusonként és gyártónként eltérő, ami hatással lesz a keletkező UvVL-képekre. Egy *full spectrum* átalakítású kameránál a látható tartományú képalkotás esetén is szükséges alkalmazni sávszűrőket (például Baader Planetarium IDAS-IUBAR, Schott BG38 vagy Schott BG39 vagy Peca 918 szűrők – 27, 29 és 31-es ábrák) és/vagy ultraibolya és a látható kék-lila fényt is blokkoló szűrőt (pl.: a Kodak Wratten 2E, Heliopan G5, B+W 021, Hoya K2, Schott KV418 – 26, 28 és 30-as ábrák)) ezek az infravörös sugárzás blokkolására is alkalmasak. A szakirodalmi ajánlások szerint, ha nem ezeket a szűrőket használjuk, az színeltolódást okozhat, és az befolyásolhatja a lumineszcencia intenzitását is. A sárga szűrőket részletesen a 11. fejezet részletesen tárgyalja).

⁶⁴ A Horiba® CrimeScope hordozható alternatív fényforrás, amelyet elsősorban kriminalisztikai vizsgálatokhoz fejlesztettek. Széles hullámhossztartományban sugároz, azonban kis méretű fényköre miatt nem biztosít homogén, nagy felületű megvilágítást, így műtárgydokumentációra és kiterjedt képalkotási feladatokra kevésbé alkalmas. <https://www.horiba.com/int/scientific/products/detail/action/show/Product/crimescope-cs-16-500w-1702/> 2025.08.22

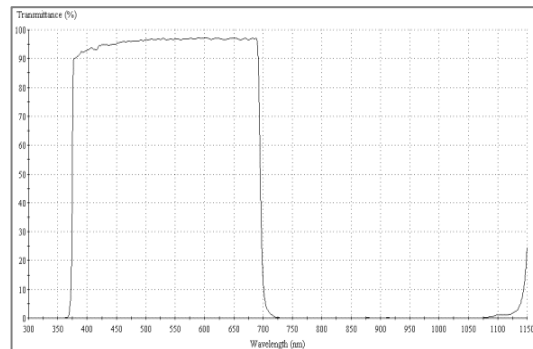
⁶⁵ Antonino Cosentino, "Practical Notes on Ultraviolet Technical Photography for Art Examination," *Conservar Património* 21 (June 2015): 53–62, <https://doi.org/10.14568/cp2015006>.

Sárga szűrők az ultraibolya sugarak és a látható lila-kék tartományú fény szűrésére

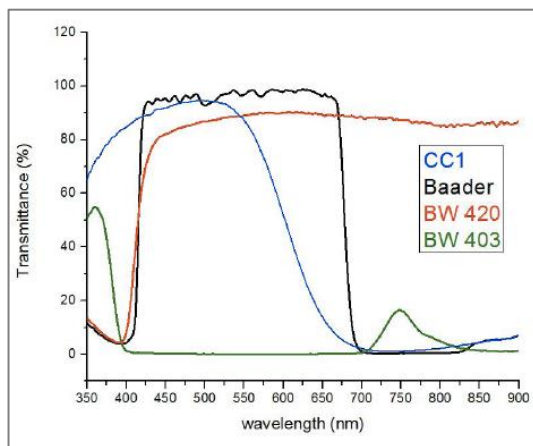


27. ábra - Kodak Wratten szűrők, többek között a 2E transzmissziós ábrája -Forrás: <https://www.kodak.com/en/motion/page/wratten-2-filters/>

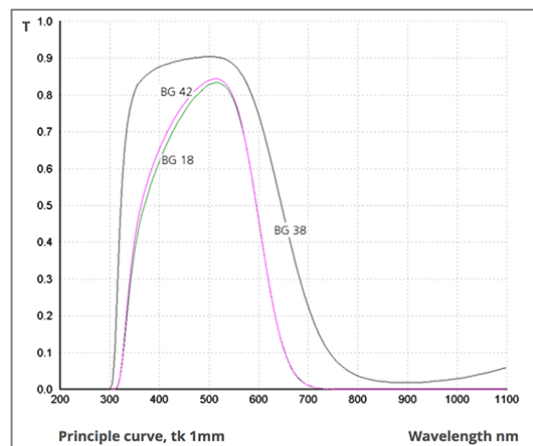
Full spektrum átalakítású kamerákon szükség szerint alkalmazott sávszűrők, melyek csak a látható tartományú fényt engedik át



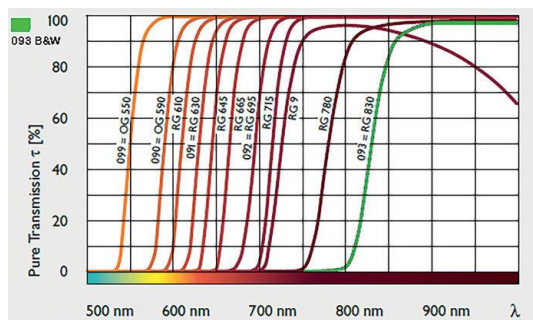
28. ábra - Az IDAS-UIBAR szűrő transzmissziós spektruma – Forrás: Joanne Dyer 2013



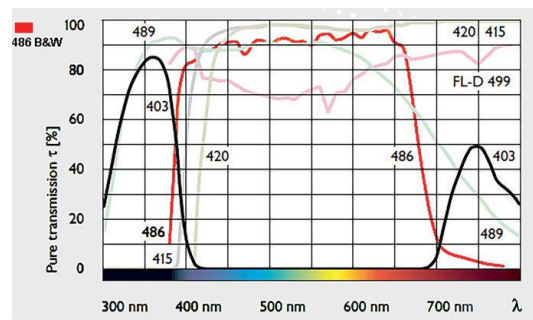
29. ábra - sávszűrők transzmissziós görbéi, többek között a Baader Planetarium szűrőé is Forrás: Antonio Consentino 2015



30. ábra - A Schott BG szűrőinek transzmissziós görbéi Forrás: https://www.pgo-online.com/de/kurven/optische_glasfilter/BG18_BG38_BG42.html



31. ábra - a B+W sárga, narancs, vörös és infra-vörös szűrői. Forrás: Kokla és Tselikas 2020



32. ábra - a B+W átható sávszűrője. Forrás: Kokla és Tselikas 2020

A kamera beállításai, a képfeldolgozás és a kalibrálás szintén befolyásolják az eredményeket. Az UvVL technika egyik kihívása a felvétel legjobb expozíciójának meghatározása. Ahogy arról a fentiekben szó volt, a fényképezőgép beállításainak módosítása

a lumineszcencia intenzitás mellett, befolyásolja az expozíciót, valamint a kapott lumineszcencia szint is. Ezek mellett a fehéregyensúly beállítás és más a kamerákban automatizált képfeldolgozási lépések szintén hatással lehetnek az eredményekre. Így ezek kikapcsolása ajánlott. A különböző referencia színskálák alkalmazása a munkafolyamatok során, majd a kalibrálási lépésekhez kapcsolódó képfeldolgozás szintén (ezt az értekezés 8. fejezete részletesen tárgyalta). Az UvVL eredmények értelmezése kihívásokat jelenthet. Rorimer⁶⁶ 1931-ben már hangsúlyozta a laboratóriumi tapasztalat szükségességét a megfelelő következtetések levonásához, Tragni⁶⁷ pedig kijelentette, hogy:

„...az UV-sugárzás alatti vizsgálat a megfigyelések zavarának és a néző szubjektivitásának van kitéve. A fényképeszeti anyagok és a fluoreszcencia jelenségek jó megértése szükséges, és a következtetéseket mindig a tárgyra vonatkozó további bizonyítékok figyelembevételével kell levonni” (2005: 8).

Tehát az UvVL eredmények értelmezése tapasztalatot és szakértelmet igényel a módszerrel és az anyagokkal kapcsolatban, és általában a technika önmagában nem nyújt meggyőző bizonyítékot, hanem kiegészítő technikák alkalmazását igényli, különösen az anyagok analitikai pontosságú azonosításához.

10.9.3 Az ultraibolya és sárga szűrők együttes alkalmazása

A szakirodalom szinte minden képalkotással foglalkozó tanulmánya hangsúlyozza a megfelelő szűrők használatának fontosságát az UvVL képalkotás során. Számos szerző konkrét ajánlásokat is megfogalmaz arra vonatkozóan, hogy különböző típusú kamerák esetén mely szűrők alkalmazása biztosítja az optimális eredményt.

A következő szűrőkombinációk a javasoltak:

1. Általános (nem átalakított) kamerák esetében: a sugárforrásból származó, valamint a tárgy felületéről visszaverődő ultraibolya és kékes-lilás komponensek kiszűrésére, olyan sárga szűrőket ajánlanak, mint például: Schott GG400 vagy KV418, B+W 021, Heliopan Gelb 5, Kodak Wratten 2E és Panchromar G1.

⁶⁶ James J. Rorimer, *Ultra-Violet Rays and Their Use in the Examination of Works of Art* (New York: The Metropolitan Museum of Art, 1931).

⁶⁷ C. B. Tragni, Juan Chen, and Diane Kushel, *The Use of Ultraviolet-Induced Visible Fluorescence for Examination of Photographs*, Capstone Research Project, Advanced Residency Program in Photograph Conservation, George Eastman House / Image Permanence Institute (Rochester, NY, 2005), accessed August 18, 2025, <https://www.eastman.org/advanced-residency-program-photograph-conservation-capstoneresearch-projects>.

2. Full spektrum átalakítású kamerák esetében: ezeknél a készülékeknél a fenti sárga szűrők alkalmazása mellett elengedhetetlen az ultraibolya és infravörös sugárzást kiszűrő sávszűrők (úgynevezett UV/IR cut vagy *hot mirror* filterek) használata is. Ilyen típusok például: Baader Planetarium IDAS UIBAR, Schott BG38, B+W 486 vagy Baader Planetarium UV/IR cut.

Meglepő módon egyik tanulmány sem tér ki arra a gyakorlati problémára, amely akkor jelentkezik, ha a vizsgált tárgy felületéről az ultraibolya sugárzás nagy arányban visszaverődik, és ez a sugárzás a szűrőkkel kölcsönhatásba lép. A probléma forrása, hogy a fenti sárga szűrők többsége kadmium sókkal színezett optikai üvegből készül. Ezek az anyagok kiváló ultraibolya elnyelő képességgel rendelkeznek, azonban egyúttal lumineszkálnak is: a gerjesztett állapotból látható narancssárga fényt bocsátanak ki. Ez a szűrőlumineszcencia torzítja a kép színhatását, így a felvételek kiértékelése félrevezetővé válhat.

Az általános kamerák alkalmazása során célszerű kiegészítő ultraibolya blokkoló szűrők használata, amelyek hatékonyan csökkentik a sárga szűrőre jutó ibolyántúli sugárzás mértékét. Ezek a szűrők a látható fényt teljes mértékben átengedik, miközben jelentős mértékben kiszűrrik az ultraibolya sugárzást, ezáltal mérsékelve a sárga szűrőre érkező gerjesztő hatású nyalábokat. Ilyen célra bevált típusok például: Schott UV, B+W UV-Haze protection (MRC, T-pro, nano stb.) Zeiss T* UV szűrő és Hoya UV© protection.

A *full spectrum* átalakítású kamerák használata során elegendő figyelmet fordítani a szűrők alkalmazásának sorrendjére. Abban az esetben, ha a megfelelő UV/IR cut szűrő az optikai rendszer első elemeként kerül beépítésre, az a nem kívánt ultraibolya sugárzást teljes mértékben kiszűri, így a sárga szűrő lumineszkálása nem jelent problémát. Az UV/IR cut és a sárga szűrők együttes hatásmechanizmusa és gyakorlati alkalmazása részletesebben a következő fejezetben bemutatott tanulmányban kerül ismertetésre.

11 AZ UV-VL KÉPALKOTÁS SORÁN ALKALMAZOTT SÁRGÁ SZŰRŐK RÉSZLETES BEMUTATÁSA⁶⁸

A UV-VL vizsgálatok esetén az egyik legfontosabb szempont az ultraibolya sugárforrás által kibocsátott (és a felületről visszaverődő) sugárzás hatékony kiszűrése, annak érdekében, hogy a képalkotás kizárólag az tárgy lumineszcenciáján alapuljon, ne az összetett kibocsátott és visszavert sugárzáson. A digitális kamerák érzékelői általában rendelkeznek valamilyen belső szűrőréteggel, ez önmagában nem elégséges, külön külső szűrő alkalmazása is szükséges.

Fontos probléma, hogy bizonyos szűrők maguk is lumineszkálnak a gerjesztő sugárzás hatására, ami zavaró színhatásokat vagy szellemképeket eredményezhet, különösen, ha a tárgy felületéről visszaverődő ultraibolya sugarak visszajutnak a kameraobjektívhez. Klasszikus példa a Schott KV-418 szűrő, amelyet korábban széles körben alkalmaztak UV-VL képalkotáshoz alacsony saját emissziója és hatékony ultraibolya blokkoló képessége miatt. Ugyanakkor ez a szűrő már nem kapható, és korlátozott méretezése miatt korábban sem volt univerzálisan használható.

A fejezet célja, hogy gyakorlati útmutatást nyújtson a megfelelő szűrők kiválasztásához az UV-VL képalkotáshoz. A feldolgozott publikációban bemutatott vizsgálat számos általánosan hozzáférhető szűrő ultraibolya alatti lumineszcenciáját értékeli, kvantitatív mérési módszerrel. Emellett megméri és elemzi e szűrők fényáteresztését a 250–800 nanométer közötti tartományban, illetve egy egyszerű, kutatók által is alkalmazható módszerrel ismerteti a szűrők saját lumineszcenciájának házilagos vizsgálatára is.

11.1 A vizsgálat módszertana

A vizsgálat során a fényképezés és a spektroszkópia kombinációját alkalmazták a szűrők értékelésére. A szűrők saját lumineszcenciájának meghatározásához szélessávú ultraibolya sugárforrással végzett, UV-VL képalkotást alkalmaztak. Emellett optikai transzmissziós spektroszkópiával mérték a szűrők fényáteresztését az ultraibolyától az infravörös tartományig.

⁶⁸ John Crowther, "Ultraviolet Fluorescence Photography—Choosing the Correct Filters for Imaging," *Journal of Imaging* 8, no. 6 (2022): 162, <https://doi.org/10.3390/jimaging8060162>.

11.2 A szűrők lumineszcenciájának mérése

A szűrők lumineszcenciájának vizsgálata két fő elemből állt: egy kontrollált ultraibolya sugárforrásból és egy képalkotó rendszerből. A vizsgálatokhoz egy Hamamatsu LC8 típusú készüléket⁶⁹ alkalmaztak, amelyet egy 200 watt-os xenon lámpával szereltek fel, és a sugárforrást a vizsgált optikai szűrőtől 40 centiméter távolságra helyezték el. A sugárforrás elé egy Baader U-Venus szűrőt⁷⁰ helyeztek, amely az emissziós nyílásra került, és a világítást legalább 30 percig hagyták bemelegedni és stabilizálódni bármilyen felvétel előtt. A szűrés eredményeként a gerjesztéshez 320–400 nanométer közötti ultraibolya hullámhossztartomány került alkalmazásra. A sugárforrás spektrális irradianciáját⁷¹ Ocean Optics FX típusú spektrométerrel mérték, amelyet egy 600 mikrométeres extrém szolarizációs optikai szálra szerelt koszinusz-korrektorról⁷² használtak.

A vizsgált szűrőt megtisztították, majd 40 centiméterre helyezték a sugárforrástól egy olyan zárt térben, amelyet Semple Black 2.0 festékkel⁷³ festettek ki. Korábbi vizsgálatok szerint ez a festék nagy fényelnyelő képességgel rendelkezik az ultraibolyától az infravörös tartományig. A belső felületek ilyen festésének célja az volt, hogy minimalizálja a visszavert fények lehetőségét, amelyek a vizsgált szűrőre vagy a kamerára juthatnának. A festékréteget négyszer vitték fel, minden réteg után körülbelül 1 óra száradási időt hagyva.

A vizsgált szűrő által kibocsátott lumineszcenciát egy Canon EOS 6D típusú fényképezőgéppel rögzítették, amelyhez egy Rayfact 105 mm f/4.5 UV objektívet használtak, a lencse elé pedig egy 420 nanométeres határhullámhosszú hosszúhullám-áteresztő szűrőt

⁶⁹ Hamamatsu LC8 (LightningCure LC8): egy nagy teljesítményű spot-fényt forrás (UV-látható tartomány: kb. 240 – 550 nm) fényvezető kimenettel, fém-halogenid (Hg–Xe) lámpával, kompakt, stabil házzal és RS-232C vezérlési lehetőséggel. Specifikusan mikroszkópos megvilágításhoz és fotokémiai alkalmazásokhoz tervezték. Forrás: https://www.hamamatsu.com/us/en/product/light-and-radiation-sources/lamp-module_unit/spot-light-source.html?utm_source=chatgpt.com 2025.08.22.

⁷⁰ Baader Planetarium U–Venus (U-Filter): speciálisan Venus képek készítésére kifejlesztett ultraviola átgengedő szűrő, centrális hullámhossza kb. 350 nm, sávszélessége kb. 60 nm (320–380 nm), amely a látható és közeli infravörös tartományt teljesen blokkolja, csúcstranzmissziója pedig körülbelül 80%. Forrás: https://www.baader-planetarium.com/en/blog/amateur-astronomers-take-a-look-through-the-cloud-cover-of-venus-with-sloan-filters/?utm_source=chatgpt.com 2025.08.22.

⁷¹ Irradiancia: az adott felület egységnyi területére beeső sugárzási teljesítmény, amelynek mértékegysége W/m². A sugárzási teljesítményt (energia időegység alatt) a felület nagyságára vonatkoztatva adja meg. Forrás: Horváth Gábor, *Sugárzási mennyiségek és fotometria* (Budapest: ELTE TTK Fizikai Intézet, 2011), 12–14.

⁷² Olyan optikai szál, amely kifejezetten UV-expozíciónak ellenálló (*solarization-resistant*), így hosszú távú ultraibolya alkalmazásokhoz alkalmas; ha ezt az eszközt koszinusz korrektorról egészítik ki, ami egy 180° látószögű diffúzor (pl. PTFE vagy Spectralon), amely biztosítja a felületi irradiancia pontos, szögátlagolt mérését. Forrás: https://spectroscopy.com/product/cosine-corrector/?utm_source=chatgpt.com 2025.08.22.

⁷³ Semple Black 2.0: egy rendkívül matt fekete, visszaverődésmentes akrilfesték, amelyet Stuart Semple tervezett és fejlesztett ki ((Culture Hustle, Dorset, Egyesült Királyság) Forrás: https://stuartsemple.com/project/black-v1-0-beta-worlds-mattest-flattest-black-art-material/?utm_source=chatgpt.com 2025.08.22.

helyeztek, amely nem mutatott észlelhető lumineszcenciát ultraibolya sugárzás hatására (a szövegben ez a KS 420 nanométer LP szűrőként szerepel). A kamerát ISO 6400 érzékenységgel és f/11 rekesssel használták, a felvételek 14 bites RAW formátumban, valamint JPEG formátumban készültek, napfény fehéregyensúllyal. Az elemzéshez a RAW fájlokat használták, míg a JPEG képek a lumineszcencia színeinek vizuális összehasonlítására szolgáltak.

Az összes kép sötétített helyiségben készült, és a fényforrás elülső LED-jeit fekete szalaggal takarták el. A RAW felvételeket a *RawDigger x64 Research Edition (LibRaw LLC, Potomac, MD, USA, 1.2.23 verzió)* szoftverbe importálták, és RAW-kompozit fájlként elemezték. A fluoreszkáló szűrő egy adott területét maszkolták, és a maszkolt régióból a vörös, zöld 1, kék és zöld 2 csatornák értékeit rögzítették. Minden adatot a *Microsoft Excel 2010* segítségével dolgoztak fel és ábrázoltak. A különböző csatornák válaszait átlagolták, hogy adott expozícióhoz egy átlagos lumineszcenciaértéket kapjanak.

Minden szűrőről legalább három különböző expozícióval készült felvétel, ezek RAW csatornaértékeit pedig az expozíciós idő figyelembevételével normalizálták, hogy szűrőnként összehasonlítható „lumineszcencia érték per másodpercenként” adatot kapjanak. A módszer, amely a RAW fájlok csatornaadataira alapoz, kvantitatívnak bizonyult a gyűjtött fény mennyiségének tekintetében, így lehetővé vált a különböző szűrők lumineszcencia-intenzitásának közvetlen összehasonlítása.

11.3 A szűrők transzmissziójának mérése

A szűrők áteresztési spektrumát 250 és 800 nanométer közötti tartományban mérték Ocean Insight DH-2000-BAL⁷⁴ fényforrással és FX típusú spektrométerrel. A be- és kimeneti optikai szálként 600 mikrométer átmérőjű, extrém szolarizációs optikai kábelt alkalmaztak, amelyekhez 74-UV kollimáló (sugárszűkítő-központosító) lencsét csatlakoztattak, mindezt egy stabil, robosztus állványra szerelve. A méréseket egyrészt csak deutérium lámpával, másrészt a deutérium- és halogénlámpák együttes alkalmazásával is elvégezték. A kapott két spektrumot ezt követően kombinálták annak érdekében, hogy csökkentsék a spektrométeren belüli szórt fény hatását.

⁷⁴ Ocean Insight DH-2000-BAL: egy kiegyensúlyozott UV–NIR spektrális tartományt (kb. 210 nm–2 500 nm) biztosító fényforrás, melyben deutérium- és volfrámhálói izzó egyesül egy optikai úton. Egyedi mintázatu dikroikus szűrői kiküszöbölik a deutérium α -vonalának torzító hatását a látható spektrumban, ezáltal sima, teljes spektrumot biztosítanak, különösen előnyös abszorpciós és reflektanciás mérésekhez zpagegroup.com. 2025.08.22.

11.4 Esettanulmány: Üveg vázáról készült kép ultraibolya sugárzás alatt

Egy üveg vázát ultraibolya sugárzással világítottak meg, a világítási beállítások megegyeztek a 12.2 szakaszban leírtakkal. A vázát 40 cm-re helyezték a sugárforrástól. A felvételeket Canon EOS 6D típusú fényképezőgéppel rögzítették. Két különböző objektív került kipróbálásra: egy Rayfact 105 mm f/4.5 UV objektív és egy Micro Nikkor 105 mm f/4 makróobjektív. A felvételek elkészítése során a lencsén nem volt szűrő, illetve külön-külön használták a következő szűrőket: KS 420 nanométer LP, Firecrest UV400, Quaser 415 nanométer 1%, valamint a LaLa U UV átengedő szűrő. A LaLa U UV áteresztő szűrő (UVIR Optics, Eugene, OR, USA) blokkolja a látható és infravörös sugárzást, miközben átengedi az ultraibolya sugárzást. A fényképezőgép beállításai és a képek elemzése megegyezett az előző szakaszban ismertetett módszerekkel, és minden expozíció időtartama 1/2 másodperc volt.

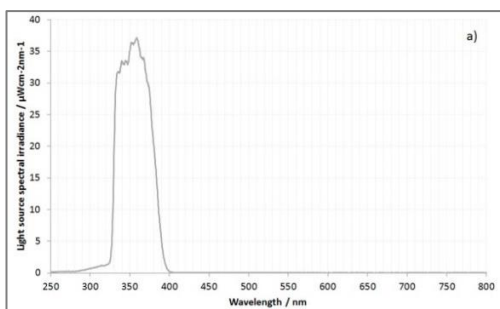
11.5 Eredmények

A kutatók számára széles választék áll rendelkezésre fényképezési szűrőkből, amelyek különböző hullámhossztartományok rögzítését teszik lehetővé – a technikai üvegszűrőktől, mint például a Schott GG400 és GG420, egészen a fogyasztói célú, színes lencseszűrőig, mint amilyeneket a Hoya vagy a Tiffen gyárt. Azonban nehéz lehet eldönteni, hogy ezek közül melyek alkalmasak ultraibolya sugárzás által gerjesztett látható tartományú lumineszcencia képalkotásához a legjobb eredménnyel. A jelen vizsgálat során különböző forrásból származó, a látható és az infravörös tartomány határhullámhosszait lefedő szűrőket teszteltek ultraibolya sugárzás alatt megfigyelhető lumineszcencia szempontjából, emellett pedig optikai transzmissziós spektrumukat is megmérték. A kiválasztott szűrők különféle alkalmazási területeken használatosak, de közös jellemzőjük, hogy blokkolják a rövidebb hullámhosszú ibolyántúli sugárzást. Emellett a dolgozat egy egyszerű, kutatók számára is kivitelezhető módszert is ismertet arra, hogyan tesztelhetik saját szűrőik ultraibolya által gerjesztett látható lumineszcenciáját.

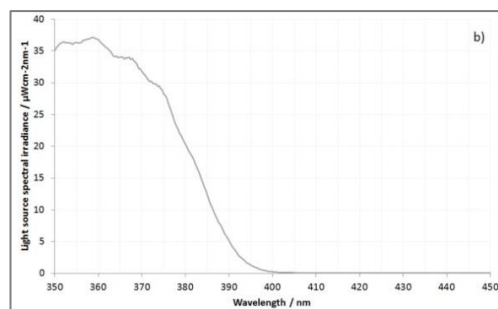
A szűrők megvilágítását egy szélessávú, xenon lámpán alapuló ultraibolya sugárforrással oldották meg. A Baader U-Venus szűrővel történő szűrés után a sugárforrás spektrumát a 32-33. ábra szemlélteti. A spektrumot ugyanabban a távolságban mérték, amelyben a szűrőket is vizsgálták.

A Baader U-Venus szűrő erőteljes sávon kívüli elnyelést biztosít a látható és infravörös tartományban, így a szűrés utáni fény 320 és 400 nanométer közötti ultraibolya

tartományból áll. A spektrumon látható kis váll a 280 és 320 nanométer közötti tartományban nem a szűrő által áteresztett sugárzást jelzi, hanem a spektrométerben fellépő szórt fény hatásának tulajdonítható, ami különösen gyakori olyan szilárdtest spektrométerek esetében, amelyek éles vágáshatárral rendelkező szűrőkkel dolgoznak. A 33. ábrán látható, hogy a sugárforrás legnagyobb irradianciája körülbelül $37 \mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nanométer}$ értéket ért el 360 nanométer körül, ami hasonló az ultraibolya sugárzás intenzitásához a tengerszint feletti napsugárzásban. Ezért a vizsgálat során a szűrők ultraibolya sérülése nem volt várható.



33. ábra - A vizsgált fényforrás spektrális kimenete a Baader Planetarium U-Venus szűrőn való áteresztés után a teljes spektrális tartomány 250–800 nanométer. Forrás: John Crowther 2022

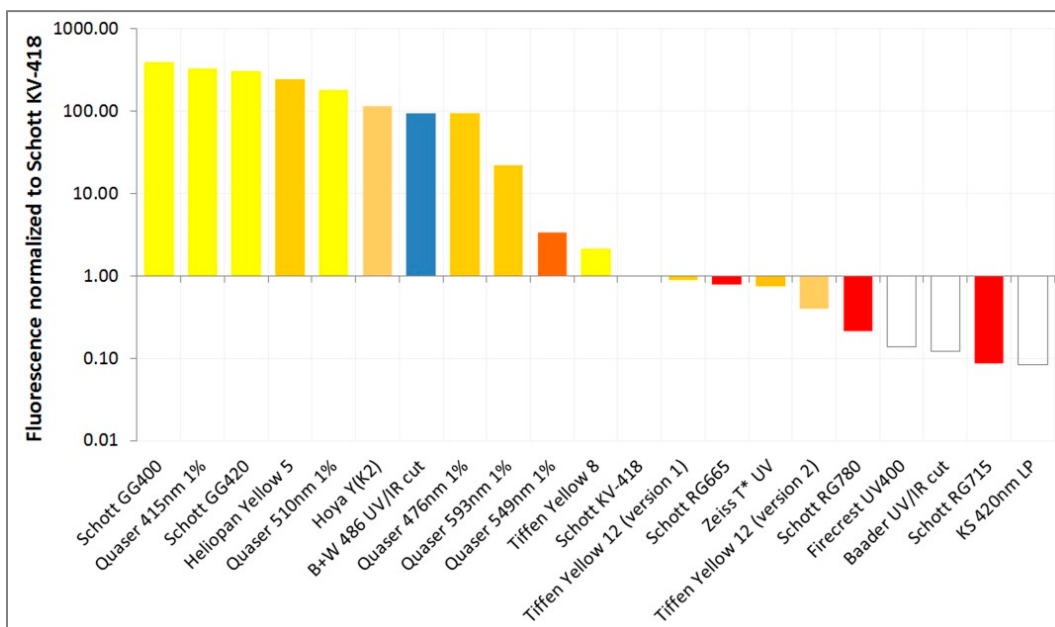


34. ábra - A vizsgált fényforrás spektrális kimenete a Baader Planetarium U-Venus szűrőn való áteresztés után) részletes nézet: 350–450 nanométer. Forrás: John Crowther 2022

A vizsgált szűrők ultraibolya sugárzás hatására széles tartományban mutattak lumineszcenciát, mind az emisszió intenzitása, mind annak színe tekintetében. A lumineszcencia relatív mértéke – az expozíciós időre normalizálva – és a szűrők szintani viselkedése a 34. ábrán szerepel, a szűrővastagságokkal együtt. A Schott KV-418 szűrőhöz viszonyítva rangsorolt és normalizált lumineszcenciaértékeket (36. ábra) mutatja be, megkönnyítve a különböző szűrők összehasonlítását.

Filter	Average Fluorescence s^{-1}	Color of Fluorescence	Thickness
Baader UV/IR cut	15.3	No color	1.9 mm
B + W 486 UV/IR cut	12,048.3	Blue	2.0 mm
Firecrest UV400	17.4	No color	1.1 mm
Heliopan Yellow 5	30,886.6	Orange	1.9 mm
Hoya Y(K2)	14,689.0	Yellow /orange	2.2 mm
KS 420 nm LP	10.7	No color	1.1 mm
Quaser 415 nm 1%	41,525.1	Yellow	3.0 mm
Quaser 476 nm 1%	12,046.2	Orange	3.0 mm
Quaser 510 nm 1%	22,769.2	Yellow	3.0 mm
Quaser 549 nm 1%	431.3	Red /orange	3.0 mm
Quaser 593 nm 1%	2771.9	Orange	3.0 mm
Schott GG400	49,779.7	Yellow	3.0 mm
Schott GG420	38,689.6	Yellow	3.0 mm
Schott KV-418	127.0	Pale yellow	3.1 mm
Schott RG665	100.4	Pale red	3.0 mm
Schott RG715	11.0	Pale red	3.0 mm
Schott RG780	27.4	Pale red	3.0 mm
Tiffen Yellow 8	270.9	Yellow	2.7 mm
Tiffen Yellow 12, (version 1)	112.3	Yellow /orange	2.3 mm
Tiffen Yellow 12, (version 2)	51.2	Yellow /orange	2.3 mm
Zeiss T* UV	95.0	Pale orange	1.9 mm

35. ábra - A tesztoszűrők lumineszcencia-intenzitása másodpercenkénti normalizálással, a megfigyelt lumineszcencia színe és a szűrő vastagsága. Forrás: John Crowther 2022



36. ábra - A vizsgált fényképezési szűrők lumineszcenciája, a Schott KV-418-hoz viszonyítva normalizálva. A diagram oszlopainak színe a szűrők lumineszcenciájának színét jelöli. Forrás: John Crowther 2022

Meg kell jegyezni, hogy a vizsgált szűrők lumineszcencia-intenzitása rendkívül széles tartományban változott (lásd a lumineszcencia logaritmikus skálán, 36. ábra). Egyes szűrők – mint például a Schott GG400 és GG420, a Quaser 415 nm, 476 nm és 510 nm, a Heliopan Yellow 5, valamint a Hoya Yellow Y (K2) – ultraibolya sugárzás hatására

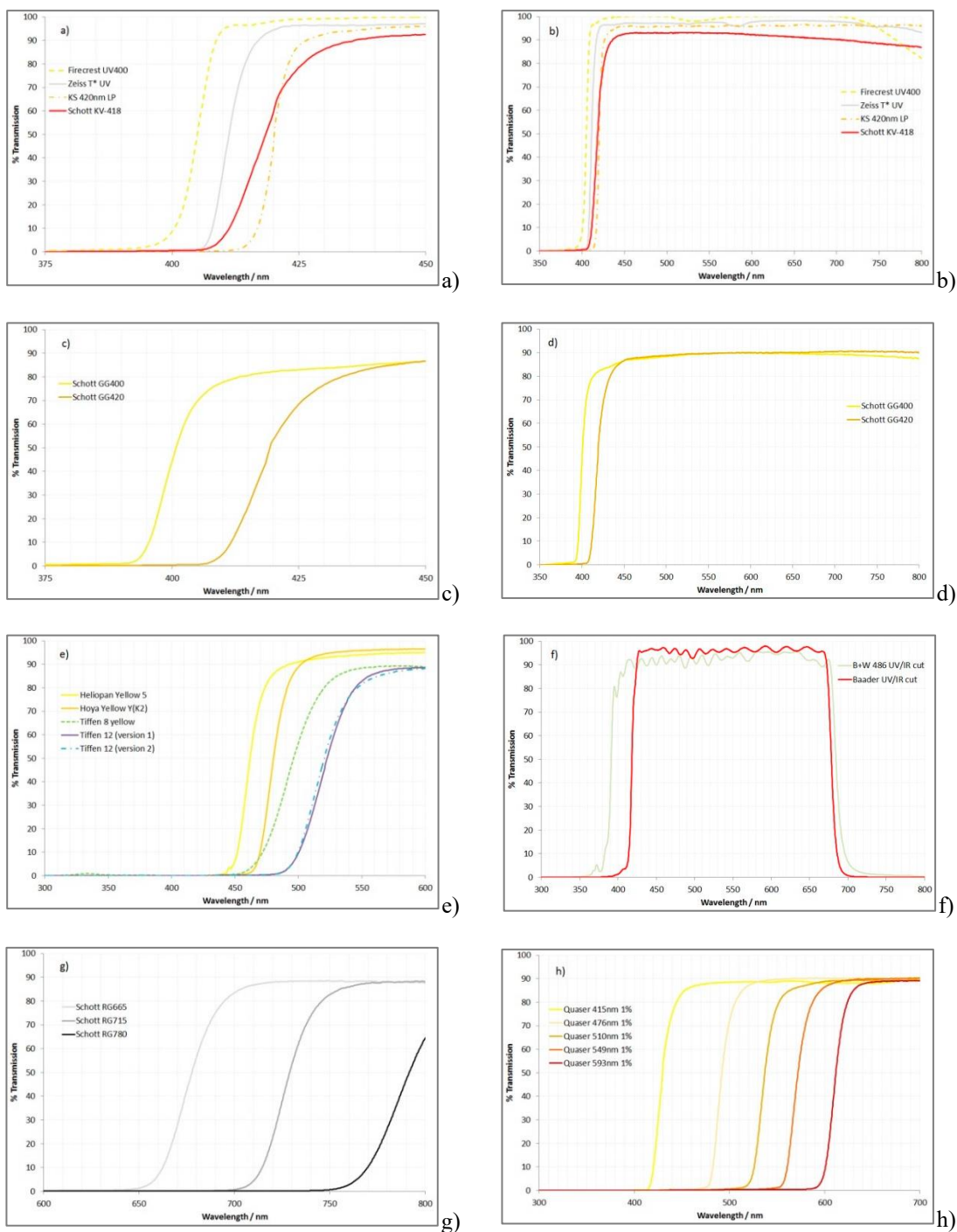
rendkívül erős lumineszcenciát mutattak, míg mások – köztük a Schott KV-418, a Baader UV/IR cut, a Tiffen Yellow 12, az Schott RG sorozat infravörös szűrői, a Firecrest UV400 és a Zeiss T* UV – alig vagy egyáltalán nem bocsátottak ki látható lumineszcenciát. A vizsgált szűrők lumineszcencia-intenzitása között csaknem négy nagyságrendnyi különbség volt. A Quaser szűrők (amelyeket néha "Quasar" név alatt is említene) feltehetően hosszúhullámú áteresztő szűrők, hasonlóan a Schott OG és GG szériához, és a Mason Vactron által forgalmazott kriminalisztikai képalkotó szűrők körébe tartoztak. A Schott KV-418, amelyet általában ultraibolya blokkoló szűrőként alkalmaznak lumineszcencia-képalkotásban, nagyon alacsony lumineszcenciát mutatott; ugyanakkor több itt tesztelt szűrő hasonló vagy még alacsonyabb lumineszcenciaértéket adott.

A lumineszcenciát mutató szűrők többsége sárga vagy narancssárga színnel világított a gerjesztés hatására (az RG szűrők esetében halvány vöröses árnyalattal). A B + W 486 UV/IR blokkoló szűrő ezzel szemben kék színben lumineszkált, és ez volt az egyetlen ilyen viselkedést mutató szűrő a teszt során. Ez feltehetően a szűrőn alkalmazott dikroikus bevonat⁷⁵ hatásának tudható be. Ez a viselkedés jelentősen eltért a másik tesztelt UV/IR blokkoló szűrőétől, a Baader UV/IR szűrőétől, amely szintén dikroikus bevonattal rendelkezik, de nem mutatott kimutatható lumineszcenciát. Ez arra utal, hogy a dikroikus bevonat jellege jelentős hatással lehet a szűrő lumineszcenciás tulajdonságaira. Az infravörös szűrők (RG665, 715 és 780) halvány vöröses lumineszcenciát adtak, amely gyengébb volt, mint a Schott KV-418 esetében mért érték.

A felvételek értékelése során megállapították, hogy a Semple Black 2.0 festék, amelynek ultraibolya reflektanciája korábban alacsonynak bizonyult a szórt fény reflektanciájának elemzése alapján, szintén rendkívül alacsony lumineszcenciát mutatott ultraibolya sugárzás alatt, így ideális fekete festéknek bizonyult az ilyen típusú vizsgálatokhoz használt zárt terek kialakításához.

Noha minden szűrőnél a 250–800 nanométeres tartományt vizsgálták, a 36. ábrán bemutatott görbéket az optikai tulajdonságaik alapján csoportosították, és az ábrákon csak azok a hullámhossztartományok szerepelnek, ahol a szűrők átviteli jellemzői jelentős változást mutattak.

⁷⁵ Dikroikus szűrő: olyan optikai szűrő, amely egyes hullámhosszakat nagy hatékonysággal átereszt, másokat pedig visszaver. A rétegezett dielektromos bevonatok interferenciajelenségein alapul, így nagy spektrális szelektivitást és stabilitást biztosít, főként fényforrások spektrális kiegyensúlyozására és képalkotó rendszerekben használt színszétválasztásra alkalmazzák (Hecht, *Optics*, 5. kiadás, 2017).



37. ábra - A vizsgált szűrők áteresztési spektrumai: (a) Firecrest UV400, Schott KV-418, Zeiss T* UV és KS 420 nm LP 375 nm-től 450 nm-ig terjedő tartományban; (b) Firecrest UV400, Schott KV-418, Zeiss T* UV és KS 420 nm LP kiterjesztett tartománya 350 nm-től 800 nm-ig; (c) Schott GG400 és GG420 375 nm-től 450 nm-ig; (d) Schott GG400 és GG420 350 nm-től 800 nm-ig; (e) Heliopan Yellow 5, Hoya Yellow Y(K2), Tiffen Yellow 8, Tiffen Yellow 12 (1. és 2. változat) 300 nm-től 600 nm-ig; (f) B+W 486 UV/IR cut és Baader UV/IR cut 300 nm-től 800 nm-ig; (g) Schott RG665, RG715 és RG780 600 nm-től 800 nm-ig; (h) Quaser 415 nm 1%, 476 nm 1%, 510 nm 1%, 549 nm 1%, 593 nm 1% 300 nm-től 700 nm-ig. A Schott KV-418 szűrő egy fokozatos levágást mutat, amely kb. 405 nm-nél kezdődik (3a ábra), majd a 418 nm körüli hullámhosszon éri el az 50%-os maximális áteresztést, ahogy az várható volt. Ezt követően az áteresztési görbe viszonylag lapos marad kb. 580 nm-ig, majd fokozatosan emelkedik tovább. Forrás: John Crowther 2022

A Schott KV-418 szűrő egy fokozatos levágást mutat, amely körülbelül 405 nanométernél kezdődik, majd körülbelül 418 nanométernél éri el az 50%-os maximális áteresztést, ahogy az elvárható. Ezt követően az áteresztés viszonylag állandó marad körülbelül 580 nanométerig, majd fokozatosan csökken 800 nanométerig. Az áteresztési görbe emelkedésének sebessége hasonló a Schott GG400 és GG420 szűrőkhöz, de lassabb, mint a Zeiss T* UV és a Firecrest UV400 szűrők esetében (37. ábra).

Az 5 darab sárga/narancs színű szabvány fotószűrő közül, a Tiffen 8 és 12 szűrők kevésbé határozott levágást mutattak az áteresztési spektrumban, mint a Hoya és Heliopan sárga szűrők. Továbbá a Tiffen 8 sárga szűrő nem blokkolta teljes mértékben az ultraibolya sugárzást, mivel körülbelül 340 nanométernél kis, de érzékelhető áteresztési csúcsot mutatott. A Tiffen 12 két különböző változatának áteresztési spektruma szinte teljesen azonos volt.

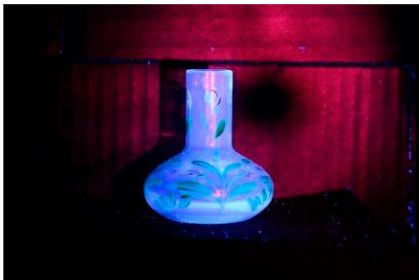
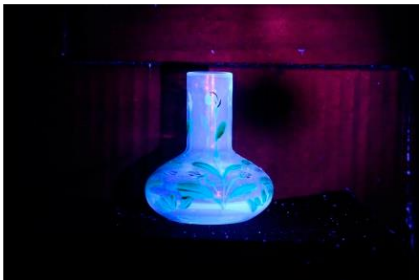
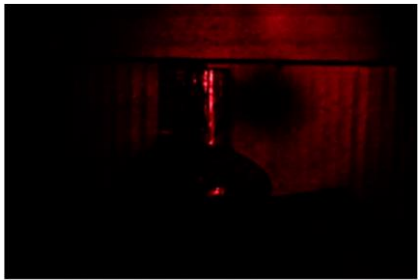
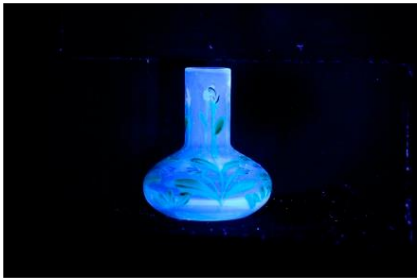
A két ultraibolya/infravörös blokkoló szűrő szintén eltérően viselkedett. A B+W 486 szűrő jelentős mennyiségű ultraibolya sugárzást engedett át 400 nanométer alatt (egészen 360 nanométerig), valamint infravörös tartományban 700 nanométer felett. A Baader Planetary UV/IR cut L szűrő azonban sokkal hatékonyabb volt mind az ultraibolya, mind az infravörös tartomány blokkolásában, és korábbi tanulmányok is kiemelték alkalmazását lumineszcenciafotózási célokra.

Az infravörös szűrők, az Schott RG665, RG715 és RG780, az elvárásoknak megfelelően viselkedtek: blokkolták a rövidebb hullámhosszú fényt, a vágáspontjaik a megadott tartományokban jelentkeztek. A Quaser szűrők hosszúhullám-áteresztő szűrők, amelyek 420–600 nanométeres tartományt fednek le.

Összefoglalva az áteresztési tulajdonságokat: a Schott GG420 viselkedése nagyon hasonló volt a Schott KV-418 szűrőhöz mind a levágási hullámhossz, mind az áteresztési görbe emelkedési sebessége tekintetében. Azonban, ahogy korábban említettük, a GG420 szűrő magas fokú lumineszcenciát mutatott ultraibolya sugárzás hatására, ami problémát jelenthet lumineszcenciafotózási alkalmazásokban. A kereskedelmi forgalomban könnyen elérhető szűrők közül a Zeiss T* UV szűrő volt a legközelebb a Schott KV-418-hoz, mivel hasonló hullámhosszon (kb. 405 nanométer) kezdte meg az áteresztést, bár az emelkedése gyorsabb volt, 411 nanométernél érte el az 50%-ot, szemben a KV-418 418 nanométerével. A Baader UV/IR szűrő szintén hasonló 50%-os áteresztési hullámhosszal rendelkezett, mint a Schott KV-418 és a GG420, és a Zeiss T* UV szűrőhöz hasonlóan nagyon alacsony lumineszcenciát mutatott ultraibolya sugárzás alatt.

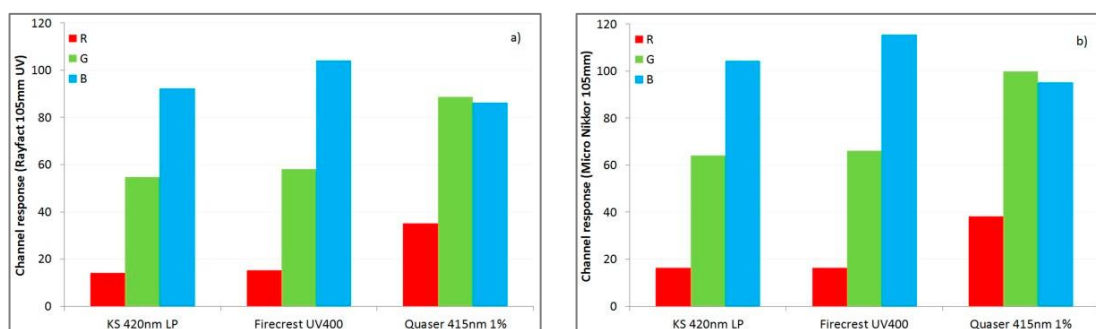
Az ilyen típusú szűrők alkalmazásával kapcsolatos problémák bemutatására egy üvegváza lumineszcenciafelvételét mutatja az (38. ábra). Ha nincs szűrő az objektíven, a képeken lumineszcencia (a váza erős kék emissziója) mellett az ultraibolya sugárzás tükröszerű visszaverődése is megjelenik. Ez a visszaverődés vöröses árnyalatúként jelenik meg a váza felületén és a fekete háttéren. Az ultraibolya sugárzás vörös színként való megjelenése a fényképezőgép érzékelőjének spektrális válaszára vezethető vissza. Bár a fényképezőgép nem volt módosítva, és tartalmazott ibolyántúli- és infravörös-blokkoló szűrőket, ezek nem voltak elég hatékonyak a tükröződés-szerű visszaverődések kiszűrésére, ami hangsúlyozza a külső szűrők alkalmazásának fontosságát. A visszavert ultraibolya komponens erőteljesebben jelent meg a Rayfact 105 mm UV objektívvel, mint a Micro Nikkor 105 mm objektívvel, mivel az előbbi nagyobb mértékben engedi át a 365 nanométeres ultraibolya sugárzást – ezzel is igazolva, hogy az objektívválasztás is befolyásolja a képalkotást.

Amikor olyan ultraibolya áteresztő szűrőt helyeztek az objektívra, amely blokkolja a látható és infravörös sugárzást (LaLa U), a képalkotás során csak a visszavert ultraibolya sugárzás jelent meg, miközben a valódi lumineszcencia nem volt detektálható. Ez jól demonstrálja, hogy a Canon EOS 6D belső szűrői nem blokkolták megfelelően a visszavert ibolyántúli sugárzást. Két ultraibolya blokkoló szűrő (KS 420 nm LP és Quaser 415 nm 1%) használatával viszont a visszaverődő ultraibolya sugárzás kiszűrődött, és a lumineszcencia jobban láthatóvá vált. A Firecrest UV400 szűrő használata során azonban enyhe vöröses színárnyalat jelent meg a vázán, ami arra utal, hogy ez a szűrő kevésbé hatékony az ultraibolya blokkolásában, mint a másik kettő. A Firecrest UV400 szűrő nagyobb mértékben engedi át a hosszabb hullámhosszú ultraibolya tartományt, ami megmagyarázza ezt a megfigyelést.

Filters on lens	Rayfact 105 mm lens	Micro Nikkor 105 mm lens
No filter		
<i>LaLa U (UV pass)</i>		
<i>KS 420 nm LP</i>		
<i>Firecrest UV400</i>		
<i>Quaser 415 nm 1%</i>		

38. ábra - A tesztváza felvételei két különböző objektívvel (Rayfact 105 mm UV és Micro Nikkor 105 mm), objektívre helyezett szűrőkkel: egy ultraibolya-áteresztő szűrővel (LaLa U), valamint három különböző ultraibolya-blokkoló szűrővel (KS 420 nm LP, Firecrest UV400 és Quaser 415 nm 1%). A felvételek készítéséhez egy módosítatlan Canon EOS 6D fényképezőgépet használtak. Forrás: John Crowther 2022

Az 38. ábrán nehezen érzékelhetők azok a színiegyenlítési hatások, amelyeket a különböző ultraibolya-blokkoló szűrők gyakoroltak a felvételekre a lumineszcencia következtében, mivel ezek meglehetősen finom különbségek (minden kép azonos fehér-egyensúly-beállítással készült). Az alacsony reflexiójú fekete háttér egy meghatározott régiójának elkülönítése, valamint a három szűrőhöz tartozó, két különböző objektívvel készített eredeti RAW képek vörös, zöld és kék színcsatornáinak elemzése az 38. ábrán látható.



39. ábra - A fekete háttér egy területéről származó vörös, zöld és kék csatornaválasz a RAW képeken, három különböző UV-blokkoló szűrő esetében, (a) a Rayfact 105 mm-es UV objektívvel és (b) a Micro Nikkor 105 mm-es objektívvel.” Forrás: John Crowther 2022

A 39. ábra alapján, a KS 420 nm LP és a Firecrest UV400 szűrők esetében a vörös, zöld és kék csatornák válaszai nagyon hasonlóak mindkét tesztobjektívnel. A Quaser 415 nm 1% szűrő esetében azonban a vörös és zöld válaszok sokkal magasabbak, mint a többi szűrőnél. A Quaser 415 nm 1% szűrő az ultraibolya sugárzás hatására erős sárga lumineszcenciát mutatott, így valószínű, hogy az emelkedett vörös és zöld csatornaintenzitás ennek a sárga lumineszcenciának tudható be. Összességében ez jól szemlélteti, hogy egy ultraibolya-blokkoló szűrő áteresztési és lumineszcenciajellemzői egyaránt befolyásolhatják a végső kép színiegyensúlyozottságát. Ez különösen fontos olyan alkalmazások esetében, ahol a színhűség kritikus, például a kriminalisztikában, műtárgyvédelmi célú képalkotásban vagy a bőrgyógyászatban.

11.6 Következtetések

A tudományos fényképezés összetett folyamat és a lumineszcencia-képalkotás további olyan tényezőket vet fel, amelyekkel a látható fény tartományában dolgozó fotográfusnak nem kell foglalkoznia. Ugyanakkor viszonylag egyszerű eszközökkel is lehetőség nyílik

e tényezők egyikének – a fényképezőgép szűrőinek ultraibolya sugárzás hatására fellépő lumineszcenciájának – képi megjelenítésére és számszerűsítésére.

A bemutatott tanulmányban különféle fényképezőgép-szűrők kerültek tesztelésre ultraibolya sugárzásnak való kitettségük során fellépő lumineszcencia szempontjából, valamint meghatározták azok optikai áteresztési spektrumát a 250 és 800 nanométer közötti tartományban. A vizsgált szűrők közül, figyelembe véve az alacsony lumineszcenciát, a hasonló vágási hullámhosszt és a különböző méretekben való kereskedelmi elérhetőséget, a **Zeiss T* UV szűrőt** azonosították a már nem gyártott **Schott KV-418 szűrő legjobb alternatívájaként**, mint UV-blokkoló szűrőt lumineszcencia-képkalkotás során. A Baader UV/IR cut L szűrő szintén jó UV-blokkoló képességgel és alacsony lumineszcenciával rendelkezik, azonban korlátozott méretválasztéka egyes alkalmazásokban akadályt jelenthet. A Firecrest UV400 szűrő szintén alacsony lumineszcenciát mutatott, bár ibolyántúli tartomány béli kissé alacsonyabb vágáshatára bizonyos fényforrásokkal való használatát korlátozhatja. A vizsgálat egy tárgy ultraibolya sugárzással történő megvilágításával szemléltette e típusú szűrők alkalmazásának szükségességét a lumineszcencia-fotográfiában.

Továbbá az előzőekben bemutatásra került egy olyan módszer is, amely lehetővé teszi a kutatók számára, hogy saját fényképezőgép-szűrőik lumineszcenciáját értékeljék, ezáltal meg tudják határozni felszerelésük alkalmasságát a kívánt képkalkotási célokra.

11.7 Gyakorlati tapasztalatok a témában

Annak ellenére, hogy az ultraibolya sugárzás által gerjesztett, úgynevezett „szűrőlumineszcencia” jelensége régóta ismert, gyakorlati jelentőségéről és kvantitatív jellemzéséről mindmáig viszonylag kevés publikáció érhető el. A jelen fejezet olyan szűrők vizsgálatára fókuszál, amelyek a restaurátori gyakorlatban korábban széles körben alkalmazott típusok voltak, illetve napjainkban is elterjedten használatosak.

Sajnálatos módon az egyik legalkalmasabbnak tartott szűrő, a **Schott KV418**, mára kikerült a gyártó kínálatából, és a másodlagos piacokon (használt termékként) is csupán elvétve érhető el, ezért ennek a szűrőtípusnak a gyakorlati tesztelésére nem nyílt lehetőség. A korábbi restaurátori gyakorlatban a Panchromar által forgalmazott, Schott üvegek felhasználásával készült szűrőtípusok kerültek alkalmazásra ultraibolya sugárzás indukálta látható lumineszcencia fényképezés során. Ezen szűrők lumineszcens válaszreakciója az ultraibolya sugárzásra már a kezdetektől ismert volt, így a nem kívánt emissziós

hatások kiküszöbölése érdekében kereskedelmi forgalomban könnyen hozzáférhető, nagy ultraibolya-elnyelő képességű, ugyanakkor a látható fénytartományban magas áteresztőképességű áttetsző szűrők kerültek előnyben részesítésre. Az így kialakított szűrőkombináció a gyakorlatban megfelelően szűrte ki mind a sugárforrásból származó kékes-lila komponenseket, mind pedig a tárgy felületéről visszaverődő ultraibolya sugárzást, ezáltal hatékonyan támogatta az ultraibolya sugarak kiváltotta lumineszcencia dokumentálását. Ennek ellenére több esetben is megfigyelhető volt, hogy bizonyos tárgytípusok – különösen erősen ultraibolya reflektív felületű anyagok – esetén a szűrőanyag saját lumineszcenciája továbbra is zavaró mértékben jelentkezett. Ez a jelenség elsősorban a totálfelvételeknél volt érzékelhető, de még hangsúlyosabban problémát okozott a közeli részletfelvételek esetében, ahol a visszavert ultraibolya sugárzás koncentráltabb formában jelent meg a képrögzítés során. A jelen kutatás keretében többféle szűrőtípus is vizsgálatra került, köztük a **Heliopan G5** és a **B+W 021** sárga szűrők, amelyek napjainkban is széles körben elérhetők és használtak a restaurátori gyakorlatban. A vizsgált típusok között szerepeltek a **Panchromar G** jelölésű szűrők, továbbá lehetőség nyílt két klasszikus fotografiai szűrő, a **Kodak Wratten 2E** és a **Hoya K2** beszerzésére és tesztelésére is. Ezen öt szűrő vizsgálatát a következő fejezet részletezi.

11.8 A kutatás alkalmával a sárga szűrőkön elvégzett vizsgálatok és az azokból levont következtetések

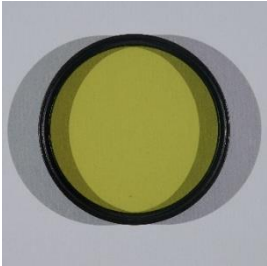
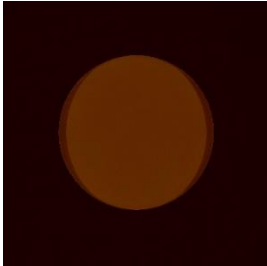
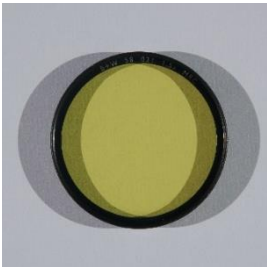
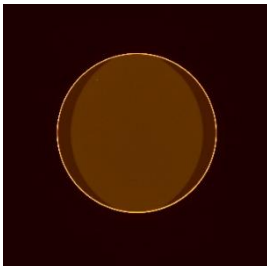
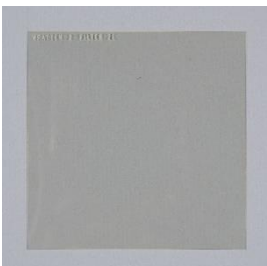
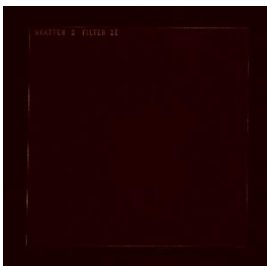
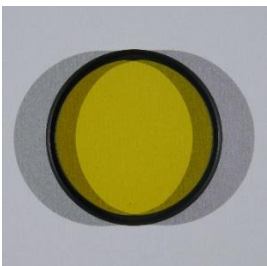
A sárga szűrők vizsgálata a kutatás során nem a korábban ismertetett képalkotási hatékonyság szempontjából történt, hanem elsősorban anyagösszetételi oldalról. A vizsgálat célja annak meghatározása volt, hogy milyen összetételű fém- vagy félfémvegyületek felelősek az optikai üveg színéért, valamint annak tisztázása, hogy fennállhat-e összefüggés a szűrő színanyagainak kémiai összetétele és lumineszcens viselkedése között.

A vizgálathoz elegendőnek bizonyult a röntgen-fluoreszcens (pXRF) spektroszkópia alkalmazása, amely roncsolásmentesen képes az üveg színét adó elemek kvalitatív(minőségi) és kvantitatív(mennyiségi) meghatározására. A kutatás hipotézise az volt, hogy a sárga szűrők színéért felelős vegyületek kadmium-szulfid (CdS) alapú fém-sók. Ezt a feltételezést a pXRF-mérések egyértelműen megerősítették: a vizsgált szűrőtípusokban szignifikáns kadmiumtartalom mutatkozott, gyakran kéntartalommal együtt, amely a CdS jelenlétére utal. Az eredmények részletesen az 9. táblázatban találhatók, ahol

a műszeres analízis során kimutatott elemek mennyiségi adatai is szerepelnek. A feltüntetett értékek tömegszázalékban (wt%) vannak megadva, a *balance* értékkel (a nem mérhető elemek mennyisége) kiegészítve. Jól látható, hogy kadmium csak a Kodak zselatin-szűrőjében nem mutatható ki, ami arra utal, hogy annak színét más, feltehetően szerves összetevő adja.

Tehát ez a lumineszcencia a képalkotás során erősen torzíthatja az elkészült felvételek színvilágát, így azok helyes kiértékelése szinte lehetetlenné válik. Ennek okán használat előtt a szűrő tulajdonságaival tisztában kell lenni.

9. táblázat – A sárga szűrők VIS-R_VIS és VIS-L_UV₃₆₅ felvételei és az pXRF mérések eredményei

HELIOPAN G5 #5 LIGHT YELLOW FILTER		
		Si – 34,2 Zn – 4,42 Cd – 0,2 Ca – 3,92 K – 4,5 S – 0,04 Balance - 52,5
B+W 021 LIGHT YELLOW		
		Si – 30,7 Al – 1,04 Zn – 4,34 Cd – 0,25 Ca – 3,71 K – 4,26 Zr – 1,37 Balance – 53,5
PANCHROMAR G1		
		Si – 33,7 Al – 0,22 Cd – 0,06 Ca – 8,82 K – 12,5 Balance 44,5
KODAK WRATTEN 2E		
		Ca – 1,49 Cl – 15,5 P - 12,5 S – 24,6 Balance – 45,6
HOYA K2		
		Si – 28,5 Al – 1,89 Zn – 1,01 Cd – 0,21 Ca – 2,17 K – 7,35 Zr – 3,94 S – 0,29 Balance – 53,3

Felvételekészítési paraméterek: Sony Alpha 7R Mark IV MILC kameraváz, Zeiss Tessar* (Sony) 55 mm f1.8 objektív, IRrecam hot mirror filter, f.5.6, iso 50, 1,30 s

11.9 Az UvVL technikai összefoglalása

Az ultraibolya sugarakkal gerjesztett látható lumineszcencia vizsgálat (UvVL) egyike a sok technikának, amelyet a restaurátori képalkotási eljárásként, dokumentációs technikaként használnak. Ez a fajta képalkotási módszer hosszú múltra tekint vissza. Létezésének kezdete óta, mint roncsolásmentes és hordozható fényképezési technikát használják a kulturális örökség tárgyain elvégzett beavatkozások dokumentálására és a művek vizsgálatára.

A múzeumi képalkotás három fő területre osztható: gyűjteményfotózás, állományvédelmi/restaurátori dokumentációs és a tudományos képalkotás. Ezeket különböző technikák, munkafolyamatok és alkalmazások határozzák meg, mégis összefüggenek és átfedik egymást:

- a gyűjtemények fényképezése magában foglalja a látható tartományú fényképezést, amely kiállítási, marketing és gyűjteményi célokat szolgál.
- a restaurátori dokumentáció normál és szélessávú spektrális képalkotási technikákat tartalmaz, amelyek rögzítik egy tárgy állapotát, tájékoztatnak a korábbi beavatkozásokról, és segítik a tárgy készítésének megértését.
- és végül a tudományos képalkotás magában foglalja az optikai mérési technikákat, a spektrális és térbeli méréseket, valamint a műtárgyakat felépítő anyagok azonosításához is hozzájárul.

E kategóriák meghatározása és a szerkezet bemutatása elismeri számos terület hozzájárulását a technikák és technológiák folyamatos fejlesztéséhez, és alapot teremt annak megértéséhez, hogy ezek a területek és kategóriák hogyan kapcsolódnak egymáshoz és hogyan fedik át egymást a fejlődés ösztönzése érdekében. Az ultraibolya sugárzás által kiváltott látható tartományú lumineszcencia vizsgálata és dokumentálása a restaurátori tevékenység során rutinná vált, mivel gyors, megfizethető és hozzáférhető.

A technika elsősorban ultraibolya sugárforrást, szűrőket és fényképezőgépet igényel a képalkotáshoz. A módszer reprodukálhatóságának és összehasonlíthatóságának növelésére tett lépések, a tudományosabb képalkotás felé való elmozdulás növelheti a költségeket és a bonyolítja a folyamatot, ami kevésbé megfizethetővé és hozzáférhetővé teszi az így már csak speciális eszközökkel alkalmazhatótechnikát. A fent említett okok miatt a *CHARISMA User manual* felhasználói kézikönyv adaptálása továbbra is kihívást jelenthet. Míg az UV Innovations munkafolyamat a restaurátori dokumentációra vonatkozó AIC-irányelvekhez hasonló beszerzési és feldolgozási eszközökre épül, a Target-

UV költsége magasnak tekinthető, és egyes restaurátori laboratóriumok és intézmények számára elérhetetlen lehet. A technika korlátai ismertek, de ennek ellenére azon kevés eszközök egyike, amelyek számos múzeumban és kutató laboratóriumban elérhetőek és könnyen alkalmazhatóak. Külön kell kezelni azokat az eseteket és szándékokat, ahol az analitikai szintű, tudományos anyagvizsgálat a cél és nem a tárgy állapotának restaurátori szempontból történő felmérése.

12 ULTRAIBOLYA VAGY LÁTHATÓ SUGÁRZÁSSAL GERJESZTETT INFRAVÖRÖS TARTOMÁNYÚ LUMINESZCENCIA VIZSGÁLAT

A műtárgyakból és az azokat felépítő anyagokból származó lumineszcenciát hosszú ideje alkalmazzák különböző vizsgálati célokra. A gyanták, olajok, pigmentek és színezékek emissziós tulajdonságait vizsgáló kutatások rámutattak, hogy ezen anyagok kibocsátása rendkívül összetett, az öregedési folyamatok során változhat, továbbá kölcsönhatásban állhat más összetevőkkel. Ez a komplexitás jelentősen megnehezíti a lumineszcencia jellemzőinek közvetlen felhasználását az anyagok azonosítására. Különösen akkor áll fenn ez a probléma, ha szélessávú ultraibolya gerjesztést alkalmaznak, miközben szélessávú emisszió figyelhető meg. Ilyen esetekben úgynevezett „hamis lumineszcencia sávok” alakulhatnak ki, amikor egy adott anyag – legyen az kötőanyag, pigment vagy színezék – kibocsátását részben elnyelik a rétegben jelen lévő, abszorbeáló tulajdonságú összetevők. A jelen fejezet az infravörös lumineszcencia alkalmazási lehetőségeit tárgyalja, különös tekintettel az infravörös lumineszcencia előnyeire és a látható tartományú emisszió okozta problémák mérséklésében. Ugyanis az IR kibocsátás sokkal specifikusabb lehet egyes anyagokra, így azok jellemzése könnyebben megvalósítható.

12.1 Sugárforrások – ultraibolya sugárzás és a látható fény

Amint a korábbi fejezetekben részletesen kifejtésre került, a műalkotásokat felépítő anyagok lumineszcenciájának ultraibolya sugárzással történő vizsgálata hosszú múltra tekint vissza. Hasonlóképpen, az infravörös lumineszcencia (IrL) vizsgálata is jelentős tudományos és művészettörténeti relevanciával bír, bár hazai alkalmazása csupán az elmúlt évtizedben vált rendszeressé a digitális technológia elterjedésével.

A szerves pigmentek közül számos ismert lumineszcens viselkedésű: ide sorolható az egyiptomi kék, a Han kék és a Han lila, a kadmiumsárga különböző árnyalatai (a citromsárgától a narancsig), a kadmiumvörös és kadmiumzöld, a mangánkék és -lila, valamint a titán-tartalmú fehérek és sárgák egyes módosulatai (például a rutil polimorf). Az IrL művészeti célú alkalmazásának első publikált esettanulmánya 1963-ban jelent meg, amely kifejezetten a kadmiumalapú pigmentek azonosítására irányult⁷⁶.

Az elmúlt években nemzetközi szinten folyamatosan erősödött az érdeklődés a multispektrális képalkotás és a nagyléptékű adatelemzés iránt, különösen festmények

⁷⁶ C. F. Bridgman and H. L. Gibson, "Infrared Luminescence in the Photographic Examination of Paintings and Other Art Objects," *Studies in Conservation* 8 (1963), <https://doi.org/10.1179/sic.1963.008>.

vizsgálatában, a modern és történeti festékanyagok részletesebb tanulmányozásának igényével összhangban. Ennek következtében Magyarországon is a legmagasabb intézményi szinteken – így például a Magyar Képzőművészeti Egyetemen és a Szépművészeti Múzeumban – beépült a fotódiagnosztikai protokollokba az ultraibolya és látható sugárzással gerjesztett infravörös lumineszcencia detektálása.

A technikai megvalósítás tekintetében ma már többféle gerjesztőforrás áll rendelkezésre, például LED-alapú világítás, valamint a korábbinál könnyebben hozzáférhető képrögzítő rendszerek. Ezek hozzájárulnak a többsávos fényképezés és képalkotás analitikai teljesítményének növeléséhez. Az ultraibolya sugárzók – jellemzően 365 nanométeres emissziós csúccsal – alkalmazása, valamint az általuk gerjesztett látható és infravörös tartományban jelentkező emisszió detektálása mára ismert és széles körben használt módszer az anyagtudományban, és egyre jelentősebb szerepet kap a restaurátori vizsgálatokban is. A kutatások kiemelt területei közé tartozik például az egyiptomi kék és a kadmiumtartalmú pigmentek vizsgálata.

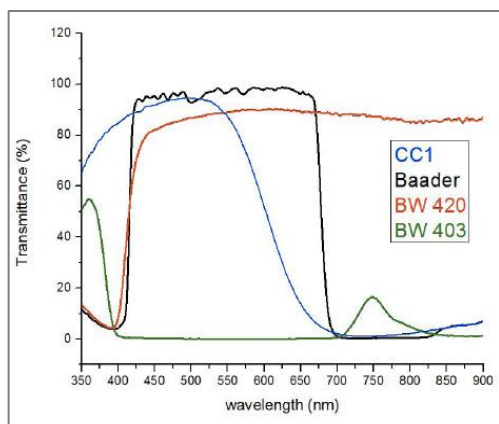
A többsávos képalkotás in situ alkalmazása különösen nagy jelentőséggel bír a festékanyagok azonosítása terén. A festett tárgyakról készült reflexiós felvételek (VIS, UV, IR) önmagukban is jelentős információval szolgálnak, amely tovább gazdagodik, ha azokat kiegészítik ultraibolya vagy látható sugárzással gerjesztett lumineszcens felvételekkel, a látható vagy az infravörös tartományban rögzítve.

12.1.1 Ultraibolya és látható LED sugárforrások és szűrőzésük az infravörös lumineszcencia vizsgálatok során

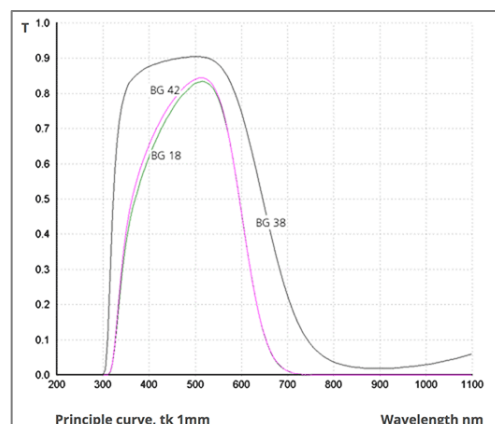
Tehát egyes ásványi anyagok és mesterséges pigmentek infravörös lumineszcenciát mutatnak. Ez a jelenség hasonló az ultraibolya sugárzással gerjesztett látható lumineszcenciával, ahol az ultraibolya sugárzás látható fény kibocsátását idézi elő az anyagból, más anyagoknál ugyanez infravörös emissziót idéz elő. Az infravörös lumineszcencia esetében a különböző fény- és sugárforrásokkal előállított ultraibolya sugárzás vagy egy látható fénynyaláb váltja ki az emissziót.

Ezek a lámpák gyenge szórt (ibolyántúli sugárzás esetében látható és infravörös is, a látható tartományú sugárforrás esetében pedig főleg infravörös) komponenssel is rendelkeznek, ami ettől fogva egyfajta zajjal járul hozzá az infravörös fluoreszcencia felvételhez. A sugárzóból érkező infravörös komponens azonban kiszűrhető például az X-

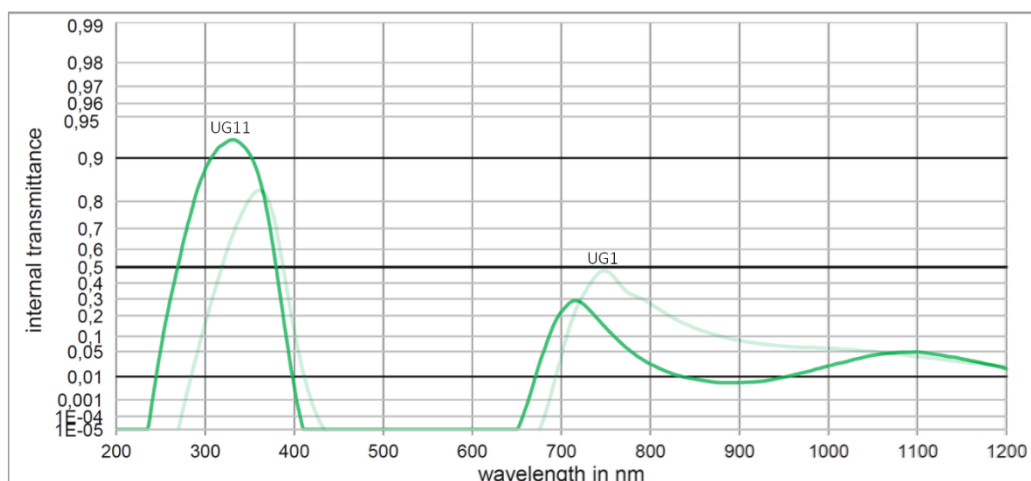
Nite CC1 vagy Schott BG38-as szűrők LED-lámpán történő alkalmazásával. A látható-hoz hasonlóan az ultraibolya LED lámpát is meg kell szűrni, például egy Baader U-Venus, Schott UG1-es vagy UG11-es szűrővel.



40. ábra - Kék vonallal rajzolva látható az X-Nite CC1-es szűrő transzmissziós görbéje Forrás: Antonio Consentino 2015



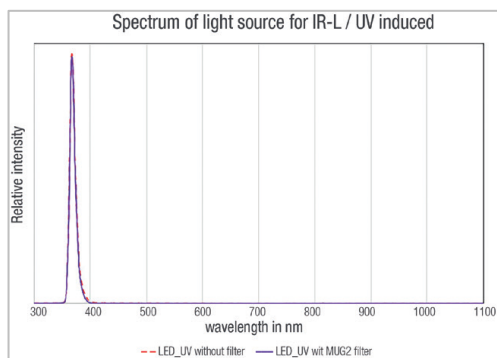
41. ábra - a Schott BG18-as, 38-as és 42-es szűrőinek áteresztési görbéi. Forrás: https://www.pgo-online.com/de/kurven/optische_glasfilter/BG18_BG38_BG42.html



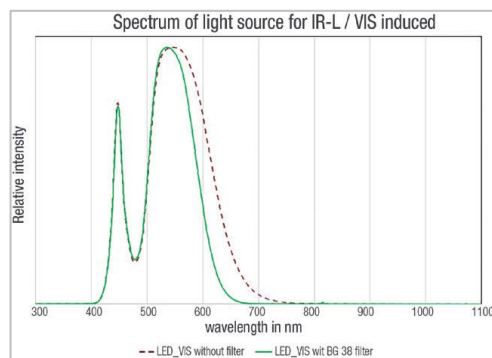
42. ábra - A Schott UG1 és UG11-es szűrők összehasonlító görbéje. Forrás: www.schott.com

A jelenlegi gyakorlatban professzionális szinten elsősorban LED-alapú sugárforrások alkalmazása terjedt el. Az ezt megelőző időszakban a lumineszcens felvételek készítéséhez jellemzően fénycsőves, illetve nagynyomású higanygőzlámpákat használtak. Ezek azonban jelentős mennyiségű látható és infravörös tartományba eső, úgynevezett parazita sugárzást is kibocsátanak, amelynek hatékony szűrése technikailag nehéz, nagyméretű lámpatestek esetében pedig gyakran kivitelezhetetlen. Emiatt ezen fényforrások elsősorban olyan vizsgálatokhoz alkalmazhatók előnyösen, ahol nem az anyagösszetétel pontos meghatározása a cél, hanem például a tárgy felületének általános állapotfelmérése.

Noha a lumineszcencia spektrális jellemzőinek precíz kiértékelésére nem alkalmasak, az így nyert képi információk tapasztalt szakember számára értékes támpontokat adhatnak a felhasznált anyagok jellegére vonatkozóan.



43. ábra - Az infravörös lumineszcens felvételekhez használt LED fényforrások spektrumi szűrőkkel és anélkül; az UV fényforrás spektruma.
Forrás: Annette T. Keller 2014



44. ábra - Az infravörös lumineszcens felvételekhez használt LED fényforrások spektruma szűrőkkel és anélkül; a látható fényforrás spektruma.
Forrás: Annette T. Keller 2014

12.1.2 A megfelelő szűrők alkalmazása a kamerán

Az infravörös tartományban történő felvételek készítésére a 800 nanométer körüli vágási tartománnyal rendelkező szűrők, például a B+W 093, különösen alkalmasak. A következő fejezetekben olvashatóan a legtöbb pigment emissziós sávjának kezdete 850 nanométer körül található, egyes esetekben pedig az emissziós maximum is ezen hullámhossz körül helyezkedik el. A B+W 093 szűrő áteresztőképessége 800 nanométerig nem haladja meg az 1%-ot, míg 900 nanométernél eléri a 88%-ot. Ennek köszönhetően a szűrő nagyméretű tárgyak esetében előnyös választás, mivel lehetővé teszi a közeli infravörös lumineszcencia hatékony gyűjtését, és ezzel rövidebb expozíciós időket biztosít, mint például a Heliopan 950-es vagy 1000-es szűrők. Ugyanakkor figyelembe kell venni, hogy 850 nanométeres szűrő használata esetén a gerjesztő LED-fényforrásból származó, 900 nm-ig mérhető, maradék infravörös komponens zavaró hatású lehet, amely a kép „zaját/szenyeződését” okozhatja, ha csak nem történik annak szűrése a fent említett szűrők (X-Nite CC1 vagy Schott BG38-as szűrők) valamelyikével.

Az infravörös lumineszcencia (IrL) fényképezés során szükséges expozíciókorrekció érdekében célszerű az egyedi fotódokumentációs referencia céltáblát ellátni egy kadmiumvörös színű mintával. A kadmiumvörös referencia értékei 30 ± 5 RGB egység-

ben adhatók meg. Ez a céltábla egyben annak ellenőrzését is lehetővé teszi, hogy a felvételt nem befolyásolja nem kívánt infravörös sugárzás, mivel ilyen esetben a céltábla összes többi mintájának sötétnek kell megjelennie, kivéve a kadmiumvöröset⁷⁷.

⁷⁷ Antonino Cosentino, "Infrared Technical Photography for Art Examination," *e-Preservation Science* 13 (2016): 1–6, accessed via Morana-RTD PDF and ResearchGate.

13 LÁTHATÓ SUGÁRZÁSSAL GERJESZTETT LÁTHATÓ TARTOMÁNYÚ LUMINESZCENCIA VIZSGÁLAT⁷⁸

A műtárgyvizsgálatok során, különösen a hellenisztikus szobrászat területén – legyen szó nagyméretű mészkő- vagy márványszobrokról, illetve kisebb terrakotta figurákról – több fotóindukált lumineszcencia alapú képalkotási technika egyaránt kiemelt jelentőséggel bír. Ennek oka, hogy a meghatározó pigmentek, így például az egyiptomi kék (infravörös lumineszcencia, VIrL technika) és a rózsaszínes árnyalatú szerves pigmentek, mint a festőbuzér vagy krapplakk (ultraibolya sugarakkal gerjesztett látható lumineszcencia, UvVL technika), feltérképezése egyaránt elengedhetetlen a festett felületek teljes megjelenítéséhez.

Az utóbbi időben több kutatócsoport tett párhuzamos erőfeszítéseket annak érdekében, hogy a látható és az ultraibolya sugárzással gerjesztett lumineszcencia technikákat finomítsák, illetve egységes rendszerbe integrálják. Bizonyos vizsgálatokban eltérő világítástechnológiák is megjelentek, például elektronikus vakuk, lézerek vagy kriminalisztikai célokra kifejlesztett berendezések – így a CrimeScope® – adaptálásával. Ezekben az esetekben ugyanakkor a használt gerjesztési hullámhossztartományok alapvetően nem térnek el a hagyományos megközelítésektől. Egy másik kutatási irány a megvilágító forrás mellett a gerjesztéshez használt fény hullámhosszának módosítását is magában foglalja. A látható fénnel indukált látható lumineszcencia (Visible-Induced Visible Luminescence, VVL) módszert a lumineszcencia anyagok feltérképezésére alkalmas technikaként javasolták, amely képes kiküszöbölni az ultraibolya sugárforrások alkalmazásával kapcsolatos nehézségeket. A módszer szűrőzött fényforrásokkal is kivitelezhető, azonban a legnagyobb hatékonyságot a szelektív és intenzív LED-megvilágítás biztosítja. E technika alkalmazását a vörös és sárga tónusú lakkpigmentek térbeli eloszlásának feltárására – az UvVL módszer alternatívájaként – már vizsgálták, többek között a *CHARISMA User Manual* projekt keretében.

A tanulmány (Joanne Dyer et al. 2017) elsősorban hellenisztikus kori szobrok vizsgálatában tárgyalja a látható tartományú lumineszcencia alapú képalkotás lehetőségeit, különös tekintettel a sárga és vörös szerves pigmentek azonosítására, ugyanakkor a módszer technikai hátterét és szélesebb körű alkalmazási lehetőségeit is áttekinti.

⁷⁸ Joanne Dyer, Maria Sotiropoulou, Giovanni Verri, Lucia Burgio, Susan Braovac, and Jan Stubbe Ødegård, “A Technical Step Forward in the Integration of Visible-Induced Luminescence Imaging Methods for the Study of Ancient Polychromy,” *Heritage Science* 5, no. 1 (2017): 20, <https://doi.org/10.1186/s40494-017-0135-1>.

13.1 A tanulmány során alkalmazott eszközök

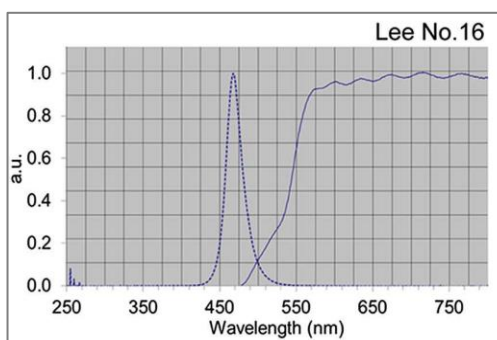
A képrögzítő berendezés és a referenciastandardok a felvételek során állandóak maradtak. A dokumentáció teljes mértékben a releváns iránymutatásokban lefektetett elveknek megfelelően történt. Valamennyi felvétel egy *full spectrum* átalakított Canon 40D típusú fényképezőgéppel készült, amelynek maximális felbontása 3888×2592 pixel (10,1 megapixel). A felvételekhez Nikon AF NIKKOR 50 mm F/1.8D objektív került alkalmazásra, amely minden lumineszcenciafelvételnél a legnagyobb blendenyílással (F/1.8) működött annak érdekében, hogy a záridő 0,5–5 másodperc közötti tartományban maradjon.

Az egyes vizsgált hullámhossztartományok meghatározása a fényképezőgép objektívje elé helyezett szűrők vagy szűrőkombinációk segítségével történt. A kamera minden esetben manuális üzemmódban működött, a képfeldolgozási beállítások közül a *neutral* (semleges) stílus volt beállítva, az ISO-érzékenység pedig 100-ra (illetve a legalacsonyabb elérhető értékre) került. A fehéregyensúly alapértelmezetten *custom* (egyedi) értéken maradt, kivéve az ultraibolya sugárzás által gerjesztett látható tartományú lumineszcenciafelvételek esetében, ahol 6500 K színhőmérsékletet alkalmaztak. A színek kalibrálása és a fényesség (luminancia) korrekciója RAW fájlformátumban történő rögzítéssel, majd utófeldolgozással valósult meg. Az alkalmazott képkorrekciós eljárás megköveteli, hogy egy Calibrite ColorChecker® színekalibrációs tábla és egy referencia szűrkeárnyalatos skála – fekete, szürke és fehér Lambert-féle referenciafelületekkel, Spectralon® referenciák – közvetlenül a vizsgált tárgy mellé, vele azonos síkban voltak elhelyezve.

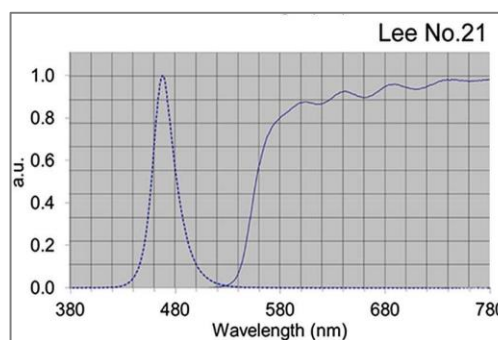
A vizsgált spektrális tartományok eléréséhez a sugárforrás és a szűrő (vagy szűrőkombináció) változtatására van szükség. Az ebben a módszerben alkalmazott LED-ek gerjesztési forrásként való használatának számtalan előnye van, melyeket a következőkben igyekszem kifejteni, és gyakorlati alternatívát kínálni más, ugyanilyen elvre épülő rendszerekkel szemben. Bár ezek a rendszerek hatékonyak, gyakran az a hátrányuk, hogy egyedi építésű, nem szabványos megoldásokra (például lézeres gerjesztő rendszerekre) épülnek, amelyek nem mindig elérhetők vagy megfizethetők a kulturális örökség és múzeumi szektor szereplői számára.

13.2 Látható fénnel gerjesztett, látható tartományú lumineszcens képkalkotás (VVL)

A gerjesztést két azonos, nagy teljesítményű LED-es (vörös, zöld és kék) fényforrás biztosította (Eurolite LED PAR56 RGB spots, 20 W, 151 LED, 21°-os sugárzási szög), amelyek közül kizárólag a kék LED-ek ($\lambda_{\text{max}} = 465$ nanométer) voltak alkalmazva a VVL felvételek elkészítéséhez. A két fényforrás opcionálisan DMX vezérlőpulthoz is csatlakoztatható, amely révén az RGB spotlámpák hangolható LED fényforrássá alakíthatók át, ahol a vörös, zöld és kék LED-ek külön-külön vagy vegyesen is használhatók, és intenzitásuk fokozatmentesen szabályozható. A sugárforrásokat szimmetrikusan, körülbelül 45°-os szögben lettek elhelyezve a kamera optikai tengelyéhez képest, és nagyjából ugyanolyan távolságra az objektumtól, mint maga a kamera. Az ebben a vizsgálatban elemzett tárgyak esetében ez a távolság 1 és 2 méter között változott, az adott tárgy méretétől függően. A kamera objektívje elé egy IDAS-UIBAR sávszűrőt (400–700 nanométer) és vagy egy Lee No. 21 poliészter szűrőt (50%-os áteresztés 560 nanométernél), vagy egy Lee No. 16 szűrőt (50%-os áteresztés kb. 540 nm-nél) helyeznek, annak érdekében, hogy kiszűrjék a beérkező kék fényt, és lehetővé tegyék a vizsgálati tartomány megfigyelését (kb. 520–700 nm az IDAS-UIBAR és Lee No. 21 szűrő kombinációval, illetve kb. 475–700 nm az IDAS-UIBAR és Lee No. 16 szűrő kombinációval).



45. ábra - Az ábra a LED-es gerjesztő fényforrás spektrumát, valamint a kamera elé helyezett szűrő átviteli görbéit mutatják be. Forrás: www.leefilters.com



46. ábra - Az ábra a LED-es gerjesztő fényforrás spektrumát, valamint a kamera elé helyezett szűrő átviteli görbéit mutatják be. Forrás: www.leefilters.com

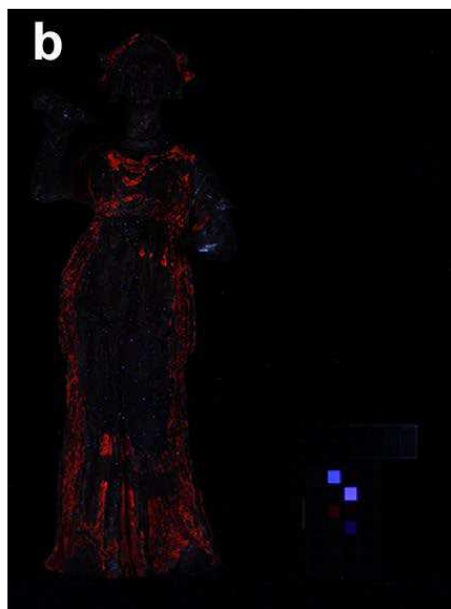
A vizsgálat elsődleges célja a szerves színezékek – jelen esetben a feltételezett festőbuzér – pontosabb azonosíthatóságának és elkülöníthetőségének elősegítése volt. A hagyományosnak tekinthető UvVL képkalkotás egyik problémája, hogy a felvételek a látható spektrum szinte teljes tartományában készülnek, még abban az esetben is, ha sárga

szűrők alkalmazásával némileg csökkentjük a kékes–ibolya tartományból származó visszavert sugárzás jelenlétét. Ennek következtében az emissziós sávok nehezebben különíthetők el egymástól.

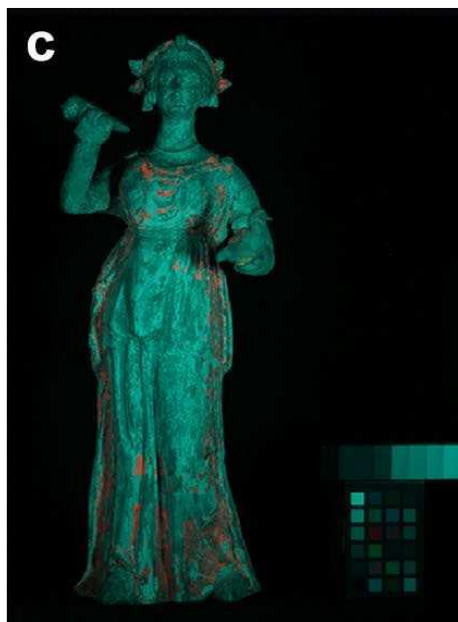
Ezzel szemben a VVL képalkotás során valamivel szűkebb spektrális tartományban rögzítjük a lumineszcens emissziót. Például 465 nanométeres kék gerjesztés esetén – a használt *Lee* szűrők spektrális áteresztésének köszönhetően – a kamera által rögzített tartomány jellemzően az 520–700 nanométeres hullámhossztartományra korlátozódik. Ezáltal a festőbuzérra, illetve más vörös tartományban lumineszkáló szerves színezékekre jellemző emisszió erőteljesebben és egyértelműbben jelenik meg, lásd az összehasonlítást a lenti ábrákon. Az (a) jelű felvétel a látható tartományban, normál megvilágítás mellett készült reflexiós kép, amelyen mérsékelt, de egyértelműen elkülöníthetők a kőszobor felszínén megmaradt vörös és kék színű festékszigetek. A (c) jelű lumineszcens felvételen (UvVL) azonban erőteljes és vizuálisan zavaró hatású a kő alapanyagának zöldes színű lumineszcenciája, amely zavarja a színezékekhez köthető emissziót. Ezzel szemben a (b) és (d) képek – amelyek látható fénnel gerjesztett látható lumineszcens (VVL) felvételek – jól elkülönítik a feltételezhetően vörös színezékhez kapcsolható vörös emissziós jelenséget, lehetővé téve annak értelmezését.



47. ábra - a) látható fényben készült reflexiós felvétel (VIS-R_VIS). Forrás: Dyer et al. 2017



48. ábra - b) látható fénnel gerjesztett, látható tartományú lumineszcenciafelvételek (VVL). Forrás: Dyer et al. 2017)



49. ábra - c) UV-sugárzással gerjesztett, látható tartományú lumineszcens felvétel (UvVL). Forrás: Dyer et al. 2017



50. ábra - d) látható fénnel gerjesztett, látható tartományú lumineszcenciafelvételek (VVL). Forrás: Dyer et al. 2017

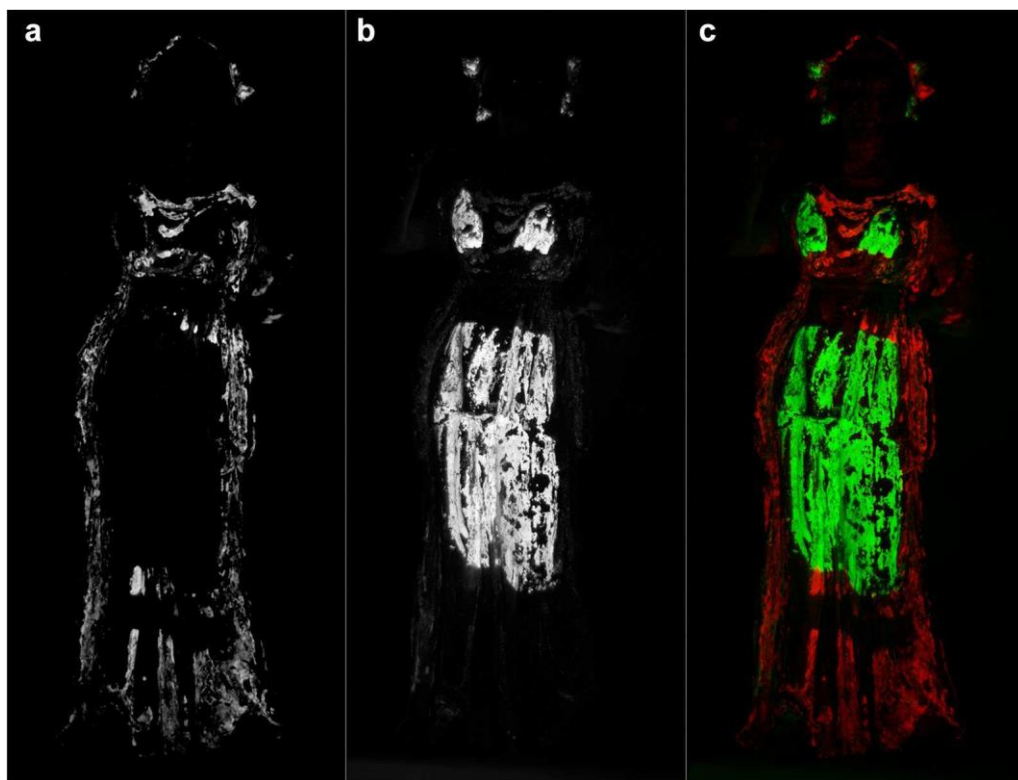
13.2.1 Utófeldolgozás – módszertani megközelítés és értékelés

A bemutatott tanulmány szerzői két, egymást kiegészítő képutófeldolgozási megközelítést mutatnak be a vizsgálat műtárgyak példáján keresztül.

Az első módszer célja a „nyers” VVL és UvVL felvételek színinformációinak megtartása mellett a gerjesztőfénytől származó szórt fény zavaró hatásainak eltávolítása. Ennek alapja a Spectralon® 99%-os reflektanciájú referenciahasáb használata, mellyel a képbe kerülő nem kívánt fények (környezeti, tárgyhoz nem tartozó emissziók, gerjesztőforrás szórt fénye) becsülhetők és korrigálhatók. Az így kapott felvételek, bár nem teljes mértékben szinkalibráltak, a vörös pigmentekhez köthető lumineszcenciát spektrálisan és intenzitásában is megbízhatóan visszaadják. E korrekció révén elfedett lumineszcenciajelenségek is láthatóvá válhatnak.

A második megközelítés a VVL és VirL képek vörös színcsatornájának önálló vizsgálatára épül. E csatornákból kivont, szürkeárnyalatossá konvertált képek összevetése nagyfokú hasonlóságot mutat, ami azt jelzi, hogy a VVL módszer a vörös pigmentek eloszlásáról hasonló minőségű információt szolgáltat, mint az UvVL. A módszer előnye, hogy nem igényel szinkalibrációt, és a vörös csatornából generált monokróm térképek a vörös pigmentek térbeli eloszlását jelenítik meg. Ezek a képek *false color* képpé is egye-

síthetők – például a VVL és VIrL képek piros és zöld csatornaként történő hozzárendelésével –, így vizualizálhatók például az egyiptomi kék és vörös lakkpigment együttes előfordulásának területei is. Az így készített *false color* képek különösen hatékonyak a keverékek és átfedések szemléltetésében. A 51. ábrán bemutatott kompozit képen például narancs-vörössel jelzik azokat a területeket, ahol a vörös pigment és kis mennyiségű egyiptomi kék is jelen van, valamint zölddel, ahol csak a kék anyag helyezkedik el.



51. ábra - Az (a) jelű kép látható fénnel gerjesztett látható lumineszcens (VVL) felvétel, amelyen a korábban említett szerves vörös színezék látható tartományba eső lumineszcenciája figyelhető meg – a kép szürkeárnyaltos megjelenítésben készült. A (b) ábra egy látható fénnel gerjesztett, infravörös tartományban rögzített lumineszcens felvétel (VIrL), amely az egyiptomi kék pigment karakterisztikus infravörös lumineszcenciáját mutatja. A (c) ábra az előző két kép kombinált, *falsecolor* változata: a szerves színezék és egyiptomi kék együttes emissziója vörös, míg ahol csak a kék pigment van jelen, zöld színekódolással került kiemelésre. Forrás: Dyer et al. 2017

Ugyanakkor a szerzők hangsúlyozzák, hogy óvatosság szükséges a *false color* képek kvantitatív értelmezésekor. A színcsatornák intenzitása nem csak a pigment mennyiségétől, hanem azok relatív lumineszcencia kvantumhatásfokától is függ. Az egyiptomi kék nagy kvantumhatásfoka miatt például kis mennyiségben is dominálhat egy adott csatornában. Ezért a pigmentarányok megbízható becsléséhez olyan utófeldolgozási módszerekre lenne szükség, amelyek a spektrális tulajdonságokon és kvantumhatásfokokon alapulnak, és ezek szerint skálázzák a színcsatornák hozzájárulását. A szerzők szerint ez

egy jövőbeni kutatás alapját képezheti egy fejlettebb, kvantitatív hamisszínes képkészítő eszköz kifejlesztéséhez.

13.2.2 Az eredmények összefoglalása

A bemutatott munka egy olyan, LED-alapú, kombinált VVL/VIrL képalkotási módszert mutat be, amely egyetlen felvételi elrendezéssel teszi lehetővé vörös lakkpigmentek és egyiptomi kék detektálását. Az eredmények minősége jól közelíti a hagyományosan külön alkalmazott UvVL és VIrL módszerekkel elérteteket, különösen a Lee No. 21 szűrővel végzett VVL képek esetében. A LED-ek használata nemcsak biztonságosabb, hanem szelektívebb gerjesztést is biztosít a célzott pigmentek számára, csökkentve a zavaró emissziók (pl. kötőanyagok, gyanták) gerjesztését.

A festőbuzér optimálisan gerjeszthető 465 nanométeres kék LED-del, és lumineszkál a látható tartományban, míg az egyiptomi kék hatékonyan aktiválható 630 nanométeres vörös LED-del, és emissziót bocsájt ki az infravörös tartományban (erről az értekezés részletesen az 21. fejezetben számol be). A vizsgálat példája azt mutatja, hogy a VVL módszer képes kiszűrni a zavaró emissziókat, és a célpigment lumineszcenciáját jó definiáltan megjeleníteni.

A LED-ek közötti gyors váltás és a kompakt kialakítás révén a rendszer jól alkalmazható múzeumi vagy helyszíni vizsgálatokra, valamint könnyen kezelhető, még nem specialisták számára is. Ugyanakkor a használt szűrők – különösen a Lee No. 21 – korlátozott spektrális áteresztése miatt bizonyos lumineszcenciasávok kimaradhatnak, ami korlátozza a pigmentek finom megkülönböztetését. A szélesebb és hatékonyabb szűrők, illetve utófeldolgozási lépések (pl. szórt fény eltávolítás, színekalibráció) szükségesek a kvantitatív és spektrálisan megbízható eredményekhez.

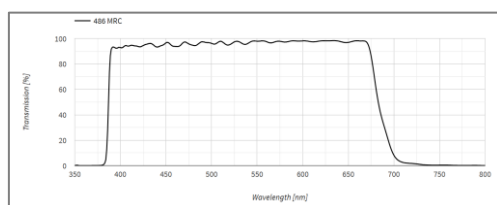
Végül a szerzők hangsúlyozzák: bár az új módszer érzékeny és megbízható a pigmentek térképezésében, a különböző lakkok forrás szerinti azonosítása továbbra is kihívás képalkotási adatok alapján, és kiegészítő spektroszkópai vagy kvantitatív feldolgozást igényelhet.

Egy másik munka⁷⁹ során, Daveri és munkatársai felfestett referenciaanyagokat (pigmentporokat) és festményeket is vizsgáltak, a látható fénynek nem csak egy kiválasztott

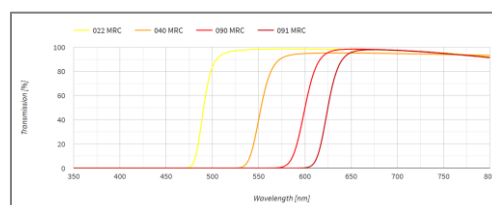
⁷⁹ A. Daveri, M. Vagnini, F. Nucera, M. Azzarelli, A. Romani, and C. Clementi, "Visible-Induced Luminescence Imaging: A User-Friendly Method Based on a System of Interchangeable and Tunable LED Light Sources," *Microchemical Journal* (2015), <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.11.019>.

(például, látható kék fény) szűk tartományát használták gerjesztésre, hanem vörös ($\lambda = 630$ nanométer), zöld ($\lambda = 517$ nanométer) és kék ($\lambda = 465$ nanométer) fényt is alkalmaztak. Ebben az esetben is LED fényforrásokat használtak a következő összeállításokban:

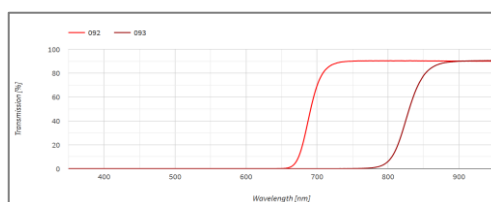
- a kék fény által gerjesztett, látható tartományú lumineszcencia felvételekhez (BIVL), a B+W 090 és a B+W 486 UV IR CUT szűrők együttes használatával a kamera előtt; valamint a kék fény által gerjesztett infravörös lumineszcenciafelvételekhez (BIL), B+W 092 (IR 695) vagy KODAK WRATTEN IR 87C szűrőket;
- a zöld fény által gerjesztett, látható tartományú lumineszcenciafelvételekhez (GIVL) pedig a B+W 040 és a B+W 486 UV/IR cut szűrőket együttesen alkalmazták a kamera előtt; valamint a zöld fény által gerjesztett infravörös lumineszcens felvételekhez (GIL) pedig a B+W 092 (IR 695) vagy a KODAK WRATTEN IR 87C szűrőket;
- a vörös LED-eket a vörös fény által gerjesztett infravörös lumineszcencia felvételekhez (RIVL) a kamera elé helyezett B+W 092 (IR 695) szűrőket használták, valamint a vörös fény által gerjesztett infravörös felvételekhez (RIL) a KODAK WRATTEN IR 87C szűrő alkalmazták;
- végül a fehér LED-eket a látható fénnel gerjesztett infravörös lumineszcens felvételekhez (VIRL) használták, HOYA 1000 szűrővel a kamera előtt.



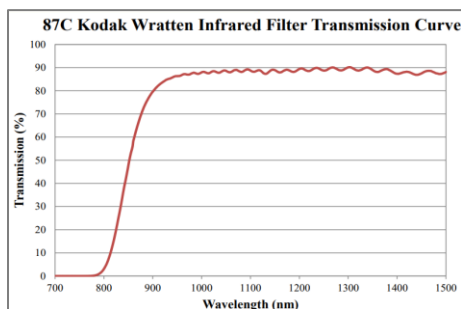
52. ábra - a B+W 486 MRC szűrőjének transzmissziós görbéje. Jól látható az egyenletes áteresztés a teljes látható tartományban, elhanyagolható ultraibolya átengedéssel és 675 nm-nél vörös blokkolással Forrás: <https://schneiderkreuznach.com/en>



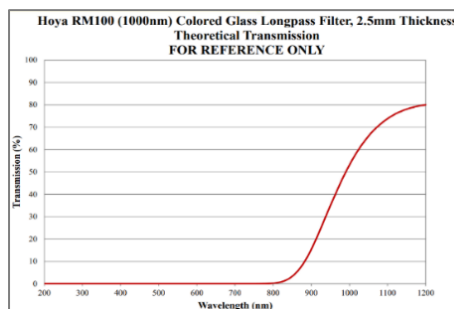
53. ábra - a B+W különböző sárga, narancs és vörös szűrők áteresztési görbéi. Forrás: <https://schneiderkreuznach.com/en>



54. ábra - a B+W infravörös szűrőinek áteresztési görbéi. Forrás: <https://schneiderkreuznach.com/en>



55. ábra - A Kodak Wratten IR 87C szűrő transzmissziós spektruma. Forrás: <https://www.edmundoptics.eu/>



56. ábra - A HOYA 100 (RM100) szűrő transzmissziós spektruma. Forrás: <https://www.edmundoptics.eu/>

Ebben a munkában is minden felvétel rögzítése során referenciaetalként a Spectralon® nem-lumineszcens szürke léptékű céltárgyat használták (99%, 50%, 25%, 12% reflektancia az UV–VIS–NIR tartományban). Az esetleges, a fotoindukált lumineszcenciafelvételeket befolyásoló nem kívánt fényhatásokat – vagyis bármely, a vizsgált felületről származó lumineszcencián kívüli fényforrás (környezeti fény, a térben jelen lévő más anyagok által kibocsátott fény, vagy a gerjesztőforrásból származó szórt fény) – figyelembe vették és értékelték a Spectralon® 99%-os reflektanciájú referenciaetalként alkalmazásával, a szakirodalomban ismertetett eljárást követve.

A vizsgálathoz minden felvételt RAW formátumban rögzítettek, majd azokat 8 984 × 6 732 képpontos felbontású, 16 bites .tiff formátumú képekké alakították a *Capture One 7* szoftver segítségével. A lumineszcenciát mutató területeket ezután UV–VIS–NIR spektroszkópiás vizsgálatnak vetették alá, megfelelő gerjesztési hullámhosszok alkalmazásával, az észlelt lumineszcenciajelenségek megerősítése céljából.

A vizsgálat első szakasza referencia pigmenttáblák elemzésére irányult. A gerjesztő LED fényforrást minden esetben az adott panelt alkotó színezőanyagok abszorpciós maximumának függvényében választották meg. A Spectralon® szürke léptékű referenciaetalként 99%-os reflektanciájú mezőjét használták viszonyítási alapként a lumineszcenciafelvételeken esetlegesen megjelenő zavaró (nem lumineszcens eredetű) fények értékeléséhez.

Az észlelt lumineszcenciajeleket intenzitásuk alapján értelmezték, majd azokat a hordozható spektrofotométerrel⁸⁰, a LED-ek által kibocsátott hullámhosszokhoz közeli

⁸⁰ Spektrofotométer: olyan fotolumineszcens műszer, amely adott hullámhosszú fénnel gerjeszti a mintát, majd a keletkező lumineszcens (fluoreszcens) sugárzás spektrumát és intenzitását méri. Forrás: Kéki Sándor – Deák György: *Spektroszkópia*. Debreceni Egyetem, Jegyzet, 2010.

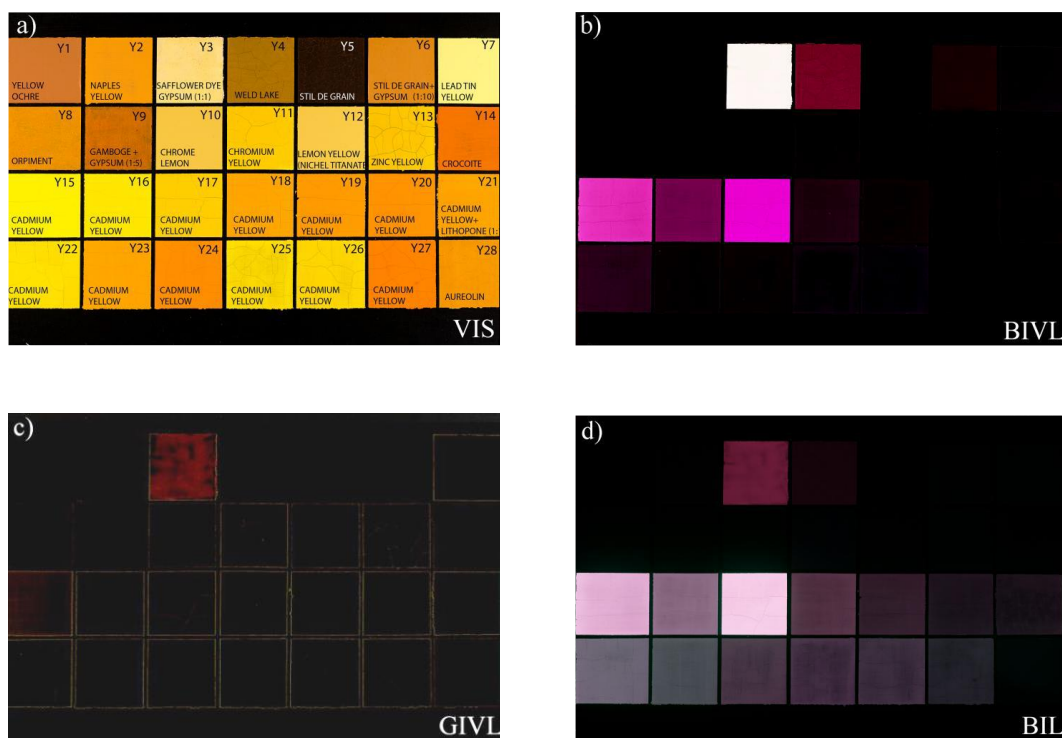
gerjesztéssel rögzített lumineszcenciaspektrumok segítségével validálták. A fejlesztett eljárást ezt követően kiterjesztették, és sikeresen alkalmazták különböző jellegű és eltérő történeti korszakokból származó valódi műtárgyakon is.

13.3 Az eredmények részletes kifejtése

A sárga panel esetében a 585–690 nanométer tartományban készült, kék fénnel gerjesztett lumineszcenciafelvételen intenzív lumineszcencia figyelhető meg a sárga sáfrányos szeklice (*Carthamus tinctorius* L. Y3) és a festő-rezeda⁸¹ (Y4) szektorokban; ugyanakkor egy jóval gyengébb, de még mindig érzékelhető jel jelenik meg a gipsszel hígított stil-de-grain-t⁸² (nedv sárga/zöld -varjútövis) tartalmazó mezőkben (Y6). Ezzel szemben a zöld LED-del végzett gerjesztés során (GIVL) csak a sárga sáfrányos szeklice szektor mutat lumineszcenciát a látható tartományban. Ezt a viselkedést a spektrofluorimetriás eredmények is alátámasztották. A 445 nanométeres gerjesztéssel, az Y3, Y4, Y5 és Y6 szektorokon rögzített emissziós spektrumok alapján a sárga sáfrányos szeklice és a festő-rezeda intenzívebb emissziót mutatott, mint a stil-de-grain pigment. A várakozásokkal ellentétben, utóbbi pigment lumineszcencia-intenzitása – amely a tiszta festéket tartalmazó szektorban (Y5) alig volt kimutatható – enyhén növekedett a gipsszel való „hígítás” után (Y6). Hasonló jelenséget már korábban is megfigyeltek kármín lakkfestékeknél, amelyeket fokozódó arányban ólomfehérrel keverték. Bebizonyosodott, hogy ez a viselkedés az önabszorpció csökkenésének és a kibocsátott fény nagyobb mértékű szóródása együttes hatásának tudható be. Ezek a fizikai jelenségek jelentősen módosíthatják a lakk pigmentek eredeti lumineszcenciaspektrumát, ami megnehezíti azok spektrális és így képalapú értelmezését.

⁸¹ A festőrezeda (*Reseda luteola* L.) az egyik legősibb és legelterjedtebb természetes sárga festőnövény. Fő színanyaga a luteolin, egy flavonoid, amely tiszta, erőteljes sárga árnyalatot ad, különösen alumínumpáccal. A festékanyagot a növény szárából, leveléből és virágzatából nyerik, használata az ókortól a 19. századig általános volt. Forrás: Dominique Cardon, *Natural Dyes: Sources, Tradition, Technology and Science* (Archetype Publications, 2007).

⁸² A stil de grain egy természetes sárga festékanyag, amelyet a bengéfélek (*Rhamnus* fajok, főként *Rhamnus saxatilis* és *Rhamnus cathartica*) éretlen, zöld bogyóiból nyertek. Fő színanyaga a rhamnetin és más flavonoid típusú glikozidok. A stil de grain erős, de kevésbé tartós sárga árnyalatot ad, fény- és mosásállósága gyenge, ezért festészetben és textilákon csak ritkán maradt fenn hosszú távon. Inkább miniatúrákban, vízfestékekben és tintákban alkalmazták a középkortól a 19. századig. Forrás: Cardon, *Natural Dyes*, 2007.



57. ábra - a sárga tábla látható tartományú reflexió és látható, valamint infravörös lumineszcens felvételei. Forrás: Daveri et al. 2015)

A táblák összes sárga szerves színezéke 445 és 532 nanométeres gerjesztési hullámhosszon egyaránt 666 nanométeren mutatott emissziót, egy 720 nanométeres vállal, amely a pigmentekben visszamaradó klorofill jelenlétére utal, amely a növényi eredetű alapanyag kivonása után marad vissza. Ez az emisszió olyan szélessé teszi a lumineszcencia-spektrumot, hogy annak vége (*tail*) átnyúlik a 700 nanométeres tartományon is, és különösen az Y3 és Y4 szektorok esetében felelős a 735–1000 nanométeres tartományban, BIL felvételen megfigyelt lumineszcenciajelenségért. Ezt a spektrumvéget (*tail*) nem detektálja a képalkotás zöld LED-es gerjesztéssel (felvétel nem szerepel), mivel a zöld fény hullámhossza nem a klorofill fő abszorpciós maximumaira esik, amelyek a látható spektrum kék és vörös tartományaiban helyezkednek el. A sárga sáfrányos szeklice emissziója viszont olyan magas és széles spektrumú, hogy zöld LED-del történő gerjesztés esetén is kimutatható a látható tartományban.

Ami a szerves sárga pigmenteket illeti, ezek közül egyik sem mutatott lumineszcenciát sem képalkotással, sem spektrofluorimetriával a három vizsgált LED-es gerjesztési hullámhosszon, természetesen a kadmiumalapú vegyületek kivételével, amelyek sajátos viselkedést mutattak. A 585–690 nanométeres tartományban készült kék fénnel

gerjesztett lumineszcens felvétel alapján csak bizonyos kadmumpigmentek mutattak ki-mutatható emissziót, míg zöld fénnel történő gerjesztés (633–690 nanométer) esetén egyik sem adott jelet. Ugyanakkor, – erről részletesen a 20. fejezet számol be – a teljes kadmium sárga sorozat lumineszcensnek bizonyult a közeli infravörös tartományban, mind kék, mind zöld LED-del történő gerjesztés során. A rögzített lumineszcenciafelvételek ismét jó korrelációt mutattak a panelen végzett spektrofluorimetriás mérésekkel.

A 445 nanométeres gerjesztés esetén néhány szektor (pl. Y15, Y16, Y17 kadmiumok) magas emisszióintenzitást mutat a 585–690 nanométer tartományban, így ezek lumineszcensnek látszanak a BIVL képeken. Más szektorokban (pl. Y22-kadmium) a lumineszcencia olyan gyenge, hogy képalkotással szinte nem is detektálható. Zöld LED-del történő gerjesztéskor egyedül az Y15 szektor mutat gyenge lumineszcenciát (gyakorlatilag nem látszik az ábrán), amit valószínűleg részben a zöld LED-ek alacsonyabb intenzitása, részben pedig az a tény okoz, hogy a zöld gerjesztés energiája épphogy a vizsgált pigmentek sávközi átmeneti energiája alatt van, így az abszorpció és ezzel együtt a gerjesztés kevésbé hatékony. Ennek ellenére az Y15 szektor 532 nanométeres gerjesztésre adott emissziója nagyobb, mint a többi sárga pigmenté, ami magyarázza a képalkotással detektált gyenge lumineszcenciát.

A **vörös** szerves színezékek esetében, a zöld fénnel gerjesztett lumineszcenciafelvételén (633–690 nanométer) jól látható a sáfrányos szeklice vörös változatának (R3) lumineszcenciája, valamint kisebb intenzitással a szantálfa (R14), a lakkfesték (*Kerria Lacca*⁸³ - R13) és a kármin – mind a tiszta (R15), mind a hígított (R16) formában – emissziója. A 585–690 nanométeres tartományban készült kék gerjesztésű képen (BIVL) csak az R3 és R14 szektorokban detektálható lumineszcencia.

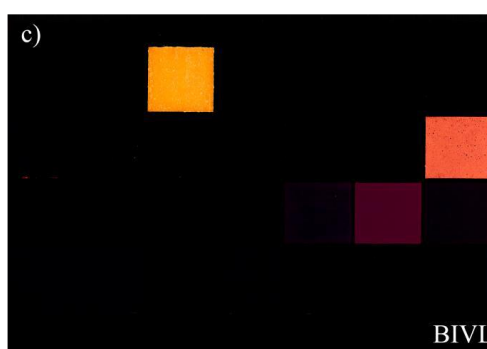
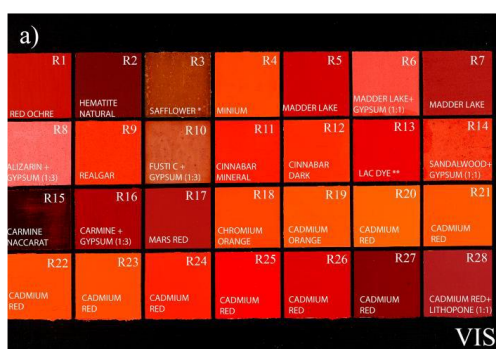
A 445 nanométeres gerjesztésű spektrofluorimetriás vizsgálatok során ugyanazon körülmények mellett a sáfrányos szeklice vörös (R3) és a szantálfa (R14) körülbelül tízszer nagyobb emisszióintenzitást mutatott, mint a lakkfesték (R13) és a kármin (R16), annak ellenére, hogy utóbbiak abszorpciója magasabb. Ez megmagyarázza, miért csak az R3 és R14 szektorok jelennek meg a BIVL képeken. Az állati eredetű lakkokat (R14 és R16) ezzel szemben jobban lehet detektálni zöld LED-es gerjesztéssel (GIVL, 633–690 nanométer), mivel még ha kisebb is az emissziójuk, a gerjesztési hullámhossz pontosan a

⁸³ A *Kerria lacca* egy Délkelet-Ázsiában őshonos rovarfaj, amelyet elsősorban arról ismernek, hogy váladékából készül a sellak (shellac). A nőstény rovarok testükből gyantás váladékot bocsátanak ki, amely megszilárdulva gyűjthető és feldolgozható. A rovar testéből kinyerhető a lakkfesték (laccic acid, carminic-szerű antrokinon színezék), amely bíborvörös árnyalatú, és történetileg fontos színezőanyag volt textíliák, selymek és más anyagok festésében. Forrás: Cardon, *Natural Dyes*, 2007.

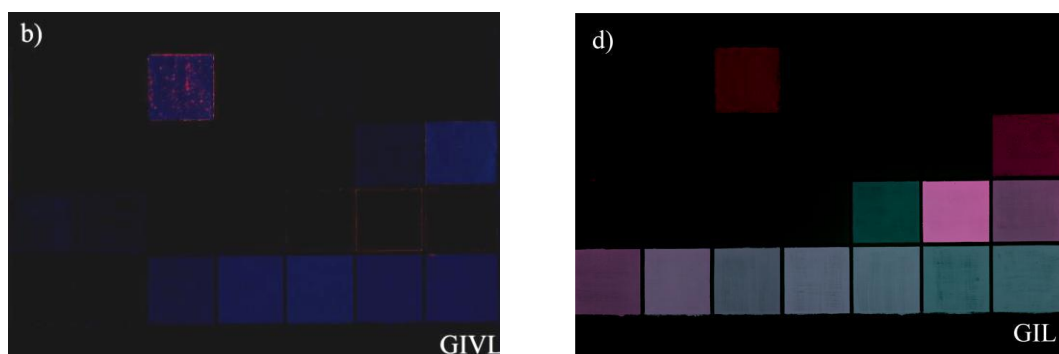
lakkok abszorpciós maximumára esik. Érdekes megjegyezni, hogy a vörös sáfrányos szeklice látható emissziója, amely 550 nanométernél mutat maximumot, nem egyezik a szakirodalomban közölt 590 nanométeres értékkel, hanem inkább a sáfrányos szeklice sárga komponensének (*safflomin A-B*) emissziójára emlékeztet. Ez valószínűleg annak tudható be, hogy a sáfrányos szeklice másik vörös komponense (*carthamin*) fluoreszcenciáját részben elfedi a sárga színezék maradványa.⁸⁴

Hasonlóan a 445 nanométeres gerjesztéshez, 532 nanométeres gerjesztés esetén is nagy intenzitású fluoreszcencia figyelhető meg a sáfrányos szeklice vörös és a szantálfa esetében; ezen pigmentek emissziós spektrumának vége (*tail*) a zöld fény által gerjesztett infravörös lumineszcencia-felvételeken is megjelenik (GIL).

Ami a vörös kadmumpigmenteket illeti, a narancssárgás árnyalatúak (R19, R20, R21) látható tartományban is kimutatható gyenge lumineszcenciát mutatnak kék LED-es gerjesztéssel, míg a mélyebb vörös árnyalatú pigmentek (R24–R28) zöld LED-del történő gerjesztésre adnak gyenge látható tartományú lumineszcenciát. Az optikai tulajdonságok – így a képalkotással megfigyelt viselkedés is – szorosan összefügg a pigmentek kémiai összetételével. Ismert, hogy a kadmium-szulfoszelenid pigmentek esetében a szeléntartalom növekedése a kadmiumhoz képest mélyebb vörös árnyalatot eredményez, mivel csökken a sávközi átmenethez szükséges energia, és ez az abszorpciós, exciton- és csapdaállapotú emissziós sávok hosszabb hullámhosszak felé tolódását idézi elő (20. fejezet).

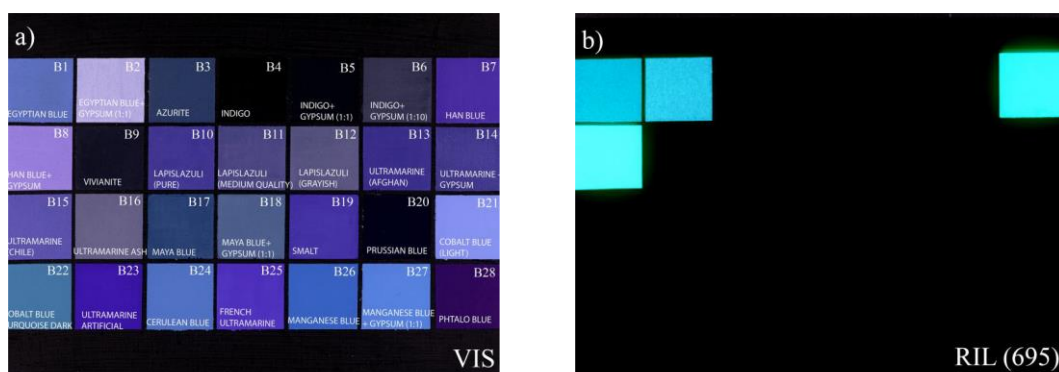


⁸⁴ A sáfrányos szeklice (*Carthamus tinctorius*) szirmaiban két fő színanyag van: a vízdíszható, sárga festékanyagok (pl. safflomin A és B, kémiaiilag chalcon-glikozidok), valamint a vörös karthamin, ami sokkal kevésbé oldódik vízben, és nehezebben nyerhető ki. A sárga festékanyagokat a középkortól kezdve gyakran használták textilfestéshez, de gyorsan fakulnak fény hatására, ezért tartósságuk jóval kisebb, mint a karthamin vörösének. A festészetben inkább a vörös karthamin (pl. japánban *benibana-e*) volt jelentősebb, míg a sárga festékanyag ritkán fordult elő tartóssági okok miatt. Forrás: Cardon, *Natural Dyes*, 2007.



58. ábra – A vörös tábla látható tartományú reflexiós és lumineszcens felvételei. Forrás: Daveri et al. (2015)

A **kék panel** esetében csak infravörös tartományú lumineszcencia volt kiváltható az alkalmazott gerjesztési források segítségével. A vörös fénnel gerjesztett lumineszcenciafelvételek – 735–1100 nanométer (RIL695) és 830–1100 nanométer (RIL830) – erőteljes lumineszcenciát mutatnak az egyiptomi kék (B1, B2) és Han-kék (B7, B8) pigmentek esetében. Röntgendiffrakciós mérések megerősítették az egyiptomi kék esetében a cuprorivait, a Han-kék esetében az Effenbergerit kristályszerkezet jelenlétét. A szakirodalom alapján a látható fényes gerjesztéssel rögzített emissziós spektrumokban az egyiptomi kék esetében a maximum kb. 910 nanométer-nél, Han-kék esetében 940 nanométer-nél helyezkedik el. A három különböző gerjesztési hullámhosszra optimalizált képalkotási eljárás során a teljes vizsgált tartományban (585–1100 nanométer) nem mutatkozott további (más pigmentből származó) lumineszcenciajelenség, amit spektrofotometriás vizsgálatok is megerősítettek.





59. ábra – A kék tábla látható tartományú reflexió és lumineszcens felvételei. Forrás: Daveri et al. (2015)

13.3.1 A tanulmány összefoglalása

A második bemutatott munka esetén pedig a vizsgálatok első részében mintatáblák elemzése történt. A gerjesztő LED fényforrást az egyes paneleken található színezékek abszorpciós maximumához igazították. A Spectralon® szürke léptékű céltárgy 99%-os reflektanciájú mezője szolgált referenciaként a lumineszcenciafelvételeken esetlegesen megjelenő zavaró fények értékeléséhez. Az észlelt jeleket intenzitásuk alapján értelmezték, és a LED-ek által kibocsátott hullámhosszokhoz közeli gerjesztéssel, hordozható spektrofлуорiméterrel rögzített lumineszcenciaspektrumok alapján validálták. Végül a kifejlesztett eljárást különböző jellegű és történeti korszakokhoz tartozó valódi műtárgyakon is sikeresen alkalmazták.

13.4 A két vizsgált tanulmány összefoglalása

A vizsgált két tanulmány egyaránt a látható tartományú fényforrásokkal (elsősorban LED-ekkel) történő gerjesztésen alapuló látható tartományú lumineszcencia képalkotás gyakorlati alkalmazhatóságát mutatja be, különös tekintettel a szerves színezékek (lakkpigmentek) azonosítására. Az első munka egy kompakt, váltogatható LED-es világítási rendszerre épülő, kombinált VVL/VIRL módszert ismertet, amely a LEE filters® szűrőkkel végzett VVL felvételek révén képes jól elkülöníthető lumineszcencia jelet szolgáltatni a szerves színezékekből, miközben a 630 nanométeres vörös LED-del hatékonyan aktiválható az egyiptomi kék infravörös emissziója. A módszer előnyei közé tartozik a hordozhatóság, a gyors szűrő- és fényváltás, valamint a tárgykímélő, célzott gerjesztés (ultraibolya sugárzás mellőzése), ugyanakkor a szűrők spektrális korlátai és a színekalibráció hiánya rontják a pigmentek elhelyezkedése szerinti meghatározás pontosságát.

A második tanulmány egy referencia-táblát és valós műtárgyakat is vizsgálva a különböző LED-ekkel végzett gerjesztés hatásait elemzi. A sáfrányos szeklice, festő-rezeda és nedv zöld, kármin szerves pigmenteknél megfigyelték, hogy az emisszióintenzitás nemcsak az abszorpciós jellemzőktől, hanem a keverési aránytól és a mátrix (például a gipsz) jelenlététől is függ, mely utóbbi az önabszorpció csökkenésén keresztül növelheti a lumineszcenciát. A klorofillmaradványok miatt megjelenő spektrális vállak az infravörös tartományba is átnyúlnak, ami a BIL felvételeken is tetten érhető. A vörös szerves színezékek (pl. lakkfesték, kármin, vörös sáfrányos szeklice) szintén változatos viselkedést mutattak, amelyet a gerjesztés és az emisszió hullámhossza közötti kapcsolat határoz meg.

A szerves pigmentek közül a látható tartományban csak a kadmiumalapú vegyületek mutattak kimutatható lumineszcenciát, jellemzően a pigmentek sávközi energiaszintjeinek megfelelő tartományban.

Az egyiptomi kék és Han-kék esetében a vörös LED-del (630 nanométer) gerjesztett VIL felvételeken infravörös emisszió detektálható, amit spektrofluorimetria is megerősített. Továbbá a tanulmány felhívja a figyelmet a mangánkék és a nikkeltitán sárgák infravörös lumineszcenciájára is.

Mindkét tanulmány rámutatott arra, hogy a lumineszcencia-emissziók értelmezése – különösen színezékek esetében – nem korlátozódhat a képalkotási adatokra, hanem kvantitatív spektrális méréseket, valamint az optikai hatásokat (önabszorpció, szórás, mátrixhatás) is figyelembe kell venni. Ettől eltekintve a VVL technikát megfelelő eljárásnak tartom egyes pigmentek, kifejezetten a szerves színezékek detektálására és bizonyos szintű azonosítására és területi eloszlásuk szelektálására.

14 KITEKINTÉS A *FALSE-COLOR* KÉPALKOTÁS TERÜLETÉRE⁸⁵

14.1 Terminológiai problémák

A *false color* kifejezés magyar nyelvű fordítása régóta vitatott a tudományos terminológiában. A szó szerinti megfelelő, a „hamis színes” felvétel, a távérzékelés és a geológia szakirodalmában már meghonosodott, ugyanakkor a műtárgyvizsgálati kontextusban félreérthető. A magyar „hamis” szó erőteljesen pejoratív jelentést hordoz, és a laikus vagy akár a szakmai közegben is azt a benyomást keltheti, hogy a felvétel hibás, torzított vagy megbízhatatlan, vagy még nagyon félreérték következtében azt a műtárgy vonatkozásában is félrevezető. Ez ellentétben áll a terminus eredeti funkciójával, amely a képalkotási csatornák tudatos átrendezésére, nem pedig a kép hitelességének megkérdőjelezésére utal.

Alternatív fordítási kísérletek is megjelentek. A „pszeudoszínes” megnevezés az űrkutatásban és a geoinformatikában ismert, de a műtárgydiagnosztikában idegennek hat, és a „pszeudo” előtag hasonlóan kedvezőtlen asszociációkat kelthet. A „kevert csatornás” kifejezés pontosabb technikai leírásnak tekinthető, de túlzottan „magyarázó” jellegű, így nem alkalmas terminusként való szélesebb körű alkalmazásra. Más nyelvekben felbukkanó szókapcsolatok, mint például az „álszínes” vagy a „mesterséges színes”, szintén nem nyújtanak megoldást, mivel a magyar szaknyelvi használatban még negatívabb jelentésárnyalatot hordoznak.

A nemzetközi gyakorlatot tekintve megfigyelhető, hogy több területen – különösen a műtárgyvizsgálatban és a konzerválástudományban – a terminus változatlanul, angol formájában kerül átvételre. Ennek számos előnye van: pontosan illeszkedik a nemzetközi terminológiához, mentes a magyar nyelvi félreértésektől, és egyértelműen azonosítható a nemzetközi szakirodalommal. Hátránya ugyan, hogy idegen szóként jelenik meg a magyar szövegben, de a gyakorlatban ez nem jelent komoly akadályt, mivel a kutatói közösség számára a kifejezés közismert, a laikus közönség számára pedig egyszerű lábjegyzetben vagy rövid definícióban tisztázható.

Összességében indokoltnak látszik, hogy a *false color* kifejezés a műtárgyvizsgálati és konzerválási szaknyelvben angol eredetű formájában kerüljön meghonosításra. Ez a megoldás lehetővé teszi a nemzetközi szakirodalomhoz való szoros illeszkedést, elkerüli

⁸⁵ Thomas Moon, Michael R. Schilling, and Sally Thirkettle, “A Note on the Use of False-Color Infrared Photography in Conservation,” *Studies in Conservation* 37, no. 1 (1992): 42–52, <https://www.jstor.org/stable/1506355>.

a félrevezető magyar nyelvi verziókat és biztosítja a terminológiai következetességet a tudományos diskurzusban.

14.2 Infravörös-reflexiós *false color* képalkotás⁸⁶

A különféle roncsolásmentes technikák közül az infravörös reflektográfia és a *false color* infravörös képalkotás kiemelkedő szerepet játszik a műalkotások vizsgálatában. A *false color* infravörös fényképezést különösen hatékony eszközként alkalmazzák a pigmentek azonosítására, amely lehetővé teszi a különböző festékrétegek elkülönítését is, különösen akkor, ha azok eltérő időszakokban vagy különböző technikával kerültek felhordásra.

Az eljárás során az RGB színeképes képeket és infravörös reflektogramokat kombinálva egy mesterségesen létrehozott színes kép jön létre, amelyben az egyes pigmentek sajátos, sokkal kontrasztosabb, figyelemfelkeltő, színes megjelenést kapnak, az infravörös sugárzásra adott reakciójuk alapján. Ez a kölcsönhatás szorosan összefügg a pigmentek kémiai összetételével, valamint függhet a művész által alkalmazott festési technikától, beleértve a színek keverési módját és a festékrétegek struktúráját is.

A reflektográfiai vizsgálatok kezdetben infravörös érzékeny fényképező filmekkel készültek, fekete-fehér és színes változatban egyaránt. A technológiai fejlődés, különösen az infravörös videokamerák és a modern CCD-kamerák alkalmazása, jelentősen javította a képek minőségét és felbontását. Továbbá a digitális képfeldolgozó programok megjelenése egyszerűsítette a módszer alkalmazását.

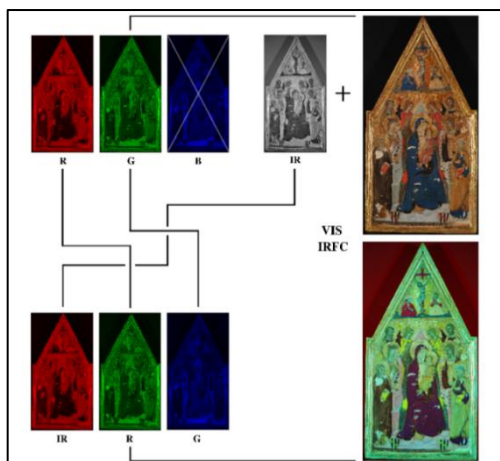
14.2.1 Az IrRFC képek elkészítésének módja

Az infravörös-reflexiós *false color* képek előállításakor a színes RGB képek kék komponense elhagyásra kerül, míg a vörös és zöld színcsatornákat az infravörös komponenssel kombinálják. Az eljárás során az eredeti vörös színcsatornát az infravörös komponens helyettesíti, a zöldet a vörös, míg a kékét a zöld váltja fel (60. ábra). Az így létrejövő képek alkalmasak arra, hogy feltárják az egyes színtónusok mögött meghúzódó pigmentek eltérő optikai tulajdonságait, ezáltal segítve azok azonosítását.

Egy adott festett tárgy különböző színű területei a felhasznált pigmentek eltéréseire utalhatnak. Bizonyos pigmentek, noha eltérő kémiai összetételűek, szabad szemmel

⁸⁶ M. C. Buoso, D. Ceccato, and D. Zafiropoulos, "False-Color Infrared Photography in the Identification of Pigments Used for a Late 13th Century Illuminated Manuscript," in *Proceedings of the International Workshop on Infrared Spectroscopy and Imaging (IRSI)*, INFN–Laboratori Nazionali di Legnaro, Padova, Italy, 2005.

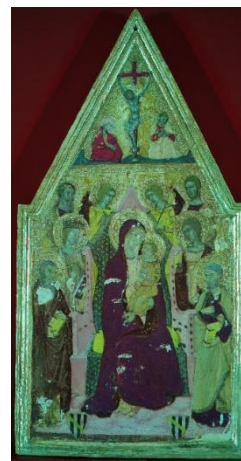
nagyon hasonló színűnek tűnhetnek. Például a világoskék árnyalat előállítható a ritka és drága *lapis lazuli*-ből vagy az olcsóbb azuritból is. Bár látható fényben ezek a pigmentek hasonló spektrumot mutatnak, az infravörös tartományban jelentős eltérések figyelhetők meg az abszorpciójukban.



60. ábra - A infravörös-reflexiós *false color* kép elkészítésének sematikus rajza. Forrás: saját ábra



61. ábra – VIS-R_VIS.
Forrás: saját felvétel



62. ábra – IrRFC. Forrás: saját felvétel

Az infravörös-reflexiós *false color* technika egyszerű és költséghatékony módszerként alkalmazható a pigmentek helyszíni meghatározására műtárgyakon, így jelentős szerepet játszik a kulturális örökség kutatásában és megőrzésében.

Bár az infravörös-reflexiós *false color* képalkotás viszonylag egyszerűen kivitelezhető, a színiegyensúlyozás és a kontraszt problémákat okozhat, ha a szűrés, a megvilágítás és a feldolgozás nincs megfelelően szabályozva. Sajnos a restaurátori szakirodalomban korábban nem állt rendelkezésre elegendő információ ahhoz, hogy kezdő restaurátorok, akik érdeklődéssel fordulnak a fotótechnikai vizsgálatok felé, próbálkozás, idő- és pénzigényes kísérletezés nélkül kiváló minőségű infravörös-reflexiós *false color* képet készítsenek.

Számos tanulmány feldolgozása alapján megállapítható, hogy az ezekben közölt információk lényegében tiszta képet nyújtanak a témáról. A következő fejezetekben szakirodalmi példák és gyakorlati tapasztalatok felhasználásával kerülnek bemutatásra a technikában rejlő lehetőségek.

14.3 Az „első próbálkozások” a múlt, az analóg filmes módszerek

Egy korai tanulmány szabványosított eljárást ismertet a Kodak 2236 típusú infravörös film alkalmazására, amely a kísérletek alapján megbízhatóan reprodukálható és kiváló minőségű képeket eredményezett. Az eljárást a kutatás során különféle festékminták és árnyalatkártyák vizsgálatára használták, beleértve olaj- és temperafestékeket, valamint ipari pigmenteket is.

14.3.1 A film tulajdonságai és tárolása

A Kodak 2236 film három rétegből áll, amelyek a zöld, vörös és infravörös sugárzásra érzékenyek. Az infravörös réteg 750–900 nanométer tartományban reflektáló anyagok esetén vörös színt eredményez a végső képen. Az érzékenységi és a színvisszaadás szempontjából meghatározó a film megfelelő tárolása, amelyet -18 és -22 °C közötti hőmérsékleten kell biztosítani. Használat előtt a film szobahőmérsékletre történő akklimatizálása szükséges, amely körülbelül négy órát vesz igénybe. A kutatások rámutattak arra, hogy a nem megfelelő tárolási körülmények jelentős eltéréseket okozhatnak a színvisszaadásban, ami hamis eredményekhez vezethet.

14.3.2 Világítás és expozíció

A fényképezéshez két Speedotron #102A típusú vakut alkalmaztak, amelyeket ultraibolya szűrőkkel szereltek fel, színhőmérsékletüket pedig 5200 Kelvinre állították be. A világítási körülmények pontos szabályozása kulcsfontosságú, mivel a különböző hullámhossztartományok hatással vannak a végső képek színegyensúlyára. A fényintenzitás beállítása Kodak 18%-os szürke kártya segítségével történt; a kamera fénymérője $f/16.2$ rekesztértéket mutatott 2400 wattmásodperces vakuenergia mellett.

Az infravörös *false color* képalkotás során a szűrés kiemelt jelentőséggel bír, mivel az infravörös réteg érzékeny a kék és ultraibolya sugárzásra, ami torzítást eredményezhet a képen. A vizsgálatok szerint a Wratten No. 12 szűrő biztosította a legjobb színkiegyensúlyozást, amelyet további Kodak színszűrőkkel (CC10, CC20, CC30, CC40) finomítottak.

14.3.3 Filmfeldolgozás és kiértékelés

A fényképezést követően a film előhívása a lehető legrövidebb időn belül megtörtént a konzisztens eredmények biztosítása érdekében. Az optimális eredmények elérése érdekében az első előhívási időt hat percre rövidítették, míg az előhívási hőmérsékletet $29,4 \pm 0,2$ °C-on tartották fenn. Megfigyelések szerint a hőmérsékleti ingadozások és a feldolgozás késleltetése eltéréseket okozhatnak a színvisszaadásban. A végső *false color* képek kiértékelése során különböző szűrők hatását vetették össze a festett minták és pigmentáryalat-kártyák színeivel; a legkedvezőbb eredményt a CC20 cián szűrő biztosította⁸⁷, amely lehetővé tette a pigmentek közötti legnagyobb színbeli eltérések érzékelését.

14.3.4 A legfontosabb megállapítások

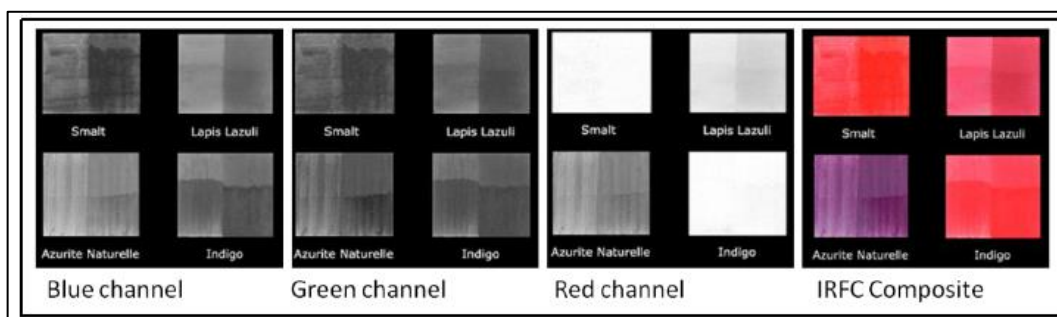
A kék pigmentek a legszélesebb színskálát mutatták: az indigó, a kobaltkék, a ftalocianinkék és az ultramarin vöröses árnyalatként jelentek meg, míg az alacsony infravörös reflektanciájú kék pigmentek (például a poroszkék és az azurit) sötétkék vagy fekete tónusban voltak azonosíthatók. A vörös és sárga pigmentek között csak csekély különbségek voltak megfigyelhetők: a vörösek általában sárgásnak, a sárgák pedig fehéres árnyalatúnak látszottak. Kivételt képeztek a vas-oxid alapú pigmentek, amelyek zöldes tónust mutattak. A zöld pigmentek esetében jelentősebb eltérések voltak tapasztalhatók: a réztartalmú pigmentek kékes, míg a krómtartalmú pigmentek ibolya vagy vöröseslila árnyalatot vettek fel. A kötőanyagok nem gyakoroltak lényeges hatást a színváltozásokra, amely megfigyelés más kutatási eredményekkel is összhangban áll. Az expozíció és a pigmentkoncentráció befolyásolta a végső színmegjelenést: túlexponálás esetén a sötétebb pigmentek világosabb, intenzívebb színüként jelentek meg, míg a világosabb pigmentek fehéres tónust vettek fel.

⁸⁷ A cián szűrők – különösen a CC20 típus – kiemelten hatékonyak a false-color infravörös fényképezésben, mivel kiegyensúlyozzák a spektrális érzékenységet: mérséklék a vörös színtúlsúlyt, miközben kontrasztosabb megjelenítést biztosítanak a pigmentek között. Ennek köszönhetően a színkülönbségek pontosabban tükrözik a vizsgált anyagok eltérő reflexiós és emissziós tulajdonságait.

14.4 A digitális technika megjelenése⁸⁸

A *false color* képalkotás napjainkra számos helyen bevett technikává vált a pigmentek azonosítására és térképezésére festményeken vagy festett tárgyakon. A hagyományos eljárásoktól eltérően ma már az ilyen képeket az elkészült felvételek csatornákra bontásával és digitális utómunkával állítják elő.

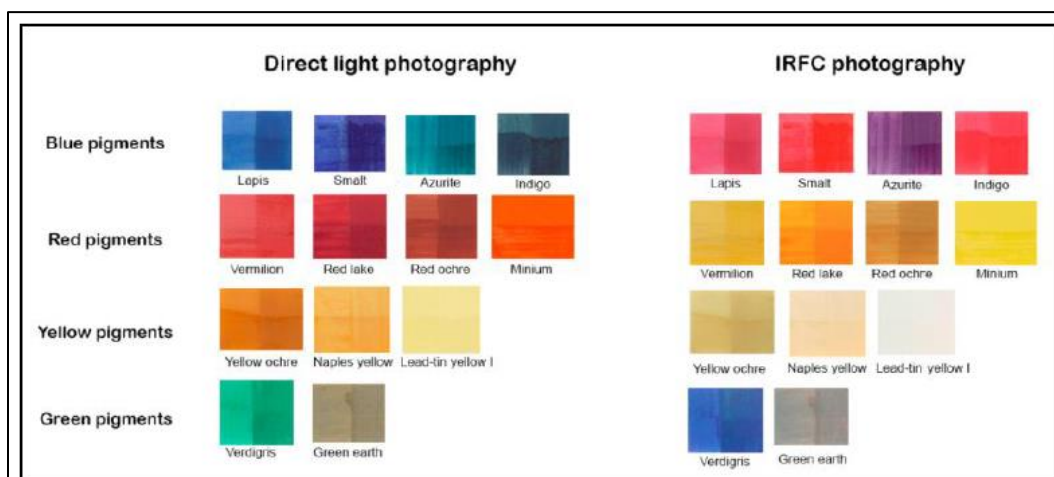
A módszer lényege, hogy a szokásos vörös, zöld és kék színcsatornákat egy infravörös vagy ultraibolya csatornával kombinálják. Az infravörös-reflexiós *false color* (IrRFC) fényképezés során a kék csatorna elhagyásra kerül, a zöld és vörös csatornák eltolódnak, majd az infravörös képet az eredeti vörös csatorna helyére illesztik (60. ábra). A *Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF)* adatbázisában szereplő négy kék pigment (azurit, smalte, indigó és lapis lazuli/ultramarin) közül az IrRFC fényképezés lehetővé teszi az azurit elkülönítését, mivel az IrRFC képeken lilás árnyalatban jelenik meg, míg a másik három pigment rózsaszín tónust mutat (63. ábra). Ez a jelenség azzal magyarázható, hogy az azurit spektruma az infravörös tartományban alacsonyabb, mint a többi pigmenté, így a monokróm infravörös felvételen sötétebbként látható.



63. ábra – Kék mintafelületek RGB csatornákra bontva. Jobbra IRRFC kompozit. C2RMF adatbázis.
Forrás: M. c. Bouso et al. 2005

Az IrRFC fényképezés nagyon hasznos bizonyos kék és zöld pigmentek megkülönböztetésére, azonban a vörösek és sárgák differenciálása sokkal nehezebb. A 64. ábrán C2RMF adatbázisából a 17. század leggyakoribb pigment-válogatása látható, mind hagyományos fényképezéssel, mind pedig IrRFC technikával rögzítve.

⁸⁸ Anita Hayem Ghez, Elisabeth Ravaud, Clotilde Boust, Gilles Bastian, Michel Menu, and Nancy Brodie Linder, "Characterizing Pigments with Hyperspectral Imaging: Variable False Color Composites," *Applied Physics A* 121, no. 3 (2015): 939–47, <https://doi.org/10.1007/s00339-015-9458-8>.



64. ábra - a C2RMF 17. században leggyakoribb pigmentjei válogatása normál és IRFC képen. Forrás: M. c. Bouso et al. 2005

Az IrRFC kompozit világosan elkülöníti az egyik kék pigmentet a többitől, valamint megkülönbözteti a kétféle zöld pigmentet: a réztartalmú zöldek (például a *verdigris*) kéknek látszanak az IrRFC képeken, míg a zöldföld szürkének tűnik. A vörös és sárga pigmentek esetében azonban a különbségek nagyon csekélyek a mintákon, és egy festményen különösen nehéz megkülönböztetni őket.

Ez a nehézség könnyen érthető, mivel különösen a sárga és vörös pigmentek meglehetősen átlátszóak az infravörös tartományban. Ennek eredményeként az infravörös sáv hozzáadása a kompozithoz nem olyan hasznos a vörös és sárga pigmentek azonosításában, mint a kék és zöld pigmentek esetében.

14.4.1 A technika továbbfejlesztése, multi – és hiperspektrális kamerák

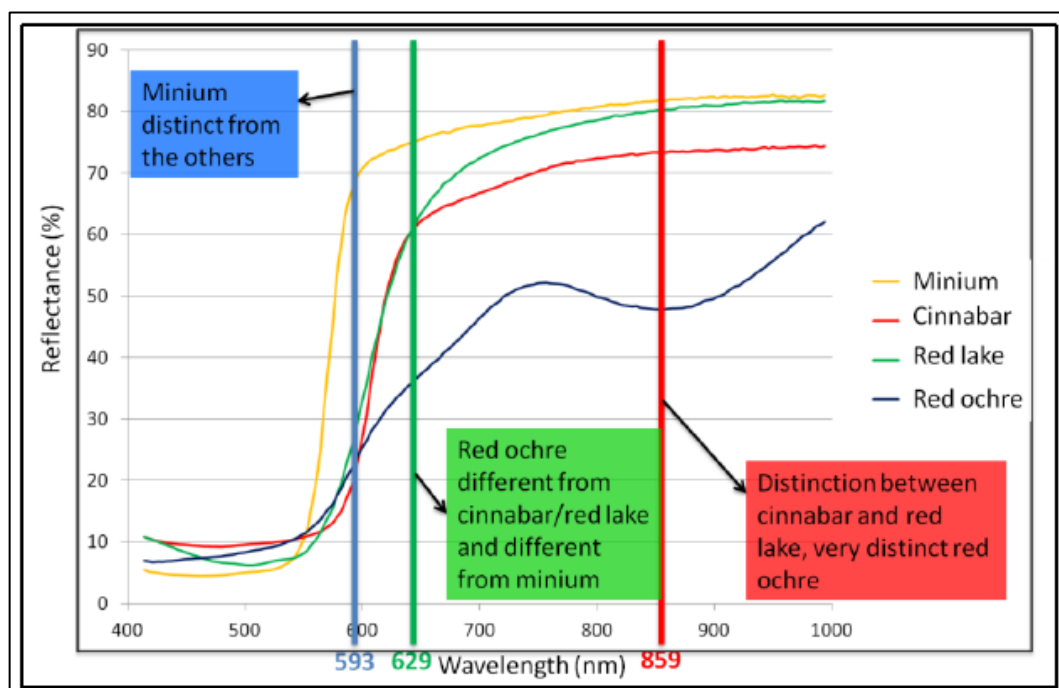
A sárga és vörös pigmentek más spektrális tartományokban, például a látható fény tartományának szűk spektrális sávjaiban jobban megkülönböztethetők. Ez arra ösztönözte a C2RMF kutatóit, hogy megpróbálják az IrRFC fényképezés módszerét a hiperspektrális képalkotásra átültetni.

A hiperspektrális képalkotás egy úgynevezett képalkotó kockát (*image cube*) hoz létre, amely az Intézet kamerájának esetében 80–160 képből áll, a 400 és 1000 nanométer közötti tartományban. Minden egyes kép egy szűk spektrális sávhoz tartozik a látható és közeli infravörös tartományban, és ezek kombinálásával több mint 4 millió különböző *false color* színes kompozit állítható elő. A spektrális felbontástól függően a spektrális sávok akár 3 nanométer szélességűek is lehetnek. Mivel a sárga és vörös pigmentek spektrumai keskeny tartományokban eltérnek egymástól a látható fény spektrumán belül, a

hiperspektrális képalkotással létrehozott *false color* kompozitok jelentős előrelépést jelenthetnek a pigmentek azonosításában.

14.4.2 Spektrumelemzés

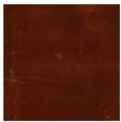
A hiperspektrális képalkotás lehetőséget biztosít arra, hogy egyrészt minden egyes hullámhosszon rögzített kép elérhető legyen, másrészt pedig minden képpont spektruma elemezhetővé váljon. A kísérletek során a cél három hullámhossz kiválasztása volt, amelyek három monokróm képet alkottak a vörös, zöld és kék csatornák számára, lehetővé téve a *false color* kompozit képen az egyes pigmentkategóriák (kék, vörös, sárga és zöld) vizuális elkülönítését. A vizsgálatokhoz a kamera maximális felbontású képeit használták, vagyis 160 spektrális sávot. A 18. század előtti időszak vörös pigmentadatbázisát négy pigment alkotta: cinóber, vörös okker, egy szerves vörös (*red lake*) és a minium, melyek spektrumai a 65. ábrán láthatók.



65. ábra - a C2RMF adatbázisában szereplő 4 vörös pigment reflexiós spektrumai. Forrás: M. c. Bouso et al. 2005

A spektrális képek leghatékonyabb kombinációjának kiválasztásához olyan sávokat jelöltek ki, amelyek a négy vörös pigment közötti különbségeket maximalizálják. Ennek érdekében meghatározó azoknak a spektrális tartományoknak a kiválasztása, ahol a spektrumok jól elkülönülnek egymástól, valamint a különböző görbék visszaverődési

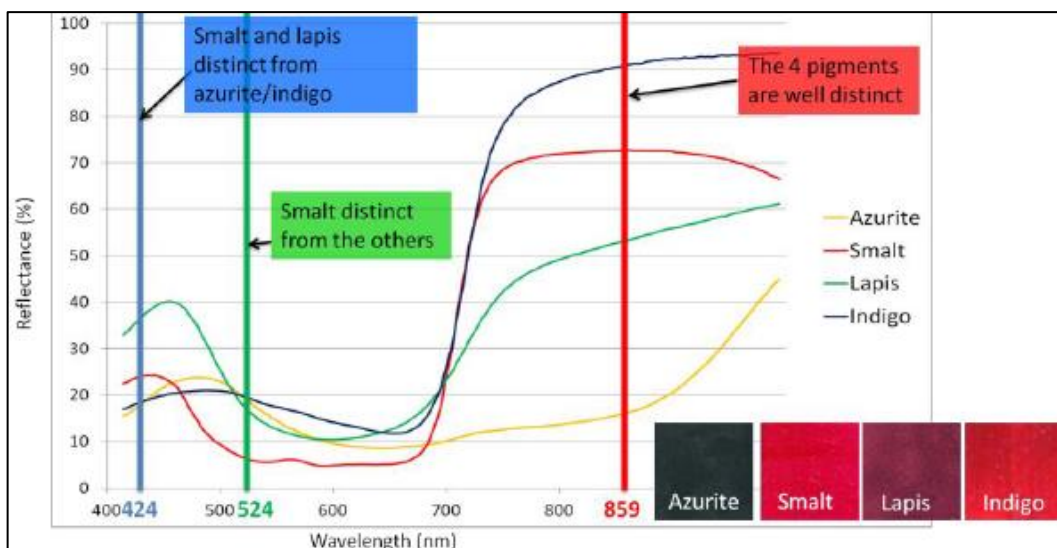
százalékai eltérő sorrendben helyezkednek el (például a minium visszaverődése 400 és 550 nanométer között alacsonyabb, mint a cinóberé, míg 550 nanométer felett fordított a helyzet – ez a sorrendváltás maximalizálja a hamisszínes különbségeket a két pigment között). A négy vörös pigment megkülönböztetése érdekében az RGB *false color* kompozit létrehozásához három spektrális sávot választottak ki: 593 nanométeren (50. sáv), ahol a minium erősen elkülönül a többitől; 629 nanométeren (60. sáv), ahol a vörös okker megkülönböztethető a cinóbertől, a szerves vöröstől és a miniumtól; valamint 859 nanométeren (123. sáv), ahol a cinóber elkülöníthető a szerves vöröstől, míg a vörös okker markánsan elkülönül valamennyi más pigmenttől. A 66. ábrán bemutatott *false color* kompozit – amelyet FC1-nek (*False Color #1*) neveztek el – összevethető a valódi színekkel, amelyeket közvetlen fényképezéssel rögzítettek.

	Cinnabar	Red ochre	Red lake	Minium
Real colors (direct light photography)				
False color composite FC1 (bands #50-60-123)				

66. ábra - A fent leírt kísérlet alkalmával létrehozott hamis színes képek. Forrás: M. c. Bouso et al. 2005

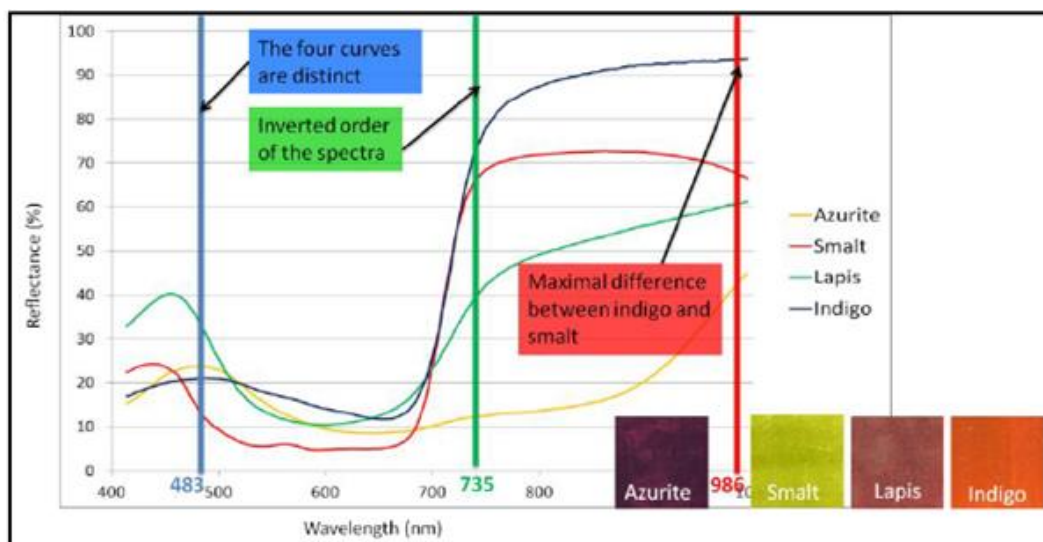
Az FC1 kompozit eredményeképpen a négy vörös pigment jól elkülöníthető: a cinóber sárga, a vörös okker szürke, a szerves vörös narancssárga, míg a minium szinte fehér árnyalatban jelenik meg.

A kék pigmentek (természetes ultramarin, indigó, azurit és smalte) esetében hasonló módszer került alkalmazásra. A spektrumok elemzését követően olyan spektrális sávok kerültek kiválasztásra, amelyek a lehető legnagyobb különbségeket biztosítják. A 67. ábrán bemutatott három kiválasztott sáv eredményeként a természetes ultramarin (lila) jól megkülönböztethető az azurittól (kékesszürke). Ugyanakkor a smalte és az indigó megjelenése túlságosan hasonlónak bizonyult (mindkettő rózsaszín–narancssárga árnyalatot mutatott), így elkülönítésük további finomhangolást igényel.



67. ábra - A megválasztott reflexiós sávok a FC2-es kompozit létrehozásához a kék pigmentek esetén. Forrás: M. c. Bouso et al. 2005

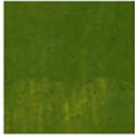
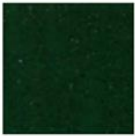
Mivel a smalte és az indigó az FC2 kompozitban túlságosan hasonló színeket mutatott, elkülönítésük nem volt egyértelműen megvalósítható. Ennek érdekében egy újabb háromsávos kombináció (FC3) került kiválasztásra, amely lehetővé tette a két pigment pontosabb megkülönböztetését. Az új sávválasztás, valamint az így kapott színek a 68. ábrán láthatók.



68. ábra - a megválasztott reflexiós sávok az FC3-as kompozit létrehozásához. Forrás: M. c. Bouso et al. 2005

Az FC3 kompozitban a smalte zöldes, míg az indigó narancssárga árnyalatot mutat. Az FC2 és FC3 kompozitok együttes alkalmazása így lehetővé tette az adatbázisban szereplő négy kék pigment megbízható elkülönítését. A sárga pigmentek (sárga okker,

ólom-ón sárga I. és nápolyi sárga) esetében azonos protokoll alapján történt a spektrális sávok kiválasztása. Az FC1, FC2 és FC3 kompozitok gyors összehasonlítása alapján az FC3 bizonyult a leghatékonyabbnak: a sárga okker zöldként, az ólom-ón sárga I. halvány-sárgaként, míg a nápolyi sárga zöldessárga árnyalatként jelenik meg. A zöld pigmentek elkülönítésére az FC2 kompozit bizonyult alkalmasnak: a réztartalmú zöld pigmentek élénkzöldként, a zöldföld pedig barnás tónusban jelenik meg. A sárga pigmentek FC3 kompozitjának és a zöld pigmentek FC2 kompozitjának eredményei a 69. ábrán láthatók. Az adatbázis pigmentmintáin kapott eredmények következtetések, és megfelelőnek tűnnek a megfelelő időszak festményeinek vizsgálatához. A módszert ezt követően egy konkrét műtárgy vizsgálata során is alkalmazták.

Composite FC3 for the yellow category	  
	Yellow ochre Lead-tin yellow I Naples yellow
Composite FC2 for the green category	 
	Copper green Green earth

69. ábra - az elért eredmények a sárga és zöld mintákon. Forrás: M. c. Bouso et al. 2005

14.5 A modellkísérletek és annak eredményei

A korábban bemutatott referencia táblák segítségével ellenőrzésre kerültek a szakirodalomban közölt információk, valamint tesztelésre kerültek a különböző forrásokban előforduló ellentmondások is, amelyek elsősorban a csatornák keverési módjában mutatkoztak meg. Az így megszerzett és rendszerezett adatok felhasználásával készült el egy összefoglalás a technika segítségével azonosítható és elkülöníthető anyagokról.

14.5.1 A referenciatáblák vizsgálatának eredményei

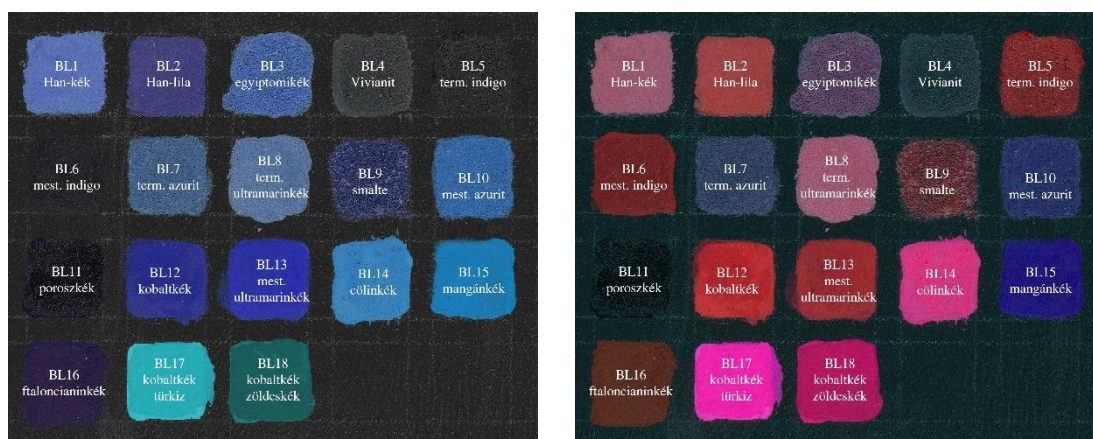
A referencia táblákról készült infravörös-reflexiós *false color* felvételek elkészítésekor a korábbi példákhoz hasonlóan többféle eszköz került alkalmazásra: egyrészt a Phase One MSI rendszer, amely szoftveresen automatizáltan állítja elő a látható fényben készült reflexiós és az infravörös reflexiós felvételekből a *false color* képeket, másrészt egy Sony

full spectrum átalakítású tükörnélküli fényképezőgép, amelynek reflexiók felvételeiből *Adobe Photoshop* szoftverrel, a szakirodalomban ismertetett módszerek alapján kerültek összeállításra az IrRFC képek.

Az eredmények összhangban állnak a szakirodalomban közöltekkel: főleg egyes kék és zöld pigmentek között egyértelmű elkülöníthetőség mutatkozik, emellett több vörös pigment is jól differenciálható. A lila pigmentek esetében szintén megfigyelhetők jellegzetes színváltások, míg a sárga, fekete és fehér pigmentek körében markáns különbségek nem tapasztalhatók.

A **kék pigmentek** esetében megállapítható, hogy a réztartalmú változatok – így a Han kék, az egyiptomi kék, az azurit és a mesterséges azurit – kékes-ibolya árnyalatba váltanak, míg a természetes ultramarin, a mesterséges ultramarin, a smalte (és más kobalt tartalmú kékek), valamint az indigó vörös árnyalatként jelennek meg (70. ábra). A természetes ultramarinkék és a Han kék színváltozása különösen hasonló, ugyanakkor a többi pigment esetében a különbségek többnyire jól elkülöníthetők.

Kiemelendő, hogy a kobalttartalmú kék pigmentek – köztük a smalte, a kobaltkék, a cölinkék és egyéb kobalt-alapú változatok – minden esetben vöröses vagy vöröses-magenta tónusba váltanak. Ez az átalakulás jól felismerhető, bár bizonyos esetekben zavaró lehet, hogy az indigó is hasonló vörös árnyalatot vesz fel, mint a kobaltkék és a mesterséges ultramarinkék.



70. ábra – A kék pigmentmezőkről készült VIS-R_VIS felvétel, balra; IrRFC kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec (VIS), 2 sec (IrR) ISO 50; balról jobbra: BL1 Han-kék, BL2 Han-lila, BL3 egyiptimikék, BL4 Vivianit, BL5 természetes indigó, BL6 mesterséges indigó, BL7 természetes azurit, BL8 természetes ultramarinkék, BL9 smalte, BL10 mesterséges azurit, BL11 porosz kék, BL12 kobaltkék, BL13 mesterséges ultramarinkék, BL14 cölinkék, BL15 mangánkék, BL16 ftalocianinkék, BL17 kobaltkék türkiz, BL18 kobaltkék zöldeskék; Forrás: saját felvételek

A kék pigmentek eredményeit a lila pigmentekkel összevetve megállapítható, hogy a tendencia hasonló. A kékes árnyalatú mesterséges ultramarin viola (V3) színváltozása erősen emlékeztet a kék párjáéra, míg a másik ultramarin viola (V2) sárga árnyalatba vált. Az eltérés okára egyelőre nem áll rendelkezésre kielégítő magyarázat (a műszeres vizsgálatok eredményeit lásd a mellékletben). A kobalttartalmú lila pigment vöröses-barna színbe tolódik, míg a mangántartalmú lilák barna, illetve sárgás-barna árnyalatban jelennek meg.



71. ábra – lila pigmentmezőkről készült látható fényes reflexiós felvétel balra; infravörös *false color* jobbra, Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec (VIS), 2 sev (IrR) ISO 50; balról jobbra haladva: V1 mangán viola (mangán-ammónium-foszfát), V2 ultramarin viola (nátrium-alumínium-szulfoszilikát), V3 ultramarin viola (nátrium-alumínium-szulfoszilikát), V4 kobalt viola (kobalt-foszfát); V5 mangán lila (mangán-foszfát), V6 mangán lila (bárium-manganát-foszfát). Forrás: saját felvételek

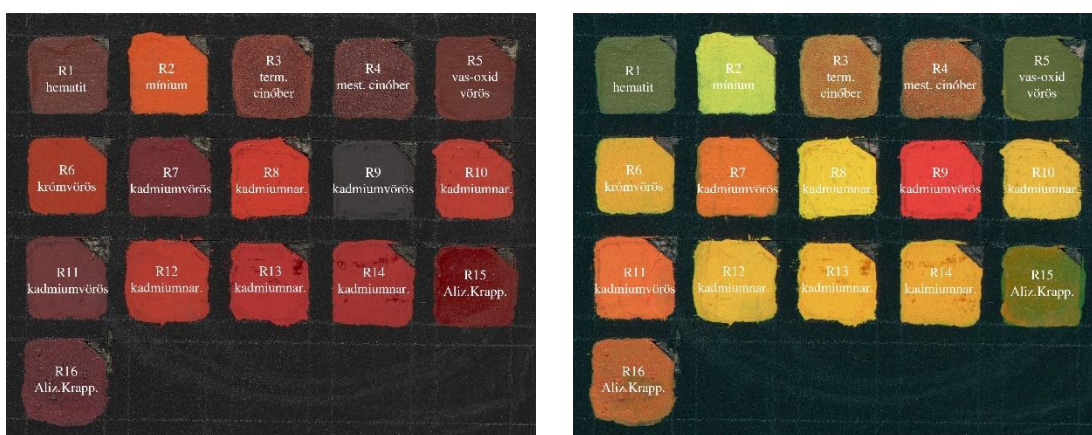
Mindezekkel együtt, amennyiben a képek kiértékelése a szakirodalomban alkalmazott megközelítést követi, vagyis az anyagok korszakok szerinti csoportosítására épül, az IrRFC-felvételek segítségével az alapvető megkülönböztetések valóban elvégezhetők.

A **zöld pigmentek** esetében a vas-tartalmú zöldföld kékeszöld irányú színváltozást mutat, míg a természetes és mesterséges malachit ciánkék eltolódással jellemezhető. Ezzel szemben a smaragd zöld, a *verdigris* és az egyiptomi zöld – szintén réztartalmuknak köszönhetően – egyértelműen kék színbe válnak. A kobaltot és krómot tartalmazó zöld pigmentek esetében a magenta irányú eltolódás a legmarkánsabb az összes vizsgált zöld közül. A cinkzöld, amely fizikai keverékként van jelen, a keverékben nagyobb arányban előforduló cink-sárga hatását tükrözi, így világos kékeslila megjelenése magyarázható. A további réztartalmú pigmentek (*verdigris* és egyiptomi zöld) színe a malachithoz hasonlóan szintén kék irányba tolódik.



72. ábra - A zöld pigmentmezőkről készült látható tartományú reflexiós felvétel balra; infravörös *false color* kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec, ISO 50; balról jobbra haladva: G1 zöldföld, G2 természetes malachit, G3 mesterséges malachit, G4 kobaltzöld, G5 smaragdazöld, G6 króm-oxid zöld, G7 viridián, G8 cinkzöld, G9 mesterséges *verdigris*, G10 egyiptomi zöld. Forrás: saját felvételek

A **vörös pigmentek** vizsgálata során a vasalapú vörösek – a korábbi kutatások eredményeivel összhangban – jellegzetes, zölde irányú színváltozást mutattak, amelyhez hasonló eltolódás egyetlen más vörös pigment esetében sem volt kimutatható. A referenciaanyagok elemzése alapján markánsan egyedi színváltozás kizárólag két pigmentnél jelentkezett: a minium színe élénk sárgászöld irányba tolódott, míg az egyik kadmium-vörös intenzív, élénk vörös árnyalatot vett fel. A többi vizsgált vörös pigment – köztük a kadmiumnarancsok és -vörösek, a krómvörös, a cinóber, valamint a természetes és mesterséges krapplakkok – esetében megfigyelhető narancsos árnyalatváltozás nem bizonyult kellően karakteresnek ahhoz, hogy megbízható azonosító értékkel rendelkezzen.



73. ábra – A vörös pigmentmezőkről készült látható tartományú reflexiós felvétel balra; infravörös *false color* kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec, ISO 50; R1 természetes vas-oxid vörös (hematit), R2 minium, R3 természetes cinóber; R4 mesterséges cinóber; R5 mesterséges vas-oxid vörös, R6 krómvörös; R7 kadmium vörös; R8 kadmium narancs; R9 kadmium vörös; R10 kadmium narancs; R11 kadmium vörös, R12; kadmium narancs; R13 kadmium narancs; R14 kadmium narancs; R15 krapplakk; R16 krapplakk. Forrás: saját felvételek

A **sárga pigmentek** esetében a nápolyi sárga, a cinksárgák, bizonyos kadmium-sárgák (feltehetően a magas cinkfehér-tartalom következtében), a világosabb nikkel-titán

sárga, valamint a krómsárgák gyakorlatilag fehérnek látszanak. A szakirodalom szerint a sárgák és a vörösek elkülönítése hagyományos IrRFC felvételeken nehézségekbe ütközik, különösen akkor, ha a felvételek nem referencia színtábláról, hanem festményről készülnek. A korai vizsgálatok eredményei alapján a vas- és mangántartalmú sárgák (sárga és sárgásbarna földfestékek) zöld irányú színeltolódást mutatnak, míg az összes többi sárga pigment esetében fehérés megjelenés figyelhető meg. Ez az eredmény alapvetően összhangban van a jelen elemzések során tapasztaltakkal, azzal a kiegészítéssel, hogy a fehér irányú elmozdulás több esetben sárgás, zöldes vagy szürkés árnyalatként jelentkezett.



74. ábra – A sárga pigmentmezőkről készült látható tartományú reflexiós felvétel balra; infravörös *false color* kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec, ISO 50; Y1 természetes vas-oxid sárga (Goethit); Y2 auripigment; Y3 realgár; Y4 masszicot; Y5 nápolyi sárga; Y6 ólom-ón sárga I.; Y7 ólom-ón sárga II.; Y8 mesterséges vas-oxid sárga; Y9 krómsárga; Y10 cinksárga I.; Y11 cinksárga II.; Y12 kobaltsárga; Y13 kadmiumsárga; Y14 kadmium sárga; Y15 nikkel-titán sárga; Y16 titánsárga; Y17 indiai sárga; Y18 kadmiumsárga; Y19 kadmiumsárga; Y20 kadmiumnar; Y21 kadmiumnar; Y22 kadmiumnar; Y23 kadmiumnar; Y24 kadmiumsárga; Y25 krómsárga; Y26 nápolyi sárga; Y27 Jarosit; Y28 safrány. Forrás: saját felvételek

14.5.2 A szakirodalmi és a modellkísérlet eredményeinek összefoglalása

Az infravörös-reflexiós *false color* fényképezés hatékony kiegészítő módszer a műtár-
gyak vizsgálatában és dokumentálásában, különösen a pigmentazonosítás területén. Az
eljárás lehetővé teszi az egyes festékrétegek pontos megkülönböztetését, valamint az át-
festések és restaurálások felismerését. A kutatások során kidolgozott standardizált mód-
szertan biztosítja, hogy az infravörös-reflexiós *false color* képek reprodukálhatók és pon-

tosak legyenek, minimális eltérésekkel a különböző fényképezési alkalmak között. A protokoll szigorú betartása lehetővé teszi a technika megbízható és széles körben alkalmazható használatát a konzerválási és művészettörténeti vizsgálatokban.

A szakirodalmi adatok és a kísérleti vizsgálatok összesítése alapján a következő megfigyelések és csoportosítások tehetők:

- **Fehér és fekete pigmentek:** a módszer nem alkalmas a különböző fehér pigmentek azonosítására, megkülönböztetésére, illetve területi eloszlásuk meghatározására.
- **Sárga pigmentek:** elsősorban a vas tartalmú sárgák (természetes vas-oxid sárgák, pl. okkerek: Goethit, jarosit, valamint mesterséges vas-oxid sárgák) különíthetők el egyértelműen, mivel zöld irányú színeltolódást mutatnak. Az eltolódás mértéke a pigment tónusától (vastartalom) függően gyengébb vagy erősebb lehet, megjelenésük így világosabb vagy sötétebb. A többi sárga, beleértve a szerves sárgákat is, fehér vagy törtfehér (sárgás, zöldes vagy szürkés) árnyalatként jelenik meg.
- **Vörös pigmentek:** a vas tartalmú vörösek (természetes vas-oxid vörös, pl. okkervörös, hematit, valamint mesterséges vas-oxid vörös) zöldes, zöldesbarna vagy szürkés eltolódást mutatnak, amely következetesen azonosítható. A mínium élénk, világos sárgás eltolódása egyedinek tekinthető. A szerves vörösek narancssárga irányú színváltozása szintén jellemző és következetes.
- **Zöld pigmentek:** a malachit (természetes és mesterséges változata egyaránt) cián (világoskék) színbe vált, míg a többi réztartalmú zöld (verdigris, smaragd zöld, egyiptomi zöld) sötétkékek árnyalatban jelenik meg. A króm- és kobalttartalmú zöldek vörös (magenta) tónust vesznek fel, ezáltal egyértelműen elkülöníthetők. A zöldföld enyhén kékes, élénk árnyalatot mutat, de a szakirodalom szerint szürke vagy fekete megjelenés is lehetséges. A modern ftalocianin-zöld szintén kék irányba tolódik.
- **Kék pigmentek:** a réztartalmú kékek (Han-kék, egyiptomi kék, azurit, mesterséges azurit) kékes-ibolya árnyalatot mutatnak. Ezzel szemben a természetes ultramarin, a mesterséges ultramarin, a smalte, a kobalttartalmú kékek (kobaltkék és változatai, cölinkék), valamint az indigók vörös színben jelennek meg. A poroszkék és a vivianit (természetes vas tartalmú kék) sötétszürke vagy fekete tónusú, míg a mangánkék sötétebb kékes-ibolya árnyalatba vált. A ftalocianin kék vörös megjelenésű.
- **Lila pigmentek:** a kobalttartalmú lilák és az ultramarin viola vörös irányú eltolódást mutatnak, míg a mangánalapú lilák sárgás-barnás árnyalatba váltanak. Egyedinek tekinthető az ultramarin viola (pink) világos sárgába történő eltolódása, amely további magyarázatot igényel.

14.6 Ultraibolya-reflexiós false color képalkotás⁸⁹

Az előbbieken bemutatott technika, valamint a korábban ismertetett lumineszcens módszerekben rejlő lehetőségek figyelembevételével, továbbá azzal a megfontolással, hogy az ilyen típusú vizsgálatok során több módszer együttes alkalmazása csökkentheti a hibás elemzések lehetőségét, szakemberek megvizsgálták annak lehetőségét, hogy a reflexiós ultraibolya sáv fekete-fehér tónusait is beépítsék egy színes, digitális RGB felvételbe. Ennek célja egy olyan ultraibolya-reflexiós *false color* kép létrehozása, amely könnyebben értelmezhető, valamint színes és látványos módon prezentálható.

Az infravörös *false color* technika kiválóan alkalmas bizonyos pigmentek felismerésére, azonban más esetekben a színekülönbségek nem mindig érzékelhetők egyértelműen, mivel a válaszreakciókat rendszerfüggő változók is befolyásolhatják. Emiatt indultak meg azok a kísérletek, amelyek a visszavert ultraibolya sáv alkalmazását célozták, annak érdekében, hogy még pontosabban elkülöníthetők legyenek azok a pigmentek, amelyeket az IrRFC technika önmagában nem képes megfelelően differenciálni.

14.7 A kivitelezés technika részletei

A technika lényege – az IrRFC-hez hasonlóan – egy a látható tartományban készült reflexiós felvétel és egy ultraibolya-reflexiós felvétel rögzítésében áll, ugyanarról a festett felületről, azonos méretarány megtartásával. Ezt követően a látható fényben készült reflexiós felvétel két összetevője, valamint az ultraibolya-reflexiós felvétel feldolgozásra és újrakombinálásra kerül, amelynek eredménye egy tisztán konvencionális, de rendkívül megkülönböztető RGB háromszínű kép. A felvételeket egymás után, azonos beállítási paraméterekkel szükséges elkészíteni az UvRFC kép létrehozásának megkönnyítése érdekében.

14.7.1 Az UVRFC képek elkészítésének módja

A látható tartományban történő felvételkedészítés részletezésétől eltekintve az alábbiakban az ultraibolya reflexiós felvétel rögzítésére alkalmazott paraméterek kerülnek ismertetésre, mind fényképezőfilm, mind digitális fényképezőgépek esetében.

Ultraibolya sugárforrásként a korábbi fejezetekben bemutatott sugárzók bármelyike alkalmas, amelyek ultraibolya spektruma 315 és 400 nanométer között helyezkedik

⁸⁹ Alfredo Aldrovandi, Ezio Buzzegoli, Anette Keller, and Diane Kunzelman, „Indagini su superfici dipinte mediante immagini UV riflesse in falso colore,” *OPD Restauro* 16 (2004): 83–87.

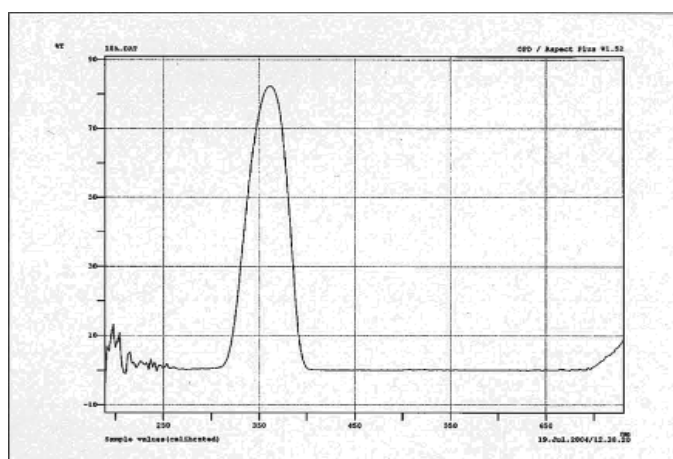
el, maximális kibocsátási csúccsal 365 nanométernél. A sugárforrásokat körülbelül 30°-os szögben szükséges elhelyezni a vizsgált felület síkjához képest annak érdekében, hogy minimalizálható legyen a szabad szemmel nem érzékelhető zavaró visszaverődés. Amennyiben lehetséges, a sugárforrásokat a korábbiakban ismertetett módon szűrőkkel kell felszerelni.

14.7.2 Analóg filmes módszer

A kísérletek során a lámpákat körülbelül 1,3 méteres távolságra helyezték el, és az ultraibolya dózist 20 pW/cm^2 értéken mérték. Különös figyelem irányult az alkalmazott lencsék és szűrők áteresztési tulajdonságainak ellenőrzésére az érintett hullámhossztartományban. Az elvégzett mérések jelentős üvegelnyelést jeleztek ezeken a hullámhosszokon, különösen olyan objektívek esetében, amelyek tükröződésgátló bevonattal vagy bo nyolult optikai csoportokkal rendelkeznek – ez a jelenség a szakirodalomban is ismert és több különböző típusú, márkájú objektívnél megfigyelték. A kísérletekben az UV-reflexiós felvétel rögzítésére fekete-fehér fényképezőfilmeket és digitális fényképezőgépeket egyaránt alkalmaztak. A vizsgált filmek között nem mutatkoztak jelentős problémák. Az Ilford FP4 film (ISO 125/22°) használata kifejezetten kedvező tónusgradiens eredményeket biztosított.

Mivel az ultraibolya sugárzás fókuszsíkja közelebb helyezkedik el az objektívhez, mint a látható fényé, az elegendő mélységélesség eléréséhez általában $f/16$ vagy annál nagyobb rekeszérték alkalmazása bizonyult megfelelőnek. Az expozíciós idő a fenti feltételek mellett 20 másodperc volt, amelyet empirikusan határoztak meg oly módon, hogy az expozíciós időt fokozatosan megduplázták. A film előhívását követően ellenőrzésre került, hogy az erre a célra a képen elhelyezett, öt különböző referenciaként szolgáló Spectralon® felület (UV-reflektanciájuk rendre 2%, 10%, 50%, 75% és 99%) szürkeárnyalatos tónusaik alapján egyértelműen megkülönböztethető legyen.

Az UV-reflexiós felvételek rögzítéséhez mindig a Kodak 18A üvegfilttert alkalmazták, mint gátló szűrőt, amelynek áteresztési görbéje lent, a 75. ábrán látható.



75. ábra - A Kodak 18A üvegszűrő áteresztési görbéje. Forrás: Alfredo Aldrovandi et al. 2004

14.7.3 Digitális módszer

Digitális fényképezőgépek esetében szükséges egy hőszűrő (atermikus szűrő) alkalmazása annak érdekében, hogy eltávolítható legyen a sugárforrások által kibocsátott közeli infravörös sugárzás. Ennek oka, hogy a CCD- és CMOS-érzékelők különösen érzékenyek erre az NIR-tartományra, ellentétben a hagyományos fényképezőfilmekkel. Jó eredmények érhetők el digitális fényképezőgépek használatával is, amennyiben lehetőség van hosszú expozíciós idő beállítására manuális módban, tekintettel arra, hogy a digitális érzékelők érzékenysége a 365 nanométer hullámhosszon alacsony. A digitális fényképezőgépek egyik előnye, hogy a Kodak 18A szűrő objektívre helyezése mellett is használható marad az autofókusz. Ugyanakkor a felvételt készítés során figyelembe kell venni az adott kép felbontásának korlátait, amely a 120-as formátumú film alkalmazása esetében nem jelentett problémát.

A későbbi digitális feldolgozás során a filmes felvételeket nagy felbontású szkennelvel digitalizálták (3200 dpi – 6×6 cm), annak érdekében, hogy biztosítva legyen a magas minőségű adatátvitel és az árnyalatok megfelelő megőrzése egy 8 bites (256 szintű) dinamikus tartományú képen.

A látható és az ultraibolya-reflexiós felvételek, amelyek azonos méretűek voltak, a feldolgozás előtt kalibrálásra kerültek a Spectralon® referenciaminták alapján annak érdekében, hogy a megfelelő RGB értékek biztosíthatók legyenek. Ezek a referenciaértékek – amint azt korábban részletesen ismertetésre került – lehetővé teszik egy normalizált és reprodukálható digitális kép létrehozását, függetlenül az alkalmazott eszközöktől és anyagoktól, amely az eredmények helyes értelmezése szempontjából kulcsfontosságú. A 10. táblázat a hozzárendelt értékeket mutatja be.

10. táblázat - Az RGB komponensek értékelése. Forrás: Alfredo Aldrovandi et al. 2004	
Felhasznált Spectralon referenciák (5db)	Hozzárendelt RGB értékek (0-255)
2 %	42
10 %	95
50 %	182
75 %	223
99%	249

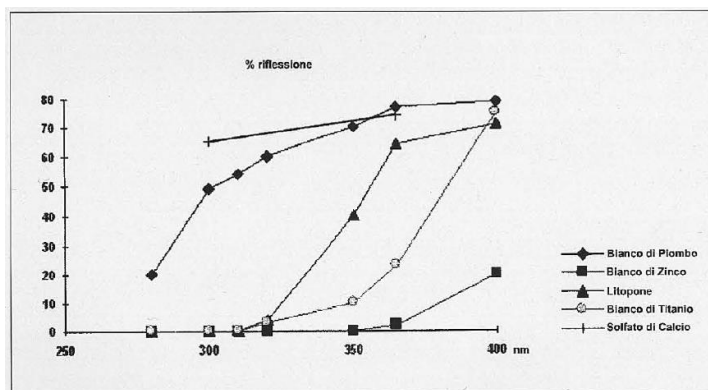
Az RGB komponensek és az ultraibolya-reflexiók felvétel kombinálásával összesen 18 lehetséges *false color* képvariáció hozható létre. Mivel minden esetben tartalmaznia kell az UV-reflexiók komponensét – amely szabad szemmel nem érzékelhető –, a lehetőségek közül az első bizonyult a legalkalmasabbnak a vizsgált anyagok jellemzésére. Az IrRFC képekhez hasonlóan az ultraibolya *false color* képek esetében is az RGB csatornák kombinálásával történik a képalkotás, azonban itt a csatornák eltolása ellentétes irányban megy végbe. A táblázat szemlélteti a két technika során alkalmazott kombinációkat.

11. táblázat. Forrás: Alfredo Aldrovandi et al. 2004																	
Elérhető sávok	Lehetséges trikromatikus kombinációk																
UV	B	B	B	B	B	B	G	G	G	G	G	G	R	R	R	R	R
B	G	R	G	R			B	R	B	R			B	G	B	G	
G	R	G			G	R	R	B			B	R	G	B			B
R			R	G	R	G			R	B	R	B			G	B	G

A kutatás elsősorban azokra a pigmentekre irányult, amelyeket az infravörös *false-color* képalkotás nem tudott hatékonyan megkülönböztetni. A legjelentősebb eredmények azoknál a pigmenteknél mutatkoztak, amelyek – például a fehér pigmentek – különösen eltérő ultraibolya-reflexiók tulajdonságokkal rendelkeznek. Példaként a 76. ábra szemlélteti ezeknek a pigmenteknek a reflektanciaértékeit.

A kutatás eredményei szerint a legszembetűnőbb eltérések az alábbi pigmentek között voltak megfigyelhetők: világos kobaltzöld, nápolyi sárga, kadmiumvörös, króm-oxid zöld, litharge, cinóber, smaragdzöld és kadmiumsárga. A korai publikációban felvé-

telek nem kerültek közlésre. A megállapítások alapján ezeknek a pigmenteknek az ultraibolya-reflexiók különbségei lehetővé teszik azok hatékonyabb megkülönböztetését, amelyet az infravörös *false-color* technika nem minden esetben biztosított.



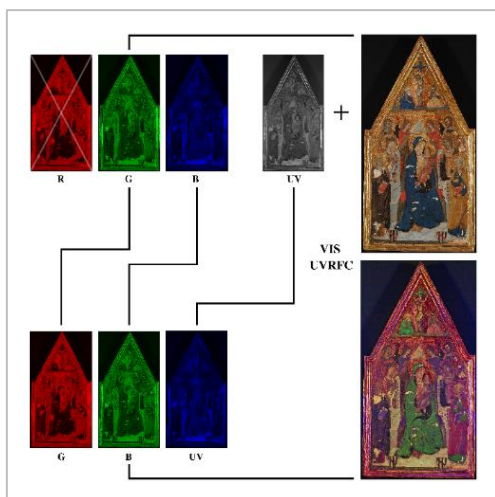
76. ábra - a magas ultraibolya reflexióval rendelkező fehér pigmentek reflexiós görbéi az UV tartományban. Forrás: Alfredo Aldrovandi et al. 2004

14.7.4 A kutatás összefoglalása

A fentiekben egy 2004-es kutatás első eredményei kerültek ismertetésre. Korábban számos más aspektus már feltárássra került, azonban ezen eredmények, valamint az újabb adatok további ellenőrzése és értékelése elméleti és gyakorlati szempontból egyaránt szükséges. A vizsgálatok célja olyan kiegészítő módszer az infravörös *false color* technikához, amely alacsony költségű és így hozzáférhető egy modern restaurátorműhely számára, mind a költségek, mind a végrehajtás egyszerűsége szempontjából, továbbá nem igényel speciális szaktudást. Ugyanakkor kiemelendő, hogy a kapott eredmények értelmezése során fokozott óvatosság szükséges, és azokat minden esetben más nem invazív vizsgálati technikák eredményeivel kell összevetni.

14.7.5 Az UvRFC kép elkészítésének rövid leírása

Az ultraibolya-reflexiós *false color* képek előállításakor a színes RGB képek vörös komponense elhagyásra kerül, míg a kék és a zöld színcsatornák az ultraibolya komponenssel kerülnek kombinálásra. Részletesebben: az eredeti kék színcsatornát az UV-komponens helyettesíti, a vöröset a zöld, míg a zöldet a kék váltja fel. Az így létrehozott kép lehetőséget nyújt az egyes színtónusok mögött meghúzódó eltérő pigmentek azonosítására.



77. ábra - az ultraibolya -reflexiós *false color* kép elkészítésének sematikus rajza. Forrás: saját ábra



78. ábra – VIS-R_VIS
Forrás: saját felvétel



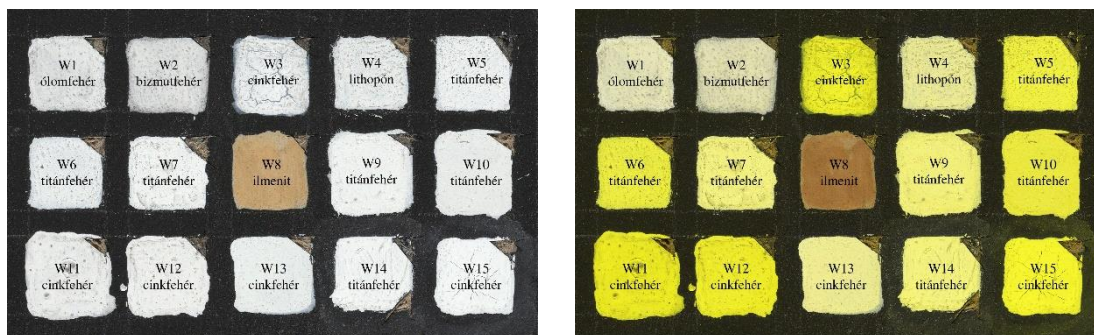
79. ábra. UvRFC
Forrás: saját felvétel

14.8 A modellkísérlet és annak eredményei

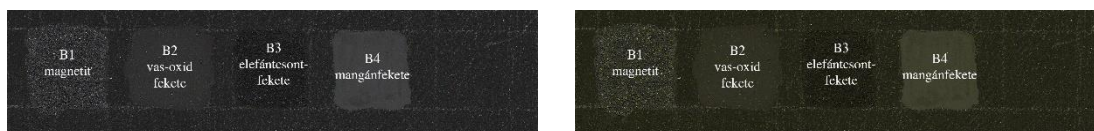
A korábban bemutatott referencia táblák segítségével ellenőrzésre kerültek a szakirodalomban talált információk, továbbá tesztelésre kerültek a különböző forrásokban előforduló ellentmondások is (amelyek elsősorban a csatornák keverési módjának meghatározásában mutatkoznak). A megszerzett információk felhasználásával összeállításra került egy összefoglaló a technika segítségével meghatározható és elkülöníthető anyagokról.

14.8.1 A referenciatáblák vizsgálatának eredményei

A **fehér pigmentek** esetében bizonyult a technika a leghasznosabbnak; néhány kivételtől eltekintve itt mutatkozott a legjelentősebb és legegységesebb színváltozás. A szakirodalmi példák alapján az ólomfehér (valamint a bizmutfehér, amelynek történeti jelentősége azonban csekély) az egyetlen, amely fehér marad, míg az összes többi fehér pigment – beleértve a cinkfehéret és változatait, a litopónt és a titánfehér módosulatait is – sárga színre vált. Megjegyzendő, hogy a próbatáblán nem szerepeltek bizonyos pigmentek és töltőanyagok, például a gipsz, a kréta/mész és a csontfehér. Ezek esetében a szakirodalmi adatokra lehet támaszkodni, amelyek szerint a gipsz az ultraibolya-reflexiós *false color* felvételeken szintén fehérnek látszik. A **fekete pigmentek** esetében nem figyelhető meg változás.



80. ábra – A fehér pigmentmezőkről készült látható tartományú reflexiós felvétel, balra; ultraibolya false-color kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec VIS, 8 sec UVR, ISO 50; W1 ólomfehér, W2 bizmutfehér, W3 cinkfehér (oxid), W4 lithopón, W5 titánfehér (rutil), W6 titánfehér (rutil), W7 titánfehér (anatáz), W8 titánfehér natúr, W9 titánfehér (rutil), W10 titánfehér (rutil), W11 cinkfehér, W12 cinkfehér (oxid), W13 cinkfehér (szulfid), W14 titánfehér; W15 cinkfehér (oxid). Forrás: saját felvételek



81. ábra – A fekete pigmentmezőkről készült látható tartományú reflexiós felvétel, balra; ultraibolya false-color kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec VIS, 8 sec UVR, ISO 50; B1 természetes vas-oxid fekete (magnetit), B2 mesterséges vasoxid fekete, B3 elefántcsont fekete, B4 mangánfekete. Forrás: saját felvételek

A **sárga pigmentek** esetében összetettebb jelenségek figyelhetők meg. A vas tartalmú sárgák – így a *Goethit*, a *Jarosit* és a mesterséges vas-oxid sárga – sárgásbarna színbe váltanak. Az ólom-ón sárga mindkét változata, a nápolyi sárga, a nikkel-titán sárgák és a cinksárgák narancssárga megjelenést mutatnak, míg a titánsárga megjelenése zavaróan hasonlít a vas-tartalmú pigmentekhez. A krómsárga és a kadmiumpigmentek élénk meggyvörös színben jelennek meg. Az auripigment és a realgár az előzőekhez képest fakó vörös árnyalatot vesz fel. A masszikot az UvRFC képeken sárgászöld színváltozást mutat.



82. ábra – A sárga pigmentmezőkről készült VIS-R_VIS balra; ultraibolya *false-color* kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec VIS, 8 sec UVR, ISO 50; Goethit, Y2 auripigment, Y3 realgár, Y4 masszikot, Y5 nápolyi sárga, Y6 ólom-ón sárga I., Y7 ólom-ón sárga II., Y8 mesterséges vas-oxid sárga, Y9 krómsárga, Y10 cinksárga I., Y11 cinksárga II., Y13 kadmiumsárga, Y14 kadmium sárga, Y15 nikkel-titán sárga, Y16 titán-sárga, Y17 indiai sárga, Y18-Y24 kadmium sárgák, Y25 krómsárga, Y26 nápolyi sárga, Y27 Jarosit. Forrás: saját felvételek

A **vörös pigmentek** szinte minden esetben kékes-ibolya színű megjelenést mutatnak, egyedüli kivételként a mínium emelhető ki, amely bordós árnyalatot vesz fel.



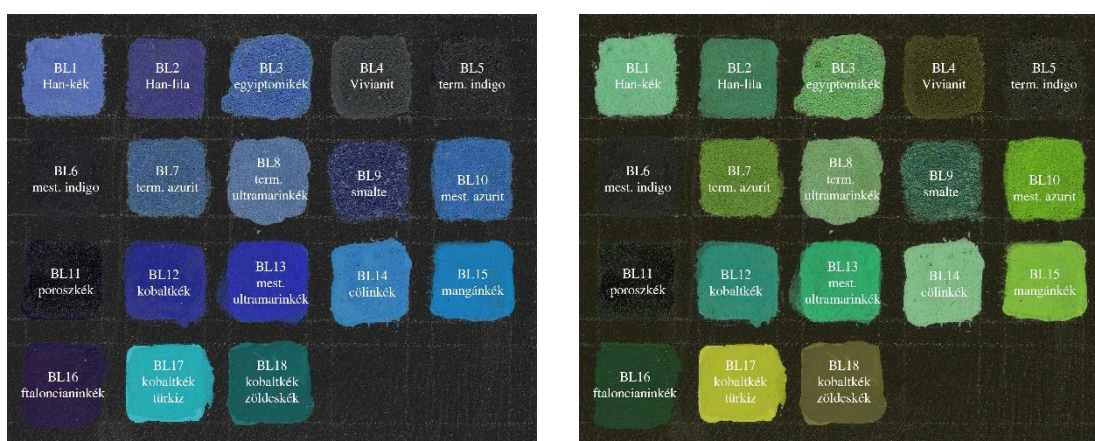
83. ábra – A vörös pigmentmezőkről készült VIS-R_VIS balra; ultraibolya *false-color* kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec VIS, 8 sec UvR, ISO 50; R1 hematit, R2 mínium, R3 természetes cinóber; R4 mesterséges cinóber, R5 mesterséges vas-oxid vörös, R6 krómvörös, R7 kadmium vörös, R8 kadmium narancs, R9 kadmium vörös, R10 kadmium narancs, R11 kadmium vörös, R12; kadmium narancs, R13 kadmium narancs, R14 kadmium narancs, R15 alizarin krapplakk, R16 alizarin krapplakk. Forrás: saját felvételek

A **zöld pigmentek** esetében a zöldföld, a *malachit*, a *verdigris* és az egyiptomi zöld – vagyis a vas- és réztartalmú pigmentek – egyaránt sárgásbarna (zöldesbarna) árnyalatba válnak. A smaragdzöld fakó narancs, a cinkzöld élénk narancs színben jelenik meg, míg a króm- és kobalttartalmú zöldek barna vagy vörösesbarna árnyalatot mutatnak.

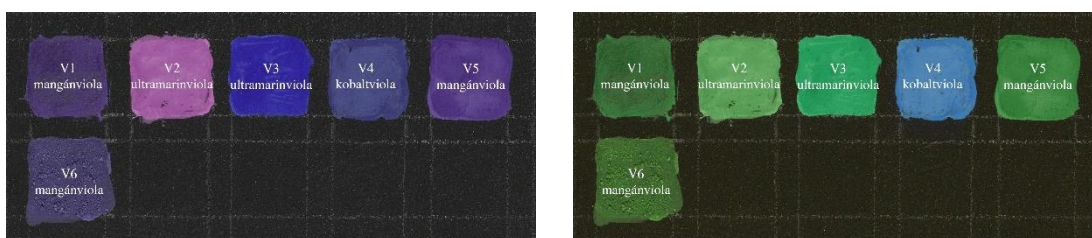


84. ábra - A zöld pigmentmezőről készült VIS-R_VIS balra; ultraibolya *false color* kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec VIS, 8 sec UvR, ISO 50; balról jobbra haladva: G1 zöldföld, G2 természetes malachit, G3 mesterséges malachit, G4 kobaltzöld, G5 smaragdzöld, G6 króm-oxid zöld, G7 viridián, G8 cinkzöld, G9 mesterséges verdigris, G10 egyiptomi zöld. Forrás: saját felvételek

A **kék pigmentek** esetében az indigó (természetes és mesterséges változata egyaránt) és a poroszkék változatlan színű marad. A természetes és a mesterséges azurit, valamint a mangánkék sárgászöld árnyalatot vesz fel. A természetes és mesterséges ultramarin, a smalte, a kobaltkék, a cölinkék és a ftalocianin kék különböző intenzitású zöldeskék színben jelenik meg. A vivianit leginkább zöldesbarna megjelenést mutat a felvételeken. A lila pigmentek közül a kobaltlila egyértelműen kékre vált, míg az összes többi pigment kivétel nélkül zöld vagy zöldeskék árnyalatot vesz fel.



85. ábra – A kék pigmentmezőről készült VIS-R_VIS, balra; infravörös *false color* kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec VIS, 8 sec UvR, ISO 50; balról jobbra: BL1 Han kék, BL2 Han lila, BL3 egyiptimi kék, BL4 *vivianit*, BL5 természetes indigó, BL6 mesterséges indigó, BL7 természetes azurit, BL8 természetes ultramarin, BL9 smalte, BL10 mesterséges azurit, BL11 porosz kék, BL12 kobalt kék, BL13 mesterséges ultramarin, BL14 cölinkék, BL15 mangánkék, BL16 ftalocianin kék, BL17 kobaltkék türkiz, BL18 kobaltkék zöldeskék. Forrás: saját felvételek



86. ábra – lila pigmentmezőkről készült VIS-R_VIS felvétel balra; infravörös *false color* kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec VIS, 8 sec UvR, ISO 50; balról jobbra haladva: V1 mangán viola (mangán-ammónium-foszfát), V2 ultramarin viola (nátrium-alumínium-szulfoszilikát), V3 ultramarin viola (nátrium-alumínium-szulfoszilikát), V4 kobalt viola (kobalt-foszfát); V5 mangán viola (mangán-foszfát), V6 mangán viola (bárium-manganát-foszfát). Forrás: saját felvételek

14.8.2 A szakirodalmi és a modellkísérlet eredményeinek összefoglalása

Az ultraibolya-reflexiók *false color* képalkotás lényegében egy új, rendkívül hatékony kiegészítő módszer a műtárgyak vizsgálatában és dokumentálásában, különösen a pigmentazonosítás területén. Az eljárás alkalmazása lehetővé teszi a festékrétegek pontos megkülönböztetését, valamint az átfestések és restaurálások felismerését. A kutatások során kidolgozott standardizált módszertan biztosítja, hogy az ultraibolya -reflexiók *false color* képek reprodukálhatók és pontosak legyenek, a különböző fényképezési alkalmak között csupán minimális eltérésekkel. A protokoll szigorú betartása lehetővé teszi, hogy a technika megbízhatóan és széles körben alkalmazható legyen a konzerválási és művészettörténeti vizsgálatokban. A vonatkozó szakirodalom feldolgozása és a rendelkezésre álló vizsgálatok alapján az alábbi megfigyelések és csoportosítások tehetők:

- A **fehér pigmentek** esetében bizonyult a technika a leghatékonyabbnak: az ólomfehér (és kisebb történeti jelentősége miatt a bizmutfehér) kivételével valamennyi vizsgált fehér pigment sárga árnyalatba tolódott. A gipsz, a kréta és a csontfehér viselkedéséről szakirodalmi adatok állnak rendelkezésre, amelyek szerint a gipsz szintén fehérnek látszik.
- A **fekete pigmentek** nem mutattak színváltozást.
- A **sárga pigmentek** közül a vas-tartalmúak (Goethit, Jarosit, mesterséges vas-oxid sárga) sárgásbarna árnyalatot mutattak, míg az ólom-ón sárgák, a nápolyi sárga, a nikkel-titán sárgák és a cinksárgák narancssárga tónusban jelentek meg. A titánsárga megjelenése zavaróan hasonlít a vas-tartalmú pigmentekére. A krómsárga és a kadmiumtartalmú pigmentek élénk meggyvörös, az auripigment és a realgár fakó vörös, míg a masszikot sárgászöld árnyalatot mutatott.

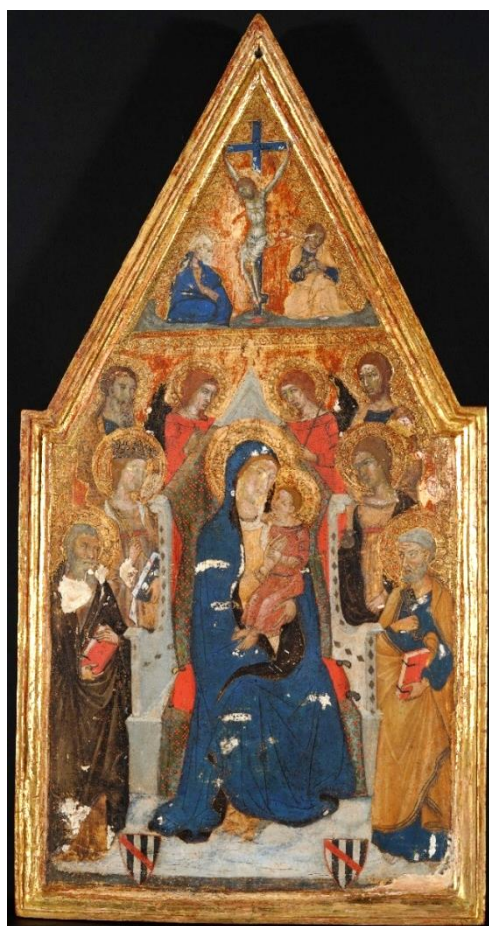
- A **vörös pigmentek** szinte kivétel nélkül kékes-ibolya színbe váltottak, egyedül a mínium mutatott bordós tónust. A zöld pigmentek közül a vas- és réztartalmúak (zöldföld, malachit, verdigris, egyiptomi zöld) sárgásbarna árnyalatba tolódtak, a smaragd-zöld fakó narancs, a cinkzöld élénk narancs, míg a króm- és kobalttartalmú zöldek barna vagy vörösesbarna árnyalatban jelentek meg.
- A **kék pigmentek** közül az indigó (természetes és mesterséges változat) és a porosz-kék változatlan maradt. Az azurit (természetes és mesterséges) és a mangánkék sárgászöld árnyalatot vett fel. A természetes és mesterséges ultramarin, a smalte, a kobaltkék, a cölinkék és a ftalocianin kék különböző intenzitású zöldeskék tónusban jelentek meg, míg a vivianit zöldesbarna színt mutatott.
- A **lila pigmentek** közül egyedül a kobaltlila váltott egyértelműen kékre, a többi lila pigment zöld vagy zöldeskék árnyalatban jelent meg.

15 AZ IRRFC ÉS AZ UVRFC TECHNIKA HASZNOSSÁGÁNAK BE-MUTATÁSA

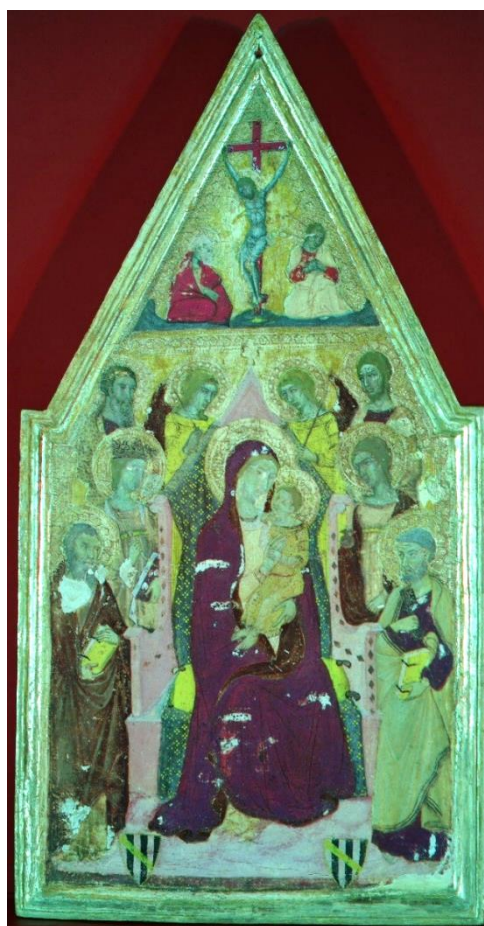
15.1 Műtárgyakon végzett vizsgálatok eredményei

A kutatás kezdete óta számos festményen végzett vizsgálat közül a következő kettő került bemutatásra a *false color* technikában rejlő lehetőségek szemléltetése céljából:

- Sienai festő (működött a 14. század második felében): *Trónoló Mária gyermekével, hat szenttel és két angyallal, fent Krisztus a kereszten, a sirató Szűz Mária és Szent János evangélista között*; 14. század második fele; tempera, arany, fa; 63,4 x 33,2 x 3 cm; leltári szám: REK_13; Régi Képtár, Szépművészeti Múzeum, Budapest
- Dénes Valéria: *Városkép (Nagybányai látkép)*; 1909 körül; olaj, vászon; 72,5 x 80 cm; leltári szám: FEO_87.22T; Festészeti Osztály, Magyar Nemzeti Galéria, Szépművészeti Múzeum, Budapest⁹⁰



87. ábra – „Trónoló Mária kép” VIS-R_VIS. Forrás: saját felvétel



88. ábra – „Trónoló Mária kép” IrRFC. Forrás: saját felvétel

⁹⁰ A festmények datálása mindkét esetben megbízható, ennek értelmében a kiértékelés a korszakokra jellemző paletták ismeretében történt.



89. ábra - „Trónoló Mária kép” VIS-R_VIS részlet. Forrás: saját felvétel



90. ábra - „Trónoló Mária kép” IrRFC részlet. Forrás: saját felvétel

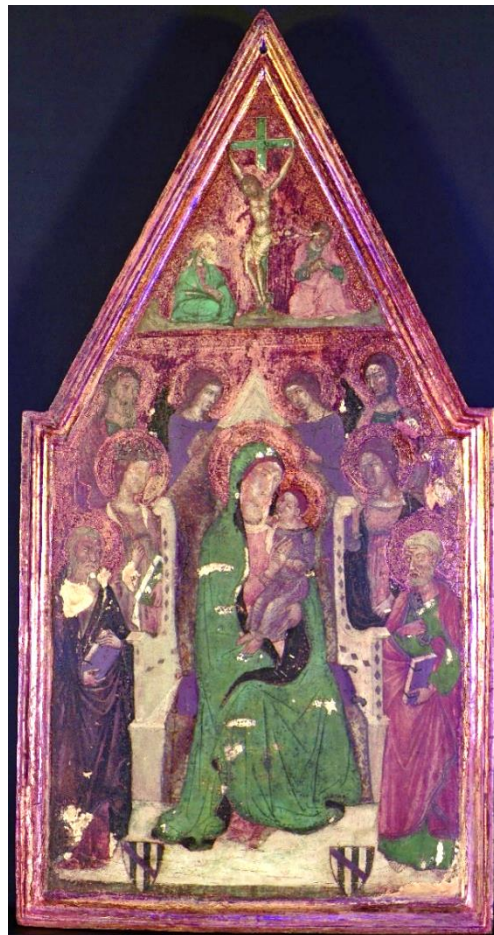
Amennyiben kizárólag a műtárgyról készült *false color* képek és a látható tartományban rögzített képek alapján történik az anyag-meghatározás – amely ugyan ellentmond annak a korábban többször hangsúlyozott alapelvnek, miszerint a fototechnikai vizsgálati módszereket egységes rendszerben szükséges értékelni –, mégis lehetséges meglehetősen konkrét következtetések levonása a felhasznált pigmentekről. Ez a módszer szemléletesen mutatja be a technikában rejlő lehetőségeket. Az ilyen típusú értékelés természetesen feltételezi a vizsgált korszakra jellemző anyaghasználat ismeretét. A „Mária-kép” vizsgálati felvételeinek elemzése alapján az alábbi feltételes következtetések tehetők:

- **alapozó és fehér pigmentek:** A tárgy kora alapján feltételezhető a korhű anyaghasználat – kréta, gipsz vagy ezek fölött gyakran alkalmazott ólomfehér aláfestés – vizsgálatok nélkül is. Ugyanakkor az UvRFC felvételen tapasztalt sárgulás hiánya egyértelműen kizárja a modern fehér pigmentek (cinkfehér, litophon, titánfehér) jelenlétét.
- **sárga pigmentek:** A sárgásbarna hajrészek IrRFC-felvételen látható sárgászöld eltolódása a vas-tartalmú sárgákra jellemző; a többi sárga pigment azonosítása bizonytalan marad.
- **vörös pigmentek:** Az aranyozás alatti vörös réteg IrRFC-felvételen mutatkozó zöldesbarna eltolódása vastartalomra utal. Emellett a többi vörös felületen tapasztalható erőteljes citromsárga színváltás a minium, esetleg cinóber használatát valószínűsíti.
- **kék pigmentek:** Az alsó képmező alakjainak kék ruhái IrRFC-felvételen lila tónusba válnak, ami az azurit jelenlétére utal. A felső mezőben található kék felületek IrRFC-felvételen rózsaszín megjelenése ultramarin alkalmazását valószínűsíti.
- **zöld pigmentek:** A ruházat jelenlegi feketének látszó zöld felületein kémiai átalakulás figyelhető meg, feltehetően réztartalmú zöld pigmentek alakultak át, így eredeti

anyagmeghatározás ezeknél a területeknél nem lehetséges. Ugyanakkor az arcfelületek zöld területeinek IrRFC-felvételen tapasztalt kékes eltolódása zöldföld használatát valószínűsíti.



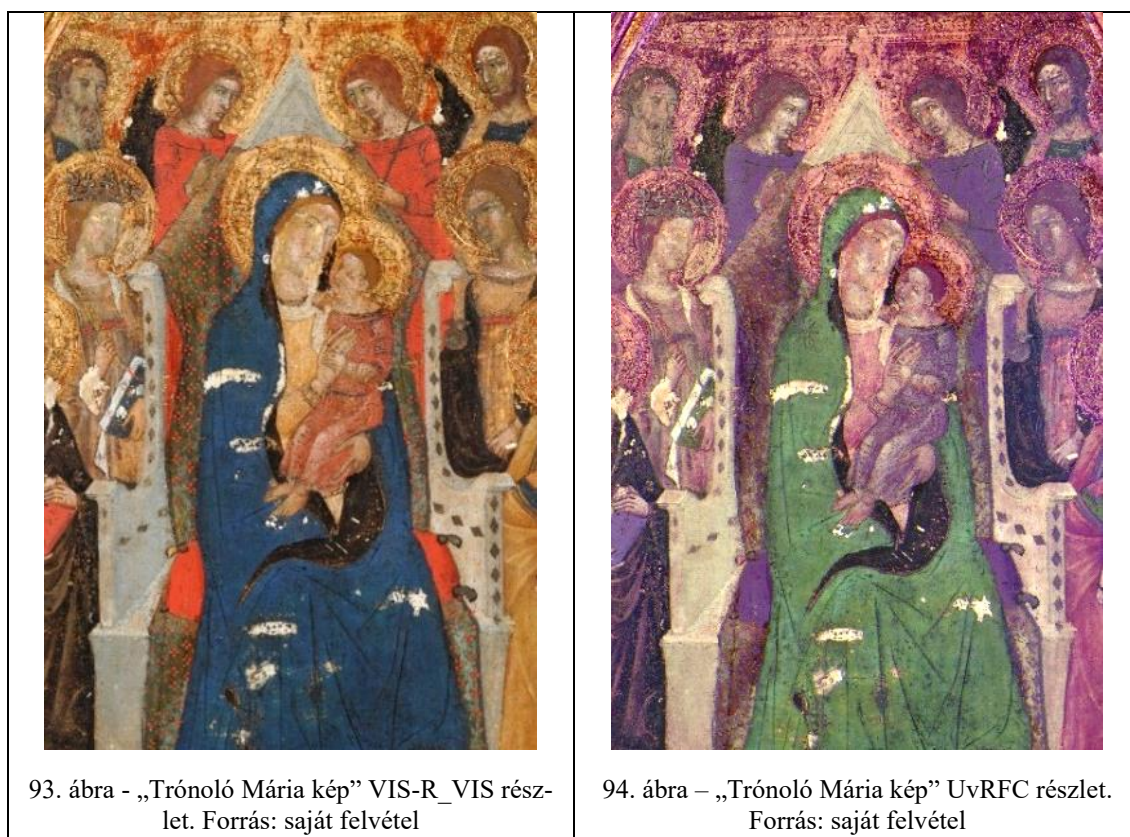
91. ábra – „Trónoló Mária kép” VIS-R_VIS. Forrás: saját felvétel



92. ábra – „Trónoló Mária kép” UvRFC. Forrás: saját felvétel

A vizsgálatok későbbi fázisában sor került a fotótechnikai felvételek teljes körű kiértékelésére, amelyet elemanalitikai módszerekkel egészítettek ki. Ennek eredményeként sikerült megerősíteni a következő pigmentek és töltőanyagok használatát: az alapozó gipszből készült, a fehér festékrétegek ólomfehéret tartalmaznak. A sárga színeknél sárga okker és auripigment alkalmazása igazolható. A vörös pigmentek között vörös okker és cinóber jelenléte volt kimutatható, továbbá sziénák és umbrák is azonosíthatók voltak. A kék festékrétegek esetében vegyes pigmenthasználat került megállapításra: a felületeken ultramarin és azurit egyaránt jelen van. A zöld pigmenteknél réztartalmú zöld és zöldföld alkalmazása vált bizonyíthatóvá. A fekete pigment – a csontfeketére jellemző kalcium- és foszforjelek hiányában – minden valószínűség szerint szénfekete.

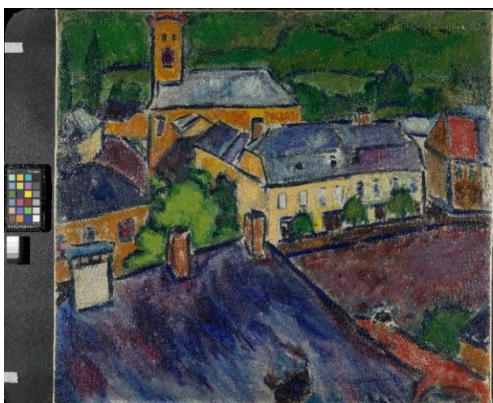
Összefoglalva, a kizárólag fotótechnikai módszerekre – elsősorban *false color* és VIS felvételekre – támaszkodó előzetes kiértékelés önmagában is több pigmentre vonatkozó feltételes meghatározást tett lehetővé. A színeltolódások alapján például következtetések születtek az alapozó anyagára, a fehér pigmentek típusára, egyes sárga pigmentek vas-tartalmára, a vörös rétegek esetében a minium feltételezett jelenlétére, valamint a kék pigmenteknél az azurit és az ultramarin elkülönítésére. Bizonyos pigmentcsoportoknál (például a zöldeknél) azonban a felület kémiai átalakulása miatt a meghatározás nem volt egyértelmű.



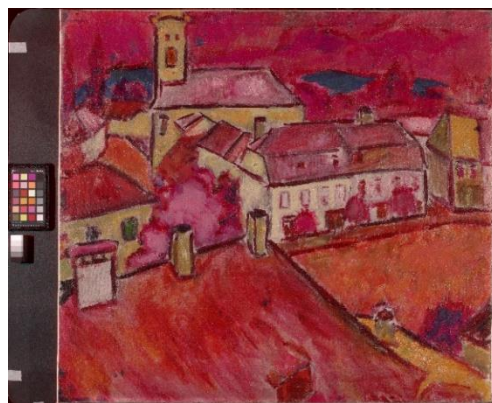
A fotótechnikai felvételek elemanalitikai vizsgálatokkal való kiegészítése lényegesen pontosabb és teljesebb azonosítást eredményezett. Az integrált módszertan megerősítette a gipsz alapozó és az ólomfehér festékréteg alkalmazását, a sárgák esetében a sárga okker és az auripigment, a vörösöknél a vörös okker, valamint a szienák és umbrák jelenlétét. Továbbá egyértelműsítést nyert, hogy a *false color* képeken tapasztaltak ellenére nem minium, hanem cinóber van jelen a festményen. Jól látszik, hogy vannak bizonytalanságok. Ha esetleg kevert rétegeről beszélünk akkor a színeltolódás olyan mértékű is lehet, hogy a meghatározásra tett kísérlet lehetetlen. A kék rétegeknél igazolódott

a vegyes pigmenthasználat (ultramarin és azurit), a zöldeknél a réztartalmú zöld és a zöld-föld alkalmazása, míg a fekete pigment nagy valószínűséggel szénfekete.

Az összevetés jól szemlélteti, hogy bár a fotótechnikai módszerek önmagukban is értékes, gyorsan alkalmazható előszűrő eszközök, a végső, megbízható pigmentazonosításhoz elengedhetetlen a fotótechnikai vizsgálatok együttes értékelése és a kiegészítő elemanalitikai módszerek bevonása.



95. ábra – „Tájkép” VIS-R_VIS. Forrás: saját felvétel



96. ábra – „Tájkép” IrRFC. Forrás: saját felvétel



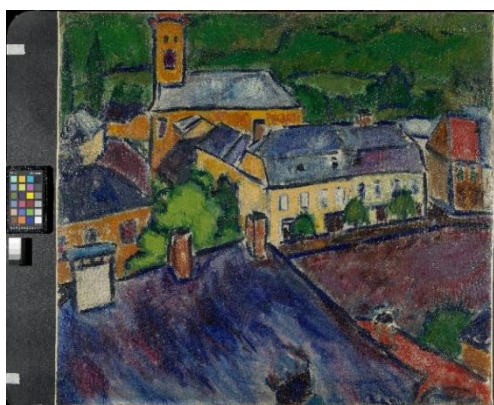
97. ábra - „Tájkép” VIS-R_VIS részlet. Forrás: saját felvétel



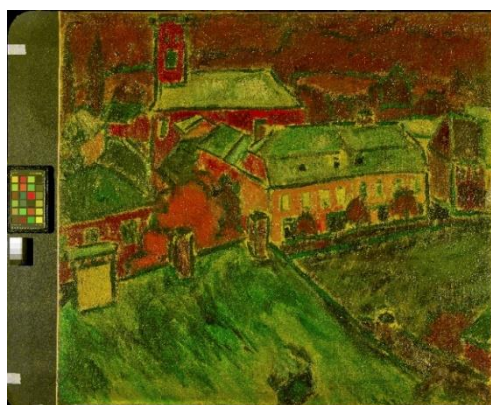
98. ábra - „Tájkép” IrRFC részlet. Forrás: saját felvétel

A második festmény esetében elsőként kizárólag a műtárgyról készült *false color* és látható tartományban rögzített (VIS) felvételek alapján történt előzetes pigment-meghatározás. E vizsgálatok a következő feltételes következtetésekre vezettek:

- **alapozó:** az UvRFC felvételek alapján egyértelműen cinkfehér jelenléte állapítható meg.
- **fehér festék:** a legvilágosabb, tisztán megfestett területek az UvRFC képeken fehérek maradtak, ami nagy valószínűséggel ólomfehér használatára utal.
- **sárga pigmentek:** egyértelmű meghatározás nem volt lehetséges, azonban a több területen tapasztalt zöldes eltolódás vas-tartalmú sárgák jelenlétét valószínűsíti, míg a nagyon élénk meggyvörös színváltozás (UvRFC) krómsárga és kadmiumsárga jelenlétére utalhat.
- **vörös pigmentek:** a középnarancs irányába történő eltolódás (IrRFC) cinóber alkalmazását valószínűsíti.
- **kék pigmentek:** a rózsaszínes színváltozás (IrRFC) ultramarin vagy kobalttartalmú kék pigmentek használatára utal.
- **zöld pigmentek:** a rózsaszínbe történő váltás (IrRFC) krómtartalmú zöldek jelenléte, míg a sötétkékre váltás réztartalmú zöldek alkalmazására utal.



99. ábra – „Tájkép” VIS-R_VIS. Forrás: saját felvétel



100. ábra – „Tájkép” UvRFC. Forrás: saját felvétel

A második festmény vizsgálata azt is jól szemlélteti, hogy a *false color* és a VIS felvételek önálló kiértékelése is meglepően pontos, számos esetben a pigmentekhez közelítően pontos meghatározást tesz lehetővé. A színeltolódások alapján azonosítható volt többek között a cinkfehér alapozó, az ólomfehér festékréteg, a vas-tartalmú sárgák, a cinóber, az ultramarin vagy a kobaltkék, valamint a króm- és réztartalmú zöldek jelenléte. Ezek a megfigyelések – bár bizonyos esetekben feltételesek – jól illeszkedtek a későbbi,

műszeres mérések eredményeihez. A pXRF elemanalitikai vizsgálatokkal való kiegészítés lehetővé tette a pigmentek kémiai összetételén alapuló, szinte teljes bizonyosságú azonosítását, amely megerősítette vagy pontosította a korábbi következtetéseket. Ennek alapján az alapozó összetétele cinkfehér, kisebb mennyiségű ólomfehér, litopón és nyomokban kréta vagy gipsz volt; a fehér festék ólomfehér; a sárgák között sárga okker és kadmiumsárga (krómtartalom nélkül); a vörösök között szerves vörös, cinóber és vörös okker; a kékek esetében ultramarin és kobaltkék; a zöldekénél króm-oxid zöld és smaragd-zöld; a lilák között kobaltlila; míg a fekete festék csontfekete volt. Az összehasonlítás rávilágít arra, hogy a *false color* képalkotás önmagában is alkalmas a pigmentpaletta nagy részének közelítő feltérképezésére, és így gyors, előzetes azonosításra kiválóan használható, különösen akkor, ha további fotótechnikai vizsgálatokkal egészül ki. A kiegészítő elemanalitikai mérések ugyanakkor elengedhetetlenek a végső, teljes bizonyosságú pigmentazonosításhoz.



101. ábra - „Tájkép” VIS-R_VIS részlet. Forrás: saját felvétel



102. ábra - „Tájkép” UvRFC részlet. Forrás: saját felvétel

15.1.1 Következtetések

A két festmény vizsgálata egyértelműen igazolta, hogy a *false color* és a VIS felvételek önálló kiértékelése is rendkívül informatív, és számos esetben meglepően pontos, közeli pigmentazonosítást tesz lehetővé. Már pusztán a színeltolódások vizsgálatával következtetni lehetett többek között a fehér rétegek összetételére (ólomfehér jelenlétére vagy a modern fehér pigmentek kizárására), egyes sárga pigmentek típusára (vas-tartalmú sárgák, krómsárga, kadmiumsárga), a vörös pigmentekre (cinóber, minium, okkervörös), a kék pigmentekre (azurit, mesterséges ultramarinkék, kobaltkék), valamint a zöld pigmentek esetében a króm-, réz- és zöldföld-tartalmú változatokra. Bár bizonyos azonosítások feltételesek maradtak, a későbbi kiegészítő fotótechnikai és elemanalitikai (pXRF) vizsgálatok nagyrészt megerősítették ezeket a következtetéseket, valamint pontosították az egyes pigmentek kémiai összetételét.

16 MESTERMUNKA - TECHNIKAI MEGOLDÁSOK A MIKRO-SZKÓPOS FELVÉTELKÉSZÍTÉSHEZ

Már a kutatás kezdetén ismert volt, hogy milyen felépítésű, márkájú és típusú polarizációs fénymikroszkóp átalakítására szükség van. Az első tesztek a Magyar Képzőművészeti Egyetem vizsgálati laborjában rendelkezésre álló Zeiss Axio Imager polarizációs mikroszkópon történtek. A felvételkészítéshez a rendszer saját fényforrásai (HAL 100 és HXP 120 V) kerültek alkalmazásra, a reflexiós és lumineszcens felvételek rögzítésére egyaránt. Képrögzítő eszközként a Tanszék teljes spektrumra átalakított tükörreflexes fényképezőgépére (Canon 50D APSC DSLR) esett a választás, B+W 093 IR (830 nanométeres) infravörös szűrővel felszerelve.

A módszer a következőképpen zajlott: a Zeiss képrögzítő feltét helyére egy Canon DSLR váz került, amelyet a megfelelő csatlakozó hiányában a fotótubusra illesztettek a szűrővel együtt. A beépített sugárváltót UV-irányba állították, a fényútból pedig minden szűrőt eltávolítottak. Az expozíciós beállítások empirikus úton, több próbafelvétel alapján kerültek meghatározásra. A teszthez használt minta a Tanszék egyik hallgatója által készített mintatáblából származott, egy olyan festett mezőből, ahol több különböző vörös pigment egymásra felhordva volt jelen.



103. ábra - A Zeiss Axio Imager rendszerű polarizációs optikai mikroszkóp fényútjainak egyszerűsített ábrája (ráeső átmenőmenőfényes vizsgálati típus egyaránt feltüntetve) Forrás: www.zeiss.com

16.1 Kezdeti tapasztalatok és fejlesztések

16.1.1 Reflexiós képalkotás

Az első, egyértelműen pozitív eredménnyel zárult próbálkozásokat követően a kutatás a megfelelő eszközök beszerzésének irányába folytatódott. Rövid információgyűjtés után kiderült, hogy a fényképezőgépekhez több, az objektív mögé építhető, úgynevezett *clip filter* is beszerezhető. Ezek a szűrők egyszerű mozdulattal behelyezhetők és eltávolíthatók a vázba, az objektív mögé. A kamera fotótubusra történő rögzítése egy kifejezetten erre a célra gyártott, APSC szenzorméretű kamerákkal kompatibilis fotótubus alkalmazásával vált megoldhatóvá.

Ezzel a lumineszcens felvételek készítése megoldódott, azonban az infravörös tartományban történő reflexiós felvételkészítés során kisebb-nagyobb problémák merültek fel.



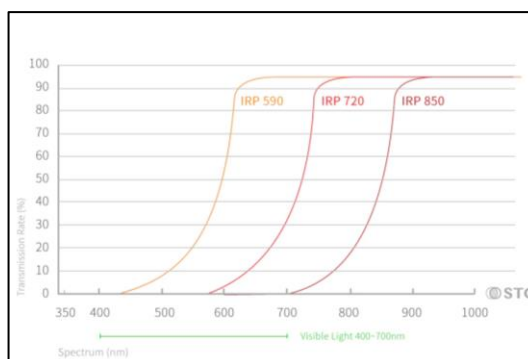
104. ábra - Az STC clip filter, Canon APSC vázakhoz. Forrás: https://www.stcoptics.com/collections/clip-filters?pf_t_camera_type=Canon



105. ábra – A szűrő behelyezésének módja. Forrás: https://www.stcoptics.com/collections/clip-filters?pf_t_camera_type=Canon



106. ábra – Egy Canon APSC vázba beillesztett szűrő. Forrás: https://www.stcoptics.com/collections/clip-filters?pf_t_camera_type=Canon



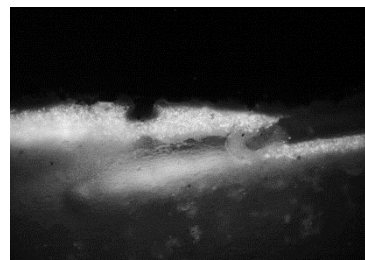
107. ábra – AZ STC infravörös *clip filter*-ek átteresztési görbéi. Forrás: https://www.stcoptics.com/collections/clip-filters?pf_t_camera_type=Canon



108. ábra - Próba felvétel a tesztelési folyamat során egy vörös festékrétegből vett minta keresztmetszet csiszolatáról (VIS-IR_VIS). Forrás: saját felvétel



109. ábra - Próba felvétel a tesztelési folyamat során egy vörös festékrétegből vett minta keresztmetszet csiszolatáról, IR-IR_830-1000. Forrás: saját felvétel



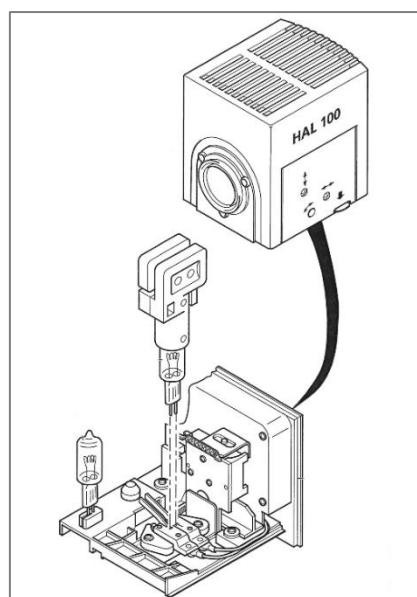
110. ábra - Próba felvétel a tesztelési folyamat során egy vörös festékrétegből vett minta keresztmetszet csiszolatáról, IR-L_UV₃₆₅

A mikroszkóp beépített halogén fényforrása elegendő infravörös sugárzást bocsátott ki a felvételek elkészítéséhez. A gyártóval való egyeztetés során kapott javaslat ellenére – a kezdeti sikeres tesztek tapasztalatai alapján – a hővédő szűrő nem került eltávolításra a fényútból. Ennek a szűrőnek a feladata a látható tartományban végzett reflexiós felvételkészítés során az, hogy a fényforrásból érkező sugárzást megsűrje, így a fényútban és az objektívekben található lencsék által felerősített és központosított fénynyaláb ne károsítsa a behelyezett mintát. Noha a gyártó által közölt adatok szerint a szűrő éppen a kívánt rögzítési tartományban nem enged át sugárzást, a képalkotás során ennek ellenére sikerült jó eredményeket elérni.



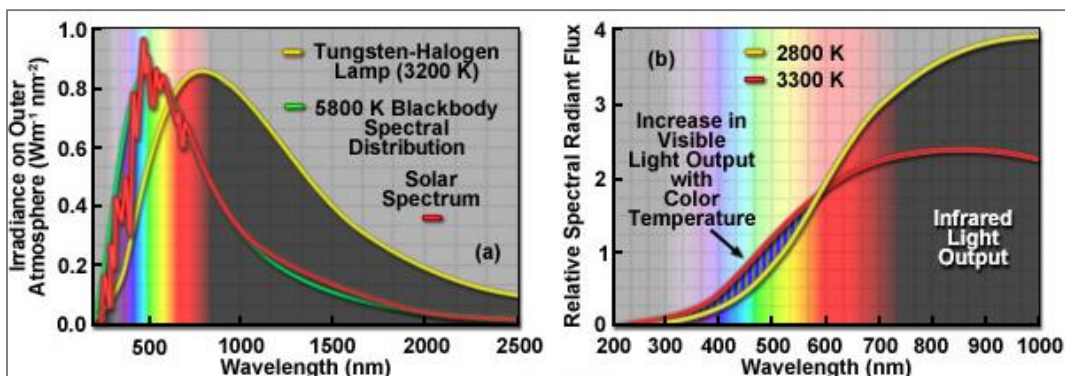
111. ábra – A Zeiss HAL 100-as halogén fényforrása.

Forrás: <https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html>

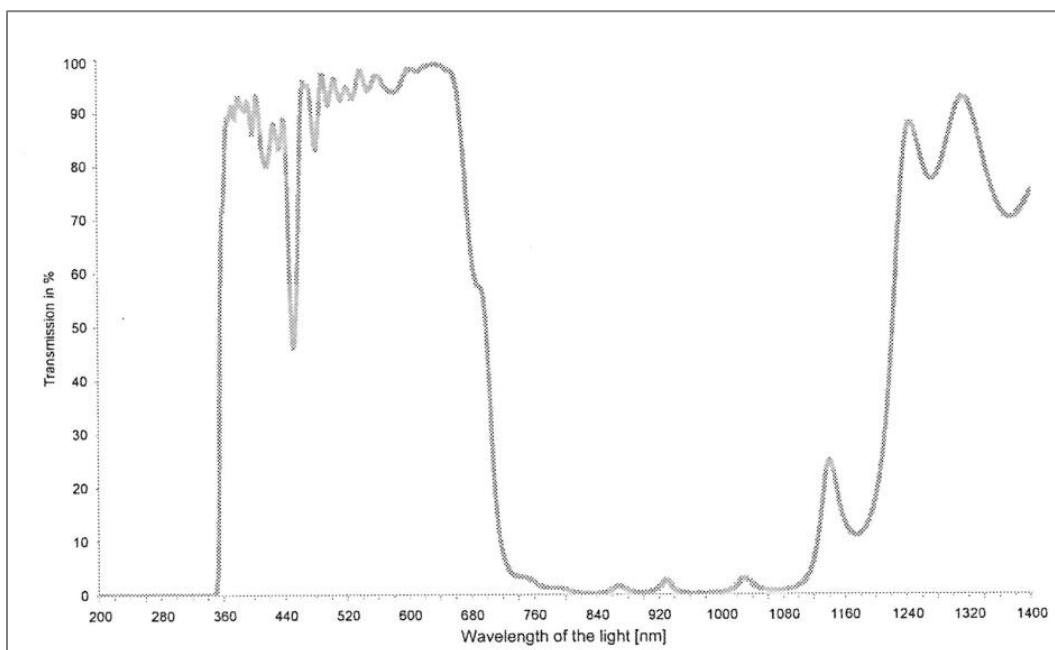


112. ábra – a Zeiss HAL 100-as halogén fényforrás robbantott ábrája. Forrás:

<https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html>

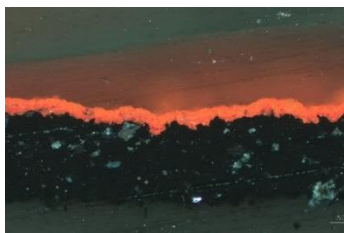


113. ábra – Halogén sugárzó kibocsátási görbéi. Forrás: <https://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/tungstenhalogen.html>



114. ábra – A beépített hővédő szűrő áteresztési spektruma. Forrás: <https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html>

A felvételek elkészítéséhez a fényképezőgép fénymérője által meghatározott adatok elegendőnek bizonyultak, mivel a készülék élőképes módban, valamint számítógéphez csatlakoztatva, szoftveres vezérlés mellett is képes volt a szükséges mérések elvégzésére. Az így beállított rekesznyíláshoz és ISO-értékhez viszonyítva relatíve rövid záridő volt alkalmazható. Az elkészült felvételek azonban az erős reflexiók miatt nehezen voltak értékelhetők. A képek alapvetően a fényútban elhelyezett lineáris polarizációs szűrővel készültek, azonban a kedvezőtlen eredmények miatt polarizált megvilágítás mellett – két, egymáshoz képest keresztezett kioltási irányú polarizációs szűrő alkalmazásával – is készültek felvételek, amelyek hasonlóan gyenge eredményt adtak.



115. ábra -A modellkísérletek-hez készült mintatábla R1-es szektorából származó minta, keresztmetszet csiszolatának felvétele, VIS-R_VIS. Forrás: saját felvétel



116. ábra – A modellkísérletek-hez készült mintatábla R1-es szektorából származó minta, keresztmetszet csiszolatának felvétele, UV-R_UV₃₆₅. Forrás: saját felvétel



117. ábra – A modellkísérletek-hez készült mintatábla R1-es szektorából származó minta, keresztmetszet csiszolatának felvétele IR-R_IR₈₃₀₋₁₀₀₀. Forrás: saját felvétel

További tervezés és információgyűjtés eredményeként az alábbi megállapítások születtek:

- a beépített polarizációs szűrők egyike sem biztosít elegendő polarizációt az infravörös tartományban,
- a fényforrásból érkező infravörös sugárzás mennyisége a hőszűrő alkalmazása mellett is megfelelő a képalkotásra; mindez annak ellenére, hogy a filter 700–1200 nanométer között is szűr, azaz éppen a közel-infravörös (830–1100 nanométer) reflexiós képalkotás tartományában,
- amennyiben ultraibolya reflexiós felvétel készítése is cél, a gépvázba helyezett infravörös szűrő (*clip filter*) nem tekinthető felhasználóbarát megoldásnak, hiszen UV tartományú felvételkészítés igénye esetén azt cserélni szükséges.

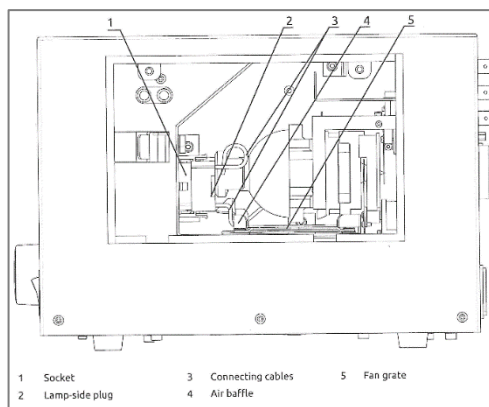
E tapasztalatok alapján egyértelművé vált, hogy az elhamarkodott felvételkészítési próbálkozások helyett átfogóbb szakirodalmi kutatásra és gondos tervezésre van szükség a végső, lehető leginkább felhasználóbarát megoldások kialakítása érdekében.

16.1.2 Lumineszcens képalkotás

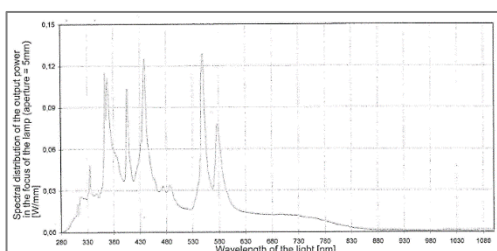
A restaurátori vizsgálatok során rendszeresen alkalmazott Zeiss mikroszkópok egyik alternatív sugárforrása a „LEJ (Lightning & Electronics Jena) HXP 120 V” elnevezésű egység. Ez a sugárforrás egy úgynevezett rövid ívű higanygőz-izzót (pontos típusa: OSRAM HXP-R120W/45C VIS) tartalmaz, amelyhez (hővédő szűrő is tartozik, lásd 118. ábra).



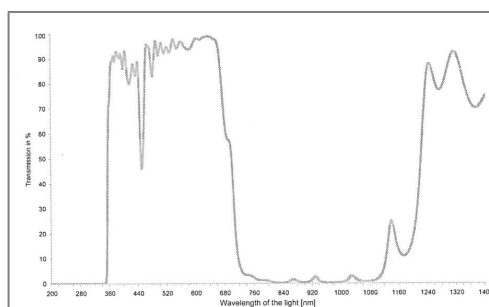
118. ábra - A JEL HXP 120 V sugárforrás. Forrás: <https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html>



119. ábra - A JEL HXP 120 V sugárforrás, robbantott ábra, oldalnézet. Forrás: <https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html>



120. ábra - A JEL HXP 120 V sugárforrás, kibocsátási görbéje. Forrás: <https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html>



121. ábra - A beépített hővédő szűrő áteresztési spektruma. Forrás: <https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html>

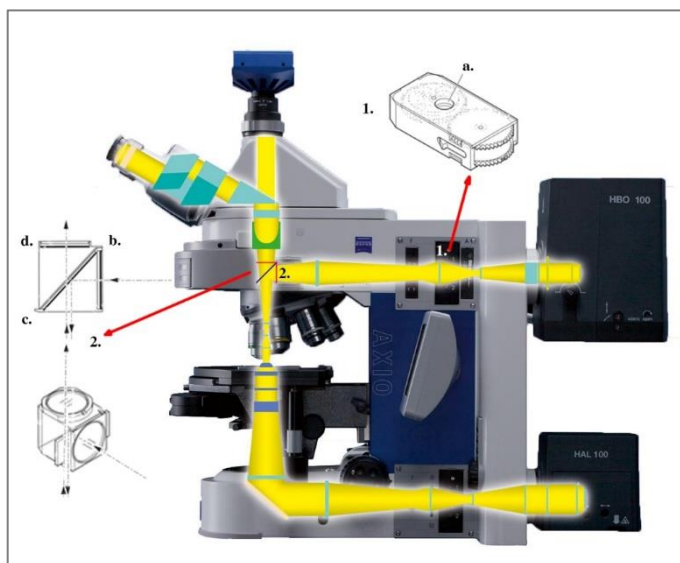
Az izzó kibocsátási görbéje alapján megállapítható, hogy a sugárforrás nem csupán az ultraibolya, hanem a látható tartományban is bocsát ki sugárzást, sőt elenyésző mértékben az infravörös tartományban is. Ezáltal egyaránt alkalmas látható és ultraibolya tartományú gerjesztésre. A hagyományos UvVL felvételek esetében a szűrőblokkban elhelyezett zárószűrő biztosítja, hogy a mintára érkező sugárzás kizárólag az ultraibolya tartományra korlátozódjon (a szűrőblokk felépítését a következő fejezet részletesen ismerteti). A fentiek alapján a mikroszkópok alapvető sugárforrásai önmagukban is alkalmasak a kiegészítő vizsgálati típusok elvégzésére, amennyiben a megfelelő szűrők megfelelő helyen kerülnek alkalmazásra.

16.1.3 A végső kialakítás

A vonatkozó szakirodalom feldolgozását és a részletes tervezési fázist követően sikerült kialakítani egy kellően felhasználóbarát és technikailag megbízható megoldást, amely al-

kalmas a látható, kompromisszumokkal az ultraibolya és a közeli infravörös tartományban végzett reflexiók, valamint a látható és az infravörös tartományban rögzített lumineszcens felvételek elkészítésére.

Az első jelentős módosítás a tesztek során alkalmazott Canon fényképezőgép cseréje volt a Zeiss Axiocam 506 rendszer színes és monokróm képrögzítő egységeire. Mindkét kamera a Sony ICX 694 EXview HAD CCD II⁹¹ típusú szenzorra épül, amely 6 megapixeles (2752×2208 pixel) felbontással és $4,54 \times 4,54$ mikrométeres pixelmérettel rendelkezik. A színes egység érzékenysége 400–720 nanométer közé esik, amelyet a gyártó Hoya C5000 szűrő⁹² és RGB Bayer color filter mask kombinációjával valósít meg. A monokróm egység érzékenysége 400–1000 nanométer között alakul, ebből hiányoznak a fent említett színszűrők, a szenzor mindössze egy BK7 protektív szűrővel (bór-szilikát, optikai védőüveg) rendelkezik. A 14 bites kamerák 250 mikroszekundum és 60 másodperc közötti expozíciós tartományt biztosítanak, ami a kívánt vizsgálati felvételek rögzítéséhez megfelelő.



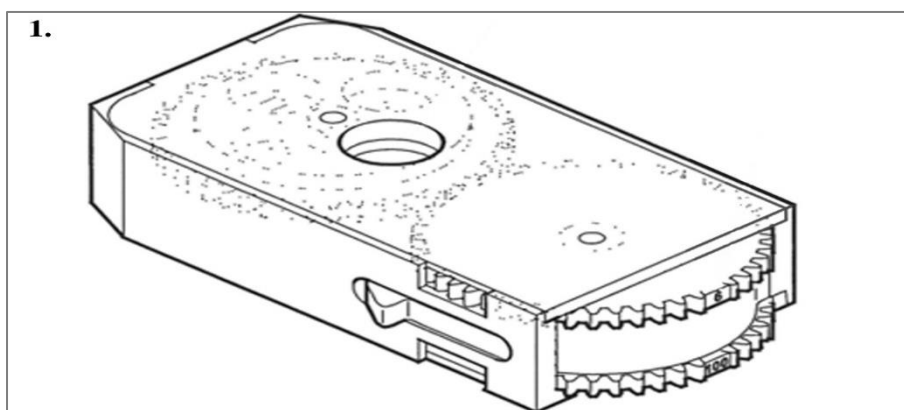
122. ábra – A Zeiss polarizációs mikroszkópja az átalakításokkal. Forrás: <https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html> weboldalról származó ábrák montázsza.

⁹¹ A Sony ICX-694 EXview HAD CCD II egy rendkívül érzékeny és precíz képrögzítő szenzor, amely kombinálja a magas felbontást, kiváló QE-t és alacsony zajszintet. Ez a szenzor különösen ideális asztrofotózásra, mikroszkópos alkalmazásokra, tudományos mérésekre, illetve nagy igénybevételű gépi látó rendszerekhez. Az EXview HAD II technológia biztosítja a kiváló teljesítményt még gyenge fényviszonyok mellett is. https://www.ximea.com/products/usb-vision-industrial/xid-usb3-scientific-sony-ccd-cameras/sony-icx694al-usb3-mono-scientific-camera?utm_source=chatgpt.com

⁹² Color Compensating Filter - A Hoya C5000 egy technikai, laboratóriumi célú színtompító üveg, amelyet elsősorban optikai korrekciós feladatokra – például kamerás vagy kijelzős rendszerek színtempizálására – használnak. <https://www.hoyaoptics.eu/colour-compensating-filters-c/> 2025.08.29.

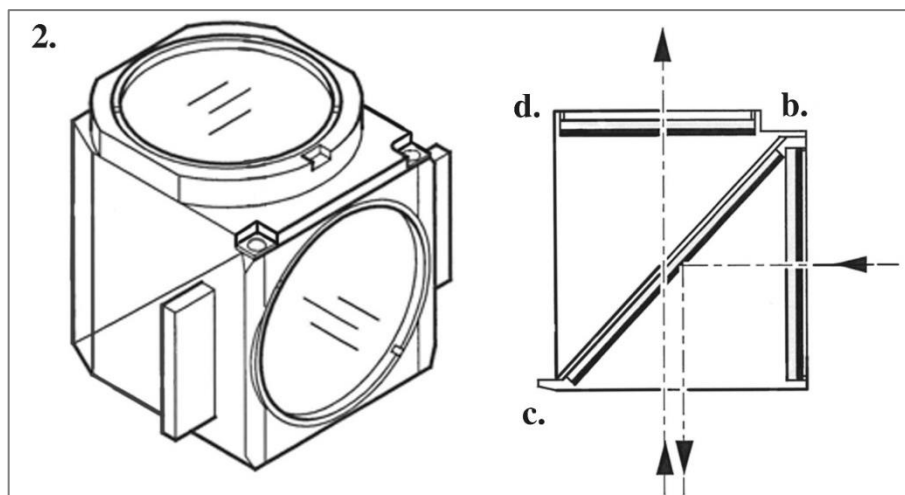
A megfelelően illeszthető, és nem mellékesen a Zeiss saját szoftverével is kompatibilis képrögzítő egységek kiválasztását követően a következő feladatot a szűrők típusának és optimális elhelyezési helyeinek meghatározása jelentette. Egyértelműnek bizonyult, hogy a külső egységekből a mikroszkópba érkező sugárzás szűrését első lépésben a belépési pont közelében célszerű megvalósítani. Erre azonban kizárólag a lumineszcens felvételek esetében volt szükség.

Az első könnyen hozzáférhető elhelyezési pontot a mikroszkóp vázának hátsó részén található szűrőtárcsa jelentette (lásd 122. ábra/1.). Ez a szűrőtárcsa (*filter wheel*) két beépített kerékkel rendelkezik, amelyekbe egyenként négy 25 milliméter átmérőjű szűrő rögzíthető. Gyári állapotban jellemzően különböző ND (*neutral density*, a fény mennyiségét szabályozó) szűrők, valamint a színhőmérséklet módosítására szolgáló színes szűrők találhatók bennük.



123. ábra - A Szűrőtárcsa (1.) rajza. Forrás: <https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html>

A beérkező sugárzás megszürésének második lehetőségét az objektívek fölött, a revolverben elhelyezkedő szűrőblokk (2.) és az abban rögzített szűrők jelentik (124. ábra). A blokk felépítése a következőképpen alakul: a belépő (b) és a kilépő (d) oldalon egy-egy szűrő beszerelésére van lehetőség (a belépő oldalon függőleges, a kilépő oldalon vízszintes elrendezésben). A b) pozícióban általában egy zárószűrő található, amely a beérkező sugárzást szabályozza, a blokk közepén pedig 45°-os szögben helyezkedik el az úgynevezett *beam splitter* (c). Ez egy féligáteresztő tükör, amelynek feladata, hogy a beérkező sugarakat 45°-os szögben lefelé, az objektíven keresztül a mintára irányítsa. A mintáról visszaérkező sugarak – amelyek lehetnek reflexió vagy emisszió eredetűek – a féligáteresztő tükrön áthaladva a vízszintes irányú (d) szűrőhely felé jutnak, amely gyári állapotban jellemzően üres.



124. ábra - a szűkőblokk felépítése, ballra a blokk háromdimenziós rajza, jobbra pedig a keresztmetszeti ábrája, a sugárirány nyilakkal jelölve. A „b.” a belépő oldali szűrőt, a „c.” a féláteresztő tükröt (*beam splitter*), a „d.” pedig a kilépő oldali szűrőt jelöli. Forrás: <https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html>

16.2 A lumineszcens képalkotás

16.2.1 Különböző gerjesztésű infravörös lumineszcens felvételkedzítés

Az ultraibolya- és látható tartományú sugárzással gerjesztett infravörös lumineszcencia vizsgálatnál a beérkező sugárzás módosítása már a fényútba való belépéskor szükséges. A fényforrásból származó széles spektrumú sugárzásból elsődlegesen az infravörös tartományba eső komponenseket kell kiszűrni, majd a gerjesztés hatására a mintából kilépő, szintén széles spektrumú sugárzásból kizárólag az infravörös tartományba eső részt szükségessé átengedni a rögzítő egység felé.

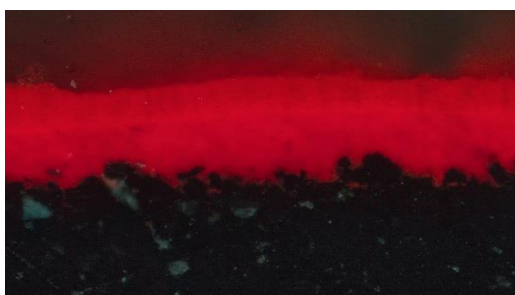
Az infravörös lumineszcens képalkotás a megfelelő átalakításoknak köszönhetően az alábbiak szerint valósul meg:

- a HPX 120 V típusú fényforrás kerül alkalmazásra,
- látható fényes gerjesztés esetén a szűrőtárcsában (1/a.) a Schott BG 18-as szűrő aktív, a fényútban helyezkedik el, ennek feladata a képalkotás szempontjából zavaró ultraibolya és infravörös sugárzás kiszűrése, ultraibolya sugaras gerjesztés esetén egy 400 nanométeres *shortpass* szűrő van beiktatva (1/b), mely csak az UV sugárzást engedi át,
- a szűrőblokk belépő oldala (b) üres, míg a kilépő oldalon (d) egy infravörös szűrő⁹³, (Schott RG830 típus) kerül elhelyezésre,

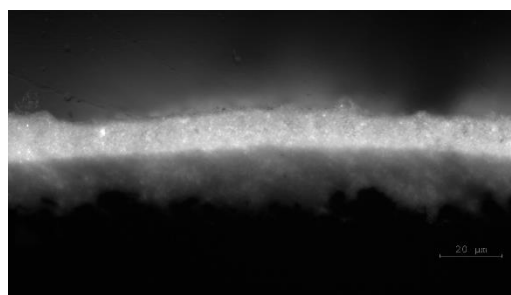
⁹³ <https://www.edmundoptics.com/p/rg-830-254mm-dia-longpass-filter/2577/>

- a fotótubus az Axiocam 506 *mono* kameraállásba van csatlakoztatva; a szoftver élő-kép funkciójában a fókuszálás ritkán valósítható meg, ezért azt a Schott BG18-as szűrő beiktatása előtt, a halogén fényforrás mellett kell elvégezni,
- az expozíciós idő meghatározása empirikus módon történik.

A fényforrásból érkező sugárzás a beavatkozásoknak köszönhetően mentes az infravörös komponensektől, ugyanakkor egyszerre tartalmazza az ultraibolya- és a látható tartományú sugárzásokat. Ez nem jelent problémát, mivel így egyidejűleg gerjeszthetők az az ibolyántúli sugárzásra reagáló pigmentek, például a titánfehér (rutil) és az egyiptomi kék, valamint a látható tartomány hatására emissziót mutató pigmentek, például a kadmium-tartalmú festékek.



125. ábra – Az R7-es mezőből vett minta keresztmetszet csiszolatának VIS-R_VIS (pol) felvétele, 10x okulár, 20x objektív. Forrás: saját felvétel



126. ábra - Az R7-es mezőből vett minta keresztmetszet csiszolatának IR-L_VIS felvétele, 10x okulár, 20x objektív. Forrás: saját felvétel

16.3 A reflexiós képalkotás

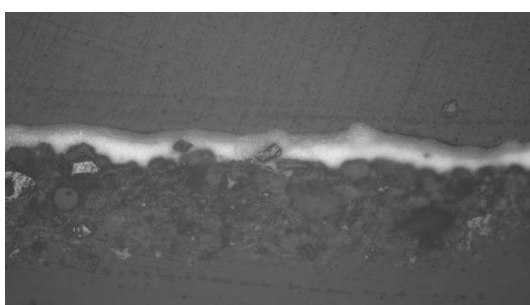
16.3.1 Infravörös-reflexiós felvételkedészítés

Az IrP típusú felvételkedészítés során a kutatások és a tesztek alatt tapasztalt képalkotási problémák összességében megoldást nyertek. A nehézséget az okozta – ahogyan azt korábban is említésre került –, hogy a mikroszkóp fénycsatornájába gyárilag beépített polarizációs szűrők az infravörös tartományú sugárzást nem voltak képesek megfelelően polarizálni. Emiatt a rendszer kiegészült infravörös polarizációs szűrőkkel, amelyek közül egy a szűrőtárcsában, egy másik pedig a szűrőblokk belépő oldali (b) foglalatában kapott helyet. Ennek eredményeként a minta felületéről visszaérkező zavaró reflexió mérséklődött.

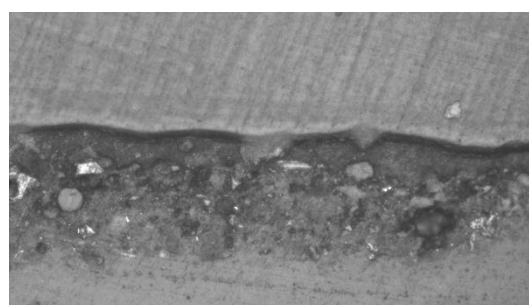
Az így kialakított képalkotási módszer a következőképpen foglalható össze:

- a fényforrás szerepét a HAL 100 típusú halogén egység tölti be,

- az első szűrőtárcsában egy infravörös lineáris polarizációs szűrő helyezkedik el⁹⁴,
- a másodikban egy infravörös szűrő mely a látható fényt nem, csak az infravörös sugarakat engedi át
- a szűrőblokk belépő oldalán szintén infravörös polarizációs szűrő található (90 fokkal elforgatva az előzőhöz képest), míg a kilépő oldalon is (biztonság kedvéért) egy infravörös zárószűrő került beépítésre,
- a fotótubus a Zeiss mono kameraállásba van csatlakoztatva,
- az élességállítás és az expozíciós idő megválasztása a szoftver élőkép funkciójának segítségével történik.



127. ábra – A modellkísérletkehez készült tábla Y13 szektorából származó minta keresztmetszet csiszolatának felvétele, IR-R_IR₈₃₀₋₁₀₀₀. Forrás: saját felvétel



128. ábra – A modellkísérletkehez készült tábla Y13 szektorából származó minta keresztmetszet csiszolatának felvétele, UV-R_UV. Forrás: saját felvétel

16.3.2 Ultraibolya-reflexiós képalkotás

Az UvR felvételkedészítés során az infravörös reflexiós képalkotásnál tapasztalt reflexiós és polarizációs problémák nem jelentkeztek. A módszer ennek megfelelően egyszerűbben, mindössze egyetlen szűrő alkalmazásával valósítható meg:

- a használt fényforrás a HPX 120 V típusú egység,
- a szűrőtárcsában egy 400 nanométeres *shortpass* szűrő van beiktatva (1/b), mely csak az UV sugárzást engedi át,
- a szűrőblokk belépő oldala (b) üres, a kilépő (d) oldalon pedig újabb 400 nanométeres zárószűrő került elhelyezésre.

A beépített és a módosítható polarizációs szűrők ebben az esetben nem játszanak szerepet a képalkotásban, mivel a reflexiós UV felvételeknél nem szükséges a sugárzás polarizációs módosítása.

⁹⁴ <https://www.edmundoptics.com/f/near-infrared-nir-linear-polarizing-film/39534/>

A kialakított eljárás működési elve a hagyományos műtermi gyakorlatban is ismert képalkotási módszerhez hasonlítható. A fényforrásból származó, szűrt sugárzás a minta felületére jutva kölcsönhatásba lép a rétegeket alkotó anyagokkal: részben elnyelődik, részben visszaverődik, bizonyos esetekben pedig lumineszcenciát vált ki. Az így létrejövő összetett sugárzás a szűrőblokkban kerül szelektálásra, ahol az UV zárószűrőnek köszönhetően kizárólag az ultraibolya reflexió jut el a képérzékelőig, míg a látható tartományú lumineszcencia nem.

17 SZERVETLEN PIGMENTEK LUMINESZCENCIÁJÁNAK VIZSGÁLATAI – KIFEJEZETT HANGSÚLLYAL AZ INFRAVÖRÖS TARTOMÁNYÚ LUMINESZCENCIÁRA

A következő fejezetek célja annak bemutatása, hogy azok az anyagok melyek lumineszcens tulajdonsággal bírnak az infravörös tartományban (a titánfehér, a cinkfehér, a nikkel–titán sárga, a titán-sárga, a kadmiumtartalmú pigmentek, valamint a Han-kék és Han-lila, az egyiptomi kék és a mangánkék és -lila), milyen fotofizikai tulajdonságokkal rendelkeznek, és miként alkalmazhatók ezen sajátosságaik a műtárgydiagnosztikai gyakorlatban.

Amint azt a dolgozat korábbi szakaszában részletesen ismertetésre került, a referenciaanyagok beszerzése és a színtáblák elkészítése elengedhetetlen előfeltétele volt a vizsgálatok elvégzésének. A táblák felépítését az előző fejezetek már bemutatták; a felhasznált pigmentek jegyzékét a 12. táblázat tartalmazza: az első oszlop a pigmentkódokat, a második az angol, német és magyar elnevezéseket, a harmadik pedig a beszerzési forrásokat rögzíti.

A vizsgálatok első lépéseként multispektrális felvételek készültek, hagyományos és professzionális képalkotó rendszerek alkalmazásával. Ezt követték a porminták és a festett felületek röntgen-fluoreszcens spektroszkópos vizsgálatai, valamint a színmezőkből vett keresztmetszeti minták optikai mikroszkópos értékelése. A pormintákon hordozható (pXRF) és makro-röntgenfluoreszcens (MA-XRF) mérések történtek, kiegészítve pásztázó elektronmikroszkópos (SEM-BSE) vizsgálatokkal, amelyekhez energia-diszperzív röntgen-spektrometriás (EDS) elemzés társult. Egyes esetekben fázis-analitikai vizsgálatok is készültek röntgendiffrakciós (XRD) módszerrel. A különböző eljárások részletes leírását és a mérések eredményei a mellékletekben kerülnek közlésre.

Az említett fejezetek során nemcsak a pigmentek történeti és kémiai vonatkozásai kerülnek bemutatásra, hanem azok fotofizikai tulajdonságai, valamint a legfontosabb szakirodalmi és friss esettanulmányok is. A kutatás így a laboratóriumi referenciaanyagok vizsgálatától a modellkísérleteken át a konkrét festmények és festett tárgyak elemzéséig ível, biztosítva a kísérleti adatok és a műtárgyi környezetben szerzett tapasztalatok szoros összekapcsolását. E bevezetést követően az infravörös lumineszcencia vizsgálatának eredményei és értelmezése kerülnek részletes bemutatásra.

12. táblázat – A kutatáshoz begyűjtött referenciaminták (porpigmentek). A táblázat tartalmazza az egyedi kódokat, az angol, német és magyar elnevezéseket és a gyártói vagy beszerzési forrást és azonosítókat.

Kód	Elnevezés	Azonosító
W1.	Lead (Cremnitz) white – Bleiweiss – ólomfehér	Kremer #46000
W2.	Bismuth white – Wismuthweiss – bizmutfehér	Kremer #54100
W3.	Zinc white (oxide) – Zinkweiss – cinkfehér	Kremer #46300
W4.	Lithopone – Litophone – litopón	Kremer #46100
W5.	Titanium white – Titanweiss – titánfehér	Kremer #46200
W6.	Titanium white – Titanweiss – titánfehér	MKE
W7.	Titanium white – Titanweiss – titánfehér	MKE
W8.	Buff Titanium – Titandioxid natur – ilmenit	Kremer #46280
W9.	Titanium white – Titanweiss – titánfehér	MKE-Bayer
W10.	Titanium white – Titanweiss – titánfehér	MKE
W11.	Zinc white (oxide) – Zinkweiss – cinkfehér	MKE
W12.	Zinc white (oxide) – Zinkweiss – cinkfehér	MKE
W13.	Zinc white (sulphide) – Zinkweiss – cinkfehér	Kremer #46350
W14.	Titanium white – Titanweiss – titánfehér	Sennelier 116
W15.	Zinc white (oxide) – Zinkweiss – cinkfehér	Sennelier 119
B1.	Magnetite, coarse – Magnetit – magnetit (term. vas-oxid fekete)	Kremer #48806
B2.	Iron Oxid Black, neutral – Eisenoxidswarz – mesterséges vasoxid fekete	Kremer #48401
B3.	Ivory Black, genuine – Elfenbeinschwarz – elefántcsontfekete	Kremer #12000
B4.	Manganese Black – Manganschwarz – mangánfekete	Kremer #47501
Y1.	French ochre – Französischer Ocker – Goethit (term. vasoxid sárga)	Kremer #40012
Y2.	Orpiment, genuine – Auripigment, echt – auripigment	Kremer #10700
Y3.	Realgar, genuine – Realgar – realgár	Kremer #10800
Y4.	Massicot – Massicot – masszikot	MKE
Y5.	Naples yellow – Neapelgelb – nápolyisárga	Kremer #10130
Y6.	Lead Tin yellow – Bleizinn gelb I. – ólom-ón sárga I.	Kremer #10110
Y7.	Lead Tin yellow II – Bleizinn gelb II. – ólom-ón sárga II.	Kremer #10120
Y8.	Iron oxide yellow – Eisenoxid gelb – mest. vasoxid sárga	Kremer #48000
Y9.	Chrome yellow – Chromgelb – krómsárga	MKE
Y10.	Zinc yellow 1. – Zinkgelb – cinksárga 1.	MKE
Y11.	Zinc yellow 2. – Zinkgelb – cinksárga 2.	MKE
Y12.	Cobalt yellow, Aureolin – Kobaltgelb, Aureolin – kobaltsárga	Kremer #43500
Y13.	Cadmium yellow – Cadmiumgelb – kadmiumsárga	Kremer #21030
Y14.	Cadmium yellow – Cadmiumgelb – kadmiumsárga	Kremer #21060
Y15.	Nickel-Titanium yellow – Nickeltitangelb – nikkel-titán sárga	Kremer #43200
Y16.	Titanium orange – Titanorange – titánsárga	Kremer #43300
Y17.	Indian yellow – Indischgelb – indiaisárga	Lukas #2424

Y18.	Cadmium yellow lemon – Kadmiumgelb - kadmiumsárga citrom	Lukas #2425
Y19.	Cadmium yellow light – Kadmiumgelb - kadmiumsárga világos	Lukas #2426
Y20.	Cadmium yellow dark – Kadmiumgelb - kadmiumsárga sötét	Lukas #2428
Y21.	Cadmium yellow – Kadmiumgelb - kadmiumsárga	Unknown XY/1.
Y22.	Cadmium yellow – Kadmiumgelb - kadmiumsárga	Unknown XY/2.
Y23.	Cadmium yellow – Kadmiumgelb - kadmiumsárga	Unknown XY/3.
Y24.	Cadmium yellow – Kadmiumgelb - kadmiumsárga	Unknown XY/4.
Y25.	Chrome yellow – Chromgelb - krómsárga	Unknown XY/5.
Y26.	Naples yellow – Neapelgelb - nápolyisárga	Unknown XY/6.
Y27.	Jarosite – Jarosit– jarosit (term. vas-oxid sárga)	Kremer #11520
Y28.	Saffron - Safran – sáfrány	Kremer #36300
R1.	Hematite – Blutstein – hematit (term. vasoxid vörös)	Kremer #48651
R2.	Red lead, minium – Mennige – mίνium	Kremer #42500
R3.	Natural Cinnabar – Zinnober – term. cinóber	Kremer #10620
R4.	Cinnabar, artificial – Zinnober – mest. cinóber	Kremer #10625
R5.	Iron Oxid – Eisenoxidrot – mest. vasoxid vörös	Kremer #48100
R6.	Chrome red – Chromerot - krómvörös	MKE
R7.	Cadmium red – Cadmiumrot – kadmiumvörös	Kremer #21120
R8.	Cadmium orange – Cadmiumorange – kadmiumnarancs	Kremer #21100
R9.	Cadmium red – Cadmiumrot – kadmiumvörös	Kremer #21150
R10.	Cadmium orange – Cadmiumorange – kadmiumnarancs	Unknown XR/1.
R11.	Cadmium red – Cadmiumrot – kadmiumvörös	Unknown XR/2.
R12.	Cadmium orange – Cadmiumorange – kadmiumnarancs	Unknown XR/3.
R13.	Cadmium orange – Cadmiumorange – kadmiumnarancs	Unknown XR/4.
R14.	Cadmium orange – Cadmiumorange – kadmiumnarancs	Unknown XR/5.
R15.	Alizarine Crimson - Alizarin Crapp-Lack – alizarin krapplakk	Kremer #23600
R16.	Alizarine Crimson - Alizarin Crapp-Lack – alizarin krapplakk	Kremer #3720-B
BL1.	Han-Blue, fine – Han blau – Han-kék	Kremer #10071
BL2.	Han-purple, fine – Han purpur – Han-lila	Kremer #10074
BL3.	Egyptian blue – Agyptischblau – egyiptomi kék	Kremer #10060
BL4.	Vivianite – Vivianit - Vivianit (vaskék)	Kremer #104000
BL5.	Indigo, genuine – Indigo -term. indigó	Kremer #36000
BL6.	Indigo, syntetic – Indigo – mest. indigó	Kremer #36009
BL7.	Azurite natural – Asurit natur – term. azurit	Kremer #10200
BL8.	Ultramarine blue – Ultramarinblau- term. ultramarinkék	Kremer #10510
BL9.	Smalt – Smalte –smalte	Kremer #10010
BL10.	Blue verditer – Bremen blau – mest. azurit	Kremer #10180
BL11.	Prussian blue – Preussich Blau - poroszkék	Kremer #45202
BL12.	Cobalt Blue – Kobaltblau – kobaltkék	Kremer #45700
BL13.	Ultramarine blue – Ultramarinblau – mest. ultramarinkék	Kremer #45010

BL14.	Cobalt Cerulean Blue – Kobalt-Cölinblau – cölinkék	Kremer #45730
BL15.	Manganese blue – Manganblau – mangánkék	MKE
BL16.	Phthalocyanine blue – Phthalocyaninblau – ftalocianin kék	Kremer #23050
BL17.	Cobalt blue turquoise – Kobaltblau türkis – kobaltkék-türkiz	Kremer #45750
BL18.	Cobalt Oxide Green Blue – Kobalt-Grünblauoxid – kobaltkék zöldeskék	Kremer #44110
V1.	Manganese violet – Manganviolet – mangánviola	Kremer #45350
V2.	Ultramarine violet/pink – Ultramarinrot, altrosa – ultramarin viola	Kremer #42601
V3.	Ultramarine violet – Ultramarinrot, altrosa – ultramarin viola	Sennelier 916
V4.	Cobalt Viola – Kobaltviolett – kobaltviola	Kremer #45800
V5.	Manganese violet – Manganese Viola – mangánviola	Sennelier 915
V6.	Manganese violet – Manganese Viola – mangánviola	MKE
G1.	Verona Green Earth – Veroneser Grüne Erde – zöldföld	Kremer #11000
G2.	Malachite natural – Malachit natur – term. malachit	Kremer #10300
G3.	Malachite, syntetic – Malachit synthetisch – mest. malachit	Kremer #44400
G4.	Cobalt Green – Kobaltgrün – kobaltzöld	Kremer #44101
G5.	Emerald green – Smaragdgrün - smaragdzöld	MKE
G6.	Chrome oxide green – Chromoxidgrün – króm-oxid zöld matt	Kremer #44200
G7.	Chrome oxide green hidrate – króm-oxid zöld hidrát (tüzes) viridian	MKE
G8.	Zinc Chromium green – Zincgrün – cinkzöld	Unknown XG/1.
G9.	Verdigris, synthetic – Grünspan, synthetisch – mest. verdigris	Kremer #44450
G10.	Egyptian green – Agyptischgrün – egyiptomi zöld	Kremer #10064

18 A TITÁNFEHÉR PIGMENTEK NIR TARTOMÁNYÚ LUMINESZCENCIÁJA⁹⁵

A titánfehér pigment a szabadalmaztatása és széleskörű elterjedése óta a kutatások középpontjában áll, mivel a cinkfehér mellett a legfontosabb kormeghatározó fehér anyag. A pigmenthez köthető megjelenési dátumok értelmezésében és használatában jelentős eltérések figyelhetők meg mind az egyes kutatók megközelítése, mind az országok közötti kutatóintézeti gyakorlatok között.

A rendelkezésre álló fotofizikai tulajdonságok alapján a titánfehéret korábban is az egyik legkönnyebben azonosítható pigmentnek tekintették fotótechnikai vizsgálatok segítségével. Az utóbbi években megjelent tanulmányok ugyanakkor lehetővé tették a pigment különböző típusainak pontosabb elkülönítését is. A fejezet elsősorban a titánfehér változatainak fotofizikai tulajdonságait tárgyalja, különös hangsúlyt helyezve az infravörös lumineszcencia vizsgálatára.

18.1 A titánfehér pigmentek története röviden

A titánfehér (titán-dioxid, TiO_2) természetes ásványi formában is előfordul anatóz, rutil és brookit módosulatokban. A mesterséges, jobb fedőképességű anatóz polimorfot az 1910-es években kezdték el ipari festékként gyártani, azonban művészeti pigmentként csak a 1920-as évektől vált elterjedté. Az anatóz változatot az 1940-es évektől fokozatosan kiszorította a stabilabb rutil, amely napjainkig a legelterjedtebb fehér pigmentek közé tartozik a művészeti gyakorlatban.⁹⁶



129. ábra ábra – Anatóz ásvány.
Forrás: <https://en.wikipedia.org/wiki/Anatase>



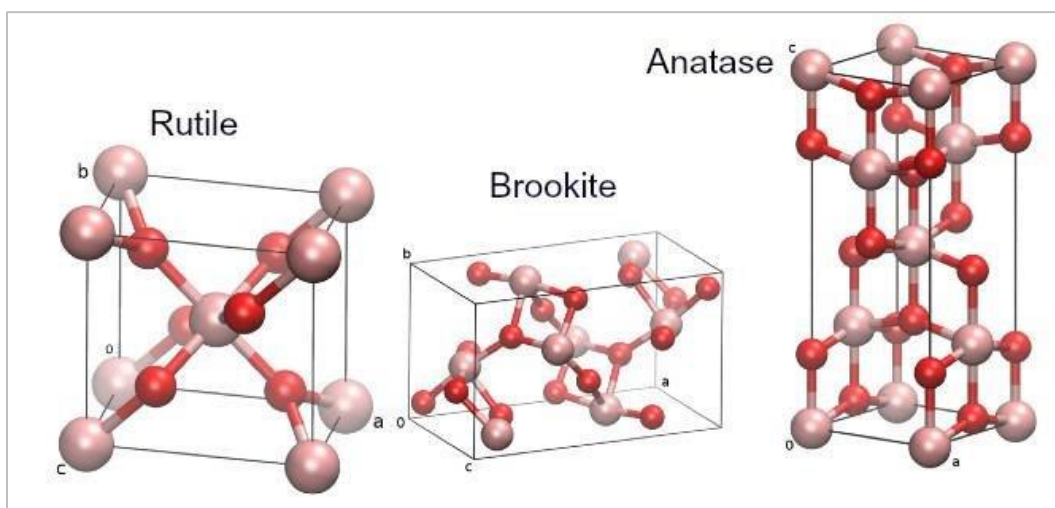
130. ábra– Brookit ásvány. Forrás: <https://en.wikipedia.org/wiki/Brookite>



131. ábra– Rutil kristály. Forrás: <https://en.wikipedia.org/wiki/Rutile>

⁹⁵ Annette T. Keller, Roland Lenz, Alessia Artesani, Sara Mosca, Daniela Comelli, and Austin Nevin, “Exploring the Ultraviolet Induced Infrared Luminescence of Titanium White Pigments,” in *UV-Vis Luminescence Imaging Techniques*, ed. Marcello Picollo, Maartje Stols-Witlox, and Laura Fuster-López (Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València, 2019), 201–32.

⁹⁶ Nigel Estaugh, Valentine Walsh, Tracey Chaplin, and Ruth Siddall, *Pigment Compendium: A Dictionary and Optical Microscopy of Historical Pigments* (Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004).



132. ábra – a különböző polimorfok kristályszerkezeti struktúrái⁹⁷

A pigmentek tulajdonságait nemcsak a kristályformák, hanem a gyártási eljárás és az alkalmazott felületkezelések is meghatározzák. Az anatózt és a rutilt kezdetben úgynevezett szulfátos eljárással állították elő, míg a rutil később egy környezetbarátabb kloridos eljárással került gyártásba (Niel Estaugh et al. 2004). A szerves vagy szervetlen bevonatokkal végzett opcionális felületkezelések révén a pigmentek fotokémiai viselkedése és megmunkálhatósága szabályozható.

A szakirodalomban gyakran kevés figyelmet fordítanak az anatóz és a rutil típusú titánfehér megkülönböztetésére, jóllehet a fotótechnikai vizsgálatok, valamint a szál-optikai reflexiós spektroszkópiával végzett non-invazív azonosítások eredményei számottevő különbségeket mutattak a két polimorf optikai tulajdonságai között.

18.2 Az első esettanulmányok

A titánfehér pigmentek infravörös lumineszcencia intenzívebb vizsgálatának kiindulópontja egy olyan projektsorozat volt, amelyben a standard infravörös lumineszcenciát vizsgálták különböző gerjesztési hullámhosszok segítségével. Az egyik első példa Wilhelm Geyer 1946-ban a Maria Heimsuchung templomba készült falfestményének vizsgálatáról Terese Kolar által írt tanulmánya⁹⁸, mely meghatározó volt a fehér pigmentek, kifejezetten a titán-dioxid lumineszcencia-viselkedésébe való betekintés szempontjából.

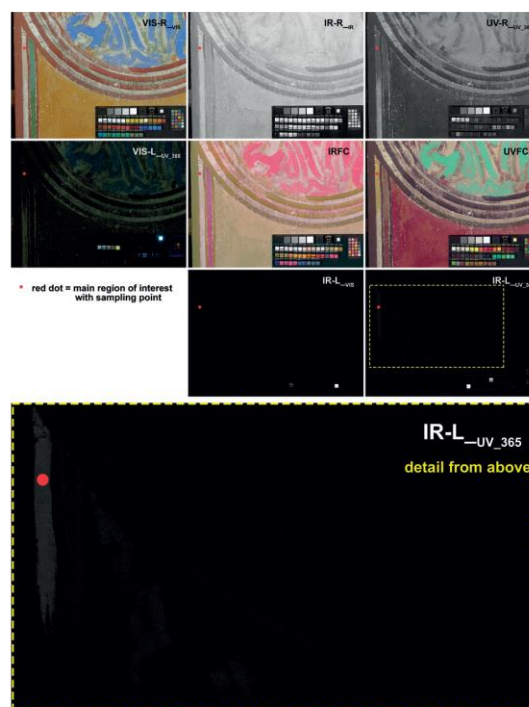
⁹⁷ Yasmeen Janzeer, *Surface Modification of Titanium and Titanium Alloys to Enhance Bone Healing* (PhD diss., King's College London Dental Institute, 2013), <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4790.1042>.

⁹⁸ Teresa Kolar, *Basic Study of the Wall Painting by Wilhelm Geyer, 1946, Mariä Heimsuchung, Blaubeuren*, research report, Ursula and Reiner Drewello Laboratory, September 23, 2017 (analysis result AN 3123).

A falfestmény freskó technikával indult, majd szerves kötőanyaggal szekkóban lett befejezve⁹⁹ (lásd 133. ábra).



133. ábra - Wilhelm Geyer festményének részlete a Maria Heimsuchung templom kórusívén. Forrás: Annette Keller et al. 2019



134. ábra - Wilhelm Geyer falfestményének részlete a Mariä Heimsuchung templomban. Komplet többsávós felvételsor. A piros pont a mintavételi területet jelöli. Az alsó nagy ábra az UV-sugárzás által kiváltott releváns IR-lumineszcenciát mutatja be. Forrás: Annette Keller et al. 2019

Az 134. ábra a többsávós képalkotás eredményeit mutatja. A művész által végzett retusálások és javítások területei (például a piros ponttal jelölt mező) jól kivehetők, és az UvVL és UvRFC felvételek alapján ezeket titánfehérként azonosították. A jelölt területen a VirL felvétel nem mutatott aktivitást, ugyanakkor az UvIrL felvételeken jól megfigyelhető jelenség volt tapasztalható. A lumineszkáló anyag összetételének tisztázása érdekében anatázból és rutilból – a titán-dioxid két polimorfjából – készült referenciaanyagokat vizsgáltak. Mivel mindkét polimorf rendelkezésre állhatott már 1946-ban (az anatáz a 20-as évek elejétől, a rutil pedig az 1940-es évektől került kereskedelmi forgalomba), a referenciák elemzése lehetővé tette annak megállapítását, hogy a detektált jel mely változat

⁹⁹ A falfestmény tanulmányozására 2017-18-ban került sor Teresa Kolar által. Az eredti festmény tudományos vizsgálatát az Ursula és Reiner Drewello laboratórium végezte anyagminták segítségével. AN 3123, Blaubeuren; Cath. Maria Heimsuchung templom, 2017.09.23.

jelenlétének köszönhető. A vizsgálatot rétegtani mikrominták elemzésével is kiegészítették, amely megerősítette az azonosítást.

Az infravörös lumineszcencia vizsgálatok során hasonló jelenségek korábbi mérésekben is megfigyelhetők voltak: a kadmiumtartalmú pigmentek mellett más anyagok is emittáltak infravörös sugarakat. Ezek a jelenségek gyakrabban későbbi beavatkozásokhoz, retusokhoz voltak köthetők, ritkábban eredeti festékrétegekhez. Mivel a beavatkozások összetétele sok esetben nem bírt közvetlen jelentőséggel a restaurátori döntéshozatal és a kutatások szempontjából, a jelenséget korábban kevésbé dokumentálták részletesen. Az említett szakirodalmi példa azonban rámutatott a jelenség jelentőségére, ezért a későbbi vizsgálatok során fokozott figyelmet kaptak az infravörös tartományban emittáló, titánfehérhez köthető lumineszcencia-jelenségek.



135. ábra - Vis-R_Vis felvétel Rudnay Gyula: *Bevonuló* című festményéről restaurálás előtti állapotban - Szépművészeti Múzeum – Magyar Nemzeti Galéria – Festészeti Osztály. Forrás: saját felvétel



136. ábra - Ir-L_UV₃₆₅ felvétel Rudnay Gyula: *Bevonuló* című festményéről restaurálás előtti állapotban - Szépművészeti Múzeum - Magyar Nemzeti Galéria – Festészeti Osztály. Forrás: saját felvétel

A fenti ábrákon egy Rudnay Gyula festmény többsávos felvételek készítése során két kiemelt felvétele látható. Az UvIrL képen a háttérben világos foltok formájában jelentkezik infravörös lumineszcencia, amely egy korábbi beavatkozás retusához köthető. A vizsgálatok eredményei szerint a retusban a titán-dioxid pigment rutil változata volt kimutatható (a vizsgálatokról részletesen a következő fejezetekben).

18.3 Részletesen a szakirodalmi és gyakorlati tapasztalatokról

A bemutatott tanulmányhoz kapcsolódó vizsgálatok során a titánfehérek viselkedésének tesztelésére különböző minőségű, mindkét polimorfból, eltérő gyártási eljárásokkal előállított mintákat gyűjtöttek. A jelen kutatás modellkísérletei esetében nem állt rendelkezésre részletes információ arra vonatkozóan, hogy az adott anyagokat a forgalmazó mely gyártótól szerezte be, illetve, hogy a pigmenteket milyen eljárással állították elő. Ez a körülmény a feladatot egyúttal izgalmasabbá és nehezebbé is tette, mivel a legtöbb esetben nem volt elegendő háttérinformáció a pigmentek tulajdonságairól.

A 13. táblázat a szakirodalmi tesztekben vizsgált pigmenteket sorolja fel: a „MERCK” kóddal ellátott minta az ABK Stuttgart gyűjteményéből származik, ahol titán-dioxidként szerepel. A 14. táblázat a jelen kutatás fehér referenciamintáit tartalmazza.

13. táblázat – A feldolgozott kutatás során elemzett minták/pigmentek listája							
Kód Code	Termék megnevezése Product name	Polimorf Modification	Eljárás Process	Bevonat Coating	Gyártó Manufacturer	Beszerzési forrás Source of supply	Beszerzés éve Year
K 1001	KRONOS 1001	anatáz	szulfát	nincs none	KRONOS	Harold Scholz	2017
K 1002	KRONOS 1002	anatáz	szulfát	nincs none	KRONOS	KRONOS Le- verkusen	2018
K 1071	KRONOS 1071	anatáz	szulfát	Al/Si	KRONOS	Harold Scholz	2018
K 2900	KRONOS 2900	rutil	szulfát	nincs none	KRONOS	KRONOS Le- verkusen	2018
K 2056	KRONOS 2056	rutil	szulfát	Al/Si/Zr	KRONOS	Harold Scholz	2017
K 2310	KRONOS 2310	rutil	klorid	Al/Si	KRONOS	Harold Scholz	2017
K 2360	KRONOS 2360	rutil	klorid	Al/Si	KRONOS	KRONOS Le- verkusen	2018
#46200	DuPont™ Ti- Pure® R-960	rutil	klorid	Al/Si	Du PONT	Kremer Pig- mente	2017
MERCK	Titándioxid	ismeret- len unknown	ismeret- len unk- nown	ismeret- len unknown	MERCK	MERCK Düs- seldorf	n/a

14. táblázat – A jelen értekezés kutatási részéhez beszerzett referenciaminták listája			
Kód	Elnevezések	Gyártó/forrás szerinti összetétel	Beszerzési forrás
W1.	Lead (Cremnitz) white Bleiweiss ólmfehér	100 % - lead carbonate synth. Cerrusite - PbCO_3 bázisos ólom-karbonát	Kremer #46000
W2.	Bismuth white Wismuthweiss bizmut fehér	>99,9% - bismuth subnitrate $\text{Bi}_5\text{H}_9\text{N}_4\text{O}_{22}$ bizmut-hidroxi-nitrát-oxid	Kremer #54100
W3.	Zinc white (oxide) Zinkweiss (oxid) cinkfehér (oxid)	100% pure zinc oxide ZnO cink-oxid	Kremer #46300
W4.	Lithopone Litophne litopón	mixture 60% zinc-sulphide + 40% barium-sulphide $\text{BaSO}_4 + \text{ZnS}$ – artificial mineral pigment, co-precipitate of zinc sulphide and barium sulphate – cink-szulfid és bárium-szulfát keverék	Kremer #46100
W5.	Titanium white (rutil) Titanweiss (rutil) titánfehér (rutil)	90-100% titanium-dioxide TiO_2 titán-dioxid	Kremer #46200
W6.	Titanium white (rutil) Titanweiss (rutil) titánfehér (rutil)	TiO_2 titán-dioxid	MKE
W7.	Titanium white (anatáz) Titanweiss (ana- tase) titánfehér (ana- táz)	TiO_2 titán-dioxid	MKE
W8.	Buff Titanium Titandioxid natur titánfehér natúr	mixture, 100% TiFeO_2 , Ilmenite + 1,25% silicon-dioxide + < 5% diiron-di- oxide Fe_2O_3 ilmenit	Kremer #46280
W9.	Titanium white (rutil) Titanweiss (rutil) titánfehér (rutil)	TiO_2 titán-dioxid	MKE Bayer
W10.	Titanium white (rutil) Titanweiss (rutil) titánfehér (rutil)	TiO_2 titán-dioxid	MKE
W11.	Zinc white Zinkweiss cinkfehér	? ZnO cink-oxid	MKE
W12.	Zinc white (oxide) Zinkweiss (oxide) cinkfehér (oxid)	ZnO cink-oxid	MKE

W13.	Zinc-sulphide Zinksulfid cinkfehér (szulfid)	95-100% Zinksulfide ZnS cink-szulfid	Kremer #46350
W14.	Titanium white Titanweiss Titánfehér	TiO ₂ titán-dioxid	Sennelier 116
W15.	Zinc white Zinkweiss Cinkfehér	ZnO cink-oxid	Sennelier 119

18.4 A többsávos képalkotásos tesztek és kiértékelésük

A többsávos képalkotást tehát a 13. táblázatban felsorolt mintákon végezték el, amely során a pigmentporok és a felfestett mintafelületek vizsgálata egyaránt megtörtént. A mintákat különböző megvilágítások, gerjesztések és felvételi módok mellett vizsgálták. Az UvVL és VIrL felvételek nem jeleznek különbséget az anatáz és a rutil pigmentek között. Az eltérések ugyanakkor egyértelműek az ultraibolya reflexiós, az ultraibolya *false color* és az UvIrL felvételeken. (Megjegyzendő, hogy egyes, cinktartalmú minták szintén mutatnak kibocsájtást a vizsgált tartományban, ennek részletesebb tárgyalása később történik.)

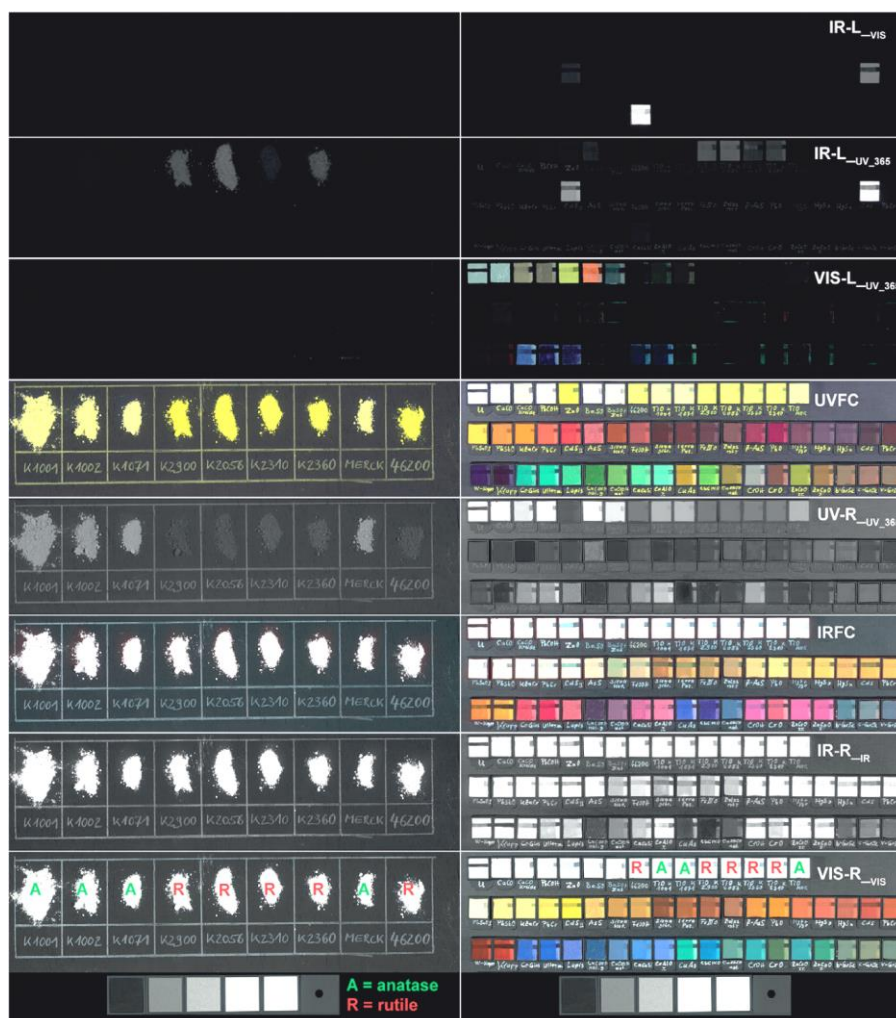
Az UvR felvételek tanúsága szerint az anatáz pigmentek nagyobb reflexiós képességgel rendelkeznek, mint a rutil pigmentek, ami intenzitásbeli különbséget eredményez az UvRFC felvételeken: az anatáz pigmentek világossárga, míg a rutilt tartalmazó felületek sötétsárga árnyalatot mutatnak. Fontos megfigyelés, hogy a többi fehér pigment (hagyományos töltőanyagok, például kréta és litopón, valamint az ólomfehér) az UvRFC felvételeken fehér marad; kivételt a cinkfehér és a titánfehér képez.

Az UvVL felvételeken kizárólag az anatáz minták esetében figyelhető meg különbség a pigmentporok és a felfestett mezők között. Az anatáz porminták gyenge vörös lumineszcenciát, míg a felfestett anatáz felületek halványzöldes vagy barnás lumineszcenciát mutatnak, ami feltehetően az anatáz részleges ultraibolya-áteresztő képességével magyarázható. Ennek eredményeként a festett anatáz-mezők lumineszcenciája a kötőanyag lumineszcenciájának és az anatáz részleges UV-elnyelésének kombinált hatásából adódik. A rutil pigmentek ezzel szemben nem mutatnak látható tartományú lumineszcenciát ultraibolya sugárzás hatására.

Az anatáz és a rutil pigmentek közötti legmarkánsabb különbségek az UvIrL felvételeken láthatók. Egy kivételtől eltekintve valamennyi rutil pigment különböző inten-

zítású infravörös lumineszcenciát mutat, függetlenül a gyártási eljárástól vagy a felületkezeléstől. A kivételt mind a szakirodalmi példában, mind a modellkísérletekben a Kremer Pigmente #46200-as rutil-minta (W5) jelentette, amely nem mutatott lumineszcenciát. Az anatóz pigmentek általában nem lumineszkálnak; kivételt csupán a K1002-es minta képez, amely alacsony intenzitású jelet adott. Az VIL felvételeken egyik típus sem produkált lumineszcenciát a közeli infravörös tartományban, tehát kizárólag magasabb energiájú (ultraibolya) gerjesztés hatására észlelhető emisszió.

A mérések összességében azt mutatják, hogy többsávú képalkotás alkalmazásával megbízhatóan elkülöníthetők egymástól az anatóz és a rutil kristályszerkezetű titánfehér pigmentek. A vizsgálatok szerint az ismeretlen „MERCK” minta anatózként viselkedett.



137. ábra - Többsávú felvételek a titán-dioxid minták vizsgálatához. A baloldalon a titán-dioxid porminták láthatók inert háttér előtt. A jobb oldalon a bemutatott szakirodalom szerzői által válogatott pigmentek felfestett mezői. Az alsó sorban a látható tartományú reflexiós felvételen (VIS-R_VIS) „A”-val az anatóz „R”-rel a rutil polimorf módosulat van jelölve. Forrás: Annette Keller et al. 2019

A bemutatott kutatáshoz készített mintatáblákon a titán-dioxid pigmentek mellett más történeti és modern fehér pigmentek – például cinkfehér és ólomfehér – is szerepeltek. A szakirodalmi példában a titán-dioxid rutil változatain kívül a többi anyag nem mutatott reakciót az alkalmazott gerjesztésekre.

15. táblázat – A modellkísérletekhez készült mintatáblákról Phase One rendszerrel készült multispektrális felvételek. Forrás: saját felvételek		
<i>Phase One MSI</i>		
VIS-R_VIS Phase One IXH, 72 mm, f/8.0 1/2 sec, ISO 50	IR-R_IR830-1000 Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 2 sec, ISO 50	UV-R_UV365 Phase One IXH, 72 mm, f/8.0 8 sec, ISO 50
VIS-L_UV365 Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 15 sec, ISO 50	IR-L_VIS Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 120 sec, ISO 50	IR-L_UV365 Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 120 sec, ISO 1600

16. táblázat - A modellkísérletekhez készült mintatáblákról Sony full spectrum rendszerrel készült multispektrális felvételek. Forrás: saját felvételek		
<i>Sony Full spectrum kamera</i>		
VIS-L_UV365 Sony A 7R Mark IV, 90 mm, f/5.6, 15 sec, ISO 100	IR-L_VIS Sony A 7R Mark IV, 90 mm, f/5.6, 30 sec, ISO 100	IR-L_UV365 Sony A 7R Mark IV, 90 mm, f/5.6, 30 sec, ISO 100

A jelenlegi kutatáshoz kapcsolódó modellkísérletek során ugyanakkor nemcsak a titán-dioxid rutil típusai különíthetők el az anatáz változatoktól, hanem az is megfigyelhető, hogy egyes cink-szulfid- és cink-oxid-tartalmú minták szintén emissziót produkálnak a közeli infravörös tartományban (15-16. táblázat). Bár ezek intenzitása egyértelműen gyengébb, mint a titán-dioxid rutil polimorfoké, a jelenség jól detektálható. Az elvégzett elemanalitikai mérések kizárták annak lehetőségét, hogy a vizsgált referenciaanyagok titán-dioxiddal (rutil) szennyezettek lennének, ezért a későbbiekben indokoltá válik a cink tartalmú pigmentek további, célzott vizsgálata is.

18.5 Időfelbontásos fotolumineszcencia-spektroszkópia - TRPL

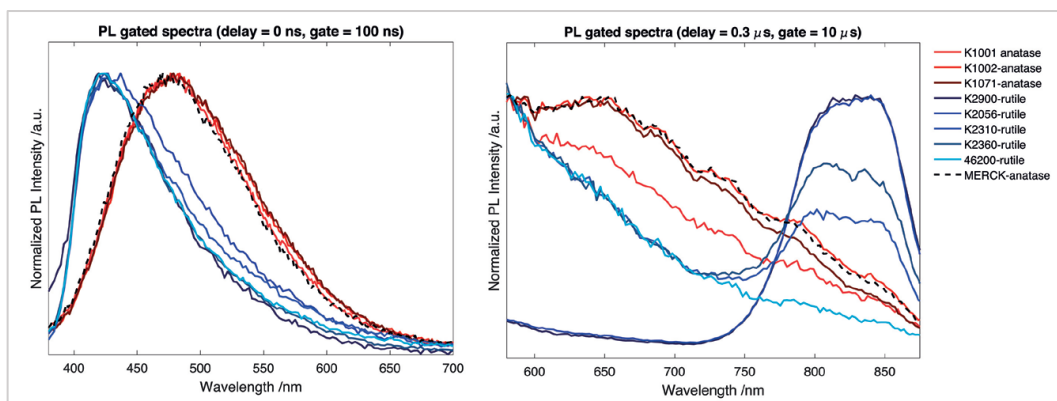
A szakirodalmi példában a többsávós képalkotással nyert eredményeket időfelbontásos fotolumineszcencia-spektroszkópiái (Time-resolved photoluminescence, TRPL) vizsgálatokkal egészítették ki az ultraibolya gerjesztés alatti emissziós viselkedés részletes tanulmányozása érdekében. A méréseket a tesztorozat ismert és ismeretlen mintáin, valamint a fent említett „MERCK” mintán egyaránt elvégezték. A TRPL rendszer impulzuslézeren és képalkotó spektrométerhez kapcsolt, gyorskapuzású (*fast-gated*) intenzív kamerán alapul. A kamera nagysebességű kapuzással rögzítette a fotolumineszcencia (PL) emissziós spektrumok bomlási kinetikáját. A gerjesztést Q-kapcsolt Nd:YAG lézer biztosította, amely 355 nanométeren szubnanoszekundumos impulzusokat bocsátott ki, míg az emissziót a spektrométer kimeneti portjára szerelt kamera detektálta. Az időfelbontásos detektor 3 nanoszekundumtól folyamatos üzemmódig állítható adatgyűjtő kapuval rendelkezett, 500 pikoszekundum alatti *jitter* mellett¹⁰⁰.

A mérési eljárás a fotolumineszcencia kapuzott spektrumainak sorozatos detektálásán alapult, különböző késleltetésekkel az impulzusos gerjesztést követően. A modern pigmentek optikai emissziójáról szóló legújabb tanulmányok alapján a titánfehér nanoszekundumos és mikroszekundumos emissziós viselkedését vizsgálták, amely alkalmasnak bizonyult a két TiO₂ polimorf módosulat megkülönböztetésére. A mérések során gyűjtött adatok a következőképpen alakultak:

¹⁰⁰ Az elektronikában *jitter*-nek (néha magyarosan remegésnek) nevezik egy periodikusnak tekintett jel periodicitásbeli eltéréseit, melyet a legtöbb elektronikai rendszerben egy órajelhez mérve adnak meg. Egy ideálisan periodikus jel esetén *jitter* lehet például a periódusidő átmeneti megváltozása vagy ingadozása rövid távon, mely jelenség a legtöbb alkalmazásban nem kívánt, kiküszöbölendő, hiszen hatására időzítésbeli bizonytalanságok léphetnek fel. Más megközelítésben a *jitter* a rendszer egy periodikus jellemzőjének nemkívánatos fázismodulációja. <https://hu.wikipedia.org/wiki/Jitter> 2024.08.02. Jelen esetben a *jitter* a detektorrendszer időkapuzásában fellépő, 500 pikoszekundumnál kisebb időbeli bizonytalanságot jelent, vagyis azt az ingadozást, amellyel a regisztrált emissziós jel időpontja eltérhet az ideális mérési időtől.

- nanoszekundumos időskálán, 10 nanoszekundumos képszélességgel, a lézergerjesztést követően nulla késleltetéssel
- mikroszekundumos időskálán, 10 mikroszekundumos képszélességgel, a lézergerjesztést követően 0,2 mikroszekundumos késleltetéssel

A PL spektrumokat a műszeres hatásfok korrekcióját követően, az emissziós maximumhoz igazítva normalizálva mutatták be. A 138. ábra a pormintákból nyert PL spektrumokat ábrázolja, amelyek szoros összhangban vannak a nemzetközi szakirodalomban közölt adatokkal. A vizsgálatok arra utaltak, hogy minden minta a gyártó által megjelölt ásványtípusnak megfelelő összetételű, míg az ismeretlen „MERCK” minta anatóz változatnak bizonyult. A legtöbb rutil típusú pigmentet a kék tartományban (B-PL) jelentkező emisszió jellemezte, amelynek maximuma 420 nm körül jelentkezett a nanoszekundumos időskálán, továbbá egy infravörös (NIR-PL) emissziós sáv is megfigyelhető volt 850 nm körüli maximum mellett a mikroszekundumos időskálán. A többsávú képalkotás eredményeivel összhangban a Kremer Pigmente #46200-as minta nem mutatott infravörös emissziót (NIR-PL). Feltételezhető, hogy ez a viselkedés a pigment speciális SiO_2 -bevonatának köszönhető, amely kiolthatja a NIR emissziót.



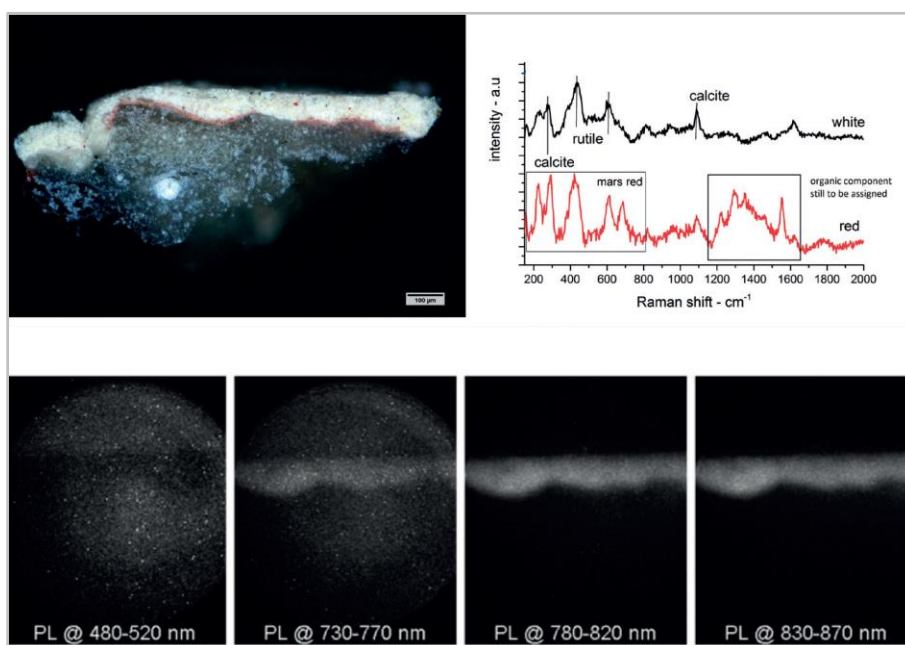
138. ábra - A titán-dioxid pormintákon, 355 nm-en végzett impulzusos lézergerjesztést követően kapott időfüggő fotolumineszcencia spektrumok nanoszekundumos (bal oldali panel) és mikroszekundumos (jobb panel) időskálán. Forrás: Annette Keller et al. 2019

Az anatóz alapú pigmenteket széles fotolumineszcencia emisszió jellemzi, amelynek központja a zöld régióban (G-PL) helyezkedik el, élettartama néhány nanoszekundum, valamint halvány vörös emisszió (R-PL) mikroszekundumos időskálán. Egy 850 nm körüli infravörös emissziós sáv használható az anatóz pigmentekben lévő rutilnyomok jelenlétének markereként.

18.6 Optikai mikroszkópos keresztmetszet csiszolatok elemzése – Mikro-mintaelemzés - titánfehér

A Wilhelm Geyer falfestményből vett rétegtani mikrominta anyagelemzésére TRPL mikroszkópiát és mikro-Raman spektroszkópiát alkalmaztak. A Raman esetében 785 nm-es lézergyjessztéssel, lehetővé téve az 50 mikrométer átmérőjű minta kiválasztott pontjainak elemzését. A TRPL-mikroszkópia ugyanazon impulzuslézeres gerjesztésen és időzített képdetektoron alapul, amelyet már fent bemutatásra került. A rendszer, kihasználva a detektálási útvonalban lévő változtatható szűrőtárcsa használatát is, lehetővé teszi a minta PL-emissziója térbeli eloszlásának spektrális és időtartam-érzékenységgel történő detektálását. Ezzel a megközelítéssel lehetővé válik a mikrominta PL-emissziójának több spektrumú, nanoszekundumos vagy mikroszekundumos időskálán történő vizsgálata.

A keresztmetszet csiszolat (139. ábra) egy fehér felső rétegből áll - amelyet Raman-spektroszkópia alapján kalcium-karbonátként (CaCO_3) azonosítottak, kisebb mennyiségű rutil tartalommal -, egy vékony vörös réteg felett, amely vasoxid vörösből (Fe_2O_3) és egy azonosítatlan szerves komponensből áll. Ezekkel az eredményekkel összhangban a TRPL-mikroszkópia a felső fehér rétegből mikroszekundumos időskálán megjelenő, 850 nm-en tetőző PL-emissziót mutat, ami a rutil jelenlétére utal.



139. ábra – polarizációs mikroszkópos VIS felvétel a rétegtani mikromintáról. A felső fehér rétegben (fekete görbe) és a vörös rétegben (piros görbe) felvett Raman-spektrumok. Alul a második sorban pedig, a mintában a 0,5 és 10 μs közötti időintervallumban detektált emisszió időgátolt PL-felvételeinek multispektrális adatsora. Forrás: Annette Keller et al. 2019

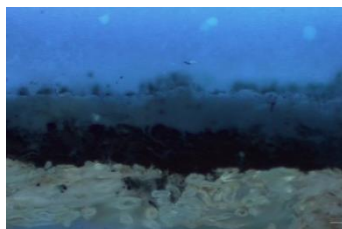
18.7 A modellkísérletek – titánfehér-rutil pigmentek

A referenciaként használt fehér pigmentek vizsgálata során, különböző analitikai módszerek alkalmazásával, a szakirodalmi példákhoz hasonló eredmények születtek. A korábbi fejezetekben bemutatott fehér mintasor többsávos képalkotással végzett vizsgálatát követően, a felfestett mintákon mintavétel után, a keresztmetszet csiszolatokon ismételt elkészültek a fototechnikai vizsgálatok. Emellett pXRF és mikro-XRF, valamint SEM-EDS mérések is készültek a kémiai összetétel meghatározására. A vizsgálatok kiegészítéseként visszaszórt elektronképeket (BSE) is rögzítettek a szemcsekarakter és a szemcseeloszlás tanulmányozásához. A részletes eredményeket a mellékletek tartalmazzák.

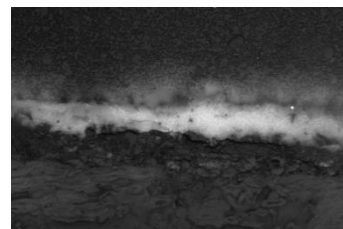
A műszeres analízisek igazolták, hogy a felhasznált minták összetétele megfelel a forgalmazók és egyéb beszerzési források által közölt adatoknak. A diffrakciós vizsgálatok megerősítették, hogy a többsávos képalkotással rutilként azonosított titánfehér minták valóban rutil kristályszerkezetűek. Egyetlen kivételt a szakirodalmi példában is említett Kremer #46200 pigment jelentett, amely a vizsgálatok során W5 kód alatt szerepelt, és nem mutatott infravörös lumineszcenciát. Ebben az esetben mind az XRF, mind a SEM-EDS vizsgálatok kiemelkedően magas szilíciumtartalmat jeleztek, ami alátámasztja azt a feltevést, hogy a pigment felületkezelt. Az 140-142. ábrák a referencia táblákból vett W10-es minta polarizációs mikroszkópos felvételeit mutatja be.



140. ábra - a W10-es pigmentmezőből vett minta keresztmetszet csiszolatáról készült VIS-R_VIS (pol) felvétel. Forrás: saját felvétel



141. ábra - W10-es pigmentmezőből vett minta keresztmetszet csiszolatáról készült VIS-L_UV₃₆₅ felvétel. Forrás: saját felvétel

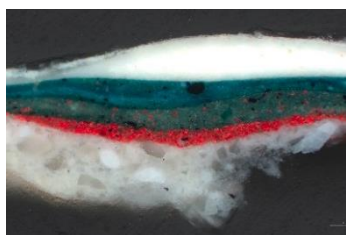


142. ábra - W10-es pigmentmezőből vett minta keresztmetszet csiszolatáról készült IR-L_UV₃₆₅ felvétel. Forrás: saját felvétel

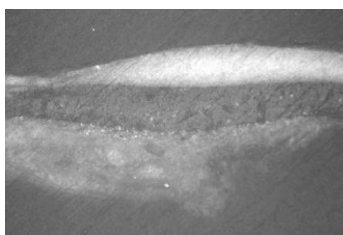
A referenciaanyagokon, laboratóriumi körülmények között végzett vizsgálatok többsége ideálisnak, illetve viszonylag egyszerűnek tekinthető. Ilyen esetekben általában ismert a vizsgált minta összetétele, és előre jelezhető az elvárt eredmény. Ezzel szemben egy ismeretlen tárgy laboratóriumi vizsgálata már számos nehézséget vethet fel. Éppen

ezért minden tárgyalt pigment és pigmentcsoport esetében célszerű olyan műtárgyas példát is bemutatni, amely szemléletesen igazolja a kutatás során alkalmazott és kidolgozott eljárások alkalmasságát. A korábbi bekezdésekben említett Rudnay-festményből származó keresztmetszet-csiszolat (Rud1) felvételei az 143-148. ábrákon láthatók.

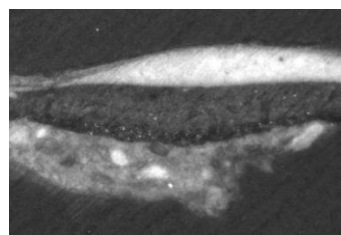
Az UvIrL felvételeken jól kivehető, hogy az eredeti vastag fehér réteg felett elhelyezkedő vékony, szintén fehér bevonat produkálja a lumineszcenciát, amely ilyen kis rétegvastagság mellett is jelentős fedőképességet mutat. Más képalkotási technikákkal a bevonat szürkés tónusban jelenik meg: mérsékelten elnyeli az ultraibolya és az infravörös sugárzást, ezért az UvR és IrP felvételeken középszürke. A látható tartományban – 365 nm-es ultraibolya és 440 nm-es kék fény gerjesztés hatására – nem mutatható ki egyértelműen lumineszcencia. Az összesített megfigyelések alapján a bevonat tulajdonságai egyértelműen titán-dioxid jelenlétére utalnak. Mivel ultraibolya sugárzás hatására az infravörös tartományban lumineszcencia is rögzíthető, kijelenthető, hogy a legfelső, retusált rétegben titán-dioxid rutil változata található.



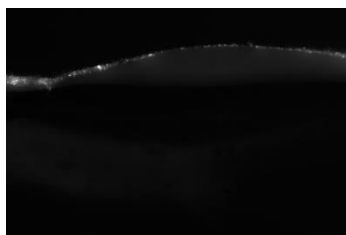
143. ábra – a „Rud1”-es minta keresztmetszet csiszolatának VIS-R_VIS (pol) felvétele (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



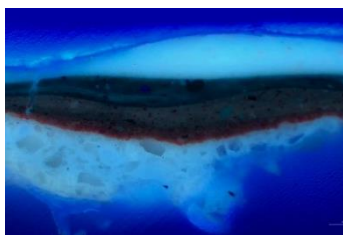
144. ábra – a „Rud1”-es minta keresztmetszet csiszolatának UV-R_UV₃₆₅ felvétele (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



145. ábra – a „Rud1”-es minta keresztmetszet csiszolatának IR-R_IR₈₅₀₋₁₀₀₀ felvétele (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



146. ábra – a „Rud1”-es minta keresztmetszet csiszolatának IR-L_UV₃₆₅ felvétel (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



147. ábra – a „Rud1”-es minta keresztmetszet csiszolatának VIS-L_UV₃₆₅ felvétel (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



148. ábra – a „Rud1”-es minta keresztmetszet csiszolatának VIS-L_BV₄₂₀ felvétele (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel

18.8 Az UVIRL alkalmazása titánfehér polimorfok megkülönböztetésére

18.8.1 Összefoglalás és perspektívák

A restaurátorok és természettudományos szakemberek interdiszciplináris együttműködésének eredményeként többsávos képalkotással lehetővé vált a titánfehér pigment (titán-dioxid) anatáz és rutil módosulatainak megkülönböztetése és eloszlásának vizsgálata. Annak tisztázása, hogy a jelenlegi adatok milyen mértékben segítik elő az anatáz azonosítását többsávos képalkotással, további vizsgálatokat igényel minél több, megfelelő pigmentációjú műtárgyon. Az eddigi eredmények azonban biztatóak és egyértelműeknek tűnnek.

A bemutatott tanulmányok és vizsgálatok alapján a „titán-dioxid” kifejezés túlságosan általános ahhoz, hogy pontosan meg lehessen fogalmazni a pigmentekre vonatkozó kérdéseket. A helyes kérdésfelvetés az anatáz és a rutil megkülönböztetésére kell, hogy irányuljon. A korai változat (1920-tól) főként anatáz típusú volt, egészen az 1940-es évekig, melyet ezt követően leváltotta a rutil változat. A szakirodalmi források szerint az anatáz változatban is előfordulhat kis mennyiségű rutil „szennyező”, de ez igaz fordított esetben is. A PL mérések alapján ultraibolya gerjesztés hatására az anatáz és a rutil változat is bocsájt ki látható tartományú sugárzást, ez előbbi zöld és vörös tartományban, az utóbbi a kékben. Ennek intenzitása azonban általában olyan gyenge, hogy klasszikus módon (fototechnikai eljárások) nehezen vagy egyáltalán nem kimutathatók. Viszont az NIR tartományban (850 nm-es csúccsal) csak a rutil változatnak van jelentős, jól kimutatható lumineszcenciája.

Figyelembe kell venni viszont, hogy az újabb pigmentek – optimalizált felületkezeléseiknek köszönhetően – más optikai tulajdonságokkal rendelkezhetnek, mint a korábbi gyártású változatok, így előfordulhat, hogy a bizonyított rutil kristályszerkezet ellenére egy vizsgált anyag kibocsátása nem detektálható.

A festékminták vizsgálatait azt is igazolták, hogy akár nagyon kis mennyiségű rutil-szennyeződés is elegendő jelentős infravörös lumineszcencia megjelenéséhez többsávos képalkotás során. Megjegyzendő viszont, hogy a titán-dioxid pigmentek nem az egyetlen fehér lumineszkáló anyagok (cinkfehérek gyenge NIR emissziója) az infravörös tartományban, ezért további széles körű vizsgálatok szükségesek más, IR-lumineszcenciát mutató anyagcsoportokra is.

A vizsgálatok igazolták, hogy a többsávos képalkotás alkalmas a különböző lumineszcenciával rendelkező területek azonosítására, amelyek összetétel béli különbségeit a szerzők spektroszkópiai elemzésekkel is alátámasztották. Végezetül megállapítható, hogy

a megfelelően kiválasztott analitikai módszerek kiegészítik és gazdagítják az anyagok lumineszcenciájával kapcsolatos ismereteket, elősegítve a nem invazív többsávos képalkotásból nyert adatok hasznos és hatékony értelmezését

19 A NIKKEL-TITÁN SÁRGA PIGMENTEK NIR TARTOMÁNYÚ LUMINESZCENCIÁJA^{101, 102}

A nikkeltitán sárga (más néven titán-nikkel-antimon-oxid, PY53 vagy C.I. 77788) egy mesterséges, szintetikus pigment melyet főként művészeti és ipari célokra fejlesztettek ki. Színe tiszta, hűvös, enyhén zöldes-sárga, tompább, mint a kadmiumok vagy a krómok. Opak és ezáltal jó fedőképességű. Stabil, magas olvadásponttal ($>1000^{\circ}\text{C}$), vegyszer- és lúgálló. Több tanulmányban esett már róla említés, hogy rendelkezik lumineszcens tulajdonsággal.

19.1 A nikkeltitán sárga pigment háttere röviden

Általában a következő összegképlettel írható le, $\text{NiO} \cdot \text{Sb}_2\text{O}_3 \cdot 20 \text{TiO}_2$ – titándioxid rutil polimorf, mátrixba beépülő nikkellel és antimonnal. A kristályrendszere a rutil struktúrára épül: Ti^{4+} helyén 2–5 % Ni^{2+} és 9–12 % Sb^{3+} található. Több forrás szerint nem csak rutil, hanem ilmenit-típusú struktúrája¹⁰³ is létezik.¹⁰⁴ Gyártása és elterjedése az 1950-60-as évekre tehető.

Előállítására nagy hőmérsékleten végbemenő kémiai szintézismódszeren (*solid-state* eljárás – szilárdállapotú szintézis) alapszik, ahol szilárd anyagokat száraz vagy nedves módszerrel elegyítenek, összekevernek, majd magas hőmérsékleten ($800\text{--}1300^{\circ}\text{C}$) hevítik (kalcinálják), melynek hatására kristályos fázis alakul ki. Ezt követően újra őrlik és szemcseméret alapján osztályozzák. Teljesen szintetikus anyag, nincs természetes előfordulása. Ahogy a fentiekben elhangzott, a titándioxid előfordul természetes formában, de a nikkellel és antimonnal dús keverék csak mesterségesen állítható elő.

A színárnyalatát a nikkellel (Ni) és az antimonnal (Sb) koncentráció növekedése befolyásolja. Magasabb Ni-tartalom esetén sárgásabb, narancsosabb tónus jellemzi, mivel a Ni^{2+} ion elektronátmenetei a látható tartományban erősebben elnyelik a kék-zöld fényt. Az alacsonyabb Ni-tartalom világosabb, hidegebb sárga tónust eredményez, néha zöldes

¹⁰¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%28II%29_titanate?utm_source=chatgpt.com

¹⁰² https://shop.kremerpigments.com/us/shop/pigments/43200-nickel-titanium-yellow.html?utm_source=chatgpt.com

¹⁰³ Az ilmenit (FeTiO_3) egy titán-vas-oxid ásvány, amely a titándioxid (TiO_2) egyik legfontosabb természetes kiindulási ásványa ipari feldolgozás során. Leggyakrabban magmás kőzetekben, főként gabbrókban és bazaltokban fordul elő, de metamorf kőzetekben és üledékekben is megtalálható. Fő ipari felhasználása a titándioxid gyártása pigmentként. Forrás: W. A. Deer, R. A. Howie, and J. Zussman, *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*, 2nd ed. (London: Longman, 1992). Az, hogy ilmenit struktúrában is létezhet, hogy ismert olyan vas-titanát melyben találtak nikkellel összetevőt a kristályba épülve, de nagyon ritka.

¹⁰⁴ G. A. Traistaru, "Synthesis and Characterization of NiTiO_3 and NiFe_2O_4 as Catalysts for Toluene Oxidation," *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures* 6, no. 3 (July 2011): 1257–65, https://chalcogen.ro/1257_Traistaru.pdf.

felhanggal. Az Sb^{3+} ion a kristályrácsban töltéskiegyenlítő szerepet játszik. Hatása közvetett: befolyásolja, mennyire jól integrálódik a Ni a TiO_2 rutil-mátrixába, ez az optikai átmenetek finomhangolását eredményezi.

19.1.1 A pigment fotofizikai tulajdonságai¹⁰⁵

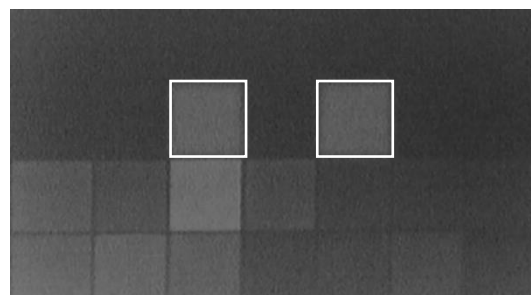
Mivel a nikkeltitán sárga pigmentek – továbbá a mangánkék is – 1100 nm-nél hosszabb hullámhosszon mutatnak lumineszcenciát, amelyet a hagyományos kamerák nem érzékelnek, egyedi gyártású LED-eket alkalmaznak gerjesztő forrásként, hogy a minták esetleges 1100–2200 nm közötti lumineszcenciáját is vizsgálni lehessen, speciális kamerákkal. A gerjesztőforrás maximális intenzitásának biztosítása érdekében a vörös, zöld és kék LED-eket egyidejűleg alkalmazzák.

Különösen figyelemre méltó, a 2015-ben Daveri, A., M. Vagnini, F. Nucera, M. Azzarelli, A. Romani, and C. Clementi. *"Visible-Induced Luminescence Imaging: A User-Friendly Method Based on a System of Interchangeable and Tunable LED Light Sources."* Microchemical Journal-ban megjelent kutatási anyag sárga próbatábláin vizsgált két szektora (Y10 és Y12), amelyekbe „krómsárga” (WINSOR&NEWTON 1. széria) és „citromsárga” (nikkeltitanát, WINSOR&NEWTON 2. széria) pigmentet festettek, szintén határozott lumineszcenciát mutattak. A 445 és 532 nm-es gerjesztéssel végzett spektrofluorimetriás mérések mindkét szektorban egy 1470 nm-es emissziós sávot és egy széles vállat mutattak kb. 1580 nm-nél, Az is megfigyelhető, hogy ez az emisszió nem érzékelhető a CCD kamerával, amelyet a látható tartományú lumineszcenciaképek rögzítésére használtak, mivel az emissziós jel az adott gerjesztési feltételek mellett teljesen laposnak tűnik. A röntgenfluoreszcenciás (XRF) vizsgálatok mindkét szektorban nikkelt, titán és antimon jelenlétét mutatták ki, míg a röntgendiffrakciós mérések rutilszerű szerkezetet igazoltak. Nyilvánvalóvá vált, hogy a „chrome lemon” felirat téves címkézés eredménye. A nikkeltitán sárga pigment valójában antimon-oxid, nikkeltitán-oxid és titán-dioxid együttes hevítésével előállított vegyület. A pigment szintézise során a kromofór-oxidokat (nem +4 oxidációs állapotban) oldják be a rutil kristályszerkezetbe. A tiszta titán-dioxid rutilszerkezetben nem mutat lumineszcenciát a látható tartományban történő gerjesztésre, viszont nikkelt és antimon adalékolásával lumineszcens tulajdonságokat szerez.

¹⁰⁵. Daveri et al. 2015.



149. ábra - a szakirodalmi példa a mintatábláról készült VIS-R_VIS felvétel. Forrás: A. Daveri et al. 2015)



150. ábra - IR-L_VIS felvétel, a fehérrel keretezett mezőkben a lumineszkáló nikkeltitán sárga pigmentmezők. Forrás: A. Daveri et al. 2015)

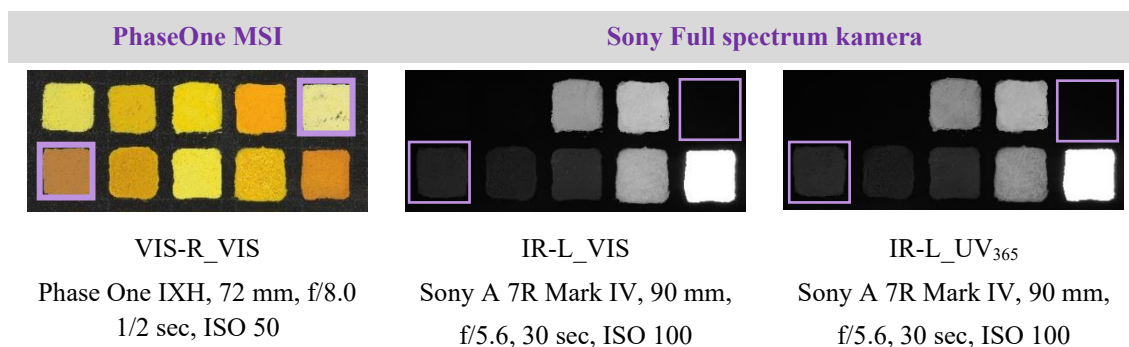
A lumineszcencia természetének pontosabb megértéséhez fotofizikai és szerkezeti vizsgálatok vannak folyamatban. Érdeemes megjegyezni, hogy bár gyengébben, de az említett 1100–2200 nm tartománybeli lumineszcencia egy keskenysávú LED-del végzett gerjesztés esetén is kimutatható képalkotással, ami azt jelzi, hogy a gerjesztő rendszer fényereje olyan nagy, hogy a lumineszcencia jele még egy Vidicon kamerával is érzékelhető.

19.2 Modellkísérletek – nikkeltitán pigmentek

19.2.1 Referenciatáblák vizsgálatai – nikkeltitán pigmentek

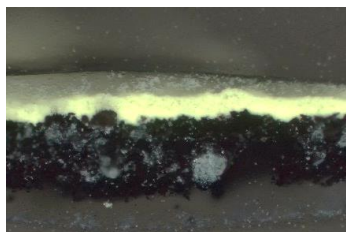
A kutatáshoz készült próbatáblákon elvégzett multispektrális vizsgálatok alkalmával az Y15-ös és az Y16-os mező esetében is tapasztalható volt gyenge lumineszcencia az UvIrL felvételeken. A 17. táblázat középső és jobb oldali képén, lilával keretezve láthatók az említett szektorok. A lumineszcencia jelenség amiatt érdekes, mert némileg ellentmond a fent említett szakirodalmi példáknak. Ugyanis a felvételkészítéshez használt kamera (Sony) érzékelője csak 1150 nm-ig érzékeny az NIR tartományban.

17. táblázat – A modellkísérletekhez készült mintatáblák többsávós felvételei. Forrás: saját táblázat és felvételek. Forrás: saját felvételek

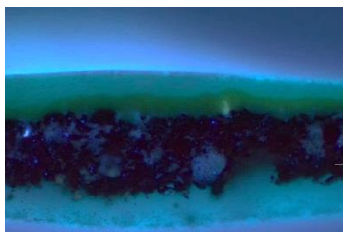


19.2.2 Optikai mikroszkópos keresztmetszet csiszolatok elemzése – Mikrominta-elemzés – nikkel-titán sárgák

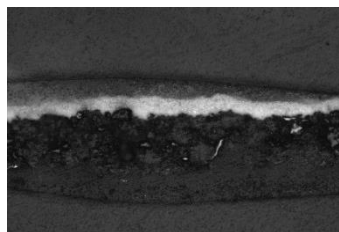
A szektorokból vett minták keresztmetszet csiszolatainak vizsgálata során a lumineszcens jelenség még egyértelműbben rögzíthető volt. Annak ellenére, hogy a Zeiss képalkotó egysége csak 1000 nm-ig érzékeny.



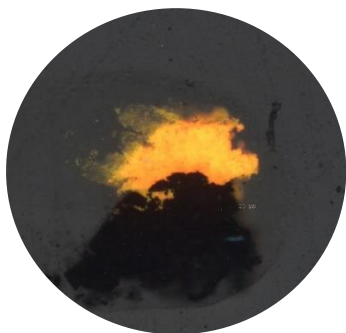
151. ábra - az Y15-ös mezőből vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-R_VIS (pol), (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



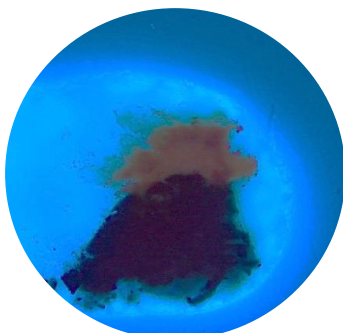
152. ábra - az Y15-ös mezőből vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-L_UV₃₆₅, (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



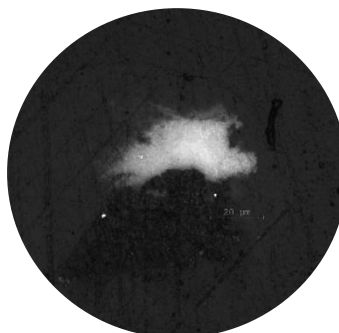
153. ábra - az Y15-ös mezőből vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, IR-L_UV₃₆₅, (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



154. ábra - Y16-os mezőből vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-R_VIS (pol), (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



155. ábra - Y16-os mezőből vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-L_UV₃₆₅, (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



156. ábra - Y16-os mezőből vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, IR-L_UV₃₆₅, (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel

Mind a két minta esetében a színréteg ugyanúgy intenzív lumineszcenciát mutat ultraibolya gerjesztés hatására. A pXRF vizsgálat az Y15-ös mintában titánt (Ti), antimon (Sb) és nikkelt (Ni) mutatott ki, az Y16 esetében a nikkelt, a króm (Cr) váltotta fel¹⁰⁶. A SEM-EDS vizsgálat hasonló arányban hozta ugyanezt az eredményt. Az XRD pedig mindkét esetben a nikkel-titán-sárgának megfelelő spektrumot mutatta.

¹⁰⁶ Titán sárga/Króm-rutil sárga szinonima, változat vagy közhasználatú megnevezés. A króm-rutil sárga pigmenteket a *Colour Index* (1971; CI 77310 / Pigment Brown 24) írja le, és tipikus összetételük $Ti_{0.90}Sb_{0.05}Cr_{0.05}O_2$. A részecskemérettől függően a szín a világostól a közép okker árnyalatig változhat. Forrás: Estaugh et al. 2004.

Az eredmények alapján a nikkeltitán sárgák további vizsgálata mindenképp javasolt, annak érdekében, hogy közölt módon a detektált rövidebb hullámhosszú lumineszcenciára magyarázat születhessen.

19.3 Összefoglalás

A nikkeltitán sárga (más néven titán-nikkel-antimon-oxid, Pigment Yellow 53, C.I. 77788) egy teljes mértékben mesterségesen előállított pigment, amelyet művészeti és ipari célokra egyaránt fejlesztettek ki. Színe tiszta, enyhén zöldes árnyalatú sárga, amely tompább a kadmium- és krómsárgákhoz képest, ugyanakkor opak, jó fedőképességű, kémiaiilag stabil és vegyszerálló. Kristályszerkezete a titándioxid rutil polimorfjára épül, amelybe nikkel és antimon épül be. A pigment előállítása magas hőmérsékletű szilárdfázisú szintézissel történik, természetes előfordulása nincs. A színárnyalatot a Ni és Sb koncentrációja határozza meg: magasabb nikkel-tartalom narancsosabb tónust, alacsonyabb koncentráció hidegebb, zöldesebb árnyalatot eredményez.

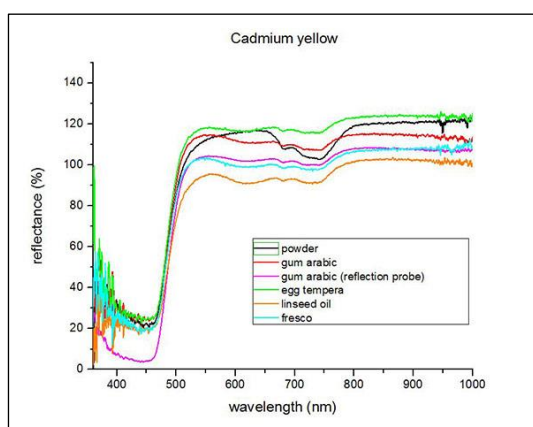
Fotofizikai tulajdonságai közül kiemelkedő, hogy 1100 nm feletti hullámhosszon gyenge, 1500 nm már erős infravörös lumineszcenciát mutat, amelyet hagyományos kamerák nem képesek detektálni. Ennek vizsgálatához speciális, nagy intenzitású LED-es gerjesztőforrásokra és NIR-érzékeny kamerákra van szükség. A szakirodalomban több tanulmány kimutatta, hogy a pigment adalékolásának köszönhetően a rutil mátrix lumineszcens tulajdonságokra tesz szert, amelyeket tiszta TiO_2 önmagában látható tartományú fény hatására nem mutat. Például Daveri és munkatársai (2015) spektrofluorimetriás vizsgálatokkal 1470 nm körüli emissziós sávot, valamint 1580 nm-nél egy széles emissziós vállat azonosítottak nikkeltitán sárga pigmentekben. A mérések megerősítették, hogy a lumineszcencia közvetlen összefüggésben áll a Ni és Sb beépülésével a TiO_2 rutil kristályrácsába.

A modellkísérletek során készült próbatáblák vizsgálata megerősítette, hogy a pigment UvIrL felvételeken is lumineszcens jelenséget mutathat, még akkor is, ha a felhasznált képalkotó rendszerek elvileg csak 1000–1150 nm-ig érzékenyek és a gerjesztő sugárforrás spektruma sem illeszkedik a szakirodalmi példához. Az Y15 és Y16 jelű minták keresztmetszeti csiszolatainál a lumineszcencia szintén jól megfigyelhető volt. Az elemalanalitikai vizsgálatok (pXRF, SEM-EDS) titán, antimon és nikkel jelenlétét mutatták ki az egyik mintában, míg a másikon a nikkelt részben króm helyettesítette. Az XRD mérések mindkét esetben nikkeltitán sárga spektrumát igazolták.

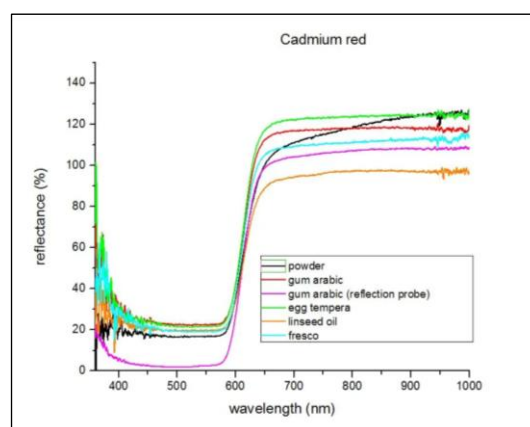
Az eredmények összességében azt mutatják, hogy a nikkel-titán sárga pigmentek infravörös lumineszcenciája összetett jelenség, amelynek pontos mechanizmusa még nem teljesen tisztázott. Az adatok arra utalnak, hogy az adalékolt rutil szerkezetben fellépő elektronátmenetek felelősek a megfigyelt emisszióért, de a jelenség egyes körülmények között – alacsonyabb hullámhosszon – is detektálható. Ez indokoltá teszi a pigment további vizsgálatát, különösen a lumineszcencia pontos mechanizmusának feltárása és a különböző összetételű változatok összehasonlítása érdekében.

20 KADIUM TARTALMÚ PIGMENTEK NIR TARTOMÁNYÚ LUMINESZCENCIÁJA¹⁰⁷

A kadmium pigmentek szinte folyamatos árnyalatokat adnak a hideg sárgától egészen, a szinte már barnás mélyvörösig, mindezt magas szintelítettséggel, jó fedőképességgel és kiváló stabilitással. Széles színválasztékuk és szinte jellegtelen reflexiós spektrumaik megnehezítik a gyakorlati azonosításukat reflexiós spektrumok, azaz az infravörös, az ultraibolya és a látható tartományú reflexiós felvételek elemzésével és összehasonlításával. Emiatt is nagyon hasznos, hogy különböző gerjesztések következményeképpen lumineszkálásra képesek, mind a látható, mind pedig az infravörös tartományban egyaránt.



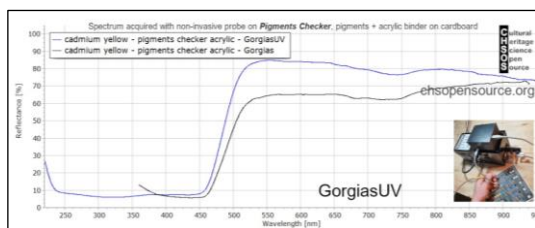
157. ábra - a Kadmium sárga pigment reflexiós görbéi, különböző kötőanyagban mérve. Forrás: Antonio Consentino 2014



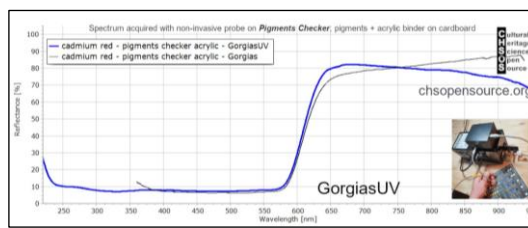
158. ábra - Kadmium narancs/vörös pigment reflexiós görbéi, különböző kötőanyagban mérve. Forrás: Antonio Consentino 2014

Az 157-158. ábrákon jól látható, hogy kötőanyagtól függetlenül erős a reflexiójuk a látható tartományban és a közeli (NIR) infravörösben egyaránt. A kadmium sárga látható reflexiós görbéje meredeken indul el 460 nm-nél, a vörös pedig valahol 580 nm körül. Magas intenzitásig halad, majd ki is tart sokáig. Ultraibolya tartományban már ellenkező a helyzet, jelentős elnyelést produkálnak minden esetben (159-160. ábrák). Itt szükséges megjegyezni, hogy nem véletlenül készítik az ultraibolya és kék szűrésre is alkalmas színszűrőket kadmium sók felhasználásával (erről részletesebben a 11. fejezet szolt).

¹⁰⁷ Mathieu Thoury, John K. Delaney, E. René de la Rie, Michael Palmer, Kathryn Morales, and Jay Krueger, "Near-Infrared Luminescence of Cadmium Pigments: In Situ Identification and Mapping in Paintings," *Applied Spectroscopy* 65, no. 9 (2011): 936–43, <https://doi.org/10.1366/11-06399>.



159. ábra – A kadmiumsárga pigmentek reflexiós görbéi kötőanyag nélkül. Forrás: www.chopenso-urce.org 2025.08.24.



160. ábra - A kadmiumvörös pigmentek reflexiós görbéi kötőanyag nélkül. Forrás: www.chopenso-urce.org 2025.08.24.

A kadmium pigmentek félvezetőként viselkednek, szennyezőik és/vagy kristályhibáik következtében a látható és az infravörös tartományban egyaránt kibocsátást mutatnak, amely gyakorlatilag a vörös színtől a közeli infravörös tartomány végéig terjed. A jelenség részletes kémiai és fizikai magyarázata túlmutat a jelen értekezés keretein, ezért itt bizonyított tényként kerül közlésre, anélkül, hogy annak mélyebb okai kifejtésre kerülnének. A szakirodalmi adatokkal összhangban a jelen kutatás során is több különböző kadmiumtartalmú pigment vizsgálata történt meg, beleértve a kadmium-szulfidot (CdS_x), a kadmium-cink-szulfidot ($\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$) és a kadmium-szulfoszelenidet ($\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$). Ezek a változatok színükben a halvány sárgától a narancson át egészen a sötétvörösig terjednek. A fejezet végén bemutatásra kerül két műtárgyas példa is, amely kadmiumtartalmú festéket hordozó rétegek vizsgálatát szemlélteti.

20.1 A kadmium pigmentek háttere röviden

Annak ellenére, hogy 1817-ben Stromeyer (Mathieu Thoury et al. 2011) felfedezte és javasolta őket pigmentnek, a kadmiumvegyületeket csak az 1840-es évek közepén hozták forgalomba és nagyobb léptékű gyártásuk, majd csak több, mint 100 év múlva az 1920-as években kezdődött el és tart mindmáig. Először a kadmium sárga (kadmium-szulfid – CdS) volt elérhető, ezt követték a narancsok és majd 1910 után a vörösek (kadmium-szulfoszelenidek – CdSSe), legutolsóként az kadmium-zöld, ami tulajdonképpen nem tiszta pigment, hanem kadmium sárga és valamilyen kék (leggyakrabban ftalocianin kékkel keverve, melyhez dúsítóként bárium-szulfátot is adnak) keveréke.

A természetben előforduló kadmium-szulfiddal két kristályos formában találkozhatunk, az egyik a hatszögletű Greenockit és a szabályos rendszerű Hawleyite néven ismert köbös forma. Egy harmadik nem kristályos fajta, egy amorf fázis csak kémiai szintetizált termékben létezik.¹⁰⁸



161. ábra A Greenockite ásvány.

Forrás:

<https://rruff.info/Greenockite/R070017>

2025.08.26.



162. ábra - A Greenockite ásvány.

Forrás:

<https://rruff.info/Greenockite/R070017>

2025.08.26.



163. ábra - A Hawleyite ásvány.

Forrás:

<https://rruff.info/Hawleyite>

2025.06.01

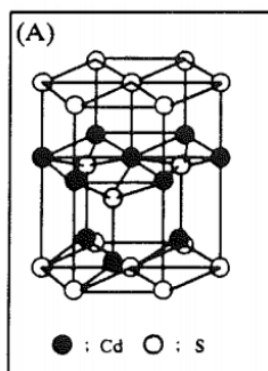


164. ábra - A Hawleyite ásvány.

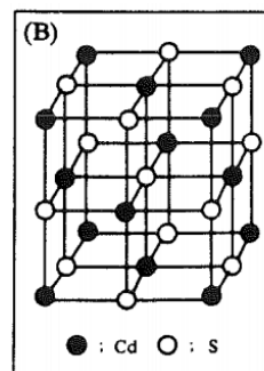
Forrás:

<https://rruff.info/Hawleyite>

2025.06.01.



165. ábra - A Greenockite hexagonális kristály rajza. Forrás: <https://www.911metallurgist.com/blog/bioleaching-cadmium/> 2025.03.12.



166. ábra – A hawleyite köbös kristály rajza. Forrás: <https://www.911metallurgist.com/blog/bioleaching-cadmium/> 2025.03.12.

Winsor and Newton 1851-ben dobta piacra első kadmium sárga pigmentjét, amit követően lassan növekedett a gyártók katalógusaiban elérhető árnyalatok száma. 1920-

¹⁰⁸ Amorfn CdS – nem kristályos, rendezetlen szerkezetű forma, amely kizárólag szintetikus eljárással előállított termékekben fordul elő. A harmadik, amorfn fázis kizárólag szintetikusn előállított kadmium-szulfid termékekben létezik. Ez a forma nem fordul elő természetes ásványként, és kémiai úton történő pigmentgyártás során keletkezik – főként alacsony hőmérsékleten történő kicsapódásos szintézis során, amikor a CdS nem tud kristályos szerkezetbe rendeződni. Ez az amorfn forma különösen érdekes lehet lumineszcencia-szempontról, mivel a rendezetlenség és a hibák jelenléte befolyásolhatja a fotolumineszcens tulajdonságokat – például a gerjesztési és emissziós spektrumot, illetve az élettartamot is.

ban Bayer egy olyan ipari eljárást szabadalmaztatott a kadmium sárga világosabb árnyalatainak előállítására melyet bárium-szulfát (BaSO_4) hozzáadásával valósítottak meg. 1927-re ezek az úgynevezett kadmium-litopónok, amelyek kadmium-szulfid és bárium-szulfát, valamint néha cink-szulfid (ZnS) fizikai keverékből állnak, ezekkel a gyártók nagy mértékben kibővítették az elérhető színárnyalatok és telítettség tartományát.

Hasonló fejlődés figyelhető meg a kadmium vörös és narancs esetében. Egy német szabadalom 1892-ben írta le először a kadmiumvöröset, amely $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ vegyes kristályokból áll. A kadmium alapanyag szélesebb körű elérhetőségét kihasználva a kadmiumvörösek 1910-ben váltak elérhetővé, mint művész-pigmentek, és így a következő évtizedekben a narancstól a mélyvörösre terjedő paletta állt az alkotók rendelkezésére. 1955-ben a kadmium-higany-szulfidot (CdSHgS) is forgalomba hozták, de ez azóta – a higany tartalom okán – már kivonták.

20.2 A bulk¹⁰⁹ kadmium szulfid és kadmium-szelenid fotofizikai tulajdonságai

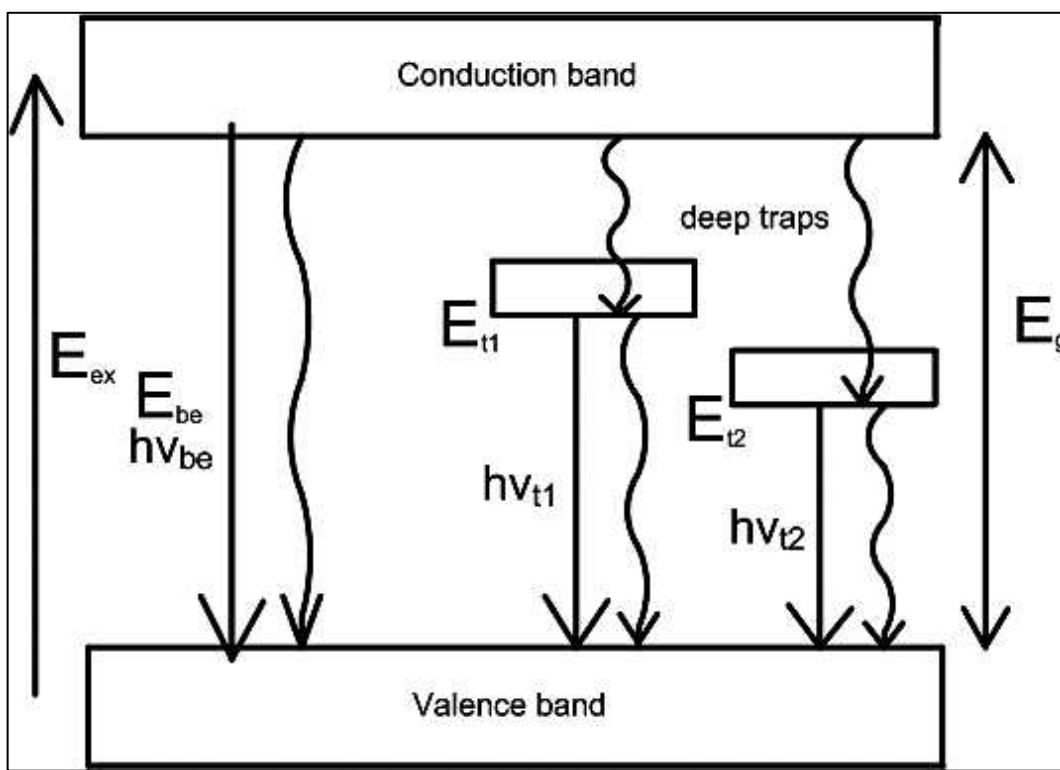
A CdS és CdSe kristályok fotofizikai tulajdonságai jól ismertek. A CdS és a $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ a IIb–VIb csoportokba tartozó félvezetők, amelyek az periódusos rendszer 12-es csoportjába tartozó egy vagy több elemből, úgymint a kadmium és a cink, valamint a 16-os csoportba tartozó kalkogén¹¹⁰ elemekből, úgymint a szelén és a kén, épülnek fel. A II–VI vegyületek közvetlen átmeneti típusú félvezetők, és széles tiltott sávval¹¹¹ (*bandgap*) rendelkeznek, úgynevezett szélessávú félvezetők. A tiltott sáv (*bandgap*) a vegyértéksáv (*valence band*) teteje és a vezetési sáv (*conduction band*) alja közötti energiakülönbség (E_g). A tömbi kristályok esetében a CdS tiltott sávja 2,42 eV (512 nm), míg a CdSe esetében ez 1,74 eV (712 nm) (Mathieu Thoury et al. 2011).

¹⁰⁹ A *bulk* kifejezés az anyag tömbi, nagyléptékű állapotára utal, amelyben a részecskék vagy kristályok mérete elég nagy ahhoz, hogy a felületi hatások elhanyagolhatóak legyenek, és a tulajdonságokat a kristályrács egészének viselkedése határozza meg (szemben a nanoméretű vagy vékonyrétegű formákkal). Peter W. Atkins és Julio de Paula, *Fizikai kémia*, ford. Császár Attila (Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó, 2003), 742.

¹¹⁰ A kalkogének a periódusos rendszer 16. főcsoportjába tartozó elemek (oxigén, kén, szelén, tellúr, polónium), melyek gyakran képeznek vegyületeket fémekkel és félvezetőkkel. László Fodor, *Szervetlen kémia* (Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó, 1999), 254.

¹¹¹ A sávhézag/tiltott sáv (*bandgap*) a félvezetők és szigetelő elektronikai szerkezetében a vezetési és a vegyértéksáv közötti energiarés, amely meghatározza az anyag elektromos és optikai tulajdonságait. Attila Császár és Miklós Tóth, *Modern fizikai kémia* (Budapest: ELTE Eötvös Kiadó, 2011), 312. A két kifejezés közül a „sávhézag” az elterjedtebb a fizika- és anyagtudományi szakirodalomban, míg a „tiltott sáv” inkább didaktikusabb, tankönyvi használat.

A CdS és CdSe tömbkristályok egyszerűsített energiadiagramja az 167. ábrán látható, amely szemlélteti azokat a fotofizikai folyamatokat, melyek akkor következnek be, amikor ezeket a pigmenteket besugározzák.



167. ábra - Egyszerűsített energiadiagram a kadmium-szulfid (CdS) és kadmium-szelenid (CdSe) tömbi kristályaihoz. Az E_g a tiltott sáv energia-különbsége a vegyértéksáv és a vezetési sávok között. Az E_{be} a tiltott sáv kibocsátási energiájának felel meg. Az E_{t1} és E_{t2} az energia-különbségek a vegyértéksáv és a kristály hibák által indukált csapdaállapotok között, amelyekből sugárzó dekadencia történhet. A sugárzó dekadenciát szilárd vektorok reprezentálják, míg a nem sugárzó dekadenciát hullámvonalak jelölik. Forrás: Mathieu Thoury et al. 2011

A sugárzó folyamat vörös és közeli infravörös tartományban lumineszcenciát eredményez, amelynek oka az alábbi tulajdonságokon alapszik. A fényabszorpció (E_{ex}) során egy elektron a vegyértéksávból (*valence band*) a vezetési sávba (*conduction band*) kerül, és egy lyukat hagy maga után. Ez az elektron-lyukpár vagy sugárzásmentesen vagy sugárzó módon, a tiltott sáv energiaszintjénél valamivel alacsonyabb energiával kibocsátott fény (emisszió) révén rekombinálódik. Az ilyen kibocsátást tiltott sáv-emissziónak nevezzük (E_{be}). Azonban, amikor kristályhibák, felületi hibák vagy szennyeződések vannak jelen, a vezetési sáv alatt „csapda” állapotok keletkeznek, amelyekbe az elektronok a vezetési sávból nem sugárzó módon (sugárzásmentesen) átvándorolhatnak. Az ilyen csapdaállapotok alacsonyabb energia-különbséggel rendelkeznek a vegyértéksávban lévő

sávhoz képest, mint a vezetési sáv. Ezekben a csapdaállapotokban az elektronok rekombinációja a lyukakkal nem sugárzó vagy sugárzó módon történhet. A sugárzó folyamat lumineszcenciát eredményez a vörös és a NIR (közeli infravörös) tartományokban (E_{t1} és E_{t2}). A tiltott sáv-emisszió és a csapda-emisszió hozama várhatóan változhat a csapdák számától és típusaitól, valamint az egyszerre lejátszódó, kompetitív sugárzó és sugárzásmentes folyamatoktól függően.

A CdS és CdSe tömbi kristályokkal végzett vizsgálatok legalább két közeli infravörös kibocsátási (emissziós) sávot mutattak, amelyek a fent vázolt elektroncsapdákhoz kapcsolódnak, a tiltott sáv lumineszcencia (E_{t1} és E_{t2}) mellett. Ezen állapotok pontos eredete még nem lett véglegesen tisztázva, de úgy gondolják, hogy ezek rácshibákból, a felületen lévő szabad vegyértékű kötésekéből (szabad gyökökből), csapdákban és elektronakceptor anyagokból állnak. A felületpassziváció egy jól ismert technika a csapda-emisszió megszüntetésére.

20.2.1 Kadmium nanodotok¹¹²

Az elmúlt tizenöt évben a kutatók a nanoméretű CdS és CdSe kristályok, valamint más félvezetők abszorpciós és lumineszcenciás tulajdonságaira összpontosítottak, hogy olyan anyagokat fejlesszenek, amelyek magas kibocsátási hozammal rendelkeznek és széles színskálán (kék-től a vörösig) képesek kibocsátani fényt. A CdS és CdSe nanokristályoknál a lumineszcencia színét a szemcseméret szabja meg. Ha a szemcse mérete kisebb, mint az *exciton* Bohr-sugara¹¹³, akkor a kvantummechanikai bezártság miatt a tiltott sáv (*bandgap*) megnövekszik, így a kibocsátott fény kékebb tartományba tolódik. Ez, kombinálva a nanodotok felületének passziválásával, amelyet magas tiltott sávú anyagokkal végeznek, szintén megszüntette azokat a csapdaállapotokat, amelyek a közeli infravörös lumineszcenciát okozzák. A nanodotokat magas tiltott sávú, félvezető anyagokkal „burkolják be”, hogy passziválják a felületen lévő rácshibákat. Amikor az ilyen nanodotok be vannak burkolva, a tiltott sáv-lumineszcencia hozama növekszik, és a közeli infravörös (NIR) kibocsátási sávok eltűnnek. Néhány művészpigment esetében a

¹¹² A nanodot néhány nanométer méretű, kvázirészecskeként viselkedő, többnyire gömbszerű nanostruktúra, amely kvantummechanikai tulajdonságai miatt gyakran a kvantumpont (quantum dot) szinonimájaként szerepel. Forrás: Charles P. Poole Jr. és Frank J. Owens, *Nanotechnology: Fundamentals and Applications* (New York: Wiley, 2003), 145.

¹¹³ Az exciton Bohr-sugár az az átlagos távolság egy félvezetőben a gerjesztett elektron és a vele kötött állapotban lévő lyuk között. Ha a nanorészecske mérete kisebb ennél a sugárnál, kvantumbezártság lép fel, amely megnöveli a sávhézagot és eltolja az emisszió színét. Forrás: Louis Brus, „Quantum Crystallites and Nonlinear Optics,” *Applied Physics A* 53, no. 6 (1991): 465–474.

szemcseméret ennek köszönhetően szerepet játszhat azok szín- és lumineszcencia tulajdonságaiban, tehát az egyes esetekben tapasztalt lumineszcencia hiány lehet ennek köszönhető.

Ebben a munkában a kadmium szemcséket vagy tömbi kristályokként vagy nanoszemcséként említik, előbbinél a szemcseméret nem befolyásolja a szín- és lumineszcencia-tulajdonságokat, az utóbbinálviszont a szemcseméret kulcsfontosságú tényező.

20.2.2 Korábbi tanulmányok a kadmium pigmentek lumineszcenciájáról

A kadmium pigmentek lumineszcencia tulajdonságaira vonatkozó tanulmányok többségét por és kész festék formájú mintákon is elvégezték már, különféle gerjesztőforrások és detektorok segítségével. A CdS ásványi Greenokit NIR-kibocsátásáról először 1958-ban számoltak be. Egy másik korai publikáció a kadmium pigmentek 700–900 nm-es tartományban történő kibocsátását írta le, amely akkor fordul elő, amikor kék/zöld tartományba eső sugárzással gerjesztve, az emissziót infravörös fényképezőfilmmel rögzítik. Miyoshi leírta¹¹⁴ a kadmiumvörös és sárga pigmentek lumineszcenciáját mind por formában, mind száradó olajban diszpergálva, 337,2 nm-en (UV) gerjesztve. A por alakú kadmium sárga és kadmiumvörös pigmentek lumineszcencia spektruma emissziós sávot mutatott 520 nm-nél, illetve 605 nm-en, amelyek a tiltott sáv emisszióinak tulajdoníthatók, tekintettel a sávok szűk mivoltára (25-35 nm). Az olajos közeggel kevert kadmium pigmentek esetében az emisszió kiszélesedését figyelték meg a por formához képest, 40, illetve 60 nm szélességben a kadmium sárga és vörös esetében is. Ekkor még nem írtak le NIR emissziós sávokat, bár nem világos, hogy megpróbálták-e megkeresni őket. Később 680 és 710 nm közötti emissziós maximumokról számolnak be a kadmiumsárga porok esetében, amelyek változatai a zöldes-sárgától a mélysárgáig terjednek, és a 715 és 740 nm közötti emissziós maximumokat a kadmiumnarancs és a kadmiumvörös esetében, mindezt 365 nm-en gerjesztve.

Egy másik vizsgálatot spektrális lumineszcencia képalkotást alkalmazva UV gerjesztéssel, lenolajban és tojás temperában lévő sárga és vörös kadmium pigmenteken végeztek. Ez a vizsgálat a kadmium pigmentek két lumineszcencia sávját mutatta ki 640 és 820 nm körüli hullámhosszon. Egy in situ lumineszcencia mérés pedig, egy Piet Mond-

¹¹⁴ T. Miyoshi, M. Ikeya, K. Shuichi, and K. Takashi, "Luminescence of Cadmium Red and Yellow Pigments Excited by 337.2 nm UV Radiation," *Japanese Journal of Applied Physics* 21 (1982): 1032.

rian festményen, szálspektrométerrel, 700 nm-en maximum emissziós sávot adott a kadmium sárga pigmentekből, amelyekről az XRF-analízis szerint CdS vagy Cd_xZn_{1-x}S pigmentek lehetnek.¹¹⁵

Újabban már kalibrált lumineszcencia képalkotó spektroszkópiát használnak a kadmiumsárga felhasználásának azonosítására és feltérképezésére, melyet például Pablo Picasso 1924-es Harlequin Musician festményén is alkalmaztak.¹¹⁶

Így a korábbi publikációk többsége vörös színű látható és közeli infravörös emisszióról számolt be, még akkor is, ha a legtöbb esetben ezeknek a kibocsátásoknak a pontos eredete nem volt kifejezetten ellenőrzött.

20.3 A kadmimpigmentek színének eredete

A kadmimpigmentek színárnyalatát feltehetően három fő paraméter szabályozza: az egyes szemcsék mérete, az aggregáció mértéke és a kémiai összetétel. E három paraméter relatív jelentőségének meghatározására a kadmimpigmentek színére vonatkozóan több vizsgálatot végeztek.

20.3.1 Szemcse és aggregátumméret

A CdS és CdSe kristályok tiltott sáv szélessége ismert módon a méret hatására változik az excitonok¹¹⁷ kvantum-bezártasága¹¹⁸ révén, amikor a tömbi anyag mérete csökken és megközelíti a fotogerjesztett elektron-lyuk pár Bohr-átmérőjét, amely CdS esetén 5,6 nm, míg CdSe esetén 10,8 nm. E méretek alatt a tiltott sáv energiája (szélessége) növekszik, ami a reflexió (fényvisszaverődés) átmenetet rövidebb hullámhosszú tartományokba helyezi. Így a művészpigment részecskék színét ezen méretek alatt a méretbeli viszonyok okozhatják, nem pedig a dőpolással (idegen, szennyező anyag/atom szándékos bevitele)

¹¹⁵ C. Miliani, A. Sgamellotti, K. Kahrim, B. G. Brunetti, A. Aldrovandi, M., R. van Bommel, K. J. van den Berg, and H. Janssen, "MOLAB. A Mobile Facility Suitable for Non-Invasive In-Situ Investigations of Early and Contemporary Paintings: Case Study – *Victory Boogie Woogie* (1942–1944) by Piet Mondrian," in *IIC Committee for Conservation 15th Triennial Meeting* (New Delhi, 2008), 857.

¹¹⁶ J. K. Delaney, J. Zeibel, M. Thoury, R. Littleton, M. Palmer, K. Kathryn, E. R. de la Rie, and A. Hoenigswald, "Visible and Infrared Reflectance Imaging Spectroscopy (RIS) for Mapping Pigments in Paintings," *Applied Spectroscopy* 64, no. 6 (2010): 584–94.

¹¹⁷ Az exciton egy kvázirészecske, amely egy gerjesztett állapotban lévő elektron és a vele Coulomb-kölcsönhatásban lévő lyuk kötött állapotát jelenti félvezetőkben, szigetelőkben vagy nanostruktúrákban. László Fodor, *Szervetlen kémia* (Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó, 1999), 411.

¹¹⁸ A kvantumbeszűrés (quantum confinement) az az effektus, amikor az exciton térbeli mozgása a nanostruktúra (pl. kvantumpont, nanorúd vagy nanohuzal) mérete miatt korlátozott, így az energiáját és optikai tulajdonságait már nem a tömbi anyag (bulk), hanem a részecske mérete és alakja határozza meg. Forrás: Charles P. Poole Jr. és Frank J. Owens, *Nanotechnology: Fundamentals and Applications* (New York: Wiley, 2003), 151–153.

kiváltott energetikai változása a tiltott sávnak. Azok az aggregátumok, amelyek mérete kisebb, mint a látható tartomány hullámhossza, szintén képesek lehetnek a színt módosítani fényelnyelés által. Ilyen méretek esetén a szín a vörös felé tolódik. A méret hatását vizsgálva, egy világos vörös kadmium pigment szemcseméretét meghatározták pásztázó elektronmikroszkópiával (SEM). A pigment por alakú, bevonat nélküli, diszpergált mintáját (Conservation Materials Ltd.) változó nyomású beállítások mellett és visszaszórt geometriában elemezték. A SEM-mel kapott visszaszórt elektron képek aggregátumokat mutattak, amelyek mérete 100 nm és 1000 nm között változott.

Az aggregátumok legkisebb szemcséje, amelyet megbízhatóan lehetett mérni, körülbelül 80 nm volt, bár a képek arra utaltak, hogy kisebb szemcsék is jelen vannak. A pigment szemcsék valódi méretének meghatározásához transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálatok (TEM) szükségesek. Mindazonáltal ezek a megfigyelések arra utalnak, hogy a fényelnyelés befolyásolhatja a szín világosságát, bár arra vonatkozóan nem találtak bizonyítékot, hogy a szín változását a kvantum-bezártág befolyásolja.

20.3.2 Kémiai összetétel

A szín és az elemi összetétel közötti kapcsolat meghatározása érdekében röntgenfluoreszcencia-elemzések (XFR) készültek az összes sárga, narancssárga és vörös kadmiumpigmenten. Ahogy arról a mintatáblák elkészítésének leírásánál szó volt a porminták PVB kötőanyaggal lettek felfestve, csontfekete (CaPO_3) alapozásra, legalább 2 rétegben. A mintavételek után az optikai mikroszkópos vizsgálatok során elvégzett mérések alapján kijelenthető, hogy 200-300 mikrométer vastagságú rétegekről van szó.

A sárga reflexiós tartományba eső pigmentek esetében minden vizsgált mintában cinket, kadmiumot és ként mutattunk ki, és néhány mintában jelentősebb mennyiségű bárium és kalcium is jelen volt. Ezek az eredmények arra utalnak, hogy ezekben a sárga mintákban az elsődleges pigment CdS vagy $\text{Cd}_{x-1}\text{Zn}_x\text{S}$. Mivel azonban ezek a kereskedelmi minták valószínűleg némi fehér pigmenteket is tartalmaznak, azaz BaSO_4 , ZnO , ZnS vagy litopónt (ZnS , BaSO_4), esetleg titánfehéret (TiO_2) nem lehet közvetlen következtetéseket levonni a CdS -kristályban lévő Zn jelenlétére vonatkozóan.

A mélyebb sárga reflexiós tartományba eső kadmiumsárgák esetében minden mintában nyomokban szelént (Se), valamint kadmiumot (Cd) és ként (S), néhány mintában pedig báriumot (Ba) és cinket (Zn) került kimutatásra.

A narancssárgától a mélyvörösre terjedő pigmenteknél a kadmiumot (Cd), kék (S) és báriumot (Ba) mellett nagyobb mennyiségű szelént (Se) azonosítottunk; néhány mintában elenyésző mennyiségű cinket (Zn) és kalciumot (Ca) is találtunk. Ezek az eredmények arra utalnak, hogy a kristály szelén-koncentrációjának növelése a színt a vörös felé tolja el, ami összhangban van az irodalommal. A szakirodalom szerint a zöldessárga színárnyalatok oka, hogy a kadmium-szulfid (CdS) rácshoz cink társul, akár 25%-os arányban. A jelen kutatás során nem volt lehetőség olyan vizsgálatokra, ami szerkezetileg tisztázta volna a pontos összetételt. Ennek ellenére $Cd_xZn_{1-x}S$ jelenlétére következtítettünk, mert az élénk, zöldes-sárga minták mindig tartalmaztak jelentős mennyiségű cinket. A pontos mérési eredmények a mellékletekben összefoglalva olvashatók.

20.3.3 A por alakú kadmium pigmentek fotofizikai tulajdonságainak jellemzése

A tanulmányok először gyakran por alakban vizsgálják a minták reflexiós és emissziós tulajdonságait, számolva azzal, hogy ezek a jellegzetességek a kötőanyaggal elegyített pigmentek esetén változhatnak, eltolódhatnak.

Ezen vizsgálatok általános tapasztalataként elmondható, hogy a kadmium pigmentek jellemzően 3 emissziós sávot mutatnak. Erről a legtöbb szakirodalom egyetértésben számol be. Egy sáv a látható tartományban 580-590 nm-nél (vörös) és kettő a közeli infravörös tartományban helyezkedik el, jellemzően 830-860 és 1100 nm-nél.

Annak megállapítására, hogy a 3 emissziós sáv ugyanattól a vegyülettől származik-e (fent említettem, hogy a kereskedelemben kapható kadmium pigmentek gyakran fizikai keverékek), több esetben is tesztek és mérések végeztek, melyek megállapították, hogy két emissziós sáv – az 580 nm és a 850 nm körüliek – gerjesztési spektrumai hasonlóak, 350-570 nm közé esnek, ám 570 nm-hez közeledve és azon túlhaladva a 850 nm-es emisszió intenzitása csökkenést mutat. Ez a pigmentek reflexiós tényezőjének növekedését jelentik. Az eredmények arra utalnak, hogy mindhárom emissziós sáv egy vegyületből származik.

Tehát kijelenthető, hogy habár több tényezőtől is függ, de majdnem az összes kadmium pigment – sárgától a vörösre – lumineszkál a látható és a NIR tartományban egyaránt. A gyakorlati tapasztalat is megegyezik a szakirodalmi példákkal, azzal kiegészítve, hogy kizárólag többsávos képalkotási módszerekkel a kadmium vörösek látható tartományú emissziós sávjai nehezen detektálhatók, mind por, felfestett minta vagy műtárgyon egyaránt. Valamint, ha egy kadmium sárga (citrom) pigment kadmium-szulfid és cink-

szulfid (ZnS) fizikai keveréke akkor az emisszió összetett, hiszen a cink-fehér látható tartományú lumineszcenciája összeadódik a kadmium sárgáéval így egy egyedi színhatást érve el az UVL felvételeken. A keresztmetszet csiszolatokon már más a helyzet, mert a szemcsék lumineszcencia színe külön-külön is érzékelhető.

20.3.4 A festékben lévő kadmium pigmentek fényvisszaverő képességének és lumineszcenciájának jellemzése

Annak tanulmányozására, hogy a festékkötőanyagok (tojás, olaj, műgyanták, emulziók stb.) hozzáadása hogyan befolyásolja a vizsgálat minták emissziós tulajdonságait, számos esetben végeztek összehasonlító méréseket por és festék alakban lévő pigmentek kapcsán. Egyértelműen kijelenthető – hiszen logikus is –, hogy ha egy kötőanyag rendelkezik emisszióval ugyanazon a gerjesztési tartományon, amin a kadmium pigmentek, akkor az eredményt ez a tulajdonság befolyásolni fogja.

A felfestett minták emissziós sávja minden esetben intenzívebbek a látható tartományban. A méréseken a pormintákon tapasztalt három emissziós sávon kívül továbbiak jelennek meg és a meglévő három szélesedik és el is tolódik a hosszabb hullámhosszok felé. Továbbá egyértelműen kimondható, hogy a festékminták látható tartományú emissziós sávjainak intenzitása csökken a gerjesztési hullámhossz, hosszabb hullámok felé való eltolódása esetén. Míg a közeli infravörös tartományba eső lumineszcencia esetén ellentétes a tendencia, nevezetesen az infravörös lumineszcencia intenzitás növekszik a gerjesztési hullámhossz növelésével.

20.4 Összefoglalás – a kadmium tartalmú pigmentek lumineszcenciája

A kadmiumalapú pigmentek a 19. század közepétől váltak elérhetővé, és a művészetben a mai napig fontos szerepet játszanak. Legismertebb változataik a kadmiumsárga (CdS), a kadmium-narancs és a kadmiumvörös (CdSSe), amelyek a halvány citromsárgától a mély, barnásvörösig terjedő árnyalatokat biztosítják. Ezek a pigmentek különösen kedveltek, mert erőteljes színűek, jó fedőképességűek és időtállóak.

Az azonosításuk azonban nem mindig egyszerű, mert reflexiós spektrumaik (a látható fény, az ultraibolya- és infravörös sugárzás visszaverődésének vizsgálatával nyert adatok) sokszor jellegtelenek. Emiatt a kutatók egy másik tulajdonságukat igyekeznek kihasználni: a lumineszcenciát, vagyis azt a jelenséget, amikor bizonyos sugárzás hatására maguk is fényt bocsátanak ki. A kadmium pigmentek különösen érdekesek ebből a

szempontból, mert nemcsak a látható, hanem a közeli infravörös (NIR) tartományban is erős lumineszcenciát mutatnak. Ez a kettős emissziós viselkedés egyedivé és könnyen felismerhetővé teszi őket.

A kadmium pigmentek viselkedése abból fakad, hogy félvezető anyagok. A kristályszerkezetükben előforduló hibák, szennyezők vagy rendezetlenségek miatt az elektronok különböző energiaszintekről képesek visszatérni alapállapotba, miközben fényt bocsátanak ki. Ennek eredményeként a vörös látható tartománytól egészen a közeli infravörösig több sávban is mérhető lumineszcencia. Általában három emissziós sáv figyelhető meg: egy keskeny sáv a vörös látható fényben (kb. 580–590 nanométernél), valamint kettő a közeli infravörösben (830–860 nanométer és 1100 nanométer körül).

A pigmentek színét és lumineszcencia-tulajdonságait tehát három fő tényező szabja meg:

- a szemcsék mérete,
- az aggregátumok (szemcsehalmozok) nagysága,
- és a kémiai összetétel (pl. a kén és a szelén aránya).

A szelén például vörös irányba tolja a színt, míg a cink a sárga, sárgászöld felé módosítja. A részecskék mérete különösen nanométeres skálán válik fontossá: ekkor kvantumhatások lépnek fel, és a méret közvetlenül meghatározza a színt és a kibocsátott fény hullámhosszát. Bizonyos mérettartományokban és különböző bevonatolások esetén a lumineszcencia változhat vagy meg is szűnhet.

A korábbi kutatások során kimutatták, hogy a kadmium pigmentek por alakban, kötőanyagba (pl. olajba, temperába) keverve, valamint kész műtárgyakban egyaránt megőrzik lumineszcenciás tulajdonságaikat. A festékekben azonban a kötőanyag befolyásolja a jelenséget: a látható fényű emisszió intenzitása sokszor csökken, míg a közeli infravörös tartományban inkább erősödik. Ez a tulajdonság a műtárgyvizsgálatokban is hasznos, mert a NIR-lumineszcencia gyakran jól detektálható, még akkor is, ha a látható tartományban a jel gyenge.

Összességében elmondható, hogy a kadmium pigmentek nemcsak színük miatt fontosak, hanem különleges optikai viselkedésük miatt is. A látható és a közeli infravörös tartományban tapasztalt lumineszcenciájuk lehetővé teszi, hogy modern képalkotó és spektroszkópiai módszerekkel viszonylag könnyen azonosíthatók legyenek festményeken, még összetett rétegekben is.

20.5 Modellkísérletek - kadmium pigmentek

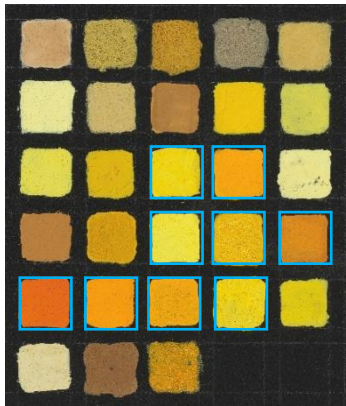
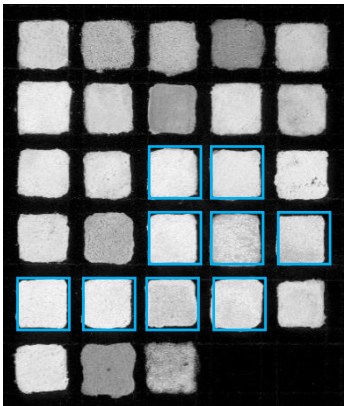
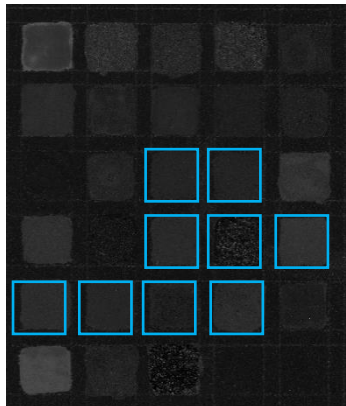
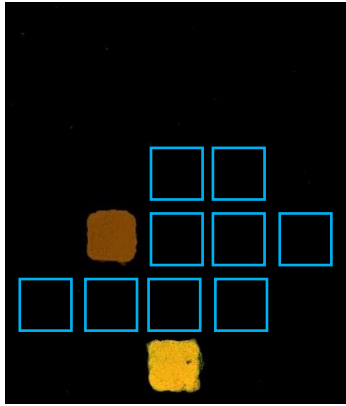
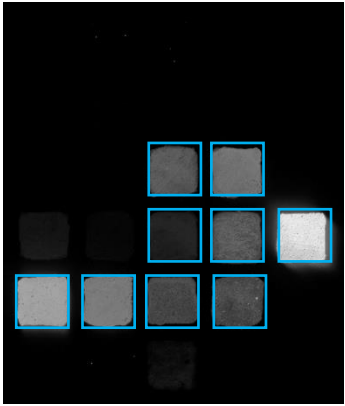
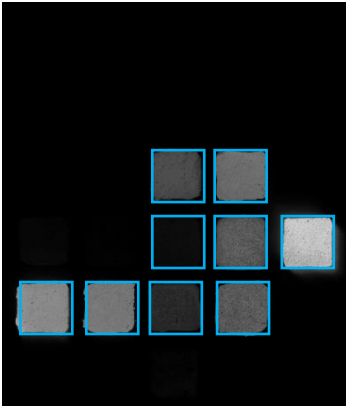
20.5.1 Referenciatablák vizsgálata - kadmiumpigmentek

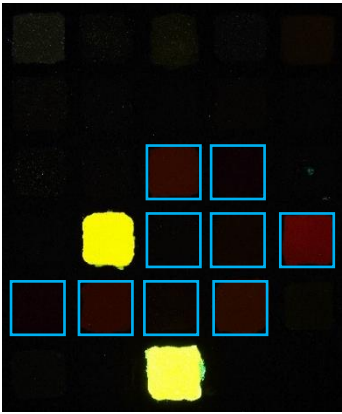
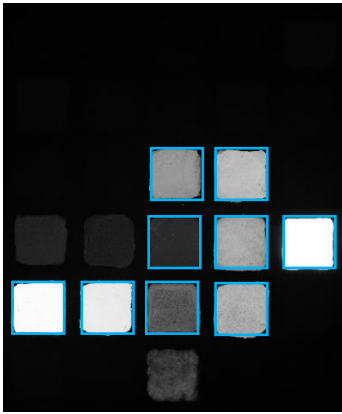
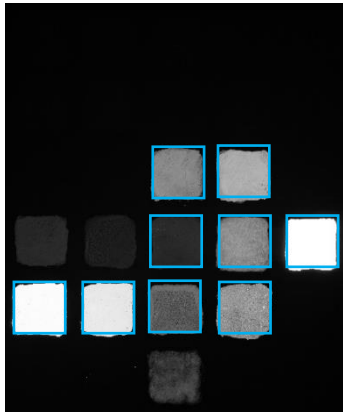
A vizsgálati eredmények összhangban állnak a szakirodalomban közölt megfigyelésekkel. Gyakorlatilag az összes tesztelt **kadmiumsárga és kadmiumnarancs** pigment gerjeszhető volt 365 nanométeres ultraibolya sugárzással, és a legtöbb minta esetében – bár nehezen – kimutatható volt narancssárgás-vörös lumineszcencia, valamint különböző intenzitású emisszió a közeli infravörös tartományban, utóbbi pedig egyértelműen.

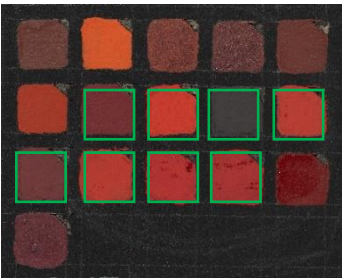
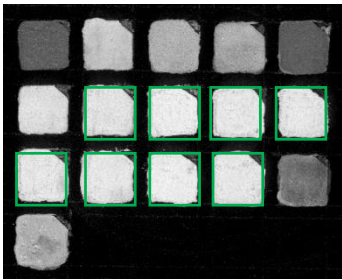
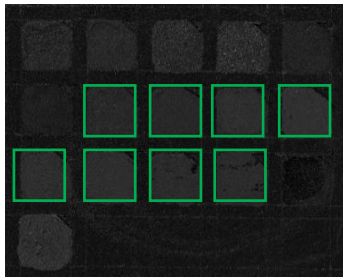
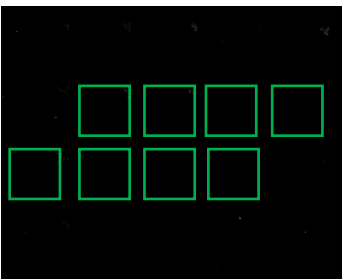
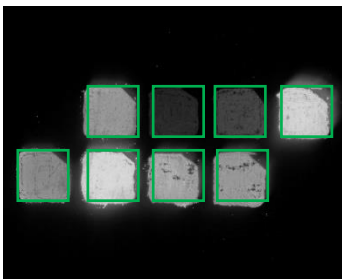
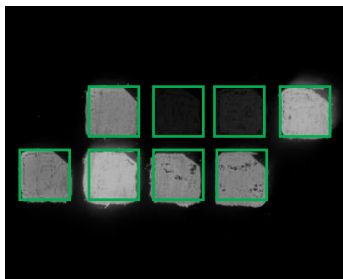
A **kadmiumvörös** pigmentek esetében a kötőanyagba ágyazott minták lumineszcenciája a korábbi adatoknak megfelelően gyengének bizonyult a narancs és vörös tartományban (600–700 nm), míg az emisszió eltolódott 700 nm fölé, így sokkal inkább a közeli infravörös tartományban érzékelhető. Emiatt ezek a pigmentek elsősorban NIR-érzékeny detektorokkal mutathatók ki. A többsávos képalkotás a látható tartományban nem igazolta egyértelműen az lumineszcencia jelenlétét (18. táblázat).

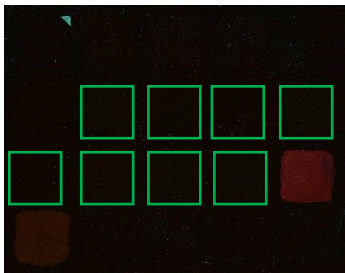
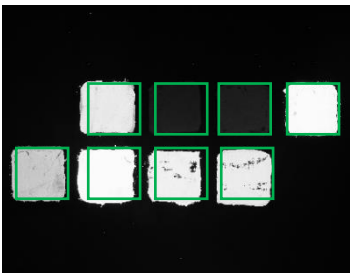
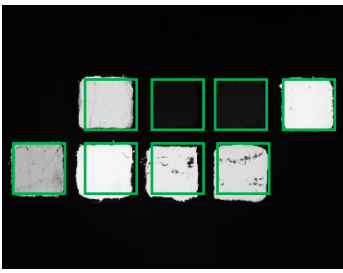
A Phase One MSI többsávos képalkotó rendszerrel végzett vizsgálatok során látható tartományban lumineszcenciát kizárólag a szerves sárga pigmentek mutattak ultraibolya gerjesztés hatására, míg a kadmiumtartalmú pigmentek esetében a lumineszcencia a beállított paraméterek mellett nem volt rögzíthető. Tehát ezekben az esetekben valamilyen a lumineszcenciát befolyásoló tényező befolyásolta a vizsgálat eredményét. Továbbá az is előfordulhat, hogy a *Phase One Rainbow* szoftverébe integrált egyik automatikus korrekció eltávolítja az egyébként jelen lévő gyenge lumineszcens jelet.

18. táblázat – A referencia tábla sárga pigmentmezőiről készült felvételek

Phase One MSI		
		
VIS-R_VIS Phase One IXH, 72 mm, f/8.0 1/2 sec, ISO 50 (a kék kerettel jelölt mezők a kadmiumsárga és narancs pig- mentek)	IR-R_IR₈₃₀₋₁₀₀₀ Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 2 sec, ISO 50	UV-R_UV₃₆₅ Phase One IXH, 72 mm, f/8.0 8 sec, ISO 50
		
VIS-L_UV₃₆₅ Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 15 sec, ISO 50	IR-L_VIS Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 120 sec, ISO 50	IR-L_UV₃₆₅ Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 120 sec, ISO 1600

Sony Full spectrum kamera		
		
VIS-L_UV₃₆₅ Sony A 7R Mark IV, 90 mm, f/5.6, 15 sec, ISO 100	IR-L_VIS Sony A 7R Mark IV, 90 mm, f/5.6, 30 sec, ISO 100	IR-L_UV₃₆₅ Sony A 7R Mark IV, 90 mm, f/5.6, 30 sec, ISO 100

19. táblázat – A referencia tábla vörös pigmentmezőiről készült felvételek		
Phase One MSI		
		
VIS-R_VIS Phase One IXH, 72 mm, f/8.0 1/2 sec, ISO 50 (a zöld kerettel jelölt mezők a kadmium vörös pigmentek)	IR-R_IR₈₃₀₋₁₀₀₀ Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 2 sec, ISO 50	UV-R_UV₃₆₅ Phase One IXH, 72 mm, f/8.0 8 sec, ISO 50
		
VIS-L_UV₃₆₅ Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 15 sec, ISO 50	IR-L_VIS Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 120 sec, ISO 50	IR-L_UV₃₆₅ Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 120 sec, ISO 50

Sony Full Spectrum kamera		
		
VIS-L_UV ₃₆₅ Sony A 7R Mark IV, 90 mm, f/5.6, 30 sec, ISO 100	IR-L_VIS Sony A 7R Mark IV, 90 mm, f/5.6, 20 sec, ISO 800	IR-L_UV ₃₆₅ Sony A 7R Mark IV, 90 mm, f/5.6, 30 sec, ISO 1600

A felfestett porminták esetén a kadmium pigmentek infravörös lumineszcenciájának csúcsa 850 nanométer fölé esik, nagy intenzitással, mind ultraibolya, mind pedig látható tartományú gerjesztés esetén. Ez kis mennyiségű, vékony rétegvastagságú felületeken is egyértelműen kijelenthető. Csak két mintán (R8 és R9) esetében volt jelentősen alacsonyabb a közeli infravörös lumineszcencia.

Egyértelműen kijelenthető tehát, hogy a kadmium tartalmú sárga, narancs és vörös pigmentek egyaránt jól kimutathatók a közeli infravörös tartományba eső emissziójuk detektálásával. Mivel más szervesen sárga és vörös sem produkálnak még hasonlót sem, így elmondható, hogy olyan egyedülálló vizsgálati módszerrel van dolgunk, amely alkalmazása során egyértelműen azonosíthatóvá válnak a vizsgált festékrétegek kadmiumtartalmú összetevői. Egyetlen kivételtől eltekintve: a nikkel-titán és titán-sárgák.

A vizsgálataim során kontrollként 2-2 szerves sárga és vörös színezéket is vizsgáltam (sáfrány, indiai sárga és 2 krapplakk). A sárgák UV sugárzással gerjesztve nagyon intenzív sárga – saját színükhöz hasonló – tartományú lumineszcenciát produkáltak. Az intenzitás-különbség a kadmium sárgák látható tartományú emissziójához képest jelentősen magasabb. A sárga szervesek (indiai sárga és sáfrány) a közeli infravörösben szintén kibocsátanak, bár alacsony intenzitáson, de sajnos több kadmium tartalmú sárga mintához hasonló erősségen. Így jelenlétük a rétegekben megzavarhatja az egyértelmű következtetést.

A vörös színezékek a kadmium vörösekkel ellentétben, ultraibolya gerjesztés hatására lumineszkálnak a vörös tartományban, szintén saját színükhöz közeli sávban, hasonlóan, mint a szerves sárgák. Ám intenzitásuk már közel sem olyan erős, mint, sárga „rokonaiké”. Az infravörös tartományban viszont ezek a kontroll anyagok nem mutattak semmiféle emissziót ultraibolya, valamint látható tartományú gerjesztés hatására sem.

Ezek mellett érdemes kiemelni, hogy az Y16-os minta, ami a Kremer #43300-as titán-sárga (narancs) nevet viseli, a kémiai összetételt tekintve: Ti, Cr, Sb, O, és rutil kristályszerkezetűnek mondott pigment is mutat lumineszcenciát látható és ultraibolya gerjesztés hatására is (erre részletesebben az 19. fejezet már kitért).

20.5.2 Műtárgyakon elvégzett vizsgálatok – kadmium-pigmentek

A kutatás során a referencia anyagokon kívül számos műtárgyon végzett vizsgálat során sikerült kadmium pigmenteket azonosítani. Ezek közül két esetet emelnék ki, ahol egyrészt a cink-fehér jelenléte mellett a szerves vörös színezék tartalmú festékek jelenléte sem könnyítette meg az meghatározást. Továbbá egy olyat, ahol nem a legfelső rétegben tudtam azonosítani a szóban forgó anyagokat:

1. Vaszary János: *Balkonon álló vörös pizsamás nő*; olaj, vászon; 1930 körül; 85 x 105 cm, leltári szám: FEO_58.182T; Szépművészeti Múzeum-Magyar Nemzeti Galéria-Festészeti Osztály
2. Czóbel Béla: *Műteremben*; olaj, vászon; 1922, 95 x 75 cm; leltári szám: FEO_FK8742; Szépművészeti Múzeum-Magyar Nemzeti Galéria-Festészeti Osztály



168. ábra - Vaszary János: *Balkonon álló vörös pizsamás nő*; olaj, vászon; 1930 körül; 85 x 105 cm, leltári szám: FEO_58.182T; Szépművészeti Múzeum-Magyar Nemzeti Galéria-Festészeti Osztály.

VIS-R_VIS (pol.) Forrás: saját felvétel



169. ábra - VIS-R_VIS (pol.)
részlet. Forrás: saját felvétel



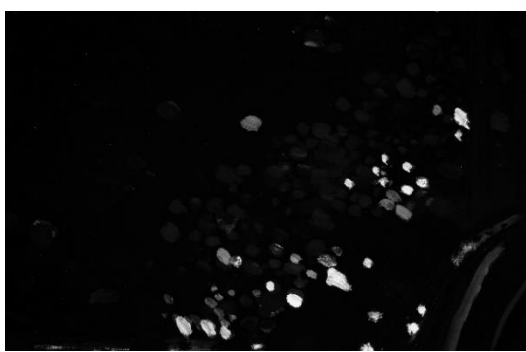
170. ábra - IR-R_IR830-1100,
részlet. Forrás: saját felvétel



171. ábra - UV-R_UV365, rész-
let. Forrás: saját felvétel



172. ábra - VIS-Lu_UV365, részlet. Forrás: saját
felvétel



173. ábra - IR-Lu_UV365, részlet. Forrás: saját
felvétel

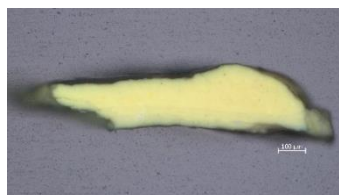
A felvételeken a virágmotívumok sárga, narancs és vörös foltjai tartalmaznak különböző mennyiségű kadmium tartalmú pigmentet. A reflexiós felvételeken a már említett tulajdonságok (magas infravörös reflexió, közepes ultraibolya abszorpció) szinte kivétel nélkül megfigyelhetők. Az UvVL felvételeken narancssárgás vörös lumineszcencia, köztük egy rózsaszínes árnyalat, amely a szerves vörös színezékre utal. Az infravörös lumineszcens felvételeken pedig a különböző intenzitású emisszió van jelen. Láthatjuk, hogy a színfoltok kadmium tartalomtól függően eltérő intenzitást produkálnak. A keresztmetszet csiszolatok elkészítése és vizsgálatát követően olyan példa is előfordult, ahol alsó rétegben azonosítottunk kadmium pigmentet, amit fedett egy eltérő összetételű réteg, ennek ellenére detektálható volt az infravörös emisszió a festményről készült felvételeken, hiszen az fizikai tulajdonságainak köszönhetően áthaladt a felette lévő rétegeken.



174. ábra - A 4-es mintavétel
helye, makrófelvétel (VIS-
R_VIS). Forrás: saját felvétel



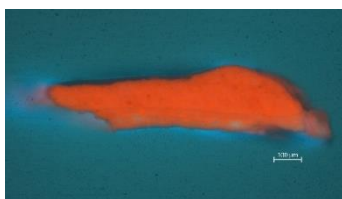
175. ábra - A 4-es mintavétel
helye,
makrófelvétel (VIS-L_UV365).
Forrás: saját felvétel



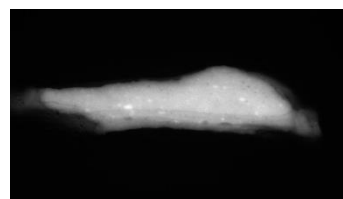
176. ábra - A 4-es minta ke-
resztmetszet csiszolatának pola-
rizációs mikroszkópos felvétele
VIS-R_VIS (pol)



177. ábra – A 4-es minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétel, VIS-L_UV₃₆₅. (10x okulár, 20x objektív) Forrás: saját felvétel



178. ábra – A 4-es minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétel, VIS-Lu_BV₄₂₀. (10x okulár, 20x objektív) Forrás: saját felvétel

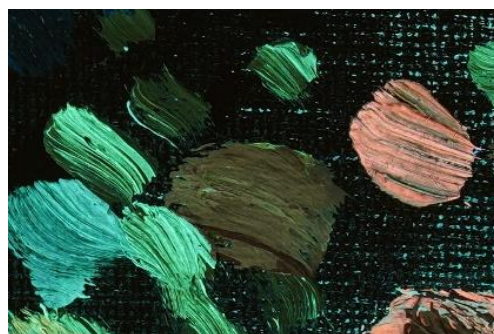


179. ábra - A 4-es minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétel, IR-Lu_UV₃₆₅. (10x okulár, 20x objektív) Forrás: saját felvétel

A mikrominták vizsgálatának elsődleges célja a lumineszcencia jelenségének demonstrálása volt. A citromsárga ecsetvonásból származó keresztmetszeti mikroszkópos felvételeken megfigyelhető a látható tartományban jelentkező lumineszcencia, valamint annak intenzitásváltozása a gerjesztési tartomány módosulásával. A közeli infravörös emisszió detektálása szintén egyértelműen megvalósult.



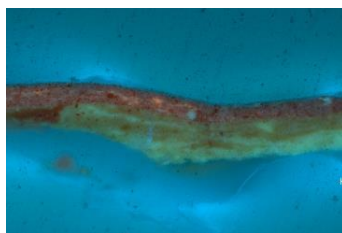
180. ábra - A 8-as mintavétel helyének makrófelvétele, VIS-R_VIS. Forrás: saját felvétel



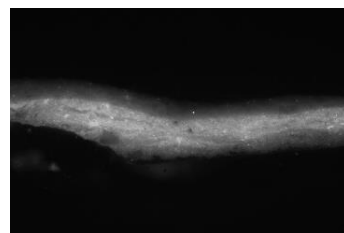
181. ábra - A 8-as mintavétel helyének makrófelvétele, VIS-L_UV₃₆₅. Forrás: saját felvétel



182. ábra - A 8-as minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-R_VIS (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



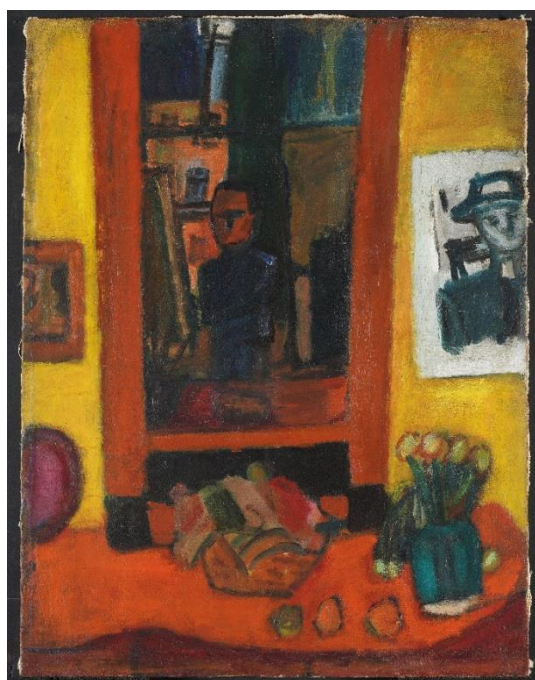
183. ábra - A 8-as minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-L_UV₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



184. ábra - A 8-as minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, IR-Lu_UV₃₆₅. (10x okulár, 20x objektív) Forrás: saját felvétel

A 8-as minta esetében megfigyelhető, hogy a vélhetően kadmiumtartalmú, sötétebb sárga réteget egy vörös réteg fedi. A vörös réteg nem mutat egyértelmű lumineszcenciát, az emisszió inkább a hozzá kevert cinkfehér és a kötőanyag jelenlétéből adódik. Az alatta található sárga réteg viszont lumineszcenciát bocsát ki, bár kisebb intenzitással, mint a 4-es minta világos sárga rétege. A látható tartományban észlelhető lumineszcenciakülönbség – amely a kadmiumsárga pigmentek eltérő típusaihoz köthető – összhangban áll a referenciaanyagok vizsgálata során szerzett tapasztalatokkal. Ugyanakkor az NIR-emisszió ebben az esetben is egyértelműen kimutatható.

A következő esettanulmányban a Czóbel-festmény narancssárga alapszínén megfigyelt, citromsárga színű, lumineszcenciát mutató felületekből származó minták kerülnek elemzésre. A minták a két sárga réteg mentén váltak szét a mintavétel során, így külön darabokban lettek beágyazva (1.1 és 1.2 jelöléssel).



185. ábra - Czóbel Béla: *Műteremben*; olaj, vászon; 1922, 95 x 75 cm; leltári szám: FEO_FK8742; Szépművészeti Múzeum - Magyar Nemzeti Galéria - Festészeti Osztály, VIS-R_VIS.
Forrás: saját felvétel



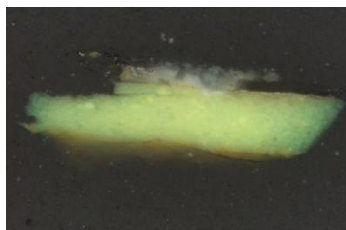
186. ábra - Az 1-es mintavétel helye makrófelvétellel (VIS-R_VIS). Forrás: saját felvétel



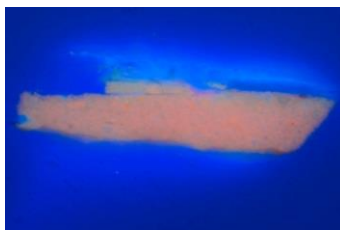
187. ábra - A 1-es mintavétel helye makrófelvétellel (VIS-L_UV₃₆₅). Forrás: saját felvétel

Az alsó narancssárga réteg látható tartományú lumineszcenciája nem egyértelmű, míg a felső réteg egyértelmű lumineszcenciát mutat. A jelenség jól azonosítható: a felső réteg narancsos lumineszcenciája az UvVL-felvételeken, míg NIR-emissziója az UvIrL-felvételeken jelenik meg. Az alsó narancssárga réteg lumineszcenciája csak az infravörös-

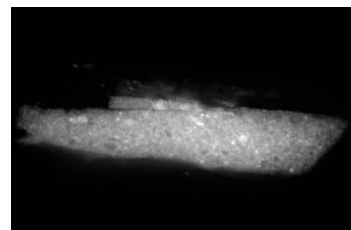
lumineszcens felvételeken válik egyértelművé. A festményen végzett XRF- és a mintákon készült SEM-EDX mérések eredményei alátámasztják a fotótechnikai vizsgálatok következtetéseit; ezek a mellékletben találhatók.



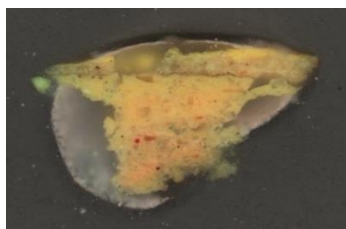
188. ábra – A Cz_1.1-es minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-R_VIS (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



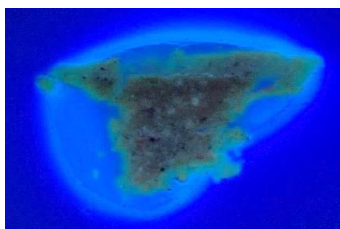
189. ábra - Czobel 1.1-es minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-L_UV₃₆₅, (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



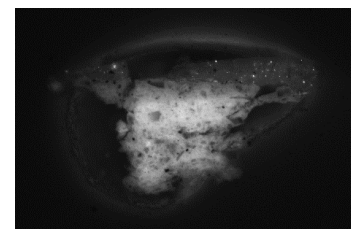
190. ábra - Czobel 1.1-es minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, IR-L_UV₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



191. ábra – A Cz_1.2-es minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-R_VIS (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



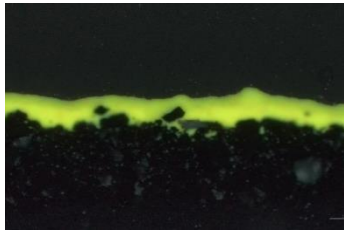
192. ábra – A Cz_1.2-es minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-L_UV₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



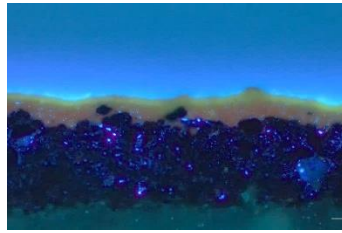
193. ábra – A Cz_1.2-es minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, IR-L_UV₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás saját felvétel

20.5.3 Optikai mikroszkópos keresztmetszet csiszolatok elemzése – Mikrominta-elemzés – kadmium-pigmentek

A fehér mintákhoz hasonlóan a sárga felfestett felületekből is történt mintavétel, mikroszkópos keresztmetszet csiszolat-készítés céljából. A kadmium pigmentek sárga (citrom), narancssárga és vörös változatainak vizsgálatait a következő ábrák mutatják be.



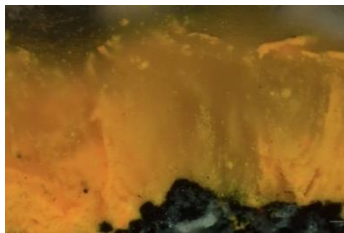
194. ábra - Az Y15-ös szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvételei, balról jobbra: VIS-R_VIS (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



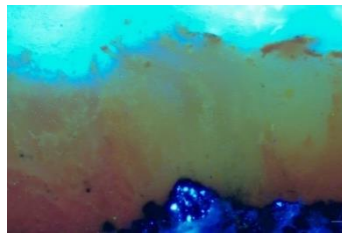
195. ábra - Az Y15-ös szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvételei, balról jobbra: VIS-L_UV₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



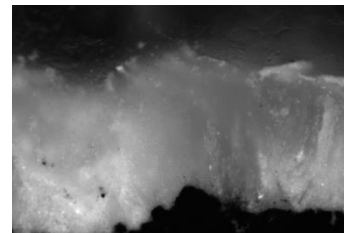
196. ábra - Az Y15-ös szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvételei, balról jobbra: IR-L_UV₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



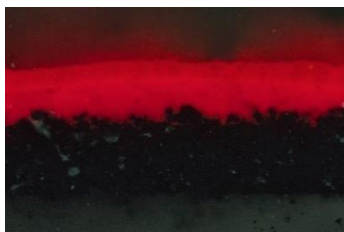
197. ábra - Az Y18-as szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvételei, balról jobbra: VIS-R_VIS (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



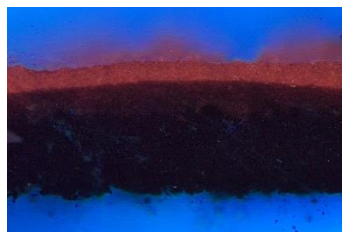
198. ábra - Az Y18-as szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvételei, balról jobbra: VIS-L_UV₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



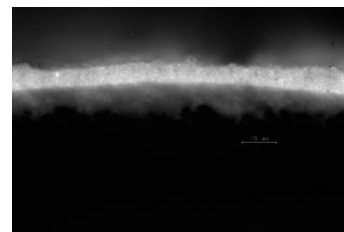
199. ábra - Az Y18-as szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvételei, balról jobbra: IR-L_UV₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



200. ábra - Az Y20-as szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvételei, balról jobbra: VIS-R_VIS (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



201. ábra - Az Y20-as szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvételei, balról jobbra: VIS-L_UV₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



202. ábra - Az Y20-as szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvételei, balról jobbra: IR-L_UV₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel

20.6 Következtetések

A kadmium-pigmentekben megfigyelt emisszió a kibocsátási sávok számát - jellemzően egy vagy kettő a közeli infravörös tartományban - és a lumineszcencia intenzitását tekintve változatos, de felhasználható a festményekben való eloszlásuk feltérképezésére, még akkor is, ha más pigmentekkel keverednek.

Bár a megfigyelt lumineszcencia a vörös és a NIR tartományban jelentkezik, és így elkülönül a művészek legtöbb anyagának emissziójától, a széles sávú közeli infravörös-lumineszcens felvételek készítése önmagában nem elegendő a feltérképezés biztosításához. A megfelelő azonosításhoz spektrális képalkotásra van szükség.

A festészeti közegekbe, kötőanyagokba ágyazott pigmentek lumineszcencia-kvantumhozama ugyanis rendkívül változatos lehet. Ez különösen igaz azokra a festményekre, amelyekben ólom- és/vagy cinkfehér, vagy szerves sárga vagy vörös színezék van jelen, amelyek emissziós csúvái átfedésben lehet a kadmiumpigmentek gyenge látható lumineszcenciájával.

Az XRF-spektrometriás adatok értelmezése nehézségekbe ütközhet, ha heterogén festékekkel van dolgunk, mivel az elemzett területek kis mérete miatt számos pontelemzésre vagy területtérképezésre lehet szükség.

Amint több különböző festményen elvégzett vizsgálat és további tanulmányok mutatják, a közeli infravörös tartományban végzett multispektrális lumineszcencia-képalkotás információt nyújt a kadmiumpigmentek térbeli eloszlásáról a felületi rétegekben. A mélyebb tanulmányok továbbá azt mutatják, hogy a festményen jelen lévő több kadmiumpigment elkülöníthető, azonosítható és feltérképezhető a maximális emissziójuk helyzete alapján. Amennyiben az alkalmazott eljárás képes pontosan mérni a lumineszcencia csúcsok pontos elhelyezkedését. Ez megkönnyíti az egyenetlenül eloszló pigmentek értelmezését, különösen olyan keverékek esetében, amelyeknél a vizuális megfigyelés nem teszi lehetővé a pigmentek térbeli eloszlásának pontos meghatározását. Ehhez viszont spektrális képalkotásra van szükség.

Tehát a pigmentek térbeli eloszlására vonatkozó információk útmutatást nyújtanak a pontelemzések elvégzéséhez szükséges helyek pontosabb kiválasztásához olyan technikákkal, mint a röntgenfluoreszcens spektrometria (XRF) vagy a száloptikás reflexiós spektroszkópia (FORS), és útmutatóként is használhatók a mintavételi helyek kiválasztásához.

A látható tartományú lumineszcencia alacsony hozama miatt a kadmium pigment lumineszcencia spektrumát torzíthatja a látható tartományban szintén kibocsátó, sokkal intenzívebb lumineszcens színezékek vagy festékközegek kibocsátása. Ezért a szakirodalmi ajánlások szerint szükség van a kadmiumpigmentek azonosításához kalibrált emissziós spektrumokra, kiegészítve FORS és XRF analízis alkalmazásával, hogy ellenőrizni lehessen az átmenet éle, a szelén jelenléte és a különböző emissziós sávok maximumai közötti állandóságot.

A gyakorlati tapasztalatok és a mérési eredmények alapján egyaránt kijelenthető, hogy az optimális gerjesztés a látható tartományban történik, és biztosítja a kadmium pigment sávok maximális emissziós intenzitását a közeli infravörös tartományban, és csökkenti a látható tartományban emittáló egyéb színezőanyagok és kötőanyag lumineszcens hozzájárulását.

A jövőbeni munkák várhatóan a spektrális felbontás, a hatótávolság és a mélységi behatolás javításával fognak foglalkozni. Bár az emissziós sávok szélesek, az alkalmazott rendszerek spektrális felbontásának javítása lehetővé tenné a spektrumok finomabb értelmezését, különösen abban az esetben, ha a két NIR-sáv nem jól felbontott. Az emissziós maximumok pontos értékének visszanyeréséhez gyakran szükség van a közeli infravörös emissziós sávok dekonvolúciójára. Továbbá a vizsgált spektrális tartomány kiterjesztése a lumineszcencia 1200 nm-ig történő rögzítésére lehetővé tenné az emissziós sávok maximumának kihasználását bármilyen színű kadmiumpigmentek azonosító paramétereiként. Úgy tűnik, hogy a közeli infravörös tartományba eső emissziós sáv valóban megbízhatóbb paraméter, amelyből a kadmiumpigmentekre lehet következtetni, mivel 950 nm felett jelentkezik bármely típusú kadmiumpigment esetében, és így kevésbé valószínű, hogy a látható tartományban emittáló egyéb anyagok lumineszcenciája torzítsa, mint a látható tartományba eső lumineszcens sávot. Végül, mivel az emisszió a NIR tartományban van, fennáll annak a lehetősége, hogy ezt a módszert olyan kadmiumpigmentek keresésére is lehet majd használni, amelyek egy NIR tartományban áteresztő festékréteg alatt helyezkednek el.

21 EGYIPTOMI KÉK, HAN KÉK ÉS HAN LILA NIR TARTOMÁNYÚ LUMINESZCENCIÁJÁRÓL¹¹⁹

Az egyiptomi kék, Han kék és Han lila az ókori festékek és pigmentek közé tartoznak, amelyek különleges történelmi és művészeti jelentőséggel bírnak. Az egyiptomi kék, amely az egyik legrégebbi szintetikus színezőanyag, már több ezer éve ismert, és a történelem során széles körben alkalmazták. A Han kék és Han lila pigment a kínai Han-dinasztia idején vált népszerűvé, és mindkét szín a gazdagságot és a luxust szimbolizálta.

Ezen pigmentek fizikai és optikai tulajdonságai csak a modern kutatások révén váltak igazán érthetővé. Különösen érdekes a NIR, azaz közeli infravörös tartományú lumineszcenciájuk. Az infravörös lumineszcencia tanulmányozása lehetőséget ad arra is, hogy jobban megértsük a pigmentek fényelnyelési és kibocsátási mechanizmusait, és alkalmazásukat a művészeti és konzerválási területeken.

A fejezet célja, hogy bemutassa ezen anyagok lumineszcens tulajdonságait, különös tekintettel a közeli infravörös tartományra, és rávilágítson a pigmentek egyedülálló abszorpció és emisszió tulajdonságaira.

21.1 Az egyiptomi kék, Han kék és Han lila pigmentek történetéről röviden

Az egyiptomi kék volt az első szintetikus pigment az emberiség történetében. Egyiptomban az i.e. 3. évezredben jelent meg, vagy még korábban Mezopotámia területén.¹²⁰

A Han-kék az egyiptomi kék izomorfja, kalcium helyett báriumot tartalmaz, továbbá a Han kék kevésbé gazdag szilícium-dioxidban és eltérő kristályszerkezetű. A Han lilát és kék pigmentet is gyártották az ókori Kínában, és széles körben használták kerámiák és fémtárgyak díszítésére, valamint falfestményekre, különösen a Han-dinasztia idején (Kr. e. 208-220), innen ered az elnevezésük.

Az egyiptomi kék és a Han kék a természetben is előfordul: az egyiptomi kék kristály megfelel a cuprorivait nevű ásványnak, míg a Han kék megfelel a Dél-Afrikából származó Effenbergerit nevű ásványnak, amelynek Geister és Rieck finomította a szerkezeti leírását.¹²¹

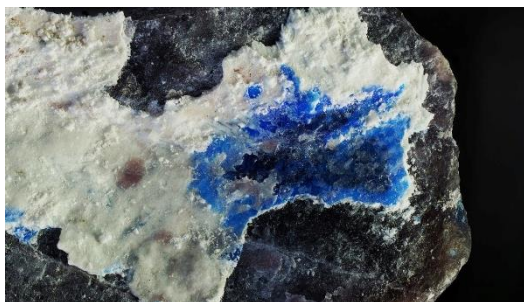
¹¹⁹ Giorgio Pozza, David Ajò, Giacomo Chiari, Franco De Zuane, és Marialuisa Favaro, "Photoluminescence of the Inorganic Pigments: Egyptian Blue, Han Blue and Han Purple," *Journal of Cultural Heritage* 1, no. 4 (2000): 393–398.

¹²⁰ D. Ullrich, "Egyptian Blue and Green Frit: Characterization, History and Occurrence, Synthesis," in *Datation-caracterisation des peintures pariétales et murales*, ed. F. Delamare, T. Hackens, and B. Helly, PACT 17 (Ravello, 1987), 324–32.

¹²¹ G. Geister and B. Rieck, "Effenbergerite, $BaCu(Si_4O_{10})$, a New Mineral from the Kalahari Manganese Field, South Africa: Description and Crystal Structure," *Mineralogical Magazine* 58 (1994): 663–70.



203. ábra - A cuprorivaite ásvány. Forrás: <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/MineralData?lang=en&mineral=Cuprorivaite> 2025.08.26.



204. ábra - Az Effenbergerit ásvány. Forrás: <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/MineralData?lang=en&mineral=Effenbergerit> 2025.08.26.

21.2 A szakirodalmi vizsgálatok

A legtöbb szakirodalmi példa alkalmával alapos vizsgálatoknak vetették alá a műtárgyból származó mintákat és szintetizált modern változatokat egyaránt. Az egyik ilyen kutatás (Giorgio Pozza et al. 2000) során például egy egyedi készítésű fotolumineszcens (PL) spektroszkóppal vizsgáltak hat darab műtárgyból vett egyiptomi kék és 1-1 szintetizált Han kék és Han lila mintát.

Az első egy egyedi minta volt (méretei 0,15 x 0,15 x 0,1 milliméter), amelyet azonosítás céljából Nicolaus Johannes utolsó ítéletéről, egy 12. századi, fára festett temperafestményről vettek, amelyet a Vatikáni Múzeumban őrinek. A második szintén egy apró minta volt (méretei 0,12 x 0,1 x 0,05 mm³), amelyet az Augusta Praetoria (Aosta, Olaszország) régészeti lelőhelyen feltárt római pigmenttömbből izoláltak. A harmadik minta egy nemrégiben szintetizált pigment (O. Ingolf Jensen - Institute of Conservation, University of Göteborg, Svédország). A negyedik minta Egyiptomból: egy heliopolisi festőműhelyből származó pigmentekkel teli szerszámosládában találták, és a Kr. e. 8. századból származik. Az ötödik minta egy vályogszobor kis töredéke volt, amely a Kr. e. 4. századból, Ó-Nise-ből (Türkmenisztán) származik. Ez esetben a PL-spektrumot közvetlenül a töredék felületén mérték.

A Han-kék és Han-lila mintákat Hans G. Wiedemann és Gerhard Bayer szintetizálták és bebizonyították, hogy azok összetételükben és szerkezetükben megegyeznek az ókori Kínában előállított pigmentekkel.

21.3 A vizsgálatok módszertana

A PL-spektrumokat egy egyedi készítésű [(Laser Point (Milánó, Olaszország))] készülékkel vették fel, amely egy 25 MW-os He-Ne (lambda=632.8 nanométeres) lézerrel ((NEC

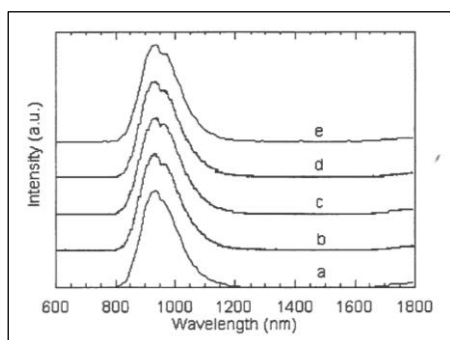
(Düsseldorf, Németország)) és egy Nd:YVO₄ megduplázott frekvenciájú ($\lambda=532$ nanométerrel) lézerrel [(Casix (Fujian, China)], egy rácsos (600 vonal/mm) spektrométerrel [(640 -HR, Jobin Yvon (Longjumeau, Franciaország)], 2,4 nm/mm reciprok diszperzióval, egy folyékony nitrogén hűtésű germánium detektorral [(EO817L, North Coast (Santa Rosa, California, USA)] és egy hélium-fluxus kriosztáttal (TBT-Air Liquide (Sassenage, Franciaország)).

Ezt a készüléket úgy tervezték, hogy bármilyen alakú (akár szabálytalan) és méretű (néhány század millimétertől több centiméterig terjedő) mintákat előkezelés nélkül vizsgálni lehessen. Heterogén anyagok esetén a minta különböző pontjain végzett mérés megismétlésével, a mintán néhány tizedmilliméteres felbontással térképezés végezhető.

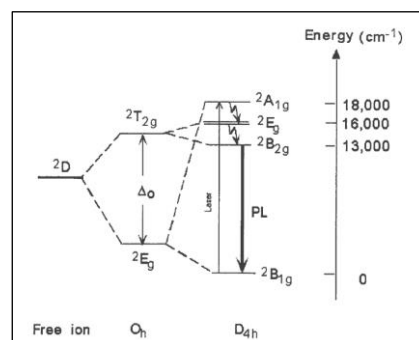
21.3.1 Mérési adatok és eredmények

Amint a 189. ábrán is látható, az egyiptomi kék öt mintájának spektrumai gyakorlatilag azonosak. Mind a 632,8 nanométeres (körülbelül 15800 cm⁻¹), mind az 532 nanométeres (kb.: 18800 cm⁻¹) gerjesztés széles infravörös emissziós sávot eredményez (félértékszélesség körülbelül 1800 cm⁻¹), amelynek középpontja (csúcs maximuma) kb.: 950 nanométernél (kb.: 10500 cm⁻¹) van. Az összes itt közölt spektrumot 632,8 nanométeres gerjesztés mellett vették fel.

A kémiai képlet alapján joggal feltételezhető, hogy a Cu²⁺ ion az egyetlen optikailag aktív centrum, amely képes a látható tartomány széles intervallumában energiát elnyelni és a vizsgált tartományban kibocsájtani. Ezért a spektrum alábbi értelmezését szigorúan a Cu²⁺ ion szilárd mátrixban történő spektroszkópiai viselkedése adja.



205. ábra - A kísérletben vizsgált egyiptomi kék minták szobahőmérsékleten felvett PL spektrumai (intenzitás tetszőleges egységekben): a, Vatikán; b, Aosta; c, Göteborg; d, Heliopolis; e, Nisa. Forrás: Giorgio Pozza et al. 2000



206. ábra - A rézion energiaszintjének sémája.
Forrás: Giorgio Pozza et al. 2000

A Cu^{2+} ion a negyedik periódusban található átmenetifém ion, amelynek külső elektronkonfigurációja $3d^9$ és az elektron-lyuk formalizmusban általában $3d^1$ ionként kezelhető.

A szabad fémion 2D jelű, alapállapotban lévő energiaszintje két energiaszintre hasad fel oktaéderes geometriájú ligandumtérben¹²², nevezetesen $^2T_{2g}$ -re és 2E_g -re. A rézion körüli tényleges szimmetria azonban síknégyzetes, amint azt a röntgendiffrakciós kristályszerkezet vizsgálatok is bizonyítják. Ez mind a rácsszerkezetben fellépő feszültségeknek, mind a Jahn-Teller effektusnak¹²³ köszönhető. A szimmetria csökkenése miatt ($O_h \rightarrow D_{4h}$, azaz az oktaéderesből a torzult síknégyzetes felé) az E_g alapállapot B_{1g} és A_{1g} szintekre hasad fel (a spinállapot jelölés az egyszerűség kedvéért szándékosan leahagyva), a T_{2g} energiaszint pedig B_{2g} és E_g szintekre (190. ábra).

Az egyiptomi kék esetében a szerkezetet először Pabst¹²⁴ fejtette meg, majd Mirti¹²⁵ egy régészeti anyagból származó minta segítségével. A Cu^{2+} a négyfogású tengelyen ($P4/ncc$ tércsoport) különleges helyzetben helyezkedik el és 4 oxigén atom koordinálja 1.928(3) Å távolságban.

A Han kék szerkezetét Lin és munkatársai¹²⁶ oldották meg, valamint Janczak¹²⁷, egymástól függetlenül. Az Effenbergerit, a dél-afrikai Kalahari manganmezőben található Han kék ásványi analógja, melynek szerkezetét Geister finomította. A fent idézett három pontosított Cu-O távolság: 1.922(4), 1.918(3) és 1.925(12) Å. Úgy tűnik, a Han kék izostrukturális (azonos szerkezetű) az egyiptomi kékkel, és a Cu-O távolságok majdnem azonosak a két vegyületben. A Han lila szerkezete eltér az egyiptomi kéktől és a Han kéktől. Valójában nemcsak a tércsoportjukban van különbség ($I4/m2$ tércsoport a $P4/ncc$ helyett), hanem a szilícium-dioxid-tetraéderek száma és elrendezése sem egyforma a két szerkezetben. A Han-lilát négy szilícium-dioxid-tetraéderből álló izolált csoportok jellemzik, amelyek négyzet alakú gyűrűt alkotnak. Ezeket a gyűrűket a rézatom tartja össze

¹²² A ligandumtér az a lokális elektromos tér, amelyet a központi fémion körül elhelyezkedő ligandumok (pl. oxigén-atomok) töltése és dipólusai hoznak létre; ez a tér határozza meg a fémion d-pályáinak energiamegoszlását. Forrás: Cotton, F. Albert. *Chemical Applications of Group Theory*. 3rd ed. (New York: Wiley, 1990), 250–255.

¹²³ A Jahn–Teller-effektus a koordinációs komplexekben és kristályokban megjelenő szerkezeti torzulás, amely akkor lép fel, ha a rendszer elektroneloszlása degenerált állapotban instabil. A torzulás energiacsökkenést eredményez, és differenciálásra használható például a különböző oxidációs állapotú átmenetifém-ionok azonosításában. Forrás: Cotton, F. Albert, és Geoffrey Wilkinson. *Advanced Inorganic Chemistry*. 5th ed. New York: Wiley, 1988, 790–792.

¹²⁴ A. Pabst, "Structures of Some Tetragonal Sheet Silicates," *Acta Crystallographica* 12 (1959): 733–739.

¹²⁵ P. Mirti, L. Appolonia, A. Casoli, Ferrari, E. Laurenti, A. Amisano Canesi, és G. Chiari, "Spectrochemical and Structural Studies on a Roman Sample of Egyptian Blue," *Spectrochimica Acta Part A* 51 (1995): 437–446.

¹²⁶ H. C. Lin, F. L. Liao, és S. L. Wang, "Structure of $\text{BaCuSi}_4\text{O}_{10}$," *Acta Crystallographica Section C* 48 (1992): 1297–1299.

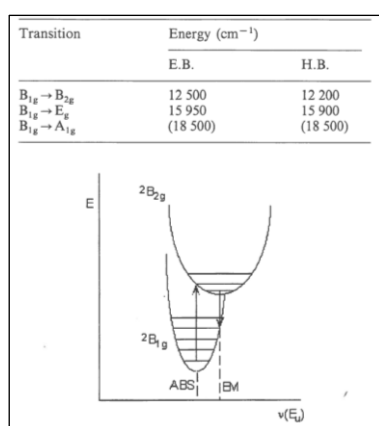
¹²⁷ J. Janczak és R. Kubiak, "Refinement of the Structure of Barium Copper Silicate, $\text{BaCuSi}_4\text{O}_{10}$, at 300 K," *Acta Crystallographica Section C* 48 (1992): 1299–1301.

négyszetes koordinációban. Minden tetraéder egy oxigén atomja egy szomszédos négytagú egységhez tartozik.

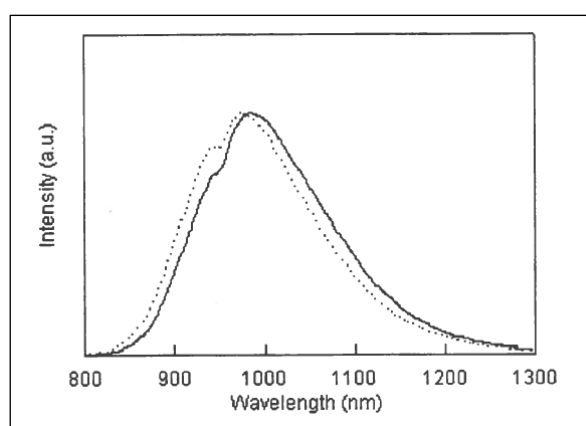
Az egyiptomi kék szerkezete ezzel szemben egy vízmentes rétegszilikátként írható le, amely elágazás nélküli, négytagú gyűrűkből álló (Si_4O_{12}) egyes rétegeket tartalmaz, 4-es szimmetria mellett, mint alapvető szilikátkomplex. Négy szilícium-tetraéder csúcsai oxigénatomokon keresztül kapcsolódnak, amelyek négyszetes koordinációban kötődnek egy rézatomhoz. Minden egyes tetraéder egy oxigénatomja egy szomszédos négytagú egységhez tartozik. Ezen szerkezeti különbségek ellenére a Han lila rézatomja ugyanazt a síknégyszetes koordinációt (geometriát) mutatja nagyon hasonló kötéstávolságok mellett ($\text{Cu-O}=1,926(7) \text{ \AA}$).

Az egyiptomi kék lumineszcenciájának tárgyalásához először az abszorpciós spektrumot vettük figyelembe. A három abszorpciós átmenet (lásd az 190. ábrát) értékeit és energiáit az 20. táblázat tartalmazza mind az egyiptomi kék, mind a Han kék esetében. Az eredetileg degenerált E_g alapállapotból származó A_{1g} szint a T_{2g} szintek fölé emelkedik a szerkezet (geometria) torzulása miatt.

20. táblázat - A címben szereplő vegyületek abszorpciós spektrumainak főbb jellemzői		
Transition/átmenet	Energy/energia (cm^{-1})	
$B_{1g} \rightarrow B_{2g}$	12 500	12 200
$B_{1g} \rightarrow E_g$	15 950	15 900
$B_{1g} \rightarrow A_{1g}$	(18 500)	(18 500)



207. ábra - Abszorpciós és emissziós átmenetek. Forrás: Giorgio Pozza et al. 2000



208. ábra - A Han kék és a Han lila minták szobahőmérsékleten felvett PL spektrumai (tetszőleges intenzitás egységekből). Forrás: Giorgio Pozza et al. 2000

Mivel a Cu^{2+} ion lokális környezet (csak az első szomszédokat figyelembe véve) inverziós központtal rendelkezik és a fent taglalt elektronátmenetek mind konfiguráción belüliek (d-d), ezért ezek szigorúan tiltott átmenetek. Ez azt jelenti, hogy a megfigyelt intenzitást szükségszerűen aszimmetrikus rezgésmódok kényszerítik ki, amelyek képesek csatolni az elektronátmenetekkel. Körülbelül 1000 cm^{-1} energiát becsülnek az érintett fononra¹²⁸, amely a $\nu(\text{E}_u)$ rezgésre vonatkozik.

A lumineszcencia kiváltására használt lézerfény alkalmas a legmagasabb energián lévő gerjesztett A_{1g} szint betöltésére (206. ábra). A három gerjesztett szint közötti energiakülönbség $5\text{--}6000\text{ cm}^{-1}$ nagyságrendű, míg a legalacsonyabb gerjesztett állapot (B_{2g}) és az alapállapot (B_{1g}) közötti távolság körülbelül $13\,000\text{ cm}^{-1}$.

Figyelembe véve a csatolt fonon energiáját (1000 cm^{-1} - lásd fent), a sugárzásmentes relaxációk nagyon hatékonyak a felsőbb energiaszintekről a B_{2g} -re, de sokkal kevésbé azok a B_{2g} -ről az alapállapotba. Valójában a gerjesztés sugárzás nélküli megszűnésének valószínűsége (sugárzásmentes relaxáció) fordítottan arányos az érintett fotonok számával, és négyenél több rezgés-kvantum esetén lényegében elhanyagolható.

A megfigyelt emisszió tehát egyedülálló, és a $\text{B}_{2g} \rightarrow \text{B}_{1g}$ átmenetnek tulajdonítható, míg a $\text{B}_{1g} \rightarrow \text{B}_{2g}$ abszorpciós átmenet energiája 12500 cm^{-1} . Az emissziós átmenet, amely formálisan az előző fordított folyamata, körülbelül 10500 cm^{-1} -nél található. Mivel a Cu^{2+} összes átmenete spin-megengedett (dublett-dublett), erős elektron-rács csatolás várható.

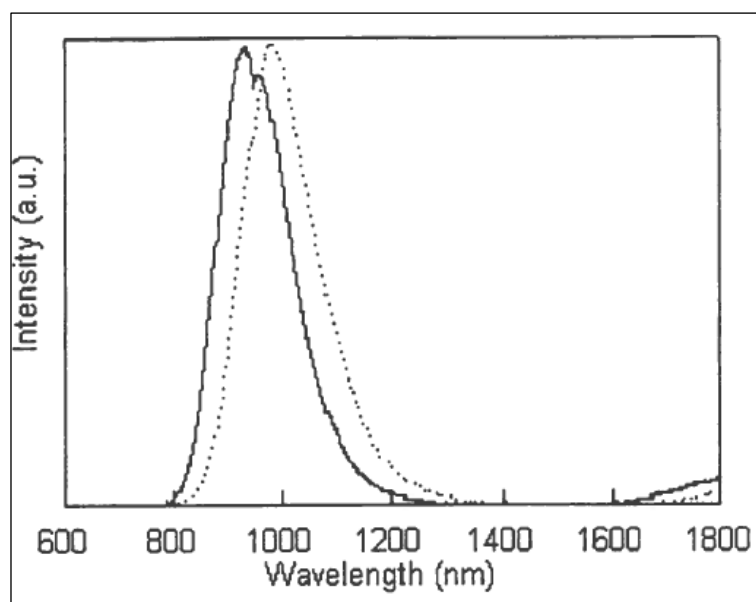
Ez a helyzet két lehetséges parabolával írható le, amelyek a $\nu(\text{E}_u)$ szerkezet-torzulási koordináta mentén helyezkednek el (207. ábra). A megfelelő oktaéderes ligandumtér átmenet megfelel egy elektron gerjesztésének a nemkötő vagy π -lazító t_{2g} pályáról a σ -lazító E_g pályára. Az elektrondelokalizáció kifejezettebb az E_g pályán, mint a T_{2g} pályán, ami miatt széles sávú átmenet várható az abszorpcióban és a lumineszcenciában.

A Han-kék és a Han-lila PL spektruma, amelyben a Ca^{2+} iont Ba^{2+} ion helyettesíti, egy széles sávból áll (208. ábra), amelynek csúcsmaximuma körülbelül 980 nm -nél található (kb. 10300 cm^{-1}). Bár a különbség a Han kék és a Han lila között meglehetősen kicsi, kísérletileg jelentős. Ami a PL spektrumok alkalmazását illeti, a Han pigmentek ismeretlen mintáinak azonosítására tanácsos további vizsgálatok elvégzése nagyobb mintakészlettel.

Az összes fent vizsgált, különböző alapanyagokból és különböző kezelések mellett előállított anyagok PL spektrumainak hasonlóságai alátámasztják azt a feltételezést,

¹²⁸ A fonon a kristályrács kollektív rezgéseinek kvantuma, vagyis a rácsban terjedő rezgési hullám kvázirészecske-leírása. Forrás: Charles Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 8th ed. (Hoboken, NJ: Wiley, 2005), 97–103.

hogy ebben a spektrumtartományban a Cu^{2+} ion felelős az emisszióért még akkor is, ha elvileg nem zárható ki a szennyeződések lumineszcenciájához való hozzájárulása.



209. ábra - Az egyiptomi kék és a Han kék szobahőmérsékleten felvett PL spektrumai. Forrás: Giorgio Pozza et al.2000

A 193. ábrán az egyiptomi kék sorozat egy spektrumát (nevezetesen a göteborgi mintát, lásd az 189. ábra c) vonalát) hasonlítjuk össze Han kék-el néhány közös jellemző ellenére, mint például a sáv alakja, különböznek, mivel a Han kék PL sávja vörös eltolódást mutat az egyiptomi kékhez képest. Ez igaz a Han lilára is és ez észszerűen megmagyarázható, figyelembe véve a ligandumtér változást, amely akkor lép fel, amikor a Ca^{2+} iont nagyobb méretű Ba^{2+} ion helyettesíti (lásd az abszorpciós energiákat az 20. táblázatban).

21.4 A bemutatott kutatásból levont következtetések

A fotolumineszcencia (PL) technika nemcsak rendkívül alacsony koncentrációjú szennyeződések, valamint azok oxidációs állapotának kimutatására bizonyult alkalmasnak, hanem finom szerkezeti eltérések detektálására is. Tehát a PL-spektrumok alkalmazása javasolt az egyiptomi kék, a Han-kék és a Han-lila pigmentek azonosítására, mivel az egyiptomi kék esetében a különböző eredetű minták között is jó spektrális reprodukálhatóság figyelhető meg, és ezek egyértelműen elkülönülnek a Han-kék spektrumától. Továbbá, a vizsgált pigmentek PL-spektrumai markánsan eltérnek más kék pigmentekétől.

A módszer kvázi roncsolásmentesnek tekinthető, mivel a méréshez elegendő egy körülbelül tized milliméteres nagyságrendű szemcseméretű minta és a gerjesztés fénnel történik.

21.5 Összefoglalás

A rézion (Cu^{2+}) az átmenetifémek közé tartozik, és különleges optikai tulajdonságai miatt fontos szerepet játszik az olyan pigmentekben, mint az egyiptomi kék, a Han kék vagy a Han lila. Elektronszerkezete miatt a réz különféle energiaszintek között képes fényt és sugárzást elnyelni és kibocsátani. Elméletileg ezek az átmenetek tiltottak lennének (nem kellene fényt kibocsátania), de a kristályszerkezet torzulásai – például a Jahn–Teller-efektus – miatt a rendszer szimmetriája csökken, így a fénykibocsátás mégis lehetővé válik. Ezért képes a Cu^{2+} ion olyan jellegzetes infravörös lumineszcenciát produkálni, amely a tárgyalt pigmentek egyik legfontosabb azonosító jegye.

Az egyiptomi kék két alkotó kristályszerkezetet már a 20. század közepén meghatározták: ebben a rézion négy oxigénatomhoz kapcsolódik, és egyfajta „lapos négyzetes” (síknégyzetes) geometriát alkot. Nagyon hasonló elrendezést mutat a Han kék és a Han lila is, de apró különbségekkel. A Han kék szinte teljesen izostruktúrális az egyiptomi kékkel, vagyis a szerkezet szinte azonos, míg a Han lila eltérő kristályrácsban kristályosodik: a szilícium-dioxid egységei másképp rendeződnek, és a réz más módon köti össze ezeket. Ennek ellenére a rézion koordinációja itt is síknégyzetes marad, a Cu–O kötésvolságok pedig szinte megegyeznek.

Az optikai tulajdonságok szoros összefüggésben állnak a szerkezettel. A különböző kristálytani környezetek miatt a rézion energiaszintjei kissé eltérően hasadnak fel, és ennek eredménye, hogy az emisszió tartománya is kismértékben változik. Az egyiptomi kék általában 910–930 nm környékén bocsát ki sugárzást (közeli infravörös tartományban), míg a Han kék és Han lila emissziós maximuma kissé eltolódik, mintegy 980 nm-re. Ez az eltolódás azzal magyarázható, hogy a kristályrácsban a kalciumionok helyére nagyobb báriumionok épülnek be, ami megváltoztatja a ligandumtér erősségét.

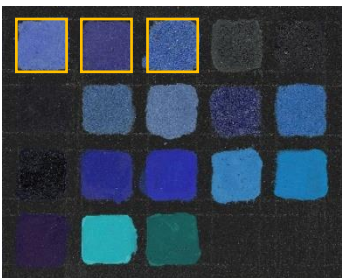
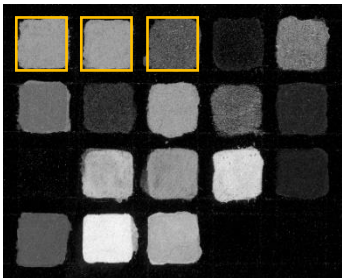
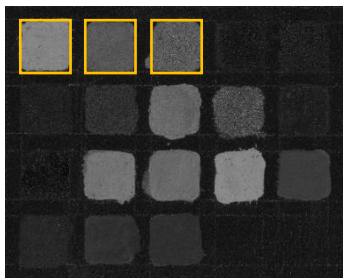
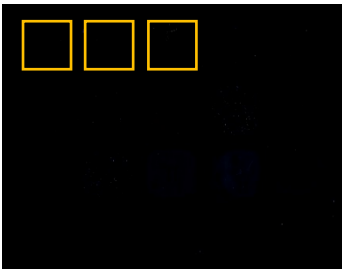
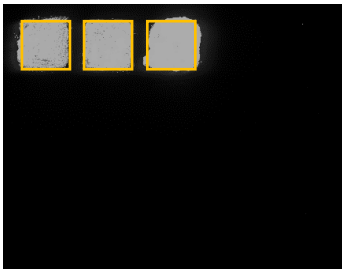
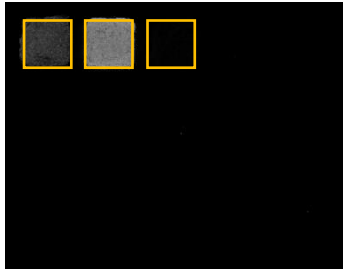
A lumineszcencia eredetét az ún. d–d átmenetek adják, vagyis a rézion saját d-pályái közötti elektronátmenetek. Mivel ezek a szabályok szerint tiltottak, a fénykibocsátás csak a rács rezgéseinek (fononoknak) a közreműködésével történhet. Ez a jelenség adja az egyiptomi kék és rokonai különlegesen stabil és évezredekken át megőrződő lumineszcenciáját.

Összességében tehát az egyiptomi kék, a Han kék és a Han lila lumineszcenciája a rézion síknégyszetes koordinációjához és a kristályrács szimmetriájának torzulásaihoz köthető. Bár a szerkezetük kissé eltér, a lumineszcens jelenség fizikai háttere közös, és ez teszi őket olyan különlegessé a történeti pigmentek között.

21.6 Modellkísérletek – Egyiptomi kék és a Han pigmentek

21.6.1 Referenciatáblák vizsgálatai – Egyiptomi kék és Han pigmentek

Az egyiptomi kék, a Han-kék és a Han-lila pigmentek esetében viszonylag kevés nyitott kérdés merül fel, mivel e színezőanyagokat a szakirodalom már alaposan tanulmányozta, és a korábbi vizsgálatok egyértelmű következtetésekre vezettek. A vizsgálatok során beszerzett referencia-anyagok viselkedése összhangban állt a szakirodalomban leírt jellemzőkkel. A kutatás keretében egy a Kremer cég által forgalmazott, „egyiptomi zöld” megnevezésű pigment is vizsgálat tárgyává vált annak érdekében, hogy tisztázható legyen: mutat-e a korábban vizsgált egyiptomi kékkel analóg viselkedést.

21. táblázat – A kék pigmentmezők többsávos képeken		
Phase One MSI		
		
VIS-R_VIS Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec, ISO 50	IR_R_IR830-1000 Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 2 sec, ISO 50	UV-R_UV365 Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 8 sec, ISO 50
		
VIS-L_UV365 Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 15 sec, ISO 50	IR-L_VIS Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 120 sec, ISO 50	IR-L_UV365 Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 120 sec, ISO 50

Sony Full spectrum kamera		
VIS-L_UV ₃₆₅ Sony A 7R Mark IV, 90 mm, f/5.6, 30 sec, ISO 100	IR-L_VIS Sony A 7R Mark IV, 90 mm, f/5.6, 25 sec, ISO 100	IR-L_UV ₃₆₅ Sony A 7R Mark IV, 90 mm, f/5.6, 30 sec, ISO 1600
(narancssárga keretézéssel balról jobbra Han kék, Han lila és végül az egyiptomi kék)		

A felvételeken jól megfigyelhető, hogy míg a Han-kék és a Han-lila pigmentek mindkét gerjesztési tartományra reagálnak és az infravörös tartományban lumineszkálnak, addig az egyiptomi kék minta kizárólag a látható tartományú gerjesztésre mutat emissziós válaszreakciót. A vizsgálatok során az ultraibolya sugárzók minden esetben Schott UG1 vagy Schott UG11 típusú zárószűrővel voltak ellátva annak érdekében, hogy a gerjesztőforrásból származó, a látható és infravörös tartományba eső komponensek se gerjesztő sugárzásként, se reflexiós elemként ne jelenjenek meg a képalkotásban.

A vizsgálatokhoz beszerzett egyiptomi zöld pigment – amely az előzetes eredmények alapján hasonló összetételt mutatott, mint az egyiptomi kék (kalcium szegény változat) – sem látható fényre, sem pedig ultraibolya sugárzásra nem reagált (22. táblázat).

22. táblázat – A zöld pigmentmezők többsávos felvételei. Forrás: saját felvétel		
Phase One MSI		
VIS-R_VIS Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec, ISO 50 (az egyiptomi zöld mező a vörös jelölőnégyzettel kiemelve)	IR_R_IR ₈₃₀₋₁₀₀₀ Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 2 sec, ISO 50	UV-R_UV ₃₆₅ Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 8 sec, ISO 50

		
VIS-L_UV ₃₆₅ Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 15 sec, ISO 50	IR-L_VIS Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 120 sec, ISO 50	IR-L_UV ₃₆₅ Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 120 sec, ISO 50

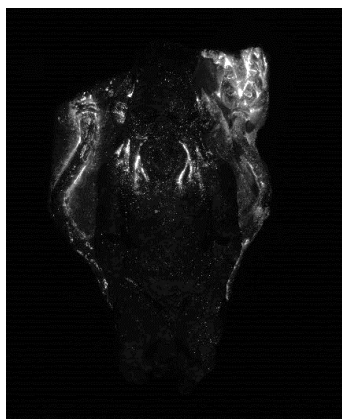
21.6.2 Műtárgyakon elvégzett kísérletek - Egyiptomi kék és Han pigmentek

A vizsgálatok több antik műtárgyon is elvégezhetők voltak, és minden esetben pozitív eredménnyel zárultak. A vizsgált tárgyak a budapesti Szépművészeti Múzeum Egyiptomi Gyűjteményéből származtak. Az első egy festett mészkő dombormű, amely Bész isten alakját ábrázolja (mérete: 33 × 21 centiméter, készítési ideje: Kr. e. 4–1. század). A második egy festett fa sztélé (mérete: 49,5 × 31,5 × 2,8 centiméter), amely a Ptolemaiosz-korba datálható. Mindkét esetben fennállt a feltételezés, hogy a festett rétegek egyiptomi kék pigmentet tartalmazhatnak.

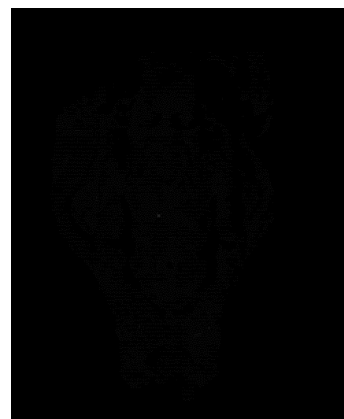
A Bész-dombormű esetében a kék pigment csupán töredékesen, kopott állapotban maradt fenn, ami feltehetően korábbi restaurálási beavatkozások következménye. Ezért a vizsgálat fő célja a korábban létezett, mára alig látható festett felületek lokalizálása és rekonstruálása volt. A sztélé esetében ezzel szemben a kék festett mezők jól megfigyelhetők voltak, így itt a cél a pigmentek összetételének pontos analitikai meghatározása volt.



210. ábra – Totálfelvétel a szoborról. VIS-R_VIS, Phase One IXH, 72 mm, f/11, 0.8 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel



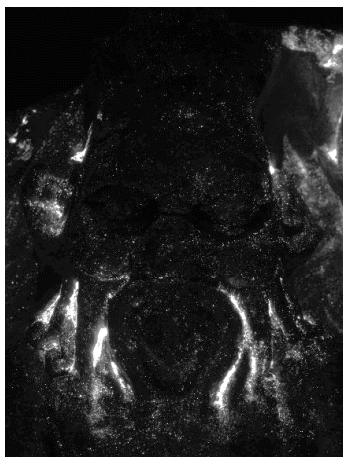
211. ábra - Totálfelvétel a szoborról. IR-L_VIS, Phase One IXH, 72 mm, f/11, 120 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel



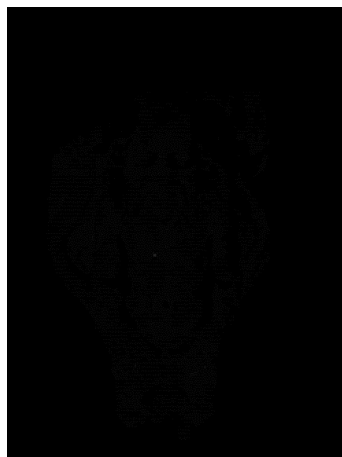
212. ábra – Totálfelvétel a szoborról. IR-L_UV₃₆₅, Phase One IXH, 72 mm, f/11, 120 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel



213. ábra - Részletfelvétel a szoborról, VIS-R_VIS, Phase One IXH, 72 mm, f/11, 0.8 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel



214. ábra - Részletfelvétel a szoborról, VIS-L_VIS, Phase One IXH, 72 mm, f/11, 120 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel

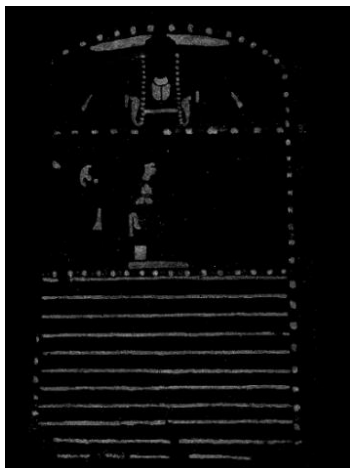


215. ábra - Részletfelvétel a szoborról, VIS-R_UV₃₆₅, Phase One IXH, 72 mm, f/11, 120 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel

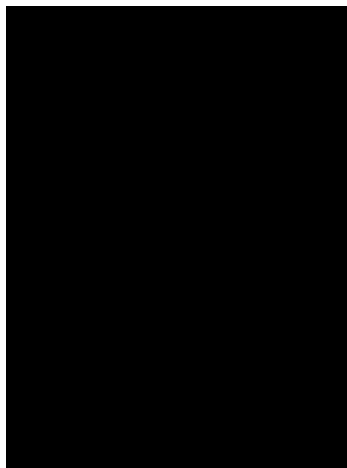
A felvételeken jól megfigyelhető, hogy egyiptomi kép pigment reagál a látható tartományú gerjesztő sugárzásra, az ultraibolya sugárzás hatására viszont nem mutat lumineszcenciát. Az eljárás sikeres alkalmazásához elegendő nagyon minimális mennyiségű anyag is a felületen, hogy lumineszcenciája miatt jól kimutathatóvá váljon.



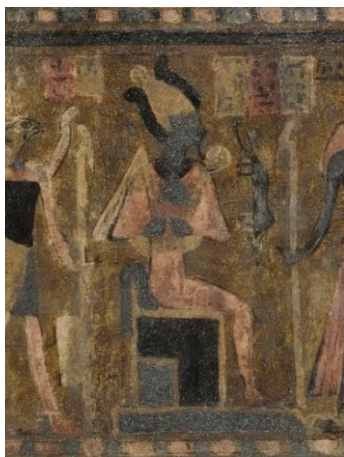
216. ábra – Totál felvétel a tábláról. VIS-R_VIS, Phase One IXH, 72 mm, f/11, 0.8 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel



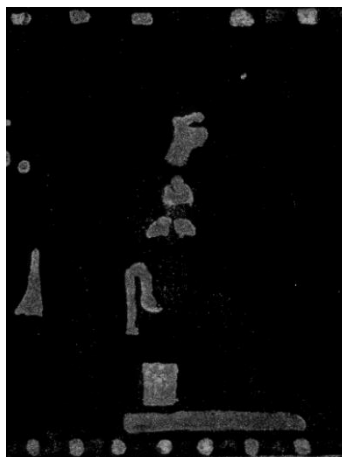
217. ábra – Totál felvétel a tábláról. IR-L_VIS, Phase One IXH, 72 mm, f/11, 120 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel



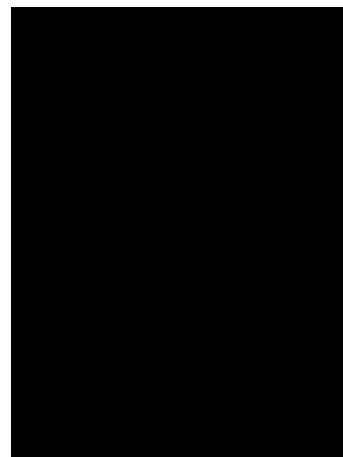
218. ábra – Totál felvétel a tábláról. IR-L_UV₃₆₅, Phase One IXH, 72 mm, f/11, 120 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel



219. ábra – Részletfelvétel a tábláról. VIS-R_VIS, Phase One IXH, 72 mm, f/11, 0.8 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel



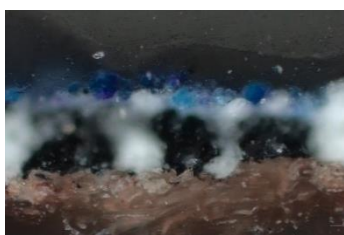
220. ábra - Részletfelvétel a tábláról. IR-L_VIS, Phase One IXH, 72 mm, f/11, 120 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel



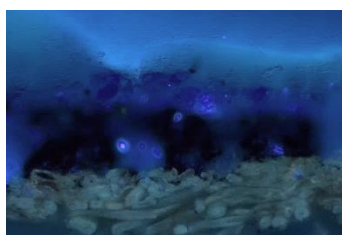
221. ábra – Részletfelvétel a tábláról. IR-L_UV₃₆₅, Phase One IXH, 72 mm, f/11, 120 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel

21.6.3 Optikai mikroszkópos keresztmetszet csiszolatok elemzése – Mikrominta-elemzés

A kialakított módszertan szerint az egyiptomi kék, a Han kék és a Han lila szektorokból is lett minta kiemelve és azokból keresztmetszet csiszolat is készült. A minták felvételeit a lent látható ábrák mutatják be. A felvételeken jól megfigyelhető a mintatáblákról elkészített felvételeken is tapasztalt jelenség, hogy mindhárom pigment reagál a gerjesztő sugárzásra (ultraibolya – Han pigmentek és látható – egyiptomi kék) és lumineszkál a közeli infravörös tartományban



222. ábra - A BL1-es szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele. VIS-R_VIS (10 okulár, 20x objektív Forrás: saját felvétel



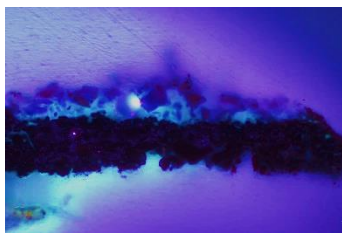
223. ábra - A BL1-es szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele. VIS-L_UV₃₆₅ (10 okulár, 20x objektív Forrás: saját felvétel



224. ábra - A BL1-es szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele. IR-L_UV₃₆₅ (10 okulár, 20x objektív Forrás: saját felvétel



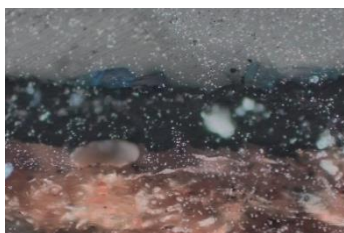
225. ábra - A BL2-es szektorból vett minta keresztmetszet csi-szolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-R_VIS (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



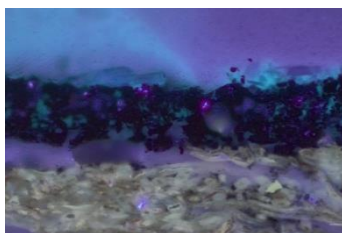
226. ábra - A BL2-es szektorból vett minta keresztmetszet csi-szolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-L_UV₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



227. ábra - A BL2-es szektorból vett minta keresztmetszet csi-szolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, IR-L_UV₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



228. ábra - A BL3-es szektorból vett minta keresztmetszet csi-szolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-R_VIS (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



229. ábra - A BL3-es szektorból vett minta keresztmetszet csi-szolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-L_UV₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel



230. ábra - A BL3-es szektorból vett minta keresztmetszet csi-szolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, IR-L_VIS (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel

21.7 Összefoglalás – a Han kék és Han lila, valamint az egyiptomi kék és zöld lumineszcenciája

Az egyiptomi kék, Han kék és Han lila pigmentek vizsgálata során különféle modellkísérletek készültek, amelyek célja a szakirodalomban leírt lumineszcencia-jelenségek ellenőrzése, valamint a gyakorlatban alkalmazható mérési módszerek értékelése volt. A vizsgálatokhoz modern gyártású, kereskedelmi forgalomban kapható referencia-pigmentek felhasználásával készült mintatáblák és történeti műtárgyak vizsgálata is megtörtént.

Az eredmények egyértelműek. A Han pigmentek és az egyiptomi kék is jellegzetes infravörös lumineszcens tulajdonsággal rendelkezik. A fő különbség a gerjesztő sugárforrás és a kibocsájtott emissziós csúcs helye a spektrumon. A Han pigmentek ultraibolya és látható tartományú gerjesztésre is reagálnak, a lumineszcencia csúcsa 980 nanométeren mérhető. Az egyiptomi kék viszont csak a látható tartományú sugárzásra reagál és az emissziós csúcsa valamivel lejjebb, 920 nanométer körül van.

A vizsgálatokhoz egy kereskedelmi forgalomban „egyiptomi zöld” néven kapható pigment is beszerzésre került. A mérések szerint ez az anyag sem látható fényre, sem

ultraibolya sugárzásra nem mutatott lumineszcens választ, ami összhangban áll azzal, hogy szerkezeti felépítése nem teszi lehetővé a Cu^{2+} ionok jellegzetes infravörös emisszióját.

22 MANGÁNKÉK NIR TARTOMÁNYÚ LUMINESZCENCIÁJÁRÓL¹²⁹

A mangánkék egy szintetikus bárium-manganát (VI)-szulfát vegyület, amelyet 1935-től az 1990-es évekig gyártottak. Felhasználták művészi műalkotások kék pigmentjeként és restaurátori gyakorlatban egyaránt, például festett tárgyak restaurálása során. Ez a fejezet bemutatja a vegyület fotofizikai tulajdonságait, valamint részletesen tárgyalja a mangánkék fotoindukált lumineszcenciáját, továbbá bemutatja azt a módszert, amellyel a pigment műalkotásokon való azonosítását és a térbeli eloszlásának vizsgálatát meg lehet valósítani.

22.1 A pigment történetéről röviden

A mangánkék egy modern, szintetikus, zöldeskék pigment. Egy bárium-manganát (VI)-szulfát vegyület, amely a $x\text{BaSO}_4y\text{BaMnO}_4$ képlettel írható le (Colour Index, 1971, CI 77112/Pigment Blue 33) és nátrium-szulfát, kálium-permanganát és bárium-nitrát kb. 750-800°C hőmérsékletre történő hevítésével állítható elő; de ugyanezen szerző többféle előállítási módszert is közölt. Míg a szabadalom csak 1935-ben kerül bejegyzésre az I.G. Farbenindustrie AG által¹³⁰¹³¹¹³², Salter 1869-ben már közli, hogy „a kálium-permanganát vizes oldata baritvízzel¹³³ lila szerkezetet ad, amely utána színtelenné válik, és kék csapadékot rak le”. Azt is hozzátették, hogy a csapadék „mosás és szárítás után is megtartja színét, de nem ajánlható pigmentként”. Bár a Salter által létrehozott vegyület nem biztos, hogy pontosan megegyezik az 1930-as évek közepe óta gyártott mangánkékekkel, az ő ajánlását nem követték. A mangánkéket egészen az 1990-es évekig gyártották és árulták pigmentként, amikor a toxicitása miatti aggodalmak okán a gyártást leállították. Jelenleg főként a réz-ftalocianinkéket (74160/PB 15,) használják a mangánkék kiváltására.¹³⁴

¹²⁹ Gianluca Accorsi, Giovanni Verri, Angela Acocella, Francesco Zerbetto, Giovanni Lerario, Giuseppe Gigli, David Saunders, and Rachel Billinge, “Imaging, Photophysical Properties and DFT Calculations of Manganese Blue (Barium Manganate(VI) Sulphate) – a Modern Pigment,” *Journal of Materials Chemistry C* 2, no. 33 (2014): 6471–6479, <https://doi.org/10.1039/C4CC01986E>

¹³⁰ Eastaugh et al. 2004.

¹³¹ Monika De Keijzer, *Kunst des 20. und 21. Jahrhunderts: Probleme und Perspektiven zur Erhaltung = Works of Art from the 20th and 21st Century: Problems and Perspectives in Conservation* (Klosterneuburg: Stift Klosterneuburg Verlag, 2011).

¹³² Rutherford J. Gettens and George L. Stout, *Painting Materials: A Short Encyclopaedia* (New York: Dover Publications, 1966).

¹³³ Bárium oxidjai és hidroxidjai

¹³⁴ T. W. Salter, *Treatise on Colours and Pigments as used by Artists*, Winsor and Newton, London, UK, 1869.

A mangán kéket a cement színezőanyagaként is használták, ezért „cementkék” néven is ismert. A cementiparban való felhasználáson kívül a mangánkéket az első ipari gyártásától kezdve egészen az 1900-as évekig művészfestékként is értékesítették. Ezért számos művész használhatta, de a szerzők tudomása szerint – rövid említését leszámítva¹³⁵ – kevés¹³⁶, mondhatni nincs publikált tudományos bizonyíték a mangánkék műalkotásokban való használatára. Az 1980-as években a mangánkéket a restaurátoroknak az azurit kiváló, megfelelőjeként ajánlották. A pigmentet még a mai napig használják festett műtárgyak restaurálása során, annak ellenére, hogy a készletek fogynak, mivel a pigmentet már nem gyártják. Emiatt is volt nehéz a beszerzése és a fotofizikai tulajdonságok ellenőrzése.

A szakirodalom két féle változatot említ: az egyik, amit a BASF cég gyártott az 1930-as évek végétől az 1980-as évekig, pontos összetétele ipari titok. Mikroszkópos vizsgálattal jól azonosítható: jellegzetes, halvány türkizkék, sima felszínű, gyakran koncentrikus zónázottságú, lapos hatszögletű kristályai vannak, középpontjukban sötét folttal, pleokroikus¹³⁷ pigment. Síkban polarizált és keresztpolarizált fényben is jól meghatározható optikai jellemzőket mutat (alacsony törésmutató, kettőtörés, rendellenes interferenciaszínek). Röntgendiffrakcióval megkülönböztethető a bárium-mangán-oxidtól. A Chelsea-szűrőn keresztül szürkés-kék színűnek látszik az alacsony vörös fényáteresztés miatt.

A másik a bárium-mangán oxid (bárium-manganát) egy ritkábban használt modern kék pigment, amely összetételében és optikai tulajdonságaiban jelentősen eltér a BASF-féle mangánkéktől. Mikroszkóp alatt tinta-kék színű, finomszemcsés, közepes törésmutatójú szemcsék figyelhetők meg, amelyek gyakran aggregátumokat képeznek. Síkban polarizált fényben a szemcsék lekerekített vagy tűszerűek. Keresztezett polarizátorok alatt gyenge kettőtörést és rendellenes vörös interferenciaszíneket mutatnak, egyenes kioltással. Chelsea-szűrőn át sötétvörösén jelennek meg.

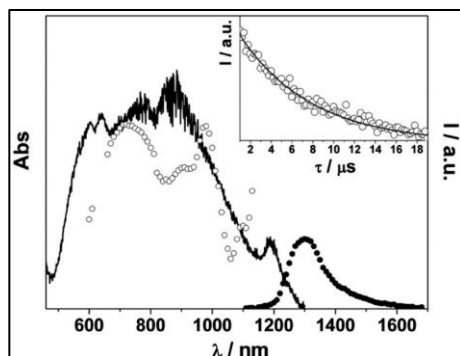
¹³⁵ A cikk hivatkozásaiban kiemelt intézményekkel való elektronikus levelezésekre van utalás.

¹³⁶ Ágota Kovácsné Göögös, *A 19. és a 20. századi festményekről készült hamisítványok kiszűrésének lehetőségei a restaurátori gyakorlatban: Aba-Novák Vilmos (1894–1941) festéstechnikájának vizsgálata* (DLA-értekezés, Magyar Képzőművészeti Egyetem, Doktori Iskola, Budapest, 2020, zárolt).

¹³⁷ A pleokroizmus (pleokróis, pleokroikus) az ásványok és kristályok azon optikai tulajdonsága, amelynek során a kristály különböző irányokból vizsgálva eltérő színekben jelenik meg, mivel az eltérő kristálytani tengelyek mentén más a fényelnyelés mértéke. Forrás: Mónika Tóth és Imre Tarján, *Ásványtan* (Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó, 1998), 125.

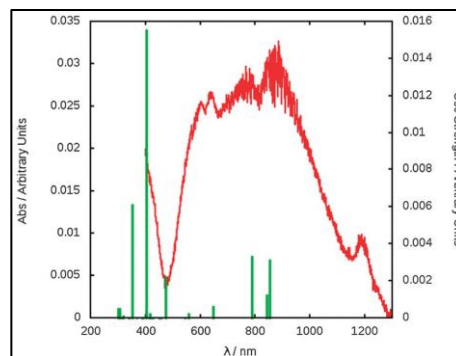
22.2 A mangánkék fotofizikai tulajdonságai

A mangánkék fotofizikai tulajdonságait tiszta por formájában, káliumbromidba ágyazva is vizsgálták az abszorbanca érték finomítása érdekében a lumineszcencia mennyiségi meghatározásához (Gianluca Accorsi et al. 2014). A szilárd állapotban, por formájában kapott abszorpciós (összreflexiós), gerjesztési és emissziós profilokat és a gerjesztett állapot élettartamát (a gerjesztett állapot időbeni lecsengését) a 220. ábra mutatja.



231. ábra -A porított szintetikus mangán-kék abszorpciós (teljes reflexió, teljes vonal), gerjesztési (üres kör, $\lambda_{em} = 1300$ nm) és emissziós (teljes kör, $\lambda_{exc} = 637$ nm) spektrumai. Jobbra fent: lumineszcencia-csökkenés (7,1 ms, $\lambda_{exc} = 637$ nm).

Forrás: Gianluca Accorsi et al. 2014



232. ábra - A kísérleti Mn-adalékolt BaSO₄ abszorpciós spektrum (piros vonal) és az elméleti TD-UB3LYP/631+G* spektrum (zöld sávok); a jobb oldali y-tengelyen az elméleti oszcillátor-erősségek vannak feltüntetve. Forrás: Forrás:

Gianluca Accorsi et al. 2014

A vegyület a látható és a közeli infravörös tartományban kb. 500 és 1250 nanométer között elnyeli a sugárzást; ez az abszorpciós mintázat felelős az anyag kék színéért. Az abszorpciós spektrumot széles sávszerkezet jellemzi, ami az elektronátmenetek és a rácsfononok közötti nagyon erős, az átmeneti fémkristályrendszerekre jellemző csatolásnak köszönhető. A korábbi elképzelések szerint ez főként egy közeli infravörös sávrendszerből áll, 800 és közel 900 nanométer között, amely a $^2E \rightarrow ^2T_2$ ligandumtér (*Ligand Field-LF*) átmeneteknek tulajdonítható, valamint 600 és 800 nanométer közötti ligandum-fém töltésátviteli sávokból (LMCT- *Ligand-to-Metal Charge Transfer*, azaz ligandumtól a fémre történő töltésátvitel), ahogyan azt a jelen munka során végzett sűrűségfunkcionál számítások (*Density Functional Theory-DFT*) is megjósolták (lásd alább).

Az 1300 nanométeren történő emisszió megfigyelésével kapott gerjesztési spektrum megegyezik az abszorpciós profil energiapozíciójával, ami azt jelzi, hogy a kibocsátó szinteket közvetlenül a fent említett abszorbeáló állapotok töltik be. Az 1300 nanométernél jelentkező lumineszcencia (az emissziós csúcsnak körülbelül 1300 nanométernél van a maximuma) fotolumineszcencia-kvantumhozamát (*Photoluminescence Quantum Yield-*

PLQY) és a hozzátartozó időtartamot (a gerjesztett állapot lecsengését – legerjesztődést) sikerült kiszámolni, meghatározni. A mangánkék 637 nanométer hullámhosszú sugárzással történő gerjesztésével a PLQY 0,5%-nak, a megfelelő bomlási idő pedig 7,1 millisekundumnak adódott. A MnO_4^{2-} anion optikai szerkezetének felderítésére tett kísérlet során kvantummechanikai DFT-számításokat végeztek a mangánat (VI)-anion $3d^1$ elektronkonfigurációjára, hogy segítsék az abszorpciós spektrum értelmezését. Brunold korábbi¹³⁸, BaSO_4 gazdarácsban adalékolt MnO_4^{2-} ionokra vonatkozó vizsgálatai a kristályhelyek geometriájának C_s -ről kvázi- C_{2v} szimmetriára történő torzulását jelzik, és a MnO_4^{2-} anionra vonatkozóan a szögátfedési modell (*Angular Overlap Model-AOM*) alapján kristálytérelemzést adtak.

Az időfüggő sűrűségfüggvény számításokat a *Gaussian09* programcsomag segítségével futtatták le a C_{2v} szimmetriájú anion geometrián, hogy elemezzék a MnO_4^{2-} adalékolt BaSO_4 optikai spektrumát a közelítőleg C_{2v} szimmetriacsoportban. A mangán (VI)-elektronokra vonatkozó DFT-függvények és ECP¹³⁹ (Effective Core Potential) pszeudopotenciálok különböző paramétereivel (*Table S1*)¹⁴⁰ alap- és elektronállapot-számításokat végeztek a kísérleti abszorpciós sávok pontos reprodukálása céljából. A legjobb számítási teljesítményt az UB3LYP elmélet nyújtotta az oxigénatomok 6-31+G* bázisfüggvénykészletével, kombinálva egy módosított LAN2LZ pszeudopotenciál-változattal (az első soros átmeneti fémekre optimalizált) mangán (VI)-ra. Az *S2 table* a C_{2v} anion geometriára vonatkozó TD-UB3LYP elméleti átmenetenergiákat, a jelen tanulmányban kapott kísérleti abszorpciós sávokat és Brunold korábbi irodalmi adatait tartalmazza, amelyek kiterjesztették a spektrális tartományt 500 nm alá. A könnyebb értelmezés kedvéért az 220. ábra a kísérleti és az elméleti pálcikaspektrumok összehasonlítását mutatja. Számításaik, összhangban a ligandumtér elmélet (LFT) előrejelzéseivel, lehetővé teszik, hogy egy közeli IR sávrendszert (Brunold szerint 800 és 900 nm között kiterjesztve) megfelelően hozzárendeljék a ${}^2E \rightarrow {}^2T$ LF átmenetekhez, amelyek a *Jahn-Teller* $Td-C_{2v}$ torzítás következtében három, majdnem átfedő d-d sávra hasadnak fel. Az elektronhullámfüggvénnyel végzett DFT molekulapálya számítások is feltárják a három LF

¹³⁸ T. C. Brunold and H. U. Gudel, *Inorg. Chem.*, 1997, 36, 1946–1954.

¹³⁹ Az ECP (Effective Core Potential) vagy effektív magpotenciál egy kvantumkémiai módszer, amely a belső (magközel) elektronokat helyettesítő potenciálként kezeli, így a számítások során csak a vegyértékelektronokat kell expliciten figyelembe venni. Forrás: Surján Péter, *Bevezetés a kvantumkémiaiába* (Budapest: ELTE Eötvös Kiadó, 2005), 213.

¹⁴⁰ A cikkben említett Table S1 és Table S2 táblázatok kizárólag a supplements (ESI) dokumentumban találhatóak meg, nem a főcikkből. Table S1 – összehasonlítás a TD-UB3LYP számítások, a kísérleti abszorpciós adatok és Brunold irodalmi eredményei között (500 nm alatti tartományban). Table S2 – különféle funkcionálok és pszeudopotenciálok kombinációinak eredményei Mn(VI) atomokra vonatkozóan.

részt vevő d-pályák C_{2v} transzformációs tulajdonságait (*Table S1*) a közeli DFT-energiák miatt felcserélődött szimmetriaállapotokkal együtt. Ahogyan az irodalomban is szerepel, az MO-elemzés (MO: molekulapálya elmélet) megerősíti a 600 nm alatti tartományban az abszorpció töltésátviteli jellegét a résztvevő d-pályák által, így azok LMCT-átmenetekhez rendelhetők (a ligandumtól a fémhez történő töltésátvitelhez).

Az 220. ábra látható kísérleti abszorpciós spektrum a 620 és 820 nm közötti tartományban további sávokat mutat a MnO_4^{2-} -ről korábban közölt spektrumokhoz képest. A DFT-számítások két különböző csúcscsoportot is előre jeleznek ebben a tartományban, 787, illetve 646 nm-nél, amelyek jellege alacsonyabb energiájú LMCT-állapotoknak, illetve az oxigén és a Mn (VI)-ion közötti elektronsűrűség újraelosztásának tekinthető, az Mn-O kötés kissé ionos jellege miatt.

22.2.1 A fotofizikai eredmények összefoglalása

A mangánkék (MnO_4^{2-} alapú vegyület) különleges optikai tulajdonságai abból adódnak, hogy a látható és a közeli infravörös tartományban – körülbelül 500–1250 nm között – nyeli el a sugarakat. Ez az abszorpciós tartomány felelős a jellegzetes kék színért. Az elnyelés széles sávokban történik, ami az elektronátmenetek és a kristályrács rezgései (fononok) közötti erős kölcsönhatás következménye.

A pigment 1300 nanométer körül lumineszkál, vagyis közel-infravörös fényt bocsát ki. A lumineszcencia hatásfoka ugyan alacsony ($PLQY \approx 0,5\%$), de az emisszió szokatlanul hosszú ideig tart (körülbelül 7,1 ms). Az elnyelési és kibocsátási sávok egymással összefüggnek, vagyis ugyanazon gerjesztett állapotokhoz köthetők.

A kvantumkémiai számítások (DFT) azt mutatták, hogy a MnO_4^{2-} anion szerkezete kissé torzult, ami a Jahn–Teller-hatásnak köszönhető. Emiatt az energiaállapotok több, átfedő sávra hasadnak. A közeli infravörös sávok d–d átmenetekhez köthetők (a mangánion saját elektronhéján belül), míg a látható tartományban jelentkező elnyelés főként töltésátviteli (LMCT) átmenetek eredménye, amikor elektronok az oxigénatomokról a fémionra kerülnek.

Összességében a mangánkék színét és lumineszcenciáját a MnO_4^{2-} ion elektronátmenetei és a kristályrács torzulásai együttesen alakítják ki, így az anyag egyszerre mutat intenzív kék színt és a közel-infravörös tartományban érzékelhető emissziót.

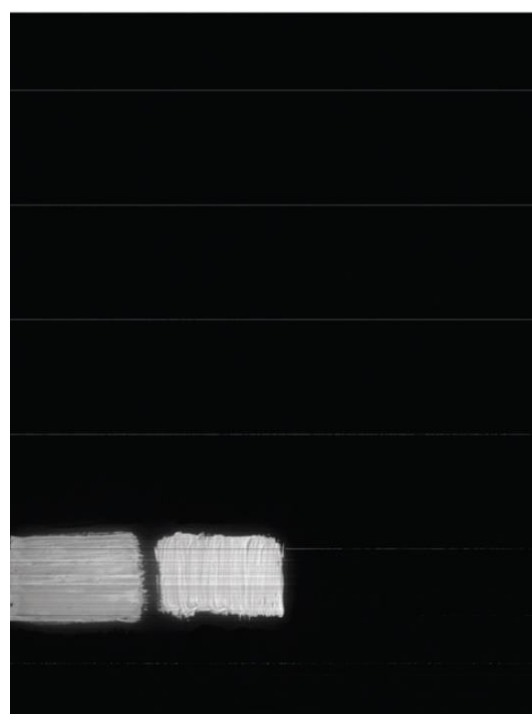
22.3 Vizsgálati eredmények – szakirodalmi példákkal

A mangánkék fotoindukált lumineszcens tulajdonságai tehát felhasználhatók a pigment térbeli eloszlásának non-invazív vizsgálatára. Ahogy az a korábbi fejezetekben olvasható volt, a fotoindukált lumineszcens-képkalkotást már széles körben alkalmazták más szervetlen pigmentek, például a titánfehér (rutil) vagy a kadmiumalapú vörös és sárga pigmentek azonosítására és eloszlásának feltérképezésére.

A 237. és 238. ábrák egy különböző kék pigmentekkel, köztük mangánkéssel festett tábla, egy normál felvétel (balra) és egy látható fény által indukált lumineszcencia (jobbra) képét mutatja.



233. ábra - Látható fényes felvétel a különböző kék pigmentekről, beleértve a mangánkéket, amely az egyetlen olyan kék pigment. Forrás: Gianluca Accorsi et al. 2014



234. ábra - Látható fénnel indukált infravörös lumineszcens felvétel 700-1700 nm-es tartományban különböző kék pigmentek esetében, beleértve a mangánkéket, amely az egyetlen olyan kék pigment, amely látható fénnel besugárzva infravörös sugárzást bocsát ki 1300 nm körüli csúccsal. Forrás: Gianluca Accorsi et al. 2014

A lumineszcens felvételen a mangán kék világos foltként jelenik meg a sötét háttér előtt, erős infravörös lumineszcenciát produkálva. A VIrL felvételt kék, zöld és vörös LED gerjesztő források kombinációjával, valamint egy InGaAs kamerával (Osiris, Opus

Instruments, érzékenység kb. 700-1700 nm) készítették, amelyen egy Schott RG830 szűrőt (50%-os transzmisszió 830 nm-en) használtak. (A felvételen látható fehér/szürke vízszintes vonalak a hosszú integrálási idő okozta zajból adódnak.)

Az indigóval festett két mintadarab nagyon gyenge lumineszcenciát mutat, amelyről már korábbi publikációk is beszámoltak¹⁴¹, de ritkán figyelhető meg valós esetekben. Ez a lumineszcencia csak akkor látható, ha a kontrasztot erősen felerősítik, a fenti ábrán ez nem figyelhető meg.

Ugyanezzel a berendezéssel készültek felvételek a londoni National Gallery gyűjteményében található, Cappenberg mester által festett *Szűz Mária megkoronázása* című festményről. Ez az 1520 körülre datált tábla egyike a liesborni oltárkép számos fennmaradt töredékének. A festmény 1984-es restaurálása során mangánkéket és kadmiumsárgát használtak a festékek hiányainak helyreállítására, különösen a fatáblát alkotó két fadeszka közötti függőleges illesztés mentén. A mangánkékekkel a Szűzanya kék (azurit) köpenyét és a szürke talapzatot – amelyen a nő térdel – retusálták, míg a kadmiumsárgát a Mária ruhájának arany brokátján használták. A kadmiumsárga, mint már említettük, a látható tartományban gerjesztve erős lumineszcenciát mutat a 800-1000 nanométeres tartományban. A 223. ábra *A Szűz Mária megkoronázása* című kép egyik részletének látható a), 800-1000 nanométeres tartományban láthatóvá vált lumineszcencia c) és 700-1700 nanométeres tartományban láthatóvá vált lumineszcencia d) képét mutatja (a gerjesztés hullámhossza 450-650 nanométer). A látható indukált lumineszcencia képeken alul, egy kör alakú 99%-os Spectralon® reflexiós standard látható, amely nem mutat lumineszcenciát, és így referencia standardként szolgál. A referencia-standardnál nagyobb szürke értékek lumineszcenciának tulajdoníthatók.

¹⁴¹ D. Ajo', G. Chiari, F. De Zuane, M. Favaro and M. Bertolin, Photoluminescence of some blue natural pigments and related synthetic materials, Art '96 proceedings, Budapest, 1996.



235. ábra –Látható fényes reflexiós totál- és részletfelvétel a), b); infravörös lumineszcens felvétel a 800-1000 nm-es tartományban c); és infravörös lumineszcens felvétel a 700-1700 nm-es tartományban d) a Cappenbergi mester Szűz Mária megkoronázása (NG 263) című művének egyik eleméről. Forrás: Gianluca Accorsi et al. 2014

A 239. ábra c) képe a kadmiumsárga lumineszcenciáját mutatja a brokát és a padlón, míg a d) kép mind a kadmiumsárga lumineszcenciáját a brokát, mind a mangánkékét a kék köpenyen. A festmény alsó sávjában a fehér Spectralon® referenciastandard szürke megjelenése azt jelzi, hogy az utóbbi képen némi szórt infravörös sugárzás van. Ez a technika meglehetősen érzékeny, és még a kék pigment kis mennyiségét is tisztán mutatja.

22.3.1 A szakirodalmi példa összefoglalása

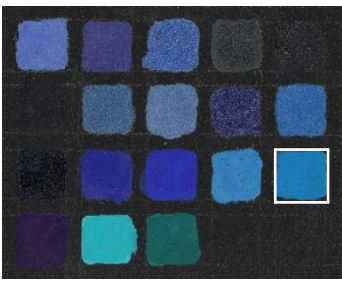
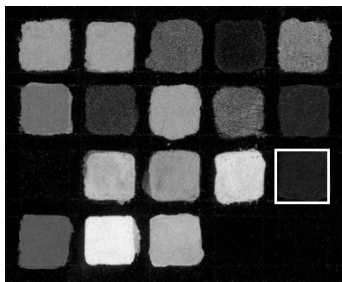
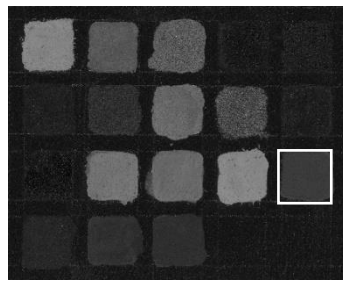
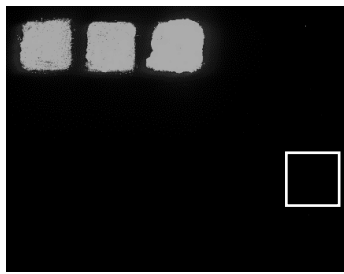
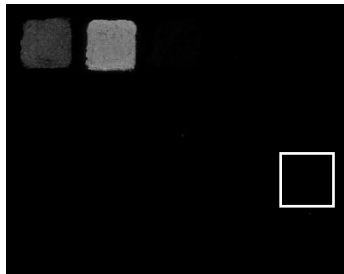
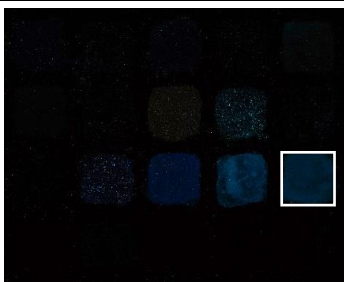
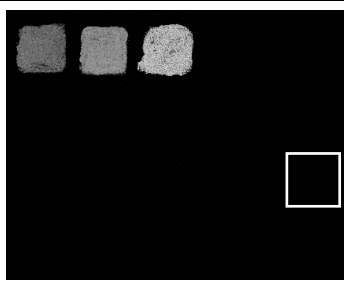
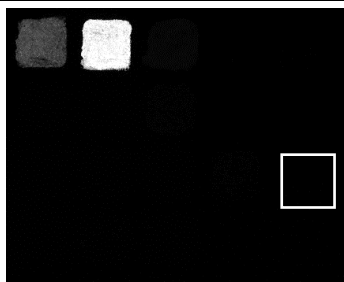
Az említett tanulmányban tehát a mangán kék szervetlen vegyület átfogó optikai vizsgálatáról számoltak be. A mangánkék pigment kék színe és infravörös lumineszcenciája mögött összetett kristályszerkezeti és kvantummechanikai hatások állnak. A ligandumtér-elmélet, a DFT-számítások, valamint a kísérleti spektroszkópiai mérések együtt teszik

lehetővé az anyag optikai viselkedésének pontos értelmezését. A fotofizikai tulajdonságok az elméleti számítások szerint a mangánkék minták széles fényelnyelést (kb. 500–1200 nm) és NIR fotolumineszcenciát (1300 nm, FPL = 0,5%) mutatnak, amely $^2E \rightarrow ^2T_2$ ligandum-mező (LF) átmenetektől ered.

Az általuk alkalmazott és leírt nem invazív, hordozható képalkotási technika műzeumi környezetben is alkalmazható a pigment térbeli eloszlásának azonosítására, mind az eredeti festékrétegben, mind a restaurátorok által retusáló pigmentként történő felhasználás esetén. A pigment előállításának jól dokumentált története miatt a pigment eredeti vagy hozzáadott anyagként való azonosítása egy műalkotáson kiindulópontként szolgálhat egy tárgy vagy egy tárgyon végzett beavatkozás datálásához, valamint egy festmény állapotának értékeléséhez.

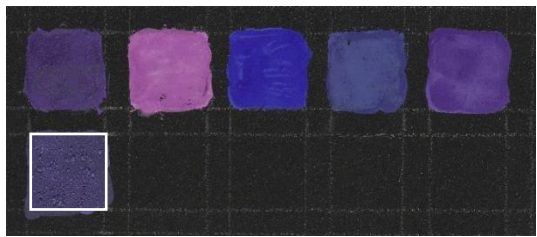
22.4 Modellkísérletek – Mangánkék és mangánlila

Sajnálatos módon a kutatás során beszerzett egyik mangánkék referencia pigment fotolumineszcenciáját sem sikerült rögzíteni. Mindhárom pigment (BL15, valamint a később beszerzett 19-es és 20-as, amelyek nem szerepelnek a referencia-táblákon) összetételét tekintve mangánkéknek bizonyult, amit a pXRF és MA-XRF vizsgálatok egyértelműen igazoltak (lásd a mellékletet). Az összes műszeres mérés megerősítette a pigmentazonosítást, ennek ellenére a felfestett szektorok, látható tartományú gerjesztés hatására, egyik rögzített tartományban sem mutattak infravörös lumineszcenciát (Phase One 200–1000 nanométer és Sony 200–1150 nanométer), továbbá az Opus Instruments, Apollo készülékével (900–1700 nanométeres rögzítési tartomány) végzett képalkotás sem hozott eredményt. Ez részben várható volt, hiszen a szakirodalomból ismert, hogy a mangánkék emissziós tartománya 1300 nanométer fölött kezdődik, amelyet a használt eszközök már nem képesek érzékelni. Az Opus Apollo detektora ugyan érzékeny 1700 nanométerig, azonban mivel a rendszer reflexiós képalkotásra készült, a beállítható záridő túl rövidnek bizonyult a lumineszcencia detektálásához. A gyári szoftver korlátai miatt ez a paraméter nem módosítható kellő mértékben, ezért a mangánkék kibocsátásának sikeres rögzítéséhez más típusú berendezés alkalmazása szükséges, amelyre külön kutatásban célszerű lesz kitérni.

23. táblázat – A referencia tábla kék pigmentszektorai		
Phase One MSI		
		
VIS-R_VIS Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec, ISO 50 (a fehér jelölő- négyzet mangánkék mezőt mu- tatja)	IR_R_IR ₈₃₀₋₁₀₀₀ Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 2 sec, ISO 50	UV-R_UV ₃₆₅ Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 8 sec, ISO 50
		
VIS-L_UV ₃₆₅ Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 15 sec, ISO 50	IR-L_VIS Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 120 sec, ISO 50	IR-L_UV ₃₆₅ Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 120 sec, ISO 50
Sony Full spectrum kamera		
		
VIS-L_UV ₃₆₅ Sony A 7R Mark IV, 90 mm, f/5.6, 30 sec, ISO 100	IR-L_VIS Sony A 7R Mark IV, 90 mm, f/5.6, 25 sec, ISO 100	IR-L_UV ₃₆₅ Sony A 7R Mark IV, 90 mm, f/5.6, 30 sec, ISO 1600

A kísérletekhez beszerzett lila minták között volt egy olyan anyag, amely összetételét tekintve mangánkéknek bizonyult, színe azonban lilás árnyalatot mutatott. Ez a jelenség abból adódhat, hogy a bárium-manganát-szulfát vegyület három különböző színváltozatban is előfordulhat, a kristályrácsban jelenlévő mangán-ionok oxidációs állapottól függően. Így a vegyület létezhet zöld, kék és lila formában is, annak megfelelően,

hogy a mangán +6-os vagy +7-es oxidációs állapotban, illetve ezek kombinációjában van jelen a rendszerben. Ez a minta mutatott enyhe lumineszcenciát a rögzített tartományban. Ez vélhetően az eltérő szerkezet miatt lehet, amely a lumineszcencia sávot lefelé tolja el.

24. táblázat – A referenciatáblák lila pigmentszektorai	
Phase One MSI	
	
VIS-R_VIS Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec, ISO 50 (a fehér jelölőnégyzet mangánlila mezőt mutatja)	IR-L_VIS Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 120 sec, ISO 50

22.5 Összefoglalás – A bemutatott tanulmány és a modellkísérletek

A mangánkék (Pigment Blue 33, CI 77112) egy szintetikus bárium-manganát (VI)-szulfát pigment, amelyet 1935 és az 1990-es évek között gyártottak, és amelyet művészeti festékekben, valamint restaurálásban alkalmaztak az azurit helyettesítésére. A pigment 500–1250 nanométer között nyeli el a sugárzást, kék színét a széles sávú abszorpció okozza, amelyben d–d ($2E \rightarrow 2T_2$) és ligandum–fém töltésátviteli (LMCT) átmenetek játszanak szerepet.

Különleges tulajdonsága a körülbelül 1300 nanométeren kezdődő közeli infravörös emisszió, amely hosszú élettartamú (≈ 7 ms), bár alacsony kvantumhozamú ($PLQY \approx 0,5\%$). Ez a jelenség nem-invazív lumineszcens képalkotással kimutatható, hordozható InGaAs kamerákkal és megfelelő szűrőkkel. A módszerrel feltérképezhető a pigment térbeli eloszlása festményekben, akár eredeti rétegben, akár restaurátori beavatkozás (retus) eredményeként.

A kvantumkémiai DFT-számítások szerint a MnO_4^{2-} anion szerkezete a Jahn–Teller-hatás miatt torzult, ami több, átfedő abszorpciós sáv kialakulásához vezet. A szín és a lumineszcencia árnyalat béli eltérései az mangán oxidációs állapotától is függnék (+6 vagy +7).

Tehát a mangánkék kék színe és NIR-lumineszcenciája az MnO_4^{2-} anion elektronátmeneteinek és a kristályrács torzulásainak eredménye. A látható fénnel gerjesztett, körülbelül 1300 nm-es emisszió egyedi azonosítási lehetőséget nyújt műtárgyakon elvégzett vizsgálatok alkalmával, a szakirodalom szerint különösen a restaurátori beavatkozások vizsgálatában.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az értekezés a restaurátori és műtárgy-diagnosztikai kutatások körében alkalmazott fotodiagnosztikai képalkotó eljárásokat tárgyalja, kiemelten a spektrális technikák módszertani és gyakorlati lehetőségeit. A vizsgálatok középpontjában a szerves pigmentek fotofizikai sajátosságai és lumineszcens tulajdonságai állnak, különös hangsúllyal az infravörös lumineszcenciára, amely az utóbbi években egyre meghatározóbb eszközzé vált a nemzetközi műtárgykutatásban. A dolgozat célja olyan módszertani keret kialakítása volt, amely bemutatja, miként alkalmazhatók a nemzetközi gyakorlatban elterjedt technikák szakszerűen és reprodukálható módon a magyarországi környezetben, valamint hogyan integrálhatók ezek a restaurátori oktatás és az intézményi gyakorlat mindennapjaiba.

A kutatás egyik pillére a szakirodalom feldolgozása és kritikai értékelése volt. Kiemelt szerepet kaptak az *AIC Guide (The AIC Guide to Digital Photography and Conservation Documentation)* és a *CHARISMA User Manual (Multispectral Imaging in Reflectance and Photo-induced Luminescence Modes: A User Manual)* című alpművek, amelyek a spektrális képalkotás és a fotodiagnosztikai dokumentáció nemzetközi referenciái. Ezek magyar fordítása, feldolgozása és összevetése olyan terminológiai, technikai és módszertani alapokat biztosított, amelyek eddig hiányoztak a hazai kutatásból.

Az értekezés foglalkozik a fotodiagnosztikai elnevezések és rövidítések problémájával is, és javaslatot tesz egy következetes, logikus rendszer bevezetésére. A rendszer lényege, hogy a felvételek megnevezése a rögzített spektrális tartomány, a detektált jel típusa és a gerjesztő sugárforrás sorrendjében történjen, amely egyértelműsíti és standardizálja a vizsgálatok leírását.

A kutatás kísérleti és fejlesztési része szintén több új eredményt hozott. Az egyik legfontosabb ezek közül egy Zeiss polarizációs mikroszkóp átalakítása spektrálisan selektív vizsgálatok végzésére. Az eszköz módosításai lehetővé tették, hogy a hagyományos polarizációs vizsgálatok mellett különböző spektrális tartományokban – ultraibolya és infravörös reflexiós és infravörös-lumineszcens üzemmódban – is felvételek készüljenek. Ez a fejlesztés új távlatokat nyitott a mikroszkópos fotodiagnosztika terén, és bizonyította, hogy viszonylag egyszerű technikai kiegészítésekkel a meglévő laboratóriumi infrastruktúra is alkalmassá tehető komplex spektrális vizsgálatokra.

A dolgozat másik jelentős eredménye egy referencia-adatbázis létrehozása pigmenttáblák és mikroszkópos keresztmetszetek segítségével. A pigmentek különböző spektrális tartományokban való részletesen dokumentálta. Az így nyert képanyag és

elemzés alapot ad egy olyan hazai referencia-rendszer kialakításához, amely segíti a restaurátorok, művészettörténészek és muzeológusok munkáját a pigmentek azonosításában és a műtárgyak értelmezésében. A referenciaadatbázis a nemzetközi példákhoz kapcsolódva, de a hazai igényekhez igazítva készült, és hozzájárulhat egy jövőbeni, magyar és angol nyelvű oktatási és kutatási platform megalapozásához.

Az értekezés részletesen elemzi a lumineszcens pigmentek fizikai és kémiai tulajdonságait, valamint a gerjesztés hatására létrejövő emissziós folyamatok jellegzetességeit. A *false color* technikák bemutatása során a dolgozat rámutat a reflexiós eljárás jelentőségére, különösen arra, hogy egy nagyszámú pigmentsor összehasonlító vizsgálata révén a technika hogyan járulhat hozzá az anyagazonosításhoz és a vizsgálatok rendszerezéséhez. Az infravörös lumineszcencia tárgyalása ezzel szemben az emissziós vizsgálatok körét bővíti, a szervetlen lumineszcens pigmentek diagnosztikai lehetőségeinek bemutatására összpontosítva. Ez a módszer új megközelítést kínál a hazai kutatás számára, mivel eddig csak szórványosan és elszigetelten jelent meg a gyakorlatban.

Összességében az értekezés egy korszerű, interdiszciplináris diagnosztikai szemlélet kialakítását szolgálja, amely ötvözi a művészeti, műszaki és természettudományos ismereteket. Az eredmények hozzájárulnak a restaurátoroktatás módszertani megújításához, a kutatási eszköztár bővítéséhez és a mindennapi intézményi gyakorlat korszerűsítéséhez. A munka a nemzetközi és hazai példák összekapcsolásával hidat képez a globális kutatás és a magyar restaurátori gyakorlat között, elősegítve a spektrális képalkotás tudatos és következetes alkalmazását a kulturális örökség megőrzése és értelmezése érdekében.

KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném kifejezni legmélyebb hálámat és köszönetemet mindazoknak, akik munkám elkészítésében és a kutatás megvalósításában segítségemre voltak.

Elsősorban szeretném megköszönni **családomnak** a szeretetet, türelmet és támogatást, amelyet a tanulmányaim és a dolgozat megírása során mindvégig nyújtottak számomra.

Külön köszönettel tartozom témavezetőmnek, **Galambos Évának**, aki szakmai útmutatásával, biztatásával és értékes tanácsaival mindvégig segítette a munkám előrehaladását.

Köszönöm **Görbe Katalinnak** a dolgozat végletekig precíz magyar nyelvi „cizellálását”.

Hálás vagyok munkahelyemnek, hogy lehetőséget biztosított a kutatás elvégzésére, és támogatta a munka és a tanulmányok összeegyeztetését.

Köszönet illeti munkatársaimat is a baráti segítségért, türelemért és támogatásért, valamint a műszeres mérések elkészítésében nyújtott közreműködésükért.

Végül, de nem utolsósorban szeretném megköszönni mindazoknak, akik bármilyen módon hozzájárultak ahhoz, hogy ez a munka elkészülhessen.

BIBLIOGRAFIA

- Accorsi, Gianluca, Giovanni Verri, Angela Acocella, Francesco Zerbetto, Giovanni Lerario, Giuseppe Gigli, David Saunders, and Rachel Billinge. "Imaging, Photophysical Properties and DFT Calculations of Manganese Blue (Barium Manganate(VI) Sulphate) – a Modern Pigment." *Journal of Materials Chemistry C* 2, no. 33 (2014): 6471–79. <https://doi.org/10.1039/C4CC01986E>.
- Ajò, D., G. Chiari, F. De Zuane, M. Favaro, and M. Bertolin. "Photoluminescence of Some Blue Natural Pigments and Related Synthetic Materials." In *Art '96 Proceedings*. Budapest, 1996.
- Aldrovandi, Alfredo, Ezio Buzzegoli, Anette Keller, and Diane Kunzelman. „Indagini su superfici dipinte mediante immagini UV riflesse in falso colore.” *OPD Restauro* 16 (2004): 83–87.
- Atkins, Peter W., and Julio de Paula. *Fizikai kémia*. Trans. Attila Császár. Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó, 2003.
- Bacci, Mauro. "Hints on the Luminescence Phenomena Theory." In *UV-Vis Luminescence Imaging Techniques / Técnicas de Imagen de Luminiscencia UV-Vis*, ed. Marcello Picollo, Maartje Stols-Witlox, and Laura Fuster-López. *Conservation 360°*, no. 1. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València, 2019.
- Bridgman, C. F., and H. L. Gibson. "Infrared Luminescence in the Photographic Examination of Paintings and Other Art Objects." *Studies in Conservation* 8 (1963). <https://doi.org/10.1179/sic.1963.008>.
- Brus, Louis. "Quantum Crystallites and Nonlinear Optics." *Applied Physics A* 53, no. 6 (1991): 465–74.
- Buoso, M. C., D. Ceccato, and D. Zafiroopoulos. "False-Color Infrared Photography in the Identification of Pigments Used for a Late 13th Century Illuminated Manuscript." In *Proceedings of the International Workshop on Infrared Spectroscopy and Imaging (IRSI)*, INFN–Laboratori Nazionali di Legnaro, Padova, Italy, 2005.
- Cardon, Dominique. *Natural Dyes: Sources, Tradition, Technology and Science*. London: Archetype Publications, 2007.
- Cosentino, Antonino. "Infrared Technical Photography for Art Examination." *e-Preservation Science* 13 (2016): 1–6. Accessed via Morana-RTD PDF and ResearchGate.
- Cosentino, Antonino. "Practical Notes on Ultraviolet Technical Photography for Art Examination." *Conservar Património* 21 (June 2015): 53–62. <https://doi.org/10.14568/cp2015006>.
- Cotton, F. Albert. *Chemical Applications of Group Theory*. 3rd ed. New York: Wiley, 1990.
- Cotton, F. Albert, and Geoffrey Wilkinson. *Advanced Inorganic Chemistry*. 5th ed. New York: Wiley, 1988.

Crowther, John. "Ultraviolet Fluorescence Photography—Choosing the Correct Filters for Imaging." *Journal of Imaging* 8, no. 6 (2022): 162.

<https://doi.org/10.3390/jimaging8060162>.

Császár, Attila, and Miklós Tóth. *Modern fizikai kémia*. Budapest: ELTE Eötvös Kiadó, 2011.

Daffner, Laurie, Diane Kushel, and James M. Messinger. "Investigation of a Surface Tarnish Found on 19th-Century Daguerreotypes." *Journal of the American Institute for Conservation* 35, no. 1 (1996): 9–21. <http://doi.org/10.1179/019713696806124584>.

Daveri, A., M. Vagnini, F. Nucera, M. Azzarelli, A. Romani, and C. Clementi. "Visible-Induced Luminescence Imaging: A User-Friendly Method Based on a System of Interchangeable and Tunable LED Light Sources." *Microchemical Journal* (2015).

<https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.11.019>.

De Keijzer, Monika. *Kunst des 20. und 21. Jahrhunderts: Probleme und Perspektiven zur Erhaltung = Works of Art from the 20th and 21st Century: Problems and Perspectives in Conservation*. Klosterneuburg: Stift Klosterneuburg Verlag, 2011.

Deer, W. A., R. A. Howie, and J. Zussman. *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. 2nd ed. London: Longman, 1992.

Delaney, J. K., J. Zeibel, M. Thoury, R. Littleton, M. Palmer, K. Kathryn, E. R. de la Rie, and A. Hoenigswald. "Visible and Infrared Reflectance Imaging Spectroscopy (RIS) for Mapping Pigments in Paintings." *Applied Spectroscopy* 64, no. 6 (2010): 584–94.

Dyer, Joanne, Maria Sotiropoulou, Giovanni Verri, Lucia Burgio, Susan Braovac, and Jan Stubbe Ødegård. "A Technical Step Forward in the Integration of Visible-Induced Luminescence Imaging Methods for the Study of Ancient Polychromy." *Heritage Science* 5, no. 1 (2017): 20. <https://doi.org/10.1186/s40494-017-0135-1>.

Dyer, Joanne, Giovanni Verri, and John Cupitt, eds. *Multispectral Imaging in Reflectance and Photo-induced Luminescence Modes: A User Manual*. London: National Gallery / CHARISMA Project, 2013.

Estaugh, Nigel, Valentine Walsh, Tracey Chaplin, and Ruth Siddall. *Pigment Compendium: A Dictionary and Optical Microscopy of Historical Pigments*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.

Fodor, László. *Szervetlen kémia*. Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó, 1999.

Geister, G., and B. Rieck. "Effenbergerite, BaCu(Si₄O₁₀), a New Mineral from the Kalahari Manganese Field, South Africa: Description and Crystal Structure." *Mineralogical Magazine* 58 (1994): 663–70.

Galambos, Éva. *A restaurátori vizsgálatok és egyéb tudományterületek kapcsolata: A szervetlen pigmentek polarizációs vizsgálatának szerepe*. PhD diss., Magyar Képzőművészeti Egyetem, Doktori Iskola, Budapest, 2007.

Gettens, Rutherford J., and George L. Stout. *Painting Materials: A Short Encyclopedia*. New York: Dover Publications, 1966.

Grant, Miles S. *The Use of Ultraviolet Induced Visible-Fluorescence in the Examination of Museum Objects, Part II*. Washington, DC: National Park Service, Department of the Interior, 2000.

Hayem Ghez, Anita, Elisabeth Ravaud, Clotilde Boust, Gilles Bastian, Michel Menu, and Nancy Brodie Linder. “Characterizing Pigments with Hyperspectral Imaging: Variable False Color Composites.” *Applied Physics A* 121, no. 3 (2015): 939–47.
<https://doi.org/10.1007/s00339-015-9458-8>.

Horváth, Mátyás. “Felvételkedzés az infravörös tartományban.” In *MS mester és kora*, ed. Gábor Endrődi, Alexandra Kocsis, Manga Pattantyús, and Emese Sarkadi Nagy, 188–92. Budapest: Szépművészeti Múzeum, 2025.

Janzeer, Yasmeen. *Surface Modification of Titanium and Titanium Alloys to Enhance Bone Healing*. PhD diss., King’s College London Dental Institute, 2013.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4790.1042>.

Janczak, J., and R. Kubiak. “Refinement of the Structure of Barium Copper Silicate, BaCuSi₄O₁₀, at 300 K.” *Acta Crystallographica Section C* 48 (1992): 1299–1301.

Keller, Annette T., Roland Lenz, Alessia Artesani, Sara Mosca, Daniela Comelli, and Austin Nevin. “Exploring the Ultraviolet Induced Infrared Luminescence of Titanium White Pigments.” In *UV-Vis Luminescence Imaging Techniques*, ed. Marcello Picollo, Maartje Stols-Witlox, and Laura Fuster-López, 201–32. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València, 2019.

Kittel, Charles. *Introduction to Solid State Physics*. 8th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2005.

Kolar, Teresa. *Basic Study of the Wall Painting by Wilhelm Geyer, 1946, Mariä Heimsuchung, Blaubeuren*. Research report, Ursula and Reiner Drewello Laboratory, September 23, 2017 (analysis result AN 3123).

Lin, H. C., F. L. Liao, and S. L. Wang. “Structure of BaCuSi₄O₁₀.” *Acta Crystallographica Section C* 48 (1992): 1297–99.

Miliani, C., A. Sgamellotti, K. Kahrim, B. G. Brunetti, A. Aldrovandi, M., R. van Bommel, K. J. van den Berg, and H. Janssen. “MOLAB. A Mobile Facility Suitable for Non-Invasive In-Situ Investigations of Early and Contemporary Paintings: Case Study – *Victory Boogie Woogie* (1942–1944) by Piet Mondrian.” In *IIC Committee for Conservation 15th Triennial Meeting*. New Delhi, 2008.

Mirti, P., L. Appolonia, A. Casoli, Ferrari, E. Laurenti, A. Amisano Canesi, and G. Chiari. “Spectrochemical and Structural Studies on a Roman Sample of Egyptian Blue.” *Spectrochimica Acta Part A* 51 (1995): 437–46.

Moon, Thomas, Michael R. Schilling, and Sally Thirkettle. “A Note on the Use of False-Color Infrared Photography in Conservation.” *Studies in Conservation* 37, no. 1 (1992): 42–52. <https://www.jstor.org/stable/1506355>.

Miyoshi, T., M. Ikeya, K. Shuichi, and K. Takashi. “Luminescence of Cadmium Red and Yellow Pigments Excited by 337.2 nm UV Radiation.” *Japanese Journal of Applied Physics* 21 (1982): 1032.

- Neiro, M. “Adhesive Replacement: Potential New Treatment for Stabilization of Archaeological Ceramics.” *Journal of the American Institute for Conservation* 42, no. 2 (2003): 237–44. <https://doi.org/10.1179/019713603806112822>.
- Pabst, A. “Structures of Some Tetragonal Sheet Silicates.” *Acta Crystallographica* 12 (1959): 733–39.
- Parker, Sybil P., ed. *McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms*. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- Picollo, Marcello, Maartje Stols-Witlox, and Laura Fuster-López, eds. *UV-Vis Luminescence Imaging Techniques. Conservation*. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València, 2020.
- Piqué, Francesca, and Giovanni Verri, eds. *Organic Materials in Wall Paintings: Project Report*. Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2015. https://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/omwp_report.pdf.
- Poole, Charles P. Jr., and Frank J. Owens. *Nanotechnology: Fundamentals and Applications*. New York: Wiley, 2003.
- Pozza, Giorgio, David Ajò, Giacomo Chiari, Franco De Zuane, and Marialuisa Favaro. “Photoluminescence of the Inorganic Pigments: Egyptian Blue, Han Blue and Han Purple.” *Journal of Cultural Heritage* 1, no. 4 (2000): 393–98.
- Radley, J. A., and J. Grant. *Fluorescence Analysis in Ultra-Violet Light*. 4th ed. Ed. E. H. Tripp. London: Chapman & Hall Ltd., 1959.
- Reilly, John A., and Margaret Mortimer. “The Care and Conservation of Glass Chandeliers.” *Journal of the American Institute for Conservation* 37, no. 2 (1998): 149–72. <https://doi.org/10.1179/019713698806082886>.
- Riedler, Rolf, et al. “A Review of Color-Producing Mechanisms in Feathers and Their Influence on Preventive Conservation Strategies.” *Journal of the American Institute for Conservation* 53, no. 1 (2014): 44–65. <https://doi.org/10.1179/1945233013Y.0000000020>.
- Rorimer, James J. *Ultra-Violet Rays and Their Use in the Examination of Works of Art*. New York: The Metropolitan Museum of Art, 1931.
- Salter, T. W. *Treatise on Colours and Pigments as Used by Artists*. London: Winsor and Newton, 1869.
- Scolf, David A., and Michael Schilling. “The Pigments of the Canosa Vases: A Technical Note.” *Journal of the American Institute for Conservation* 30, no. 1 (1991): 35–40. <http://doi.org/10.1179/019713691806373259>.
- Surján, Péter. *Bevezetés a kvantumkémiába*. Budapest: ELTE Eötvös Kiadó, 2005.
- Thoury, Mathieu, John K. Delaney, E. René de la Rie, Michael Palmer, Kathryn Morales, and Jay Krueger. “Near-Infrared Luminescence of Cadmium Pigments: In Situ

Identification and Mapping in Paintings.” *Applied Spectroscopy* 65, no. 9 (2011): 936–43. <https://doi.org/10.1366/11-06399>.

Tóth, Mónika, and Imre Tarján. *Ásványtan*. Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó, 1998.

Traistaru, G. A. “Synthesis and Characterization of NiTiO₃ and NiFe₂O₄ as Catalysts for Toluene Oxidation.” *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures* 6, no. 3 (July 2011): 1257–65. https://chalcogen.ro/1257_Traistaru.pdf.

Tragni, C. B., Jiuan Chen, and Diane Kushel. *The Use of Ultraviolet-Induced Visible Fluorescence for Examination of Photographs*. Capstone Research Project, Advanced Residency Program in Photograph Conservation, George Eastman House / Image Permanence Institute. Rochester, NY, 2005. Accessed August 18, 2025. <https://www.eastman.org/advanced-residency-program-photograph-conservation-capstoneresearch-projects>.

Ullrich, D. “Egyptian Blue and Green Frit: Characterization, History and Occurrence, Synthesis.” In *Datation-caracterisation des peintures pariétales et murales*, ed. F. Delamare, T. Hackens, and B. Helly. *PACT* 17. Ravello, 1987.

Warda, Jeffrey, ed., with Franziska Frey, Dawn Heller, Dan Kushel, Timothy Vitale, and Gawain Weaver. *The AIC Guide to Digital Photography and Conservation Documentation*. 3rd ed. Washington, DC: American Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 2017.

Webb, E. Keats. “UV-Induced Visible Luminescence for Conservation Documentation / Luminiscencia Visible Inducida por UV para la Documentación en Conservación.” In *UV-Vis Luminescence Imaging Techniques / Técnicas de Imagen de Luminiscencia UV-Vis*, ed. Marcello Picollo, Maartje Stols-Witlox, and Laura Fuster-López. *Conservation 360°*, no. 1. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València, 2019.

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra - Hullámhossz ábra. Forrás: Horváth 2025, 188–192.....	29
2. ábra - hosszúhullám áteresztő szűrők magyarázó ábrája.....	42
3. ábra - a rövidhullám áteresztő szűrő magyarázó ábrája	43
4. ábra - a sávszűrők magyarázó ábrája.....	44
5. ábra - A CCD-érzékelő (bal oldali panel) és a CMOS-érzékelő (jobb panel) relatív érzékenysége és spektrális felbontása. Forrás: <i>CHARISMA User Manual</i>	57
6. ábra – A Phase One Rainbow MSI rendszere. Forrás: https://www.phaseone.com/solutions/heritage-solutions/solutions/complete-solutions/multispectral-imaging/	58
7. ábra – a hátfal és az objektív. Forrás: https://www.phaseone.com/solutions/heritage-solutions/complete-solutions/multispectral-imaging/	59
8. ábra - a kamera a szűrőtárcsával. Forrás: https://www.phaseone.com/solutions/heritage-solutions/complete-solutions/multispectral-imaging/	59
9. ábra - fény- és sugárforrások. Forrás: https://www.phaseone.com/solutions/heritage-solutions/complete-solutions/multispectral-imaging/	59
10. ábra – A Labsphere Spectralon® referenciája. Forrás: www.labsphere.com	63
11. ábra - A Labsphere Spectralon® egy szürke referenciája – www.labsphere.com	63
12. ábra – A Labsphere Spectralon® referenciája – www.labsphere.com	63
13. ábra - Az említett egyedi referencia skála és elrendezése. 1-5: diffúz reflexió 2-99%-os PTFE felületei, 6: 100%-os elnyelő felület fénycsapdával, 7: 100% reflexiós felület, polírozott félgömb, 8: lumineszcens felület, lumineszkáló fehér pigment bevonat. A skálát Roland Lenz, ABK Stuttgart készítette. Forrás: (Annette T. Keller 2019).....	64
14. ábra - xy. ábra - Egyiptomi kék pigmentminta, balról jobbra Vis-R_Vis, Ir_R_Ir, IrFC_Uv-R_Uv365, UvFC, Ir-L_Vis és Ir-L_Uv365 - (Annette T. Keller 2019).....	65
15. ábra - Calibrite ColorChecker® Classic (korábban a Gretag Macbeth és X-rite gyártotta) - https://calibrite.com/us/	69
16. ábra - Calibrite ColorChecker® Mini (korábban a Gretag Macbeth és X-rite gyártotta) - https://calibrite.com/us/	69
17. ábra - Az Calibrite ColorChecker® Passport tartalmazza a szokásos ColorChecker® foltokat, valamint egy Photo Enhancement foltkészletet és két nagyobb fehéregyensúly mezőt egy kemény műanyag tokban. Forrás: https://calibrite.com/us/	69
18. ábra - Calibrite ColorChecker® Digital SG (korábban a Gretag Macbeth és az X-rite gyártotta). Forrás: https://calibrite.com/us/	69
19. ábra - QPcard referenciaskálák (balról jobbra 101, 102, 201, 202 és 203). Forrás: https://specular.com.au/shop/copy-reproduction/colour-resolution-targets/colour-cards-targets	70
20. ábra – A Datacolor SpyderCheckr és SpyderCheckr 24. Forrás: https://www.datacolor.com/spyder/products/spyder-checkr/	71
21. ábra - xy. ábra - Image Science Associates, Object-Level 0.5X Target. Golden Thread. Forrás: https://specular.com.au/isa-object-level-target-0-5x	72
22. ábra - Universal Test Target (UTT) az Image Engineering gyártásában.....	73

23. ábra - Kodak Color Control Patches és Gray Scale (jelenleg a The Tiffen Company gyártja)	74
24. ábra - Stouffer Industries 21-Step Reflection Guide - https://www.stouffer.net/index.html	74
25. ábra - Target UV <i>előoldal</i> - https://www.uvinnovations.com/target-uv	75
26. ábra - Target UV <i>hátsóoldal</i> - https://www.uvinnovations.com/target-uv	76
27. ábra - Kodak Wratten szűrők, többek között a 2E transzmissziós ábrája -Forrás: https://www.kodak.com/en/motion/page/wratten-2-filters/	92
28. ábra - Az IDAS-UIBAR szűrő transzmissziós spektruma – Forrás: Joanne Dyer 2013	92
29. ábra - sávszűrők transzmissziós görbéi, többek között a Baader Planetarium szűrőé is Forrás: Antonio Consentino 2015	92
30. ábra - A Schott BG szűrőinek transzmissziós görbéi Forrás: https://www.pgo-online.com/de/kurven/optische_glasfilter/BG18_BG38_BG42.html	92
31. ábra - - a B+W sárga, narancs, vörös és infravörös szűrői. Forrás: Kokla és Tselikas 2020	92
32. ábra - a B+W átható sávszűrője. Forrás: Kokla és Tselikas 2020.....	92
33. ábra - A vizsgált fényforrás spektrális kimenete a Baader Planetarium U-Venus szűrőn való áteresztés után a teljes spektrális tartomány 250–800 nanométer. Forrás: John Crowther 2022.....	99
34. ábra - A vizsgált fényforrás spektrális kimenete a Baader Planetarium U-Venus szűrőn való áteresztés után) részletes nézet: 350–450 nanométer. Forrás: John Crowther 2022.....	99
35. ábra - A teszt szűrők lumineszcencia-intenzitása másodpercenkénti normalizálással, a megfigyelt lumineszcencia színe és a szűrő vastagsága. Forrás: John Crowther 2022	100
36. ábra - A vizsgált fényképezési szűrők lumineszcenciája, a Schott KV-418-hoz viszonyítva normalizálva. A diagram oszlopainak színe a szűrők lumineszcenciájának színét jelöli. Forrás: John Crowther 2022	100
37. ábra - A vizsgált szűrők áteresztési spektrumai: (a) Firecrest UV400, Schott KV-418, Zeiss T* UV és KS 420 nm LP 375 nm-től 450 nm-ig terjedő tartományban; (b) Firecrest UV400, Schott KV-418, Zeiss T* UV és KS 420 nm LP kiterjesztett tartománya 350 nm-től 800 nm-ig; (c) Schott GG400 és GG420 375 nm-től 450 nm-ig; (d) Schott GG400 és GG420 350 nm-től 800 nm-ig; (e) Heliopan Yellow 5, Hoya Yellow Y(K2), Tiffen Yellow 8, Tiffen Yellow 12 (1. és 2. változat) 300 nm-től 600 nm-ig; (f) B+W 486 UV/IR cut és Baader UV/IR cut 300 nm-től 800 nm-ig; (g) Schott RG665, RG715 és RG780 600 nm-től 800 nm-ig; (h) Quaser 415 nm 1%, 476 nm 1%, 510 nm 1%, 549 nm 1%, 593 nm 1% 300 nm-től 700 nm-ig. A Schott KV-418 szűrő egy fokozatos levágást mutat, amely kb. 405 nm-nél kezdődik (3a ábra), majd a 418 nm körüli hullámhosszon éri el az 50%-os maximális áteresztést, ahogy az várható volt. Ezt követően az áteresztési görbe viszonylag lapos marad kb. 580 nm-ig, majd fokozatosan emelkedik tovább. Forrás: John Crowther 2022	102
38. ábra - A tesztváza felvételei két különböző objektívvel (Rayfact 105 mm UV és Micro Nikkor 105 mm), objektívre helyezett szűrőkkel: egy ultraibolya-áteresztő szűrővel (LaLa U), valamint három különböző ultraibolya-blokkoló szűrővel (KS 420 nm LP, Firecrest UV400 és Quaser 415 nm 1%). A felvételek készítéséhez egy módosítatlan Canon EOS 6D fényképezőgépet használtak. Forrás: John Crowther 2022	105

39. ábra - A fekete háttér egy területéről származó vörös, zöld és kék csatornaválasz a RAW képeken, három különböző UV-blokkoló szűrő esetében, (a) a Rayfact 105 mm-es UV objektívvel és (b) a Micro Nikkor 105 mm-es objektívvel.” Forrás: John Crowther 2022	106
40. ábra - Kék vonallal rajzolva látható az X-Nite CC1-es szűrő transzmissziós görbéje Forrás: Antonio Consentino 2015	115
41. ábra - a Schott BG18-as, 38-as és 42-es szűrőinek áteresztési görbéi. Forrás: https://www.pgo-online.com/de/kurven/optische_glasfilter/BG18_BG38_BG42.html	115
42. ábra - A Schott Ugl és UG11-es szűrők összehasonlító görbéje. Forrás: www.schott.com	115
43. ábra - Az infravörös lumineszcens felvételekhez használt LED fényforrások spektrumai szűrőkkel és anélkül; az UV fényforrás spektruma. Forrás: Annette T. Keller 2014	116
44. ábra - Az infravörös lumineszcens felvételekhez használt LED fényforrások spektruma szűrőkkel és anélkül; a látható fényforrás spektruma. Forrás: Annette T. Keller 2014	116
45. ábra - Az ábra a LED-es gerjesztő fényforrás spektrumát, valamint a kamera elé helyezett szűrő átviteli görbéit mutatják be. Forrás: www.leefilters.com	120
46. ábra - Az ábra a LED-es gerjesztő fényforrás spektrumát, valamint a kamera elé helyezett szűrő átviteli görbéit mutatják be. . Forrás: www.leefilters.com	120
47. ábra - a) látható fényben készült reflexiós felvétel (VIS-R_VIS). Forrás: Dyer et al. 2017.....	121
48. ábra - b) látható fénnel gerjesztett, látható tartományú lumineszcenciafelvételek (VVL). Forrás: Dyer et al. 2017)	121
49. ábra - c) UV-sugárzással gerjesztett, látható tartományú lumineszcens felvétel (UvVL). Forrás: Dyer et al. 2017.....	122
50. ábra - d) látható fénnel gerjesztett, látható tartományú lumineszcenciafelvételek (VVL). Forrás: Dyer et al. 2017.....	122
51. ábra - Az (a) jelű kép látható fénnel gerjesztett látható lumineszcens (VVL) felvétel, amelyen a korábban említett szerves vörös színezék látható tartományba eső lumineszcenciája figyelhető meg – a kép szürkeárnyaltos megjelenítésben készült. A (b) ábra egy látható fénnel gerjesztett, infravörös tartományban rögzített lumineszcens felvétel (VIrL), amely az egyiptomi kék pigment karakterisztikus infravörös lumineszcenciáját mutatja. A (c) ábra az előző két kép kombinált, <i>falsecolor</i> változata: a szerves színezék és egyiptomi kék együttes emissziója vörös, míg ahol csak a kék pigment van jelen, zöld színekkel kiemelésre került. Forrás: Dyer et al. 2017	123
52. ábra - a B+W 486 MRC szűrőjének transzmissziós görbéje. Jól látható az egyenletes áteresztés a teljes látható tartományban, elhanyagolható ultraibolya átengedéssel és 675 nm-nél vörös blokkolással Forrás: https://schneiderkreuznach.com/en	125
53. ábra - a B+W különböző sárga, narancs és vörös szűrők áteresztési görbéi. Forrás: https://schneiderkreuznach.com/en	125
54. ábra - a B+W infravörös szűrőinek áteresztési görbéi. Forrás: https://schneiderkreuznach.com/en .	125
55. ábra - A Kodak Wratten IR 87C szűrő transzmissziós spektruma. Forrás: https://www.edmundoptics.eu/	126
56. ábra - A HOYA 100 (RM100) szűrő transzmissziós spektruma. Forrás: https://www.edmundoptics.eu/	126

57. ábra - a sárga tábla látható tartományú reflexió és látható, valamint infravörös lumineszcens felvételei. Forrás: Daveri et al. 2015)	128
58. ábra – A vörös tábla látható tartományú reflexió és lumineszcens felvételei. Forrás: Daveri et al. 2015)	131
59. ábra – A kék tábla látható tartományú reflexió és lumineszcens felvételei. Forrás: Daveri et al. 2015)	132
60. ábra - A infravörös-reflexió <i>false color</i> kép elkészítésének sematikus rajza. Forrás: saját ábra	136
61. ábra – VIS-R_VIS. Forrás: saját felvétel	136
62. ábra – IrRFC. Forrás: saját felvétel.....	136
63. ábra – Kék mintafelületek RGB csatornára bontva. Jobbra IRRFC kompozit. <i>C2RMF</i> adatbázis. Forrás: M. c. Bouso et al. 2005	139
64. ábra - a <i>C2RMF</i> 17. században leggyakoribb pigmentjei válogatása normál és IRFC képen. Forrás: M. c. Bouso et al. 2005.....	140
65. ábra - a <i>C2RMF</i> adatbázisában szereplő 4 vörös pigment reflexió spektrumai. Forrás: M. c. Bouso et al. 2005	141
66. ábra - A fent leírt kísérlet alkalmával létrehozott hamis színes képek. Forrás: M. c. Bouso et al. 2005	142
67. ábra - A megválasztott reflexió sávok a FC2-es kompozit létrehozásához a kék pigmentek esetén. Forrás: M. c. Bouso et al. 2005	143
68. ábra - a megválasztott reflexió sávok az FC3-as kompozit létrehozásához. Forrás: M. c. Bouso et al. 2005	143
69. ábra - az elért eredmények a sárga és zöld mintákon. Forrás: M. c. Bouso et al. 2005.....	144
70. ábra – A kék pigmentmezőkről készült VIS-R_VIS felvétel, balra; IrRFC kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec (VIS), 2 sec (IrR) ISO 50; balról jobbra: BL1 Han-kék, BL2 Han-lila, BL3 egyiptimikék, BL4 Vivianit, BL5 természetes indigó, BL6 mesterséges indigó, BL7 természetes azurit, BL8 természetes ultramarinkék, BL9 smalté, BL10 mesterséges azurit, BL11 porosz kék, BL12 kobaltkék, BL13 mesterséges ultramarinkék, BL14 cölinkék, BL15 mangánkék, BL16 ftalocianinkék, BL17 kobaltkék türkiz, BL18 kobaltkék zöldeskék; Forrás: saját felvételek	145
71. ábra – lila pigmentmezőkről készült látható fényes reflexió felvétel balra; infravörös <i>false color</i> jobbra, Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec (VIS), 2 sec (IrR) ISO 50; balról jobbra haladva: V1 mangán viola (mangán-ammónium-foszfát), V2 ultramarin viola (nátrium-alumínium-szulfoszilikát), V3 ultramarin viola (nátrium-alumínium-szulfoszilikát), V4 kobalt viola (kobalt-foszfát); V5 mangán lila (mangán-foszfát), V6 mangán lila (bárium-manganát-foszfát). Forrás: saját felvételek.....	146
72. ábra - A zöld pigmentmezőkről készült látható tartományú reflexió felvétel balra; infravörös <i>false color</i> kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec, ISO 50; balról jobbra haladva: G1 zöldföld, G2 természetes malachit, G3 mesterséges malachit, G4 kobaltzöld, G5 smaragd zöld, G6 króm-oxid zöld, G7 viridián, G8 cinkzöld, G9 mesterséges <i>verdigris</i> , G10 egyiptomi zöld. Forrás: saját felvételek	147
73. ábra – A vörös pigmentmezőkről készült látható tartományú reflexió felvétel balra; infravörös <i>false color</i> kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec, ISO 50; R1 természetes vax-oxid vörös (hematit), R2 minium, R3 természetes cinóber; R4 mesterséges cinóber; R5 mesterséges vas-oxid vörös, R6	

krómvörös; R7 kadmium vörös; R8 kadmium narancs; R9 kadmium vörös; R10 kadmium narancs; R11 kadmium vörös, R12; kadmium narancs; R13 kadmium narancs; R14 kadmium narancs; R15 krapplakk; R16 krapplakk. Forrás: saját felvételek.....	147
74. ábra – A sárga pigmentmezőkről készült látható tartományú reflexiós felvétel balra; infravörös <i>false color</i> kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec, ISO 50; Y1 természetes vas-oxid sárga (Goethit); Y2 auripigment; Y3 realgár; Y4 masszikot; Y5 nápolyi sárga; Y6 ólom-ón sárga I.; Y7 ólom-ón sárga II., Y8 mesterséges vas-oxid sárga; Y9 krómsárga; Y10 cinksárga I.; Y11 cinksárga II.; Y13 kadmium sárga; Y14 kadmium sárga, Y15 nikkel-titán sárga; Y16 titán-sárga; Y17 indiai sárga; Y18-Y24 kadmium sárgák; Y25 krómsárga; Y26 nápolyi sárga; Y27 Jarosit. Forrás: saját felvételek	148
75. ábra - A Kodak 18A üvegszűrő áteresztési görbéje. Forrás: Alfredo Aldrovandi et al. 2004	152
76. ábra - a magas ultraibolya reflexióval rendelkező fehér pigmentek reflexiós görbéi az UV tartományban. Forrás: Alfredo Aldrovandi et al. 2004	154
77. ábra - az ultraibolya -reflexiós <i>false color</i> kép elkészítésének sematikus rajza. Forrás: saját ábra	155
78. ábra – VIS-R_VIS	155
79. ábra. UvRFC	155
80. ábra – A fehér pigmentmezőkről készült látható tartományú reflexiós felvétel, balra; ultraibolya <i>false-color</i> kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec VIS, 8 sec UVR, ISO 50; W1 ólomfehér, W2 bizmutfehér, W3 cinkfehér (oxid), W4 litophone, W5 titánfehér (rutil), W6 titánfehér (rutil), W7 titánfehér (anatáz), W8 titánfehér natúr, W9 titánfehér (rutil), W10 titánfehér (rutil), W11 cinkfehér, W12 cinkfehér (oxid), W13 cinkfehér (szulfid), W14 titánfehér; W15 cinkfehér (oxid). Forrás: saját felvételek	156
81. ábra – A fekete pigmentmezőkről készült látható tartományú reflexiós felvétel, balra; ultraibolya <i>false-color</i> kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec VIS, 8 sec UVR, ISO 50; B1 természetes vas-oxid fekete (magnetit), B2 mesterséges vasoxid fekete, B3 elefántcsont fekete, B4 mangánfekete. Forrás: saját felvételek.....	156
82. ábra – A sárga pigmentmezőkről készült VIS-R_VIS balra; ultraibolya <i>false-color</i> kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec VIS, 8 sec UVR, ISO 50; Goethit, Y2 auripigment, Y3 realgár, Y4 masszikot, Y5 nápolyi sárga, Y6 ólom-ón sárga I., Y7 ólom-ón sárga II., Y8 mesterséges vas-oxid sárga, Y9 krómsárga, Y10 cinksárga I., Y11 cinksárga II., Y13 kadmium sárga, Y14 kadmium sárga, Y15 nikkel-titán sárga, Y16 titán-sárga, Y17 indiai sárga, Y18-Y24 kadmium sárgák, Y25 krómsárga, Y26 nápolyi sárga, Y27 Jarosit. Forrás: saját felvételek.....	157
83. ábra – A vörös pigmentmezőkről készült VIS-R_VIS balra; ultraibolya <i>false-color</i> kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec VIS, 8 sec UvR, ISO 50; R1 hematit, R2 minium, R3 természetes cinóber; R4 mesterséges cinóber, R5 mesterséges vas-oxid vörös, R6 krómvörös, R7 kadmium vörös, R8 kadmium narancs, R9 kadmium vörös, R10 kadmium narancs, R11 kadmium vörös, R12; kadmium narancs, R13 kadmium narancs, R14 kadmium narancs, R15 alizarin krapplakk, R16 alizarin krapplakk. Forrás: saját felvételek.....	157
84. ábra - A zöld pigmentmezőkről készült VIS-R_VIS balra; ultraibolya <i>false color</i> kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec VIS, 8 sec UvR, ISO 50; balról jobbra haladva: G1 zöldföld, G2 természetes malachit, G3 mesterséges malachit, G4 kobaltzöld, G5 smaragdzöld, G6 króm-oxid zöld, G7 viridián, G8 cinkzöld, G9 mesterséges verdigris, G10 egyiptomi zöld. Forrás: saját felvételek	158

85. ábra – A kék pigmentmezőkről készült VIS-R_VIS, balra; infravörös <i>false color</i> képjobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec VIS, 8 sec UvR, ISO 50; balról jobbra: BL1 Han kék, BL2 Han lila, BL3 egyiptimi kék, BL4 <i>vivianit</i> , BL5 természetes indigó, BL6 mesterséges indigó, BL7 természetes azurit, BL8 természetes ultramarin, BL9 smalte, BL10 mesterséges azurit, BL11 porosz kék, BL12 kobalt kék, BL13 mesterséges ultramarin, BL14 cölinkék, BL15 mangánkék, BL16 ftalocianin kék, BL17 kobaltkék türkiz, BL18 kobaltkék zöldeskék. Forrás: saját felvételek	158
86. ábra – lila pigmentmezőkről készült VIS-R_VIS felvétel balra; infravörös <i>false color</i> kép jobbra; Phase One IXH, 72 mm, f/8.0, 1/2 sec VIS, 8 sec UvR, ISO 50; balról jobbra haladva: V1 mangán viola (mangán-ammónium-foszfát), V2 ultramarin viola (nátrium-alumínium-szulfoszilikát), V3 ultramarin viola (nátrium-alumínium-szulfoszilikát), V4 kobalt viola (kobalt-foszfát); V5 mangán viola (mangán-foszfát), V6 mangán viola (bárium-manganát-foszfát). Forrás: saját felvételek.....	159
87. ábra – „Trónoló Mária kép” VIS-R_VIS. Forrás: saját felvétel.....	161
88. ábra – „Trónoló Máris kép” IrRFC. Forrás: saját felvétel.....	161
89. ábra – „Trónoló Mária kép” VIS-R_VIS részlet. Forrás: saját felvétel.....	162
90. ábra – „Trónoló Máris kép” IrRFC részlet. Forrás: saját felvétel.....	162
91. ábra – „Trónoló Mária kép” VIS-R_VIS. Forrás: saját felvétel.....	163
92. ábra – „Trónoló Mária kép” UvRFC. Forrás: saját felvétel.....	163
93. ábra – „Trónoló Mária kép” VIS-R_VIS részlet. Forrás: saját felvétel.....	164
94. ábra – „Trónoló Mária kép” UvRFC részlet. Forrás: saját felvétel.....	164
95. ábra – „Tájkép” VIS-R_VIS. Forrás: saját felvétel.....	165
96. ábra – „Tájkép” IrRFC. Forrás: saját felvétel.....	165
97. ábra – „Tájkép” VIS-R_VIS részlet. Forrás: saját felvétel.....	165
98. ábra – „Tájkép” IrRFC részlet. Forrás: saját felvétel.....	165
99. ábra – „Tájkép” VIS-R_VIS. Forrás: saját felvétel.....	166
100. ábra – „Tájkép” UvRFC. Forrás: saját felvétel.....	166
101. ábra – „Tájkép” VIS-R_VIS részlet. Forrás: saját felvétel.....	167
102. ábra – „Tájkép” UvRFC részlet. Forrás: saját felvétel.....	167
103. ábra – A Zeiss Axio Imager rendszerű polarizációs optikai mikroszkóp fényútjainak egyszerűsített ábrája (ráeső átmenőmenőfényes vizsgálati típus egyaránt feltüntetve) Forrás: www.zeiss.com	169
104. ábra – Az STC clip filter, Canon APSC vázákhoz. Forrás: https://www.stcoptics.com/collections/clip-filters?pf_t_camera_type=Canon	170
105. ábra – A szűrő behelyezésének módka. Forrás: https://www.stcoptics.com/collections/clip-filters?pf_t_camera_type=Canon	170
106. ábra – Egy Canon APSC vázba beillesztett szűrő. Forrás: https://www.stcoptics.com/collections/clip-filters?pf_t_camera_type=Canon	170
107. ábra – Az STC infravörös <i>clip filter</i> -ek áteresztési görbéi. Forrás: https://www.stcoptics.com/collections/clip-filters?pf_t_camera_type=Canon	170
108. ábra – Próba felvétel a tesztelési folyamat során egy vörös festékrétegből vett minta keresztmetszet csiszolatáról (VIS-R_VIS). Forrás: saját felvétel.....	171

109. ábra - Próbafelvétel a tesztelési folyamat során egy vörös festékrétegből vett minta keresztmetszet csiszolatáról, IR-R_IR ₈₃₀₋₁₀₀₀ . Forrás: saját felvétel	171
110. ábra - Próbafelvétel a tesztelési folyamat során egy vörös festékrétegből vett minta keresztmetszet csiszolatáról, IR-L_UV ₃₆₅	171
111. ábra – A Zeiss HAL 100-as halogén fényforrása.	171
112. ábra – a Zeiss HAL 100-as halogén fényforrás robbantott ábrája. Forrás: https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html	171
113. ábra – Halogén sugárzó kibocsájtási görbéi. Forrás: https://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/tungstenhalogen.html	172
114. ábra – A beépített hővédő szűrő áteresztési spektruma. Forrás: https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html	172
115. ábra -A modellkísérletekhez készült mintatábla R1-es szektorából származó minta, keresztmetszet csiszolatának felvétele, VIS-R_VIS. Forrás: saját felvétel	173
116. ábra – A modellkísérletekhez készült mintatábla R1-es szektorából származó minta, keresztmetszet csiszolatának felvétele, UV-R_UV ₃₆₅ . Forrás: saját felvétel.....	173
117. ábra – A modellkísérletekhez készült mintatábla R1-es szektorából származó minta, keresztmetszet csiszolatának felvétele IR-R_IR ₈₃₀₋₁₀₀₀ . Forrás: saját felvétel	173
118. ábra - A JEL HXP 120 V sugárforrás. Forrás: https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html	174
119. ábra - A JEL HXP 120 V sugárforrás, robbantott ábra, oldalnézet. Forrás: https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html	174
120. ábra - A JEL HXP 120 V sugárforrás, kibocsájtási görbéje. Forrás: https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html	174
121. ábra - A beépített hővédő szűrő áteresztési spektruma. Forrás: https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html	174
122. ábra – A Zeiss polarizációs mikroszkópja az átalakításokkal. Forrás: https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html weboldáról származó ábrák montázs.	175
123. ábra - A Szűrőtárcsa (1.) rajza. Forrás: https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html	176
124. ábra - a szűkőblokk felépítése, ballra a blokk háromdimenziós rajza, jobbra pedig a keresztmetszeti ábrája, a sugárirány nyilakkal jelölve. A „b.” a belépő oldali szűrőt, a „c.” a féláteresztő tükröt (<i>beam splitter</i>), a „d.” pedig a kilépő oldali szűrőt jelöli. Forrás: https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html	177
125. ábra – Az R7-es mezőből vett minta keresztmetszet csiszolatának VIS-R_VIS (pol) felvétele, 10x okulár, 20x objektív. Forrás: saját felvétel	178
126. ábra - Az R7-es mezőből vett minta keresztmetszet csiszolatának IR-L_VIS felvétele, 10x okulár, 20x objektív. Forrás: saját felvétel	178
127. ábra – A modellkísérletekhez készült tábla Y13 szektorából származó minta keresztmetszet csiszolatának felvétele, IR-R_IR ₈₃₀₋₁₀₀₀ . Forrás: saját felvétel	179
128. ábra – A modellkísérletekhez készült tábla Y13 szektorából származó minta keresztmetszet csiszolatának felvétele, UV-R_UV. Forrás: saját felvétel.....	179
129. ábra ábra – Anatáz ásvány. Forrás: https://en.wikipedia.org/wiki/Anatase	185

130. ábra– Brookit ásvány. Forrás: https://en.wikipedia.org/wiki/Brookite	185
131. ábra– Rutil kristály. Forrás: https://en.wikipedia.org/wiki/Rutile	185
132. ábra – a különböző polimorfok kristályszerkezeti struktúrái	186
133. ábra - Wilhelm Geyer festményének részlete a Maria Heimsuchung templom kórusívén. Forrás: Annette Keller et al. 2019	187
134. ábra - Wilhelm Geyer falfestményének részlete a Mariä Heimsuchung templomban. Komplettsáv felvételsor. A piros pont a mintavételi területet jelöli. Az alsó nagy ábra az UV-sugárzás által kiváltott releváns IR-lumineszcenciát mutatja be. Forrás: Annette Keller et al. 2019	187
135. ábra - Vis-R_Vis felvétel Rudnay Gyula: <i>Bevonuló</i> című festményéről restaurálás előtti állapotban - Szépművészeti Múzeum – Magyar Nemzeti Galéria – Festészeti Osztály. Forrás: saját felvétel	188
136. ábra - Ir-L_UV ₃₆₅ felvétel Rudnay Gyula: <i>Bevonuló</i> című festményéről restaurálás előtti állapotban - Szépművészeti Múzeum - Magyar Nemzeti Galéria – Festészeti Osztály. Forrás: saját felvétel	188
137. ábra - Többsáv felvételek a titán-dioxid minták vizsgálatához. A baloldalon a titán-dioxid porminták láthatók inert háttér előtt. A jobb oldalon a bemutatott szakirodalom szerzői által válogatott pigmentek felfestett mezői. Az alsó sorban a látható tartományú reflexiós felvételen (VIS-R_VIS) „A”-val az anatóz „R”-rel a rutil polimorf módosulat van jelölve. Forrás: Annette Keller et al. 2019	192
138. ábra - A titán-dioxid pormintákon, 355 nm-en végzett impulzusos lézergyújtást követően kapott időfüggő fotolumineszcencia spektrumok nanoszekundumos (bal oldali panel) és mikroszekundumos (jobb panel) időskálán. Forrás: Annette Keller et al. 2019	195
139. ábra – polarizációs mikroszkópos VIS felvétel a rétegtani mikromintáról. A felső fehér rétegben (fekete görbe) és a vörös rétegben (piros görbe) felvett Raman-spektrumok. Alul a második sorban pedig, a mintában a 0,5 és 10 µs közötti időintervallumban detektált emisszió időgátolt PL-felvételeinek multispektrális adatsora. Forrás: Annette Keller et al. 2019	196
140. ábra - a W10-es pigmentmezőből vett minta keresztmetszet csiszolatáról készült VIS-R_VIS (pol) felvétel. Forrás: saját felvétel	197
141. ábra - W10-es pigmentmezőből vett minta keresztmetszet csiszolatáról készült VIS-L_UV ₃₆₅ felvétel. Forrás: saját felvétel	197
142. ábra - W10-es pigmentmezőből vett minta keresztmetszet csiszolatáról készült IR-L_UV ₃₆₅ felvétel. Forrás: saját felvétel	197
143. ábra – a „Rud1”-es minta keresztmetszet csiszolatának VIS-R_VIS (pol) felvétele (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	198
144. ábra - a „Rud1”-es minta keresztmetszet csiszolatának UV-R_UV ₃₆₅ felvétele (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	198
145. ábra - a „Rud1”-es minta keresztmetszet csiszolatának IR-R_IR ₈₅₀₋₁₀₀₀ felvétele (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	198
146. ábra - a „Rud1”-es minta keresztmetszet csiszolatának IR-L_UV ₃₆₅ felvétel (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	198
147. ábra - a „Rud1”-es minta keresztmetszet csiszolatának VIS-L_UV ₃₆₅ felvétel (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	198

148. ábra - a „Rud1”-es minta keresztmetszet csiszolatának VIS-L_BV ₄₂₀ felvétele (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel.....	198
149. ábra - a szakirodalmi példa a mintatábláiról készült VIS-R_VIS felvétel. Forrás: A. Daveri et al. 2015)	203
150. ábra - IR-L_VIS felvétel, a fehérrel keretezett mezőkben a lumineszkáló nikkel-titán sárga pigmentmezők. Forrás: A. Daveri et al. 2015).....	203
151. ábra - az Y15-ös mezőből vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-R_VIS (pol), (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel.....	204
152. ábra - az Y15-ös mezőből vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-L_UV ₃₆₅ , (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel.....	204
153. ábra - az Y15-ös mezőből vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, IR-L_UV ₃₆₅ , (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	204
154. ábra - Y16-os mezőből vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-R_VIS (pol), (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel.....	204
155. ábra - Y16-os mezőből vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-L_UV ₃₆₅ , (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel.....	204
156. ábra - Y16-os mezőből vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, IR-L_UV ₃₆₅ , (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	204
157. ábra - a Kadmium sárga pigment reflexiós görbéi, különböző kötőanyagban mérve. Forrás: Antonio Consentino 2014	207
158. ábra - Kadmium narancs/vörös pigment reflexiós görbéi, különböző kötőanyagban mérve. Forrás: Antonio Consentino 2014	207
159. ábra – A kadmiumsárga pigmentek reflexiós görbéi kötőanyag nélkül. Forrás: www.chopensee.org 2025.08.24.....	208
160. ábra - A kadmiumvörös pigmentek reflexiós görbéi kötőanyag nélkül. Forrás: www.chopensee.org 2025.08.24.....	208
161. ábra A Greenockite ásvány.	209
162. ábra - A Greenockite ásvány.	209
163. ábra - A Hawleyite ásvány.	209
164. ábra - A Hawleyite ásvány.	209
165. ábra - A Greenockite hexagonális kristály rajza. Forrás: https://www.911metallurgist.com/blog/bioleaching-cadmium/ 2025.03.12.	209
166. ábra – A.....	209
167. ábra - Egyszerűsített energiadiagram a kadmium-szulfid (CdS) és kadmium-szelenid (CdSe) tömbi kristályaihoz. Az E_g a tiltott sáv energia-különbsége a vegyértéksáv és a vezetési sávok között. Az E_{be} a tiltott sáv kibocsátási energiájának felel meg. Az E_{t1} és E_{t2} az energia-különbségek a vegyértéksáv és a kristály hibák által indukált csapdaállapotok között, amelyekből sugárzó dekadencia történhet. A sugárzó dekadenciát szilárd vektorok reprezentálják, míg a nem sugárzó dekadenciát hullámvonalak jelölik. Forrás: Mathieu Thoury et al. 2011	211

168. ábra - Vaszary János: <i>Balkonon álló vörös pizsamás nő</i> ; olaj, vászon; 1930 körül; 85 x 105 cm, leltári szám: FEO_58.182T; Szép-művészeti Múzeum-Magyar Nemzeti Galéria-Festészeti Osztály. VIS-R_VIS (pol.) Forrás: saját felvétel	223
169. ábra - VIS-R_VIS (pol.) részlet. Forrás: saját felvétel	224
170. ábra - IR-R_IR ₈₃₀₋₁₁₀₀ , részlet. Forrás: saját felvétel.....	224
171. ábra - UV-R_UV ₃₆₅ , részlet. Forrás: saját felvétel	224
172. ábra - VIS-Lu_UV ₃₆₅ , részlet. Forrás: saját felvétel.....	224
173. ábra - IR-Lu_UV ₃₆₅ , részlet. Forrás: saját felvétel	224
174. ábra - A 4-es mintavétel helye, makrófelvétel (VIS-R_VIS). Forrás: saját felvétel	224
175. ábra - A 4-es mintavétel helye,	224
176. ábra - A 4-es minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele VIS-R_VIS (pol)	224
177. ábra – A 4-es minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétel, VIS-L_UV ₃₆₅ . (10x okulár, 20x objektív) Forrás: saját felvétel.....	225
178. ábra – A 4-es minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétel, VIS-Lu_BV ₄₂₀ . (10x okulár, 20x objektív) Forrás: saját felvétel	225
179. ábra - A 4-es minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétel, IR-Lu_UV ₃₆₅ . (10x okulár, 20x objektív) Forrás: saját felvétel	225
180. ábra - A 8-as mintavétel helyének makrófelvétele, VIS-R_VIS. Forrás: saját felvétel.....	225
181. ábra - A 8-as mintavétel helyének makrófelvétele, VIS-L_UV ₃₆₅ . Forrás: saját felvétel.....	225
182. ábra - A 8-as minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-R_VIS (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	225
183. ábra - A 8-as minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-L_UV ₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	225
184. ábra - A 8-as minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, IR-Lu_UV ₃₆₅ . (10x okulár, 20x objektív) Forrás: saját felvétel	225
185. ábra - Czóbel Béla: <i>Műteremben</i> ; olaj, vászon; 1922, 95 x 75 cm; leltári szám: FEO_FK8742; Szépművészeti Múzeum - Magyar Nemzeti Galéria - Festészeti Osztály, VIS-R_VIS. Forrás: saját felvétel	226
186. ábra - Az 1-es mintavétel helye makrófelvétel (VIS-R_VIS). Forrás: saját felvétel.....	226
187. ábra - A 1-es mintavétel helye makrófelvétel (VIS-L_UV ₃₆₅). Forrás: saját felvétel.....	226
188. ábra – A Cz_1.1-es minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-R_VIS (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	227
189. ábra - Czóbel 1.1-es minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-L_UV ₃₆₅ , (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	227
190. ábra - Czóbel 1.1-es minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, IR-L_UV ₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	227
191. ábra – A Cz_1.2-es minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-R_VIS (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	227

192. ábra – A Cz_1.2-es minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-L_UV ₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	227
193. ábra – A Cz_1.2-es minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele. IR-L_UV ₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás saját felvétel	227
194. ábra - Az Y15-ös szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvételei, balról jobbra: VIS-R_VIS (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	228
195. ábra - Az Y15-ös szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvételei, balról jobbra: VIS-L_UV ₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	228
196. ábra - Az Y15-ös szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvételei, balról jobbra: IR-L_UV ₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	228
197. ábra - Az Y18-as szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvételei, balról jobbra: VIS-R_VIS (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	228
198. ábra - Az Y18-as szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvételei, balról jobbra: VIS-L_UV ₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	228
199. ábra - Az Y18-as szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvételei, balról jobbra: IR-L_UV ₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	228
200. ábra - Az Y20-as szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvételei, balról jobbra: VIS-R_VIS (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	228
201. ábra - Az Y20-as szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvételei, balról jobbra: VIS-L_UV ₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	228
202. ábra - Az Y20-as szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvételei, balról jobbra: IR-L_UV ₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel	228
203. ábra - A cuprorivait ásvány. Forrás: https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/MineralData?lang=en&mineral=Cuprorivaite	
2025.08.26.....	232
204. ábra - Az Effenbergerit ásvány. Forrás: https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/MineralData?lang=en&mineral=Effenbergerit	
2025.08.26.....	232
205. ábra - A kísérletben vizsgált egyiptomi kék minták szobahőmérsékleten felvett PL spektrumai (intenzitás tetszőleges egységekben): a, Vatikán; b, Aosta; c, Göteborg; d, Heliopolis; e, Nisa. Forrás: Giorgio Pozza et al. 2000	233
206. ábra - A rézion energiaszintjének sémája. Forrás: Girogio Pozza et al. 2000	233
207. ábra - Abszorpció és emissziós átmenetek. Forrás: Giorgio Pozza et al. 2000	235
208. ábra - A Han kék és a Han lila minták szobahőmérsékleten felvett PL spektrumai (tetszőleges intenzitás egységekben). Forrás: Giorgio Pozza et al. 2000	235
209. ábra - Az egyiptomi kék és a Han kék szobahőmérsékleten felvett PL spektrumai. Forrás: Giorgio Pozza et al. 2000	237
214. ábra –Totálfelvétel a szoborról. VIS-R_VIS, Phase One IXH, 72 mm, f/11, 0.8 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel	241

215. ábra - Totálfelvétel a szoborról. IR-L_VIS, Phase One IXH, 72 mm, f/11, 120 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel.....	241
216. ábra – Totálfelvétel a szoborról. IR-L_UV ₃₆₅ , Phase One IXH, 72 mm, f/11, 120 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel.....	241
217. ábra - Részletfelvétel a szoborról, VIS-R_VIS, Phase One IXH, 72 mm, f/11, 0.8 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel.....	242
218. ábra - Részletfelvétel a szoborról, VIS-L_VIS, Phase One IXH, 72 mm, f/11, 120 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel.....	242
219. ábra - Részletfelvétel a szoborról, VIS-R_UV ₃₆₅ , Phase One IXH, 72 mm, f/11, 120 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel.....	242
220. ábra – Totálfelvétel a tábláról. VIS-R_VIS, Phase One IXH, 72 mm, f/11, 0.8 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel.....	242
221. ábra – Totálfelvétel a tábláról. IR-L_VIS, Phase One IXH, 72 mm, f/11, 120 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel.....	242
222. ábra – Totálfelvétel a tábláról. IR-L_UV ₃₆₅ , Phase One IXH, 72 mm, f/11, 120 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel.....	242
223. ábra – Részletfelvétel a tábláról. VIS-R_VIS, Phase One IXH, 72 mm, f/11, 0.8 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel.....	243
224. ábra - Részletfelvétel a tábláról. IR-L_VIS, Phase One IXH, 72 mm, f/11, 120 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel.....	243
225. ábra – Részletfelvétel a tábláról. IR-L_UV ₃₆₅ , Phase One IXH, 72 mm, f/11, 120 sec, ISO 50. Forrás: saját felvétel.....	243
226. ábra - A BL1-es szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele. VIS-R_VIS (10 okulár, 20x objektív Forrás: saját felvétel.....	243
227. ábra - A BL1-es szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele. VIS-L_UV ₃₆₅ (10 okulár, 20x objektív Forrás: saját felvétel.....	243
228. ábra - A BL1-es szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele. IR-L_UV ₃₆₅ (10 okulár, 20x objektív Forrás: saját felvétel.....	243
229. ábra - A BL2-es szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-R_VIS (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel.....	244
230. ábra - A BL2-es szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-L_UV ₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel.....	244
231. ábra - A BL2-es szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, IR-L_UV ₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel.....	244
232. ábra – A BL3-es szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-R_VIS (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel.....	244
233. ábra - A BL3-es szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, VIS-L_UV ₃₆₅ (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel.....	244
234. ábra - A BL3-es szektorból vett minta keresztmetszet csiszolatának polarizációs mikroszkópos felvétele, IR-L_VIS (10x okulár, 20x objektív). Forrás: saját felvétel.....	244

235. ábra -A porított szintetikus mangán-kék abszorpció (teljes reflexió, teljes vonal), gerjesztési (üres kör, $\lambda_{em} = 1300$ nm) és emissziós (teljes kör, $\lambda_{exc} = 637$ nm) spektrumai. Jobbra fent: lumineszcencia-csökkenés (7,1 ms, $\lambda_{exc} = 637$ nm). Forrás: Gianluca Accorsi et al. 2014.....	248
236. ábra - A kísérleti Mn-adalékolt BaSO ₄ abszorpció spektrum (piros vonal) és az elméleti TD-UB3LYP/631+G* spektrum (zöld sávok); a jobb oldali y-tengelyen az elméleti oszcillátorerősségek vannak feltüntetve. Forrás: Forrás: Gianluca Accorsi et al. 2014.....	248
237. ábra - Látható fényes felvétel a különböző kék pigmentekről, beleértve a mangánkéket, amely az egyetlen olyan kék pigment. Forrás: Gianluca Accorsi et al. 2014.....	251
238. ábra - Látható fénnel indukált infravörös lumineszcens felvétel 700-1700 nm-es tartományban különböző kék pigmentek esetében, beleértve a mangánkéket, amely az egyetlen olyan kék pigment, amely látható fénnel besugárzva infravörös sugárzást bocsát ki 1300 nm körüli csúccsal. Forrás: Gianluca Accorsi et al. 2014	251
239. ábra –Látható fényes reflexió totál- és részletfelvétel a), b); infravörös lumineszcens felvétel a 800-1000 nm-es tartományban c); és infravörös lumineszcens felvétel a 700-1700 nm-es tartományban d) a Cappenbergi mester Szűz Mária megkoronázása (NG 263) című művének egyik eleméről. Forrás: Gianluca Accorsi et al. 2014	253

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat - Reflexiós képalkotás	40
2. táblázat - Lumineszcens képalkotás	41
3. táblázat - Transzmissziós képalkotás	41
4. táblázat - AIC GUIDE	52
5. táblázat - CHARISMA User Manual	53
6. táblázat - PHASE ONE RAINBOW MSI (Multiband).....	54
7. táblázat - SAJÁT GYAKORLAT (analitikai set-up).....	55
8. táblázat - SAJÁT GYAKORLAT (állapotfelmérő set-up)	56
9. táblázat – A sárga szűrők VIS-R_VIS és VIS-L_UV ₃₆₅ felvételei és az pXRF mérések eredményei .	110
10. táblázat - Az RGB komponensek értékelése. Forrás: Alfredo Aldrovandi et al. 2004.....	153
11. táblázat. Forrás: Alfredo Aldrovandi et al. 2004.....	153
12. táblázat – A kutatáshoz begyűjtött referenciaminták (porpigmentek). A táblázat tartalmazza az egyedi kódokat, az angol, német és magyar elnevezéseket és a gyártói vagy beszerzési forrást és azonosítókat.	182
13. táblázat – A feldolgozott kutatás során elemzett minták/pigmentek listája	189
14. táblázat – A jelen értekezés kutatási részéhez beszerzett referenciaminták listája	190
15. táblázat – A modellkísérletekhez készült mintatáblákról Phase One rendszerrel készült multispektrális felvételek. Forrás: saját felvételek	193
16. táblázat - A modellkísérletekhez készült mintatáblákról Sony <i>full spectrum</i> rendszerrel készült multispektrális felvételek. Forrás: saját felvételek	193
17. táblázat – A modellkísérletekhez készült mintatáblák többsávós felvételei. Forrás: saját táblázat és felvételek. Forrás: saját felvételek	203
18. táblázat – A referencia tábla sárga pigmentmezőiről készült felvételek	220
19. táblázat – A referencia tábla vörös pigmentmezőiről készült felvételek.....	221
20. táblázat - A címbe szereplő vegyületek abszorpciós spektrumainak főbb jellemzői	235
21. táblázat – A kék pigmentmezők többsávós képeken.....	239
22. táblázat – A zöld pigmentmezők többsávós felvételei. Forrás: saját felvétel.....	240
23. táblázat – A referencia tábla kék pigmentszektorai	255
24. táblázat – A referenciatáblák lila pigmentszektorai	256

Nyilatkozat a mesterséges intelligencia (MI) használatáról

Alulírott Horváth Mátyás, a Magyar Képzőművészeti Egyetem, Doktori Iskolájának doktorjelöltje ezúton nyilatkozom, hogy a doktori értekezésem és a kapcsolódó kutatás elkészítése során a mesterséges intelligenciát kizárólag támogató jelleggel vettem igénybe.

Az MI-eszköz (OpenAI ChatGPT) alkalmazásának módja és terjedelme:

- nyelvi ellenőrzés és szövegformázás,
- szaknyelvi pontosítás és stilisztikai javaslatok,
- irodalomjegyzék és hivatkozások formai rendezése,
- tudományos terminusok rövid definícióinak megfogalmazása hivatkozással.

Az MI által kezelt szövegrészek minden esetben átdolgozásra kerültek, és a doktori értekezésben a saját kutatásaim, értelmezéseim és következtetéseim részeként jelennek meg. Az algoritmus által készített tartalmak a kutatás érdemi, intellektuális hozzájárulását nem helyettesítik.

Az MI-használat során alkalmazott utasítások és kimenetek archiválásra kerültek, és ellenőrizhető módon hozzáférhetők.

Kijelentem továbbá, hogy az MI-használat a kutatás etikai normáinak megfelel:

- nem történt plágium, az MI által generált tartalmakat minden esetben saját gondolataimmal egészítettem ki,
- az adatok feldolgozása és a publikált eredmények a résztvevők jogait nem sértik.

Budapest, 2025.08.31.

HORVÁTH Mátyás