

Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet

Vesna Džimbeg-Malčić

**Primjena Kubelka-Munk teorije i Yule-Nielsenovog
efekta na tiskovnim podlogama**

doktorska disertacija

Zagreb, 2005.

UDK:

Znanstveno područje: tehničke znanosti

Znanstveno polje: grafička tehnologija

Institucija: Grafički fakultet

Voditelj rada: dr. sc. Stanislav Bolanča, red. prof. Grafičkog fakulteta u Zagrebu

Broj stranica: 175

Broj slika: 140

Broj tablica: 26

Broj priloga: 2

Broj literaturnih referenci: 84

Datum obrane: 12. srpnja 2005.

Sastav povjerenstva za obranu: dr. sc. Zdenka Bolanča, red. prof.

dr. sc. Đurđica Osterman-Parac, red. prof.

dr. sc. Stanislav Bolanča, red. prof.

dr. sc. Diana Milčić, doc.

dr. sc. Nikola Mrvac, doc.

Rad je pohranjen u biblioteci Grafičkog fakulteta u Zagrebu i u Sveučilišnoj i nacionalnoj biblioteci u Zagrebu.

Zahvaljujem mentoru dr. sc. Stanislavu Bolanči, red. prof. na konstruktivnim primjedbama pri detaljnom isčitavanju ove disertacije, dr. sc. Đurđici Osterman-Parac, red. prof. na veoma zanimljivim diskusijama i prijedlozima, te dr. sc. Zdenki Bolanči, red. prof. na primjedbama koje su doprinijele kvaliteti ovog rada.

Zahvaljujem svim članovima katedre fizika, posebno mr. sc. Višnji Mikac-Dadić na nesebičnoj pomoći u svakom trenutku tijekom izrade ove disertacije.

Zahvaljujem izvrsnoj i nezamjenjivoj ekipi sa četvrtog kata koji su bili uvijek u pravom trenutku na pravom mjestu.

I na kraju, ali najvažniji, članovi moje obitelji, koji su me trpjeli svo ovo vrijeme koje sam provodila uz računalo, a ne s njima. Bobač, mama, David: Hvala na pomoći i razumijevanju.

Tanji

Sažetak

U ovom radu provedena su spektrofotometrijska mjerenja tiskovnih podloga, te obojenih otisaka. Otisci su dobiveni klasičnim ofsetom amplitudnom i frekventnom rasterskom modulacijom za osnovna bojila CMYK.

Optičke veličine koje karakteriziraju tiskovne podloge i otiske kao što su raspršenje i apsorpcija ispitivani su preko Kubelka-Munk teorije, dok je bočno raspršenje pojava koju opisuje Yule-Nielsenov parametar n . Kubelka –Munk teorija se koristi dugo i uspješno upravo zato jer osnovne optičke veličine tiskovnih površina i obojenih otisaka, opacitet, raspršenje i apsorpciju, opisuje preko reflektancije ili transmitancije koje se eksperimentalno određuju veoma precizno i jednostavno.

Murray-Daveisova metoda tokove fotona zbraja linearno, prema zakonu sačuvanja energije fotona, ali daje prevelike iznose reflektancije u odnosu na mjerene. Yule i Nielsen zbrajaju tokove fotona na faktor $1/n$, uvodeći na taj način efekt bočnog raspršenja.

Eksperimentalno dobiveni refleksijski spektari matematički su obrađeni da bi osigurali neophodne podatke za izračun fizikalnih veličina prema pretpostavkama korištenih teorija.

Matematička obrada eksperimentalnih podataka provedena je programima MathCAD 2002 Professional i Data Analysis and Technical Graphics Origin 6.0.

Bočno raspršenje svjetlosti u papiru je osnovni uzrok optičkog prirasta rasterskog elementa. Naime, svjetlost koja ulazi u papir između rasterskih elemenata može se bočno raspršiti u papiru prije nego se vrati na površinu kao reflektirana svjetlost. To povećava vjerojatnost da će svjetlost naići na rastersku točku i da će biti apsorbirana. Zbog toga je efektivni udarni presjek apsorpcije rasterske točke veći od fizičke veličine točke.

Važno je, prema svemu izloženom, povezati Yule-Nielsenov parametar n , kao mjeru bočnog raspršenja, s fundamentalnim fizikalnim i optičkim parametrima sustava, da bi se preko njih mogla predvidjeti veličina optičkog prirasta rasterskog elementa. Ti fizikalni, odnosno optički parametri su upravo raspršenje i apsorpcija Kubelka-Munk teorije.

Na temelju eksperimentalnih mjerenja i matematičkih rezultata odredilo se je područje primjene navedenih teorija s obzirom na realne uvjete grafičke reprodukcije i uspostavila se je korelacija između relevantnih parametara.

Ključne riječi:

Kubelka-Munk koeficijenti, Yule-Nielsenov parametar n , raspršenje, apsorpcija, tiskovna podloga

SUMMARY

In this thesis spectrophotometric measurements of the chosen paper substrates and coloured prints have been performed. The prints were obtained by classical offset, amplitude and frequency screen modulation, for primary colours CMYK.

The optical values which characterize the printing surfaces and prints such as scattering and absorption were investigated according to Kubelka-Munk theory, while the lateral scattering is the appearance which is described by the Yule-Nielsen parameter n . Kubelka-Munk theory has been used successfully for a long time because the basic optical values of the printing surfaces and coloured prints, opacity, scattering and absorption are described by reflectance and transmission which are experimentally determined very precisely and simply.

Conservation of photon energy suggest the Murray-Davies method, photon flux add linearly, but the reflectance predicted by Murray-Davies equation is generally higher than the measured reflectance. Yule and Nielsen correct Murray-Davies equation adding photon flux by power factor of $1/n$ and in that way describe lateral scattering.

The fundamental cause of optical dot gain is lateral scattering of light within paper. Light that enters the paper between the halftone dots can scatter laterally within the bulk of the paper before returning to the surface as reflected light. This lateral scattering in the bulk of the paper increases the probability the light will encounter a halftone dot and be absorbed. Thus the effective absorption cross section of the halftone dot is larger than the physical size of the dot.

The obtained experimental data of the reflection spectra were processed mathematically in order to obtain the necessary data for calculation of the physical values according to the suppositions of the used theories.

Mathematical processing of the experimental data was performed by means of the programs MathCAD 2002 Professional and Data Analysis and Technical Graphics Origin 6.0.

According to all the mentioned, it is important to connect the Yule-Nielsen parameters n , as the measure of the lateral scattering, with the fundamental physical and optical parameters of the system in order to foreseen the size of the optical dot gain. These physical, i.e. optical parameters are scattering and absorption of Kubelka-Munk theory.

On the basis of the experimental measurements and mathematical results the area of the application of the mentioned theories in regard to the real conditions of the graphic reproduction has been determined and the correlation among the relevant parameters has been established.

Key words:

Kubelka-Munk coefficients, Yule-Nielsenov parameter n , scattering, absorption, paper substrate

Sadržaj

Uvod	1
1. Svrha rada	2
1.1. Problem	2
1.2. Ciljevi i zadaci istraživanja	2
2. Povijesna pozadina	3
2. 1 Povijest papira	3
2. 2 Povijest tiska	4
3. Znanstvena osnova	7
3. 1 Svjetlost i zakon sačuvanja energije	7
3. 2 Interakcija svjetlosti i materije	8
3. 3 Bojila i boja	18
3. 4 Beer-Lambertov sustav	23
3. 5 Kubelka-Munk sustav	24
3. 6 Murray-Daviesov model	29
3. 7 Yule-Nielsenovova korekcija	30
3. 8 Kubelka-Munk teorija i Yule Nielsenov efekt	35
3. 9 MTF analiza papira	36
3. 9. 1 Direktno mjerenje bočnog raspršenja svjetlosti	36
3. 9. 2 Kubelka-Munk teorija i MTF papira	37
3. 9. 3 Mjerenje MTF konstante preko Yule-Nielsenovog efekta	42
3. 10 Rasterska reprodukcija	45
3. 10. 1 Amplitudna modulacija	46
3. 10. 2 Frekventna modulacija	47
4. Eksperiment	50
4. 1 Cilj istraživanja	50
4. 2 Plan rada	51
4. 3 Izbor tiskovnih podloga	52
4. 4 Tisak odabranih tiskovnih podloga	52
4. 5 Metode istraživanja	52
4. 6 Korišteni strojevi i uređaji	54
4. 7 Istraživački rad	58
4. 7. 1 Mjerenje tiskovnih podloga i otisaka	58
4. 7. 2 Matematička obrada eksperimentalnih rezultata	58

5. Rezultati istraživanja	61
5.1 Analiza tiskovnih podloga	61
5.1.1 Kubelka-Munk analiza: koeficijenti apsorpcije i raspršenja	61
5.1.2 Opacitet	66
5.1.3 MTF analiza papira	67
5.2 Analiza otisaka	70
5.2.1 Murray-Davies metoda	70
5.2.2 Yule-Nielsenova korekcija	95
5.2.3 Kubelka-Munk analiza: koeficijenti apsorpcije i raspršenja	113
6. Diskusija rezultata	127
6.1 Tiskovne podloge	127
6.2 Obojeni otisci	130
7. Zaključci	147
8. Literatura	150
9. Prilozi	154
9.1 Matematički dodaci	154
9.2 Popisi slika i tablica	167

Uvod

Sukladno razvoju društva, znanosti i suvremene tehnologije pojavljuje se sve veći broj različitih tehnika grafičke reprodukcije, grafičkih strojeva i grafičkih materijala. S obzirom na takve uvjete sve je više parametara koji utječu na kvalitetu grafičkog proizvoda. Ako želimo ostvariti optimalan učinak cjelokupnog procesa grafičke reprodukcije moramo što bolje razumijeti sve pojave koje se zbivaju od samog odabira tiskovne podloge do gotovog proizvoda.

U ovom radu ispituje se interakcija elektromagnetskog zračenja vidljivog dijela spektra sa tiskovnom površinom i otiskom, jer je posljedica te interakcije upravo i naša percepcija grafičkog proizvoda. Zrake koje ulaze u naše oko i stvaraju sliku u mozgu nastaju reemisijom s podloge upravo zbog rezonantne i nerezonantne interakcije elektromagnetskog vala i kompleksne tiskovne podloge. Upravo zbog te kompleksnosti podloge, fizikalni procesi koji se zbivaju su veoma složeni i teško ih je opisati jedinstvenom teorijom koja je učinkovita u svim uvjetima realne grafičke proizvodnje.

Najčešće korištene teorije koje se obično primjenjuju za opis optičkih svojstava papira i drugih tiskovnih podloga su Murray-Daveisova metoda, Kubelka–Munk teorija i teorija linearnih sustava (Linear System Theory). Kubelka-Munk teorija opisuje reflektivna i transmittivna svojstva tiskovne podloge preko koeficijenata apsorpcije \mathbf{K} i raspršenja \mathbf{S} . Teorija linearnog sustava koristi funkciju širenja točke (Point Spread Function), $\text{PSF}(r)$, koja opisuje vjerojatnost izlaska svjetlosti iz papira na udaljenosti r od točke u kojoj je ušla u papir, odnosno bočno raspršenje svjetlosti u papiru. $\text{PSF}(r)$ se često opisuje u Fourierovom području kao modulacijska prijenosna funkcija (Modulation Transfer Function), $\text{MTF}(\omega)$, gdje je ω prostorna frekvencija u jedinicama $1/r$.

Murray-Daveisova metoda predstavlja zakon sačuvanja energije fotona, međutim ne uzima u obzir bočno raspršenje svjetlosti do kojeg dolazi na otisnutim rasterskim elementima ili u samoj kompleksnoj strukturi papira. Na osnovu razlike mjerenih refleksijskih spektara i dobivenih Murray-Daveisovom metodom Yule i Nielsen su uveli empirijski parametar u Murray-Daveisov izraz za reflektanciju ukupne rasterske slike. Ako Yule-Nielsenov parametar n ima fizikalno značenje, a nije samo empirijski faktor, morao bi biti u korelaciji s koeficijentima apsorpcije \mathbf{K} i raspršenja \mathbf{S} Kubelka-Munk teorije. Ta korelacija će se pratiti promjenom realnih uvjeta tiska.

1. Svrha rada

1.1 Problem

Zajednički problem u tiskarskoj industriji danas je optički prirast rasterskog elementa uzrokovan bočnim raspršenjem svjetlosti na tiskovnoj podlozi. Taj fenomen se još naziva i Yule-Nielsenov efekt ili parametar n . Zbog tog efekta, točke, kao elementi rasterske slike, izgledaju veće i slika je tamnija od originala^{1,9,22}. Budući da se u modernim tiskarskim strojevima visoke rezolucije veličina rasterskih elemenata sve više smanjuje, taj efekt postaje sve značajniji.

1.2 Ciljevi i zadaci istraživanja

Opći cilj istraživanja je bolje razumijevanje kompleksnosti interakcije svjetlosti (elektromagnetskog zračenja) i veoma složenog objekta ispitivanja kao što je otisnuta i neotisnuta tiskovna podloga- papir. Jedan od oblika interakcije je raspršenje svjetlosti na tiskovnim podlogama. Do pojašnjenja tog fenomena i njegovih posljedica na kvalitetu otiska doći će se povezivanjem Yule-Nielsenovog opisa optičkog prirasta rasterskog elementa (točke) preko parametra n s Murray-Daveisovim modelom, Kubelka-Munk teorijom, te s modulacijskom prijenosnom funkcijom (MTF) papira..

U skladu s eksperimentalnim rezultatima istraživanja, zadatak ovog rada je odrediti i područja primjene navedenih teorija s obzirom na realne uvjete grafičke reprodukcije.

Uočene promjene optičkih svojstava, kao posljedice promijenjenih parametara tiskovne podloge, doprinjet će boljem razumijevanju fizikalnih procesa koji ih uzrokuju. Na temelju dobivenih korelacija između relevantnih veličina omogućit će se bolje praćenje i kontrola upravo onih parametara koji su odgovorni za kvalitetu otisnutih tiskovnih podloga.

Naime, ako Yule-Nielsenov parametar n ima fizikalno značenje, a nije samo empirijski faktor, morao bi biti u korelaciji s koeficijentima apsorpcije K i raspršenja S Kubelka-Munk teorije.

Cilj istraživanja je i ispitivanje koji još faktori i na koji način utječu na promjenu koeficijenata apsorpcije i raspršenja, pa prema tome i na promjenu Yule-Nielsenovog parametra n , s obzirom na promjenu same tiskovne podloge, postotka obojenja i vrstu primijenjene rasterske modulacije.

Dobiveni rezultati istraživanja doprinjet će pojašnjenju raspršenja svjetlosti u ovisnosti o specifičnostima procesa grafičke reprodukcije i karakteristikama korištenih grafičkih materijala.

2. Povijesna pozadina

Od četiri tehnološka pronalaska, koji se u većini slučajeva uzimaju najvažnijim faktorima utjecaja na današnju suvremenu civilizaciju (barut, kompas, papir i tisak) dva su i glavni faktori ove doktorske teze: papir i tisak. Pronalasci papira i tiska jedni su od prijelomnih trenutaka u razvoju i širenju ljudske misli, kulture i civilizacije. Zbog sveukupne povijesne važnosti, najprije slijedi kratki opis razvoja tiskovne podloge i samih tehnika tiska čiji se utjecaji na razvoj društva očituju do današnjih dana.

2. 1 Povijest papira

Papir je dobio ime prema tropskoj trajnici, biljci *Cyperus papyrus*, od koje se, prije 4000 godina u Egiptu izrađivao materijal za pisanje. Stari Egipćani su biljnu srčiku razali u duge, tanke trake, ukrštali ih, prešali i sušili. S obzirom na tako dobivenu furnirsku strukturu, papirus i današnji papir imaju sličnost samo u imenu.

Daljnji napredak i olakšanje u pisanju bile su uglačane i osušene životinjske kože nazvane pergamentom, po antičkom gradu Pergamu. Bile su poznate na Bliskom istoku potkraj 2. stoljeća prije Krista.

Čast izradbe prvog papira, u današnjem smislu, pripada staroj Kini. Sam proces drugačije izradbe bio je potaknut potrebom za jeftinijom i lakšom podlogom za pisanje. Najstariji uzorak papira pronađen je u Xianu u Kini, datira između 140. i 87. godine prije Krista, a bio je izrađen od vlaknaca konoplje. Najstariji uzorak ispisanog papira datira iz 266. godine. Taj uzorak i mnogi drugi, pronađeni na istoj lokaciji i približno iste starosti, načinjeni su od duhana, konoplje i starih krpa.

Dugi niz godina Kinezi su tajnu proizvodnje papira držali unutar granica svoje države. Međutim, kineski ratni zatvorenici sredinom 8. stoljeća naučili su Arabe toj vještini i tada papir polako zamjenjuje papirus i pergament kao podlogu za pisanje. Korištenje papira se udomaćuje u Europi krajem tisućljeća, da bi manufakturna proizvodnja počela u Španjolskoj i Italiji tijekom 12. i 13. stoljeća.

S Gutenbergovim pronalaskom tiska 1440. godine u Mainzu i s pojavom reformacije porasla je potražnja za papirom kao prikladnim nositeljem tiska, pa ručna izradba papira koju su razvili Kinezi nije više mogla zadovoljiti povećanu potražnju za tiskovnom podlogom. Svi do tada poznati postupci za dobivanje papira bili su ograničeni na sirovine od čahura svilene bube, rižine slame, bambusa, konoplje i lanenih krpenih otpadaka. Te sirovine nisu mogle zadovoljiti potrebe za papirom. F. G. Keller iz Saske uspio je 1845. godine dobiti vlaknastu gustu drvenu masu (drvenjaču) brušenjem drveta između brusnih kamena uz dodatak vode. Ta se masa mogla dodavati masi od krpa u udjelu i do 60%. On je svoj pronalazak patentirao 1848. godine.

U Hrvatskoj se s izradbom papira započelo u Dubrovniku oko polovice 17. stoljeća⁷⁰. U Zagrebu je od 1772. godine postojao mlin za papir u Novoj Vesi, a 1895. godine započela je u Zagrebu tvornica papira redovitu proizvodnju.

Tijekom 19. stoljeća učinjena su mnogobrojna poboljšanja u samoj tehnologiji izradbe papira koja su vodila prema visoko sofisticiranoj modernoj industriji papira današnjice.

Danas se na tržištu nudi puno vrsta papira različitih optičkih, mehaničkih i kemijskih svojstava. Karakteristike papira se mijenjaju ovisno o vrsti tiska, pretpostavljenoj namjeni tiskanog proizvoda, odnosno potrebama naručitelja.

2.2 Povijest tiska

Čast pronalaska tiska također pripada staroj Kini. Najstariji pronađeni otisak datira iz 770. godine. Taj najstariji tisak je bio načinjen iz izdubljenog drveta, čija je veličina odgovarala jednoj stranici. Korištenje individualnih simbola za višekratnu upotrebu koji su se slagali u tekst vraća nas u 11. stoljeće i to opet u Kinu, dok se metalni simboli spominju u Kini u 14. stoljeću. Međutim, zbog karakterističnog kineskog pisma, prve tiskane knjige preko metalnih simbola nisu nastale u Kini veću susjednoj Koreji.

Bez obzira što se tisak prvi put pojavio u Kini nekoliko stoljeća prije u odnosu na Europu, a prva metalni simboli su uspješno korišteni u Koreji nekih 50 godina prije Europe, ipak je nepobitna činjenica da je tiskarska tehnologija nastala neovisno i u Europi, i to zaslugom jednog čovjeka: **Johannesa Gutenberga** (slika 1).

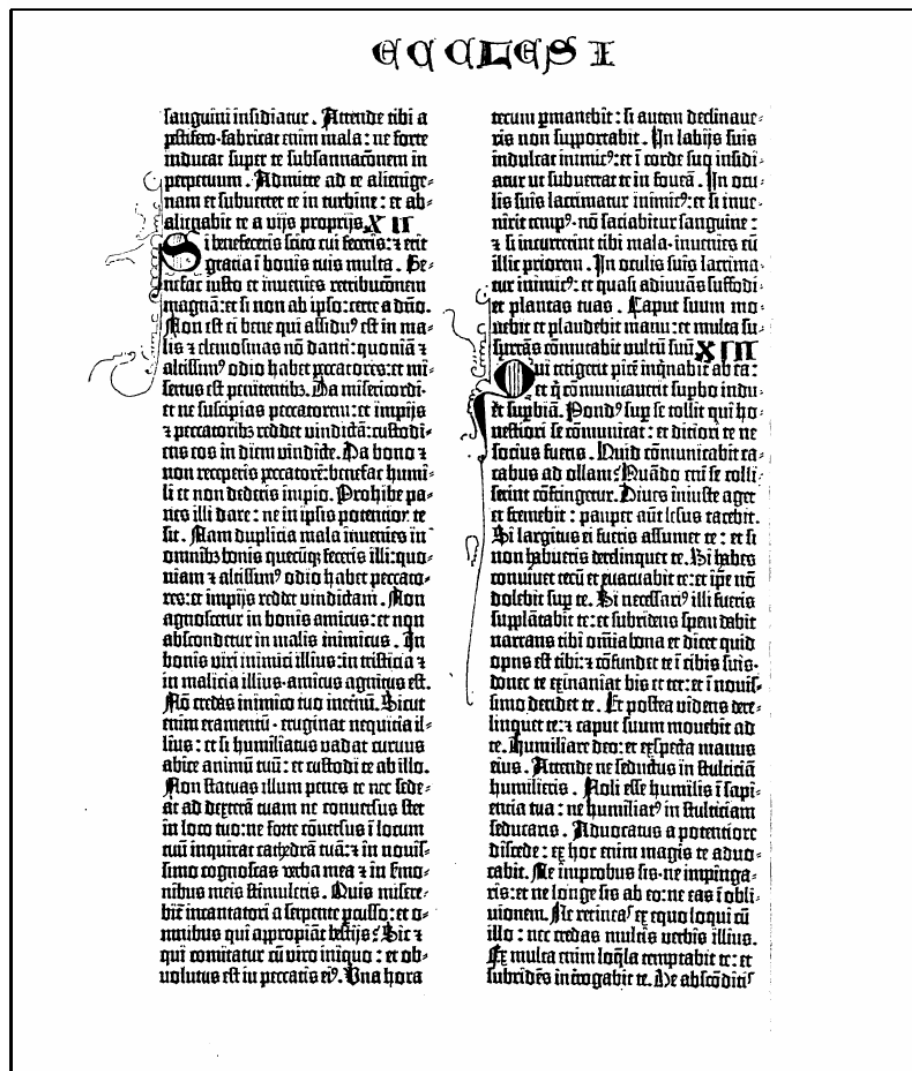


Slika 1 Johannes Gutenberg, ilustracija iz 1584. godine

Izum tiska bio je ključni događaj u kulturnoj transformaciji srednjeg vijeka prema suvremenoj civilizaciji. Johannes Gutenberg je svojim izvanrednim pronalaskom u petnaestom stoljeću položio temelj modernoj grafičkoj reprodukcionalnoj tehnologiji. On je razvio metodu odljeva individualnih slova koja je složio u ispisanu stranicu i usavršio je metodu tiskanja pritiskom tako da omogući bojilu prolaz na tiskovnu

podlogu. Jedna od najstarijih tiskanih knjiga iz Gutenbergove radionice, a ujedno i najpoznatija knjiga, je 42-linijska Biblija tiskana u razdoblju od 1452. do 1455. godine u 200 kopija (slika 2).

Ipak, tijekom nekoliko stoljeća tisak je ostao više-manje ručni, jer ni Gutenbergova metoda nije bila bitno brža. Tek automatizacija uvedena u tiskarsku tehnologiju, kao i u tehnologiju izradbe papira tijekom 18. i 19. stoljeća bitno povećava brzinu tiskanja uvođenjem rotirajućih cilindara. Tada tiskovine polako postaju dostupne svim zainteresiranim kupcima.



Slika 2 Stranica iz Gutenbergove biblije

Kroz to vrijeme boja je bila prepoznata kao nezavisni kulturološki oblik i njeni proizvođači su se trudili proizvesti što kvalitetnija bojila. Miješanje boja baziralo se je samo na iskustvenom znanju. Inspiriran Isaacom Newtonom i njegovom teorijom boja, prvu trikromatsku formu kolorističke tehnike uveo je Jacob C. Le Blon na početku 18. stoljeća²⁸. On je ručno obradio tiskovne ploče i korištenjem plavog, crvenog i žutog bojila reproducirao prvu kolorističku (obojenu) ilustraciju. Današnja takozvana procesna bojila cijan, magenta i žuta bila su uvedena da se dobije optimalni sivi balans za reprodukciju što je moguće više različitih nijansi boje³⁹.

Većini tradicionalnih tehnika tiska bila je zajednička nemogućnost direktne reprodukcije međutonova, što je značilo problem pri tiskanju kontinuiranih prijelaza. George Meisenbach je pri kraju 19. stoljeća pronalaskom amplitudno moduliranog, periodičnog rastriranja (tradicionalni raster) konačno pokrenuo modernu tehniku ilustriranja.

Hrvati su vrlo rano prihvatili i razvijali tiskarsko umijeće. Već u 15. stoljeću niz hrvatskih pisaca objavljuje svoje tiskane knjige, a ima Hrvata koji djeluju kao tiskari, stječući svoje tiskarsko umijeće u Mlecima¹⁴.

Godina 1483. značajna je u hrvatskoj kulturnoj povijesti jer je tada objavljena prva hrvatska knjiga na crkvenoslavenskom jeziku hrvatske redakcije *Misal po zakonu rimskog dvora*. Prema nekim istraživačima (J. Dobrowsky, I. Kukuljević, V. Jagić) *Misal* je tiskan u Veneciji, dok Z. Kulundžić zastupa tezu o njegovom tiskanju u kosinjskoj tiskari, prvoj na području Hrvatske.

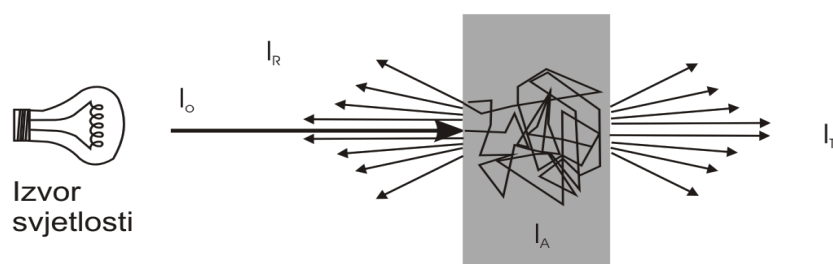
Kao lektor i slagar u Torresanijevoj tiskari u Italiji radio je i Blaž Baromić. Kasnije djeluje u senjskoj tiskari, drugoj glagoljskoj tiskari u Hrvatskoj, koja je započela radom 1493. godine. Već iduće godine iz nje izlazi glagoljski *Misal* na kojem su zapisana imena trojice tiskara zaslužnih za njegovo objavljivanje: Blaža Baromića, Silvestra Bedričića i Gašpara Turčića. Senjska tiskara je djelovala do 1508. godine.

3. ZNANSTVENA OSNOVA

3.1 Svjetlost i zakon sačuvanja energije

Svjetlost je oblik energije, bilo da je promatramo kao elektromagnetski val ili kao česticu. To znači da i za svjetlost vrijedi osnovni zakon prirode, zakon sačuvanja energije. Naime, kada iz nekog svjetlosnog izvora dio zračenja I_0 pada na neki objekt, dio svjetlosti I_T se na tom objektu može transmitirati, I_R reflektirati i I_A apsorbirati. Pri tom se apsorbirana energija transformira u toplinsku energiju (slika 3). Zakon sačuvanja energije nam kaže da se svi ti svjetlosni tokovi, kao posljedica interakcije podloge i elektromagnetskog zračenja, moraju zbrojiti:

$$I_0 = I_R + I_T + I_A \quad 1.3.1$$



Slika 3 Osnovni prikaz interakcije elektromagnetskog zračenja i materije.

Definira se korisna metrika za opis svojstava transmisije, refleksije i apsorpcije određenog objekta:

$$\text{Reflektancija} \quad R = I_R / I_0 \quad 2.3.1$$

$$\text{Transmitancija} \quad T = I_T / I_0 \quad 3.3.1$$

$$\text{Apsorbancija} \quad A = I_A / I_0 \quad 4.3.1$$

Sada zakon sačuvanja energije 1.3.1 poprima oblik:

$$R + T + A = 1 \quad 5.3.1$$

3. 2 Interakcija svjetlosti i materije

Većina objekata koje vidimo oko sebe ne emitiraju svoju vlastitu svjetlost, ne zrače u vidljivom dijelu spektra, nego većinom u infracrvenom. Ti objekti su nam vidljivi jer reemitiraju dio svjetlosti koji pada na njih iz nekog svjetlosnog izvora, prirodnog (Sunce) ili umjetnog (lampa).

U svakodnevnom životu kažemo da je svjetlost apsorbirana, reflektirana ili transmitirana, što nam ne objašnjava atomske i molekularne efekte uslijed kojih i dolazi do spomenutih pojava. Ti mehanizmi određuju da li je neki objekt bijel, crn, obojen ili proziran (transparentan).

Odgovor na pitanje 'Što se događa kad je atom ili molekula izložena svjetlosti?' dao je Albert Einstein 1905. godine proučavajući fotoelektrični efekt. Einstein je svojim tumačenjem fotoelektričnog efekta dokazao dualnu prirodu svjetlosti i energetske izmjenu (interakciju) svjetlosti s materijom.

Činjenica je da elektroni u atomu počinju lagano vibrirati kad su izloženi elektromagnetskom zračenju. Amplitude ovih vibriranja su jako male, čak i pri jasnom sunčevom svjetlu nisu veće od 10^{-17} metara, što je manje od 1% radijusa atomske jezgre. U svakom slučaju, sva svjetlost i boje koje dolaze do naših očiju kad gledamo u predmet su uzrokovane ovim malim vibracijama elektrona pod utjecajem sunčevog ili umjetnog svjetla.

Atom je prije interakcije u stanju mirovanja, odnosno u stanju najniže energije. Ako je izložen svjetlosti frekvencije kojoj je energija fotona jednaka energetskej razlici između pobuđenog stanja i stanja mirovanja dolazi do apsorpcije fotona i elektron prelazi u više energetske stanje. Nakon nekog vremena vraća se na niže stanje i emitira energetske razliku u obliku fotona. Kažemo da je foton u rezonanciji s atomom, tj. došlo je do **rezonantne interakcije**.

Atom reagira na svjetlost bilo koje frekvencije pa je takva interakcija mnogo finija i preciznija i ne može se opisati pomoću kvantnih skokova s jednog energetskeg nivoa na drugi. Većina procesa vezana uz vizualizaciju objekata je posljedica upravo te **neresonantne interakcije**⁷⁷.

Atom možemo predstaviti elektronskim oscilatorom: elektron vibrira frekvencijom ω_0 (njegova rezonantna frekvencija). Svaki od tih oscilatora (elektrona u atomu) ima određenu "jakost", mjeru za vjerojatnost prijelaza na osnovno stanje. Obično je prvi prijelaz najvjerojatniji pa atom možemo promatrati kao jedan oscilator.

Sljedeća veličina koja karakterizira oscilatore je trenje koje opisuje dio vibracijske energije koja prelazi u neki drugi oblik. To znači da atom iz pobuđenog stanja ne prelazi u osnovno stanje direktno emitirajući foton dotične energije. Dakle, ako ne dolazi do reemisije apsorbiranog kvanta znači da je oscilator pretrpio neko "trenje".

Svjetlost koja interagira s materijom možemo promatrati kao klasični elektromagnetski val koji djeluje na klasični elektronski oscilator.

Bijela (polikromatska) svjetlost sa Sunca ili iz nekog umjetnog izvora se sastoji od mnoštva različitih frekvencija. Gibanje oscilatora izloženog takvom zračenju je superpozicija svih gibanja koja bi oscilator izvodio ako bi bio izložen svakoj frekvenciji pojedinačno.

Ako elektromagnetski val amplitude E_0 i frekvencije ω prelazi preko elektronskog oscilatora, periodično električno polje inducira oscilator da vibrira frekvencijom ω , a ne više rezonantnom frekvencijom ω_0 . Amplituda i faza tog gibanja ovise o relativnim vrijednostima ω i ω_0 .

Interakcija svjetlosti s materijom se opisuje kao međudjelovanje elektromagnetskog vala i sustava koji je prikazan pomoću titranja čestica kao cijelih atoma koji su u toj slici harmonički oscilatori. Pri tom, od neutralnih atoma električno polje inducira male električne dipole. Rezultat toga je prisilno titranje sistema.

Konačni oblik prisilnog titranja jest :

$$x = A \sin \omega t = \frac{e}{m (\omega_0^2 - \omega^2 + i \gamma \omega)} E_0 \sin \omega t \quad 1.3.2$$

Titranje se odvija frekvencijom vanjskog polja $\omega = 2 \pi \nu$, a amplituda titranja A je ovisna o odnosu frekvencije upadnog elektromagnetskog vala ω i vlastite frekvencije sistema ω_0 . Faktor $i\gamma\omega$ opisuje "trenje" tj. gubitak radi istodobnog zračenja prisutnog uz maksimalnu apsorpciju.

Analiza amplitude prisilnog gibanja

$$a) \omega_0 \gg \omega \quad (A = e E_0 / m \omega_0^2) \quad 2.3.2$$

Vanjsko polje ima manju frekvenciju titranja ω od titranja materije ω_0 . Ulazni val titra jednakom frekvencijom i istim smjerom, a amplituda je ovisna o sistemu koji titra i manja je od amplitude ulaznog vala.

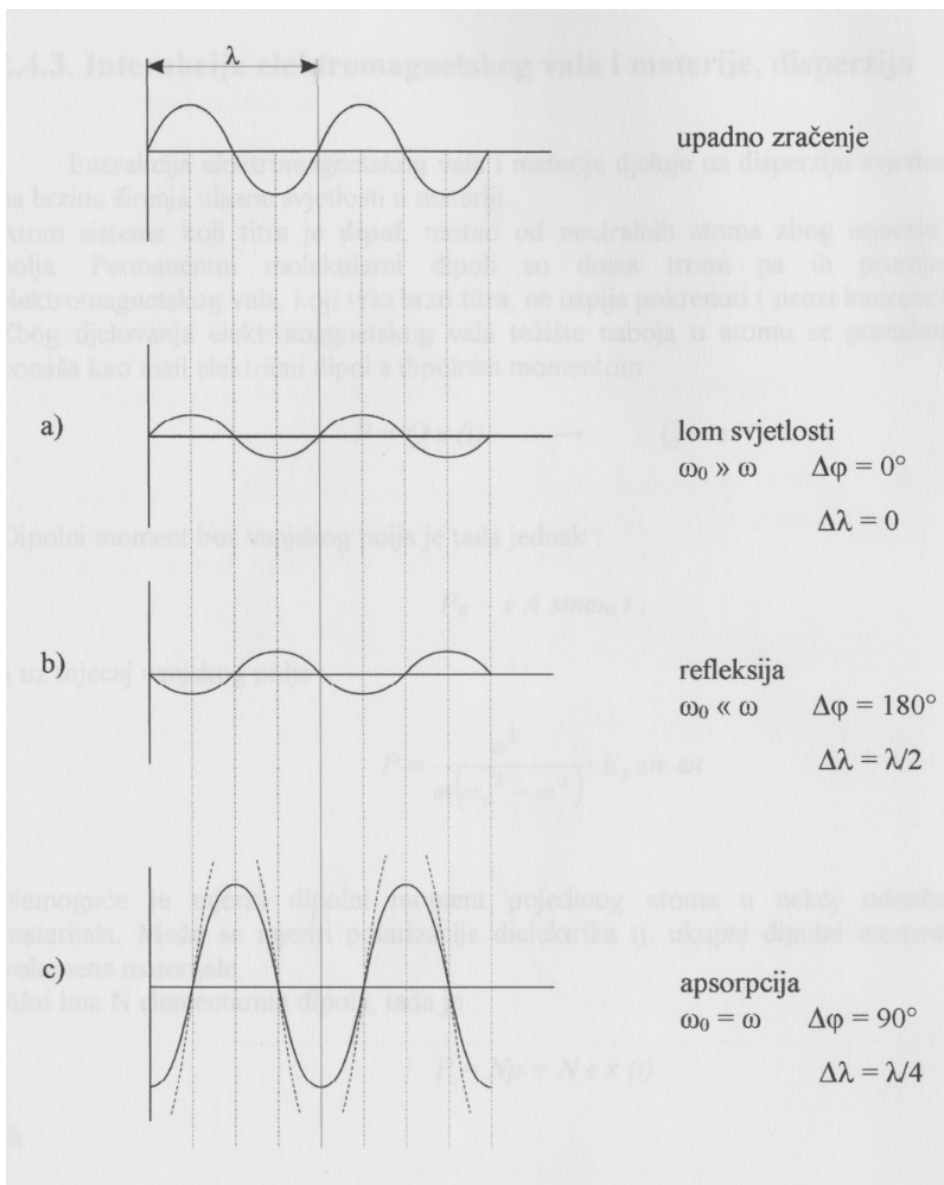
$$b) \omega_0 \ll \omega \quad (A = - e E_0 / m \omega^2) \quad 3.3.2$$

Vanjsko polje ima veću frekvenciju titranja od titranja elektrona u materiji. Rezultantno gibanje je pomaknuto za π , što znači da je u suprotnom smjeru od početnog gibanja. Ako ulazni val ima veliku energiju u odnosu na energiju titranja sustava, tada taj sustav djeluje kao da je optički rjeđi u odnosu na onaj isti sustav iz kojeg dolazi elektromagnetski val visoke frekvencije. Vraćanje elektromagnetskog vala moguće je objasniti totalnom refleksijom iz optički gušćeg u optički rjeđe sredstvo.

Dakle, ne mijenja se frekvencija ulaznog zračenja već samo amplituda i faza. Električno polje nadolazeće zrake djeluje na elektrone silom ($F = eE$), elektroni ponovo zrače svjetlost zbog dobivene akceleracije i dolazi do reemisije.

$$c) \omega_0 = \omega \quad (A = A_{\max} \rightarrow \infty) \quad 4.3.2$$

Slučaj izjednačavanja frekvencija naziva se rezonancija pri čemu dolazi do maksimalne apsorpcije ulaznog vala. Izjednačavanjem frekvencije nekog upadnog vala i vlastite frekvencije sustava, amplituda teži beskonačnosti što se teško objašnjava klasičnim pristupom, pa se zbog toga i uvodi faktor $i\gamma\omega$ kao pojam "trenja".



Slika 4 Amplitude valova elektromagnetskog zračenja kao posljedica rezonantne i nerezonantne interakcije s materijom

Znači, kada svjetlost dolazi do neke podloge interakcija može biti rezonantna (apsorpcija) ili nerezonantna (refleksija, transmisija ili lom svjetlosti). Važno je za naglasiti da se svi oblici interakcija odvijaju istodobno i da je upravo posljedica te istodobnosti prekrasan svijet pun boja koji nas okružuje.

Interakcija elektromagnetskog vala i materije uzrokuje **disperziju** svjetlosti, odnosno promjenu brzine širenja ulazne svjetlosti u materiji.

Atom sustava koji titra je **dipol**, nastao od neutralnih atoma, zbog utjecaja električnog polja. Permanentni molekularni dipoli su dosta tromi pa ih promjenjivo polje elektromagnetskog vala, koji vrlo brzo titra, ne uspije pokrenuti (nema interakcije).

Zbog djelovanja elektromagnetskog vala težište naboja u atomu se pomakne i atom se ponaša kao mali električni dipol s dipolnim momentom :

$$P = Q \cdot x(t) \quad \rightarrow \quad Q = e \quad \text{naboj elektrona} \quad 5.3.2$$

Dipolni moment bez vanjskog polja je tada jednak :

$$P_0 = e \cdot A \cdot \sin \omega_0 t \quad 6.3.2$$

a uz utjecaj vanjskog polja :

$$P = \frac{e^2}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cdot E_0 \sin \omega t \quad 7.3.2$$

Nemoguće je mjeriti dipolni moment pojedinog atoma u nekoj određenoj količini materijala. Može se mjeriti polarizacija dielektrika tj. ukupni dipolni moment jediničnog volumena materijala.

Ako ima N elementarnih dipola, tada je :

$$P = Np = N \cdot e \cdot x(t) \quad 8.3.2$$

ili

$$P = \frac{Ne^2}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cdot E \quad 9.3.2$$

Električna polarizacija iskazana preko elektrostatike dana je izrazom :

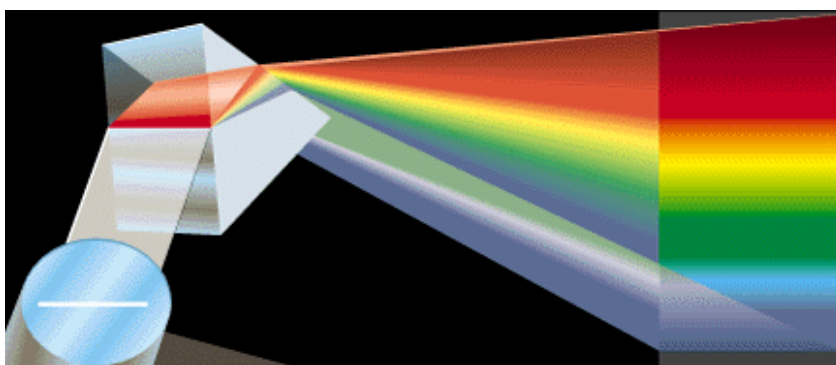
$$P = \frac{\epsilon - 1}{4\pi} E \quad 10.3.2$$

gdje je ϵ dielektrična konstanta sredstva.

Izjednačavanjem ove dvije jednačbe dolazi se do izraza za indeks loma :

$$n = 1 + \frac{Ne^2}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad 11.3.2$$

iz kojeg se uočava ovisnost $n = f(\omega, \omega_0)$. Indeks loma se povećava s frekvencijom i ta se pojava zove disperzija.



Slika 5 Disperzija bijele svjetlosti na prizmi

Jedini izuzetak je područje frekvencije oko vlastite frekvencije elektrona ω_0 ; u njemu se indeks loma smanjuje s povećanjem frekvencije ω . To područje oko ω_0 nazivamo područjem **anomalne disperzije** (područje apsorpcije).

Kad uzmemo u obzir faktor $i\gamma m$, odnosno trenje koje nastaje zbog gubitka energije elektrona vlastitim zračenjem i koje prigušuje titranje elektrona, indeks loma ima oblik:

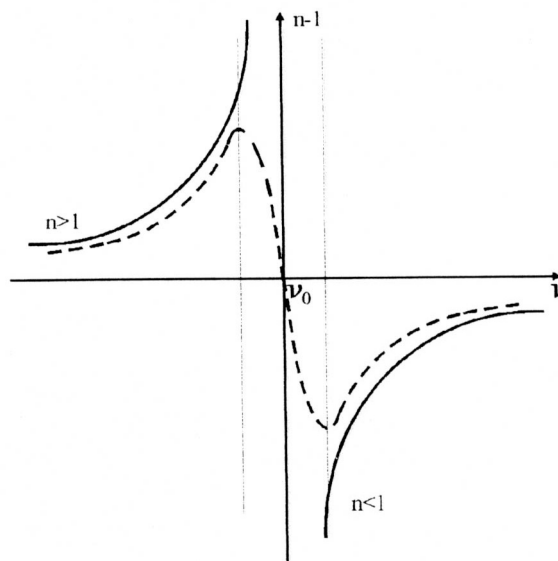
$$n = 1 + \frac{Ne^2}{m(\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma m)} \quad 12.3.2$$

Indeks loma je kompleksan broj, sastoji se od realnog i imaginarnog dijela:

$$n = n' - in'' \quad 13.3.2$$

Prolazi li elektromagnetski val kroz takav medij kompleksnog indeksa loma, dolazi do apsorpcije vala. Apsorpcija je velika kad je frekvencija upadnog vala slična vlastitoj frekvenciji vezanih elektrona ($\omega \approx \omega_0$), a maksimalna je kada je $\omega = \omega_0$. Tada je realni dio indeksa loma $n' = 1$, a imaginarni dio n'' uzrokuje apsorpciju.

Pojava anomalne disperzije povezana je s apsorpcijom elektromagnetskih valova. Svako tijelo u području u kojem pokazuje anomalnu disperziju jako apsorbira svjetlost. Realni dio indeksa loma (n') određuje faznu brzinu valova, a imaginarni dio (n'') određuje apsorpciju vala odnosno smanjenje njegove amplitude. U području anomalne disperzije $n' \approx 1$, a n'' je velik. Koeficijent apsorpcije u tom je slučaju vrlo velik.



Slika 6 Krivulja $n = f(\omega)$

Prema krivulji, za područje frekvencija ulazne svjetlosti koje su manje od frekvencije harmoničkog oscilatora ($\omega < \omega_0$) indeks loma ima vrijednost $n > 1$ što znači da je promatrano sredstvo optički gušće od sredstva iz kojeg ulazi svjetlost (pretpostavljajući da svjetlo dolazi iz vakuuma ili iz zraka). Svjetlost prolazi, ne dolazi do apsorpcije.

Za slučaj kada je $\omega > \omega_0$, indeks loma ima vrijednost $n < 1$ što znači da je materija optički "rjeđa" od vakuuma. U tom slučaju svjetlost bi se u materiji trebala širiti većom brzinom nego u vakuumu, što je nemoguće. Dolazi do totalne refleksije.

Područje gdje je $\omega = \omega_0$, $n \rightarrow \infty$ je područje rezonancije u kojem dolazi do apsorpcije. No, stvarna slika apsorpcije ne odgovara teoretskom prikazu. Naime, rezonancija se ne događa sa maksimalnim prijenosom energije nego se radi trenja unutar čestica harmoničkog oscilatora pojavljuje prigušeno titranje koje smanjuje indeks loma u području vlastite frekvencije. Pojava u području oko ω_0 , gdje se smanjuje indeks loma s povećanjem frekvencije ω , zove se anomalna disperzija. U tom se području, u praksi, pojedine komponente bijele svjetlosti apsorbiraju, pa na izlazu iz takvog sistema nastaje bojeni efekt upravo radi nedostatka određenih valnih duljina koje su na ulazu u sustav činile bijelu svjetlost.

Kada svjetlost pada na nekakvu neprozirnu podlogu (npr. papir) dio svjetlosti je reflektiran na gornjoj podlozi papira i ne ulazi u unutrašnjost. Takva refleksija se naziva **površinska refleksija**. Pri površinskoj refleksiji valne duljine reflektirane svjetlosti su gotovo nepromjenjene. Hoće li s neke podloge refleksija biti pravilna ili difuzna ovisi o samoj podlozi. Ako je podloga glatka, cijeli će snop paralelne svjetlosti koji upada na nju nakon refleksije opet biti paralelan, odnosno kretat će se smjerom određenim zakonom refleksije.

Takve podloge (plohe) daju dojam sjajnosti. Međutim, ako je ploha hrapava, nastaje difuzna refleksija i paralelni snop svjetlosti se refleksijom rasprši u svim smjerovima, a pripadna podloga djeluje mat.

Ostali dio svjetlosti koji se ne reflektira prolazi kroz podlogu i ulazi u unutrašnjost podloge. Ta se svjetlost može raspršiti unutar strukture podloge (papira) i zatim se ponovo reflektirati (iz unutrašnjosti). Takva se refleksija naziva **unutarnjom refleksijom**. Dijelovi svjetlosti koji se reflektiraju ili na gornjoj podlozi ili iz unutrašnjosti u optičkim se mjerenjima ne mogu jednostavno razlučiti tako da oba snopa daju informacije o podlozi kao ukupna reflektirana svjetlost (slika 7).

Apsorbirani dio svjetlosti se sastoji od dijela svjetlosti koji se apsorbira unutar podloge i dijela svjetlosti koji doživljava unutarnju refleksiju u podlozi i ne izlazi iz nje.

Prolazak svjetlosti kroz materijal dovodi do nastanka oscilacije elektrona pod utjecajem elektromagnetskog zračenja i biva praćeno gubitkom energije vala koji se troši na pobuđivanje elektrona na oscilaciju. Djelomično se ova energija ponovo vraća zračenju u obliku sekundarnih valova, koje elektroni emitiraju, a djelomično pak prelazi u druge oblike energije.

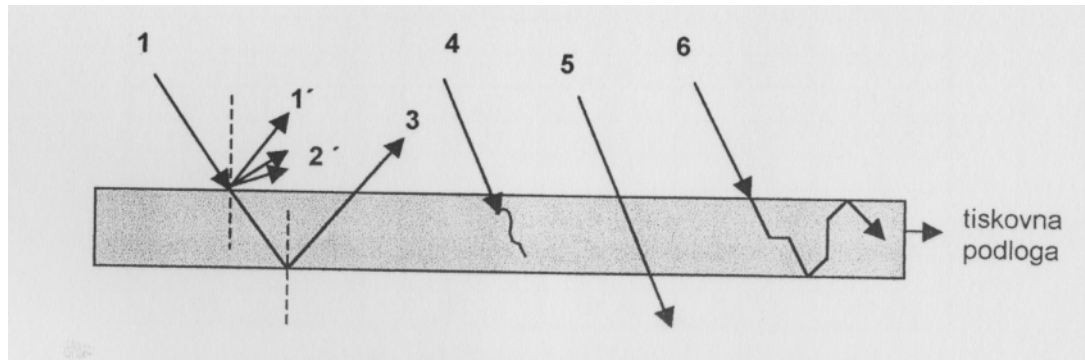
Zrake svjetlosti koje na neki način prolaze kroz podlogu pripadaju **transmitiranoj svjetlosti**.

Svi dijelovi svjetlosti koji nisu vraćeni s podloge (papira) doprinose smanjenju reflektirane svjetlosti. Ako reflektirana svjetlost ne mijenja zastupljenost valnih duljina s obzirom na ulaznu svjetlost, tada će smanjenje svjetlosti značiti samo gubitak sjaja koji opisuje tu podlogu pri čemu sama podloga ne mijenja boju. Međutim, ako dolazi do promjene valnih duljina reflektirane svjetlosti u odnosu na ulaznu svjetlost, tada će smanjenje svjetlosti značiti i promjenu boje promatranog uzorka. Takav se gubitak svjetlosti određenog intervala valnih duljina u procesu refleksije pripisuje pojavi apsorpcije koju nazivamo **selektivna apsorpcija**.

Pojam selektivne apsorpcije se veže uz pojam nestajanja potpuno određenih dijelova spektra što ovisi o vrsti podloge (bojila) na kojoj refleksija nastaje.

Tijela s velikim faktorom apsorpcije za sve valne duljine, a malim faktorom refleksije i transmisije izgledaju crno, a tijela s velikim faktorom refleksije za sve valne duljine imaju bijelu boju.

Tijela koja imaju veliki faktor transmisije (skoro jednak jedinici) za sve valne duljine sunčevog zračenja izgledaju prozirno i nemaju boju.

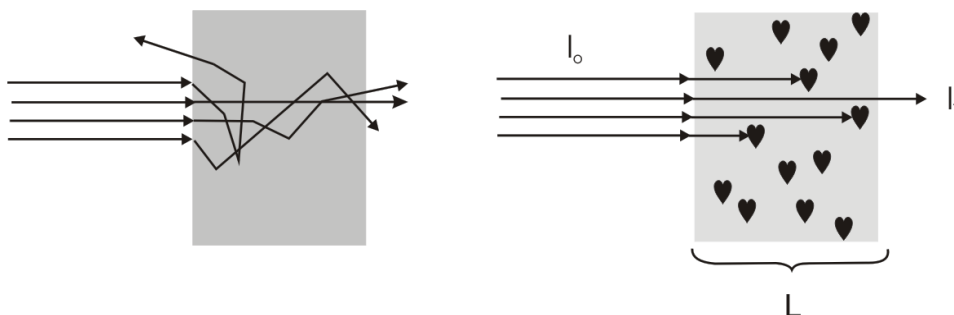


Slika 7. Interakcija svjetlosti i tiskovne podloge: 1 - upadna zraka svjetlosti, 1' - površinska refleksija, 2' - difuzna refleksija, 3 i 6 – unutrašnja refleksija (zraka 6 ne izlazi iz podloge tiskovne podloge), 4- svjetlost je djelomično apsorbirana, 5- transmitirana svjetlost

Transmitancija

Promotrimo samo dio svjetlosti koja se transmitira. Prolaskom kroz objekt svjetlost može biti apsorbirana, što će smanjiti transmitanciju T objekta (slika 8b), i može biti raspršena sudarom s nekom česticom, što će joj promijeniti smjer širenja (slika 8a). Svjetlosti se uslijed raspršenja može toliko promijeniti smjer širenja, da se vraća na podlogu kao reflektirana svjetlost. Dakle, efekt raspršenja je smanjenje transmitancije T i povećanje reflektancije R .

Ako pretpostavimo da nema raspršenja svjetlosti, jedino apsorpcija može spriječiti svjetlost da ne prođe kroz objekt. Apsorpcija je proces koji uključuje interakciju svjetlosti i čestice, ali u ovom slučaju čestica je molekula ili dio molekule koji apsorpira svjetlost, a zovemo je kromafor (chromophore). Broj molekula kromafora u danom volumenu objekta je koncentracija c i kako ona raste vjerojatnost da foton bude apsorbiran također raste, dok količina transmitirane svjetlosti opada. Također, količina transmitirane svjetlosti



Slika 8a i 8b Raspršenje i apsorpcija transmitirane svjetlosti prolaskom kroz objekt debljine L .

opada s debljinom objekta L . Te odnose kvantitativno opisuje Beer-Lambertov zakon⁵⁹:

$$I_T = I_0 \cdot 10^{-c \cdot k \cdot L} \quad \text{ili} \quad T = 10^{-c \cdot k \cdot L} \quad 14.3.2$$

gdje je k ekstinkcijski koeficijent i predstavlja fundamentalno svojstvo apsorpcije kromofora molekule dye-a. Važno je za uočiti da Beer-Lambertov zakon vrijedi jedino ako nema raspršenja unutar objekta, ili ako ga možemo zanemariti.

Jednadžbu 6.3.1 možemo napisati u logaritamskom obliku:

$$\log(T) = -k \cdot c \cdot L \quad \text{ili} \quad -\log(T) = k \cdot c \cdot L \quad 15.3.2$$

Uobičajeno je definirati tamnoću sloja kroz koji se svjetlost transmitira kao:

$$D_T = -\log(T) \Rightarrow D_T = k \cdot c \cdot L \quad 16.3.2$$

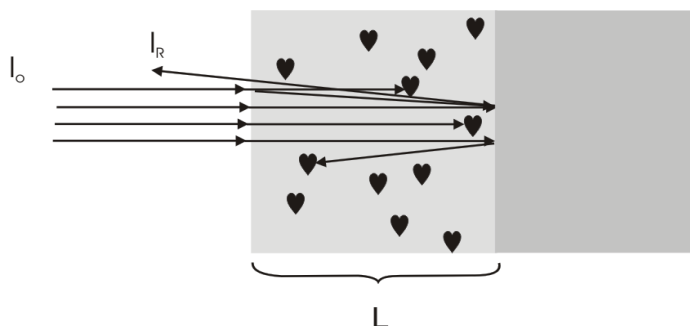
Simbol D_T se zove transmisiona gustoća, ili, jednostavno, gustoća objekta. Što manje svjetlosti prolazi kroz objekt, transmitancija T opada, a gustoća D_T raste. Gustoća je mnogo korisnija kao metrika sivoće nego transmitancija. Oko odgovara na podražaj svjetlosti prema logaritamskoj skali, tako da je gustoća aproksimativno linearna u odnosu kako mi uočavamo svjetlinu i tamnoću.

Reflektancija

Promotrimo objekt koji apsorbira i raspršuje svjetlost. Objekt će imati karakterističnu reflektanciju R određenu debljinom objekta L , koncentracijom kromofora c i raspršenjem. Zakoni koji opisuju takvu kompleksnu interakciju su aproksimativni i vrijede samo pri određenim uvjetima. Lakše je mjeriti reflektanciju takve složene strukture, kao što je npr. papir, nego je računati. Nazovimo reflektanciju čistog papira R_p . To je takozvana pozadinska reflektancija kod rasterskih slika.

Kvalitetna bojila, posebno ona koja se koriste u tisku, imaju visok koeficijent apsorpcije (veliki ϵ), dok im je raspršenje malo. Takvo bojilo, kada se otisne na papiru ima reflektanciju kao na slici 9. Upadnu svjetlost djelomično apsorbiraju molekule

dye-a u bojilu, a onaj dio svjetlosti koji prođe kroz taj sloj dođe do papira, gdje dolazi do refleksije natrag u bojilo. Svjetlost koja se reflektira na papiru po drugi put prolazi bojilom i opet se apsorbira. Konačno, svjetlost koja izlazi na podlogu kroz bojilo je reflektirana svjetlost I_R .



Slika 9 Reflektancija bojila velikog koeficijenta apsorpcije otisnutog na tiskovnu podlogu.

Može se pokazati³¹ da je reflektancija bojila na papiru ($R=I_R/I_0$) povezana s transmitancijom bojila T i reflektancijom čistog papira R_p relacijom:

$$R = T^2 \cdot R_p \quad 17.3.2$$

Pojam gustoće je koristan i za opis refleksije, tako da se definira gustoća refleksije, kojom se opisuje svjetlina i tamnoća rasterske slike, budući da oko odgovara jednoliko na gustoću:

$$D_R = -\log(R) \Rightarrow \text{iz 9.3.1} \quad D_R = 2 \cdot \varepsilon \cdot c \cdot L + D_p \quad 18.3.2$$

Ovo je fundamentalni izraz za sliku kontinuiranog tona (npr. fotografija), gdje je D_p gustoća refleksije neotisnutog papira ($D_p = -\log(R_p)$).

Većina podloga, a među njima je i papir, raspršuje svjetlost; većina koloranta (dyes, toneri, pigmenti)²⁴ također raspršuje svjetlost. Znači i apsorpcija svjetlosti na kolorantima i raspršenje svjetlosti su važni procesi pri nastajanju slike. Mnoge teorije su se bavile tim kombiniranim efektom apsorpcije i raspršenja, no najčešće korištena je svakako Kubelka-Munk teorija, prvi put objavljena 1933, a veoma uspješno, uz mnoga poboljšanja^{21, 30, 68, 72}, se koristi i danas.

3.3 Bojila i boja

Neka je tvar obojena ako selektivno apsorbira (rezonantna interakcija) elektromagnetsko zračenje valnih duljina između 380 i 750nm, a propušta ili reflektira (nerezonantna interakcija) elektromagnetsko zračenje ostalih valnih duljina u tom dijelu spektra. To zračenje, kada djeluje na mrežnicu ljudskog oka izaziva osjet boje. Boja koju doživljava promatrač komplementarna je boji apsorbiranog svjetla.

Tvari čije molekule apsorbiraju fotone valnih duljina izvan područja vidljivog svjetla, bilo u ultraljubičastom ili infracrvenom području izgledaju ljudskom oku bezbojne, ali se takva apsorpcija energije zračenja može mjeriti pogodnim instrumentima.

Sposobnost neke molekule da apsorbira foton energije zračenja:

$$E=h\nu$$

1. 3. 3

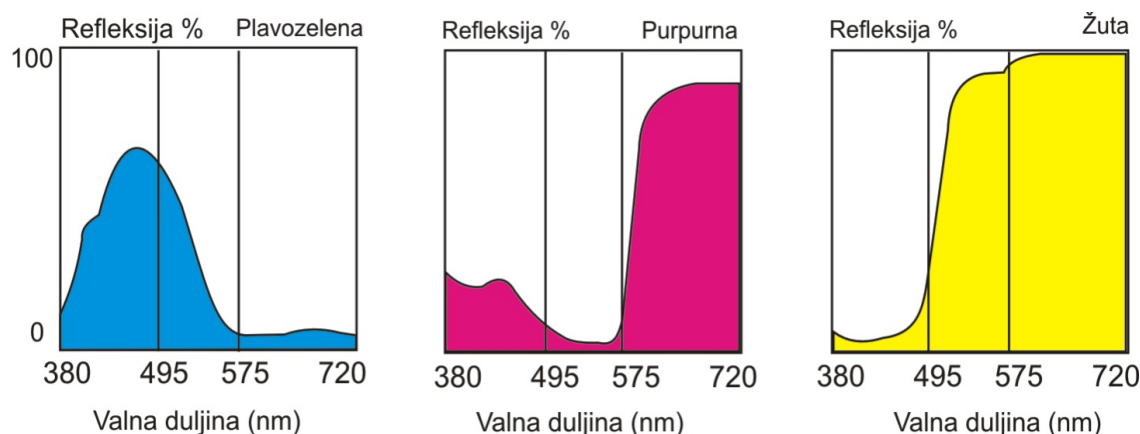
zavisi od mogućnosti da neki njen elektron prijeđe u više energetske stanje. Prema Bohrovom modelu atoma takav prijelaz može uzrokovati samo foton čiji kvant energije odgovara razlici između energije elektrona na pobuđenom i nepobuđenom, osnovnom energetske nivou. Dakle, mogući su samo prijelazi elektrona za koje vrijedi:

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E}$$

2. 3.3

Gdje je λ valna duljina apsorbiranog fotona, h Planckova konstanta, c brzina svjetlosti, a ΔE razlika energetske stanja elektrona u molekuli bojila.

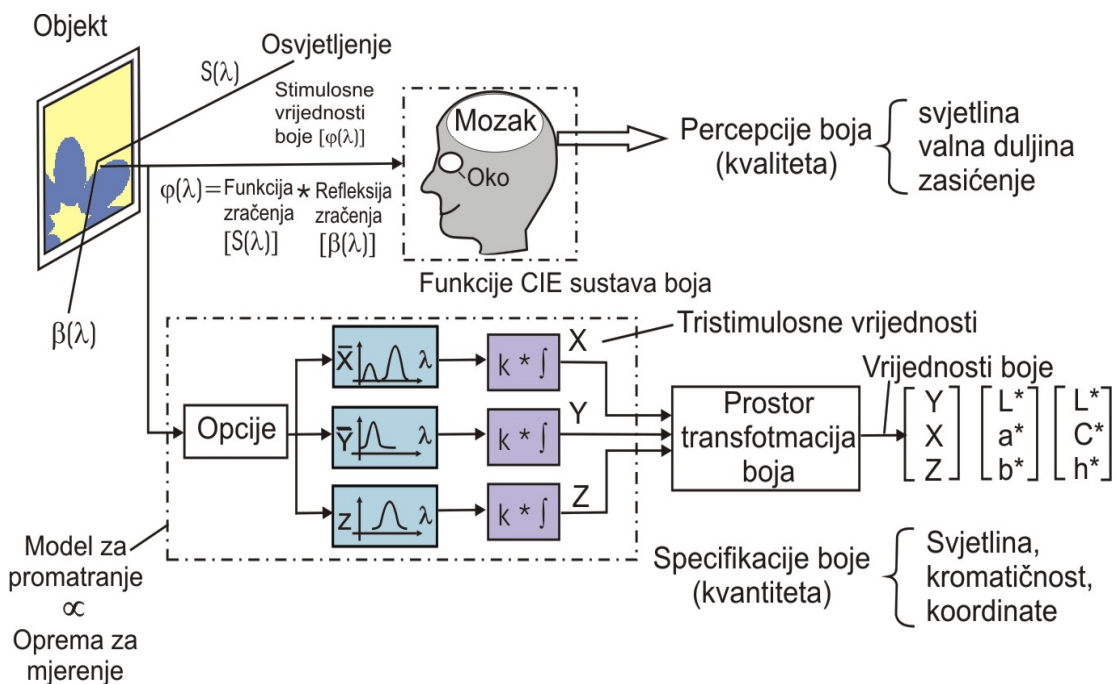
Oni organski spojevi koji u svojim molekulama imaju samo σ -veze sadrže čvrsto vezane elektrone. Energetski nivoi tih elektrona su udaljeni jedan od drugog, njihove razlike ΔE su velike te odgovaraju vrlo malim vrijednostima valnih duljina. Zbog toga takve tvari apsorbiraju u dalekom ultravioletnom području. π -elektroni su slabije vezani, pa se apsorpcija pomiče prema većim valnim duljinama, odnosno prema vidljivom dijelu spektra⁵⁶. Dakle, pigmenti koji daju obojenja ofsetnim bojilima su upravo takve molekule sa slabije vezanim elektronima. Najvrijednija bojila za celulozna vlakna, bojila s najvećim postojanostima pripadaju kemijskoj grupi antrakinonskih bojila u koja spadaju i pigmentna bojila.



Slika 10 Refleksijski spektri plavozelenog, purpurnog i žutog bojila.

Boja u užem, strogom smislu, je osjet vida što ga izaziva nadražaj mrežnice oka zrakama vidljivog svjetla, tj. elektromagnetskim zračenjem valne duljine između 380nm i 760nm (slika 11). Prema toj definiciji boja nije svojstvo svjetla koje izaziva nadražaj ni predmeta s kojeg svjetlo dolazi u oko, nije dakle svojstvo fizičkog svijeta, nego psihički doživljaj izazvan fizičkim uzrokom (stimulusom) i ovisi o fiziološkim procesima u organizmu⁷⁰.

Ipak se u tehnici, kao i u običnom životu govori i o boji svjetla, podrazumijevajući time njegov spektralni sastav ili osjet boje koji doživljavamo, i o boji tijela, podrazumijevajući time boju svjetla koje se od njih reflektira ili kroz njih prolazi kad su osvijetljena danjim ili njemu sličnim svjetlom.



Slika 11 Svjetlost reemitirana s podloge djeluje na mrežnicu ljudskog oka i u mozgu izaziva osjet boje.

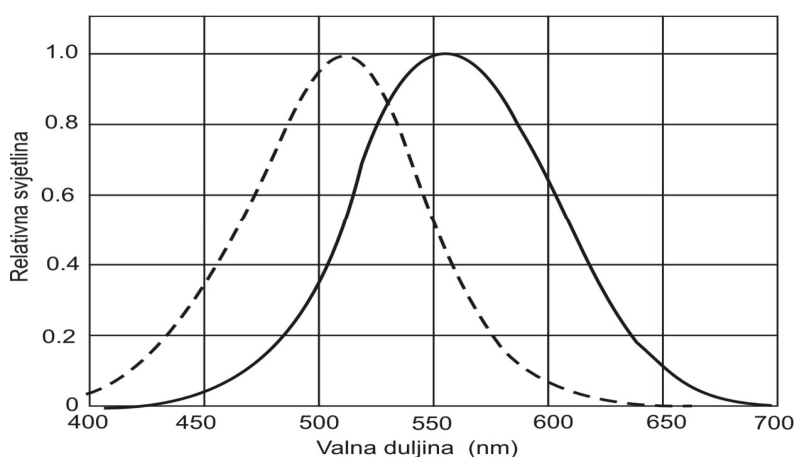
Dimenzije osjeta boje

Ako se usporede različiti osjeti boje, među njima mogu postojati samo tri razlike: svjetlina, ton i zasićenje.

Svjetlina boje

Ista količina zračene energije iz različitih dijelova spektra ne djeluje jednakim intenzitetom na organ vida. Od ukupnog fluksa zračenja samo jedan dio ima sposobnost izazvati vizualni osjet svjetline; taj se dio zove svjetlosni fluks (tok) i on je u različitim dijelovima spektra različit: najmanji je na krajevima vidljivog spektra elektromagnetskog zračenja, a za svjetlo valne duljine od $\approx 550\text{nm}$ ima maksimum.

Svjetlosni tok se mjeri omjerom svjetlosnih tokova ispitanog svjetla i monokromatskog svjetla koje ima maksimalni svjetlosni tok. Taj se omjer zove relativni luminozitet (za izvore svjetla), odnosno relativna reflektancija (za reflektirano svjetlo) i relativna transmitancija (za svjetlo propušteno kroz prozirne medije). Krivulja koja prikazuje zavisnost relativnog luminoziteta monokromatskih svjetala o valnoj duljini, krivulja luminoziteta, bit će za svakog promatrača (makar svi imali normalni vid) ponešto različita. Slika 12 pokazuje prosječnu krivulju luminoziteta za 200 promatrača koju je Međunarodna komisija za rasvjetu (CIE-Commision internationale d'éclairage) standardizirala. Ta krivulja definira način kako svjetlinu svjetla doživljava standardni promatrač i predstavlja jednu od osnovnih psihofizičkih pomagala za objektivnu (standardiziranu) procjenu svjetline uopće.



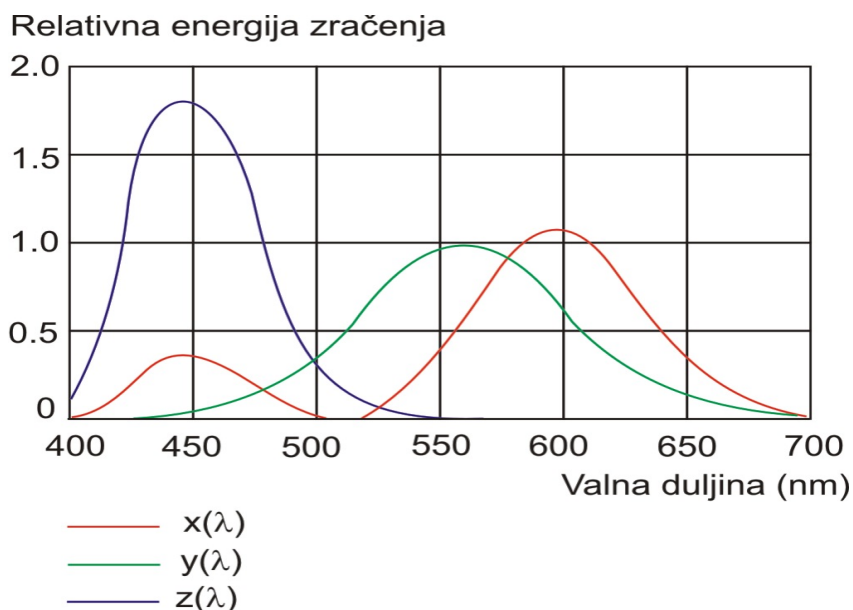
Slika 12 Prosječna krivulja luminoziteta za 200 promatrača za dnevno i noćno gledanje.

Krivulja s maksimumom na 550nm vrijedi za gustoću rasvjete iznad $3 \cdot 10^{-8} \text{ cdm}^{-2}$, kad kao receptori svjetla u mrežnici oka djeluju čunjići. Ako gustoća rasvjete padne ispod navedene granice u akciju stupaju receptori za noćni vid, štapići, pa se maksimum krivulje luminoziteta pomakne prema kraćim valnim duljinama $\approx 500\text{nm}$. Štapići su osjetljiviji na svjetlo nego čunjići, ali ne razlikuju boje.

Spektralna raspodjela svjetlosnog toka nekog emitiranog, reflektiranog ili transmitiranog svjetla dobiva se tako da se za svaku valnu duljinu pomnože ordinate krivulje reflektancije ili transmitancije i krivulje luminoziteta. S dobivenim vrijednostima mogla bi se nacrtati krivulja spektralne raspodjele svjetlosnog toka ispitanog svjetla. Podloga ispod te krivulje je ukupni svjetlosni tok ili svjetlina ispitane boje u proizvoljnim jedinicama:

$$Y = \int_{380}^{760} y_{\lambda} \cdot E_0(\lambda) \cdot \rho(\lambda) d\lambda \quad 3. 3. 3$$

gdje je Y svjetlina, y_{λ} ordinata krivulje luminoziteta za valnu duljinu λ , ρ_{λ} spektralna reflektancija, $E_0(\lambda)$ tok upadnog svjetla.



Slika 13 Tristimulusne vrijednosti spektralnih boja.

Y vrijednost, koja je jedna od tristimulusne vrijednosti X, Y, Z (slika 13), se često uzima kao pojedinačna funkcija koja opisuje optičko svojstvo podloge papira.

Opacitet

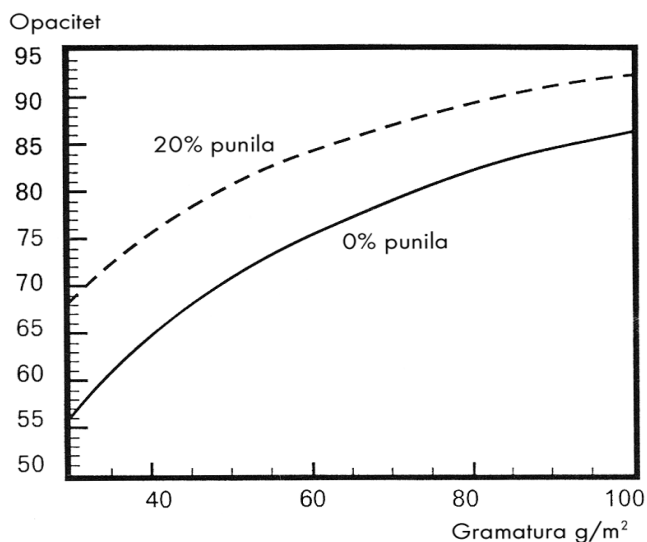
Uz reflektanciju, i opacitet je, kao optička veličina važan parametar praćenja kvalitete tiskovnih podloga-papira. Opacitet je mjera neprozirnosti tiskovne podloge i jedna je od osnovnih optičkih svojstava papira. Ako ga određujemo iz izraza:

$$O = \frac{R_0}{R_\infty} \quad 4.3.3$$

znači da reflektancije mjerimo prema standardu TAPPI 519 om-96, *Diffuse opacity of paper (d/0° paper backing)*, što podrazumijeva d/0° geometriju i standardni izvor svjetlosti C, dok je mjerni instrument podešen na CIEY, 2° standardni opažatelj. Opacitet određen pri takvim uvjetima mjerenja je tzv. difuzni opacitet. Izražava se omjerom faktora reflektancije R_0 jednog uzorka ispod kojeg je crna podloga reflektancije $R_g \leq 0,5\%$ i faktora reflektivnosti R_∞ snopa uzoraka, kojem se reflektivnost ne mijenja dodavanjem novih uzoraka.

Stupanj reemisije lista u snopu je zapravo stupanj bjeline tog lista papira. Papiri s malom gramaturom imaju nisku vrijednost reflektancije R_0 . Kako gramatura raste tako se i povećava vrijednost opaciteta. Da bi list papira bio upotrebljiv za tisak vrijednost opaciteta mora prelaziti 80%.

Opacitet je primarno određen količinom punila u papiru, indeksom loma punila, premazom i gramaturom⁶⁰ (slika 14).



Slika 14 Promjena opaciteta s gramaturom za tiskovnu podlogu bez punila (0%) i s udjelom punila od 20%.

3. 4 Beer-Lambertov sustav

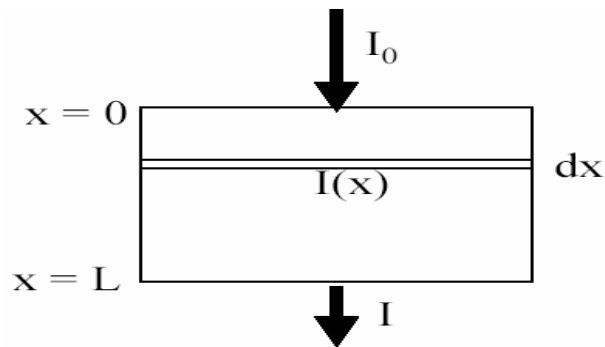
Najprije ćemo razmotriti sustav koji apsorbira svjetlost, ali je ne raspršuje, tzv. Beer-Lambertov sustav⁵⁹. Apsorpcija svjetlosti je proces prvog stupnja, što znači da iznos na koji zračenje opada ($-dI/dx$) ovisi o iznosu upadnog zračenja $I(x)$ na lokaciji x . Jednadžba 11. opisuje taj proces:

$$-\frac{dI}{dx} = K \cdot I_0 \quad 1. 3.4$$

Konstanta proporcionalnosti K je karakteristična za materijal koji apsorbira svjetlost. Kad se riješi ta diferencijalnu jednadžbu 1. reda dobije se uobičajeni izgled Beer-Lambertovog zakona:

$$-\frac{dI}{I_0} = Kdx \Rightarrow -\ln \frac{I}{I_0} = Kx \quad \text{ili} \quad \frac{I}{I_0} = e^{-Kx} \quad 2. 3.4$$

Ako je x u mm, koeficijent apsorpcije K je u mm^{-1} . Što je veća vrijednost od K , veća je vjerojatnost apsorpcije fotona, tj. manja je udaljenost (u mm) koju svjetlost prolazi prije nego što bude apsorbirana.



Slika 15 Sustav debljine L koji apsorbira svjetlost, ali je ne raspršuje.

Koeficijent apsorpcije ovisi o materijalu kroz koji svjetlost prolazi. Ako je c koncentracija bojila, a k ekstinkcijski koeficijent, vrijedi:

$$K = ck \Rightarrow -\ln \frac{I}{I_0} = kcL \quad 3. 3.4$$

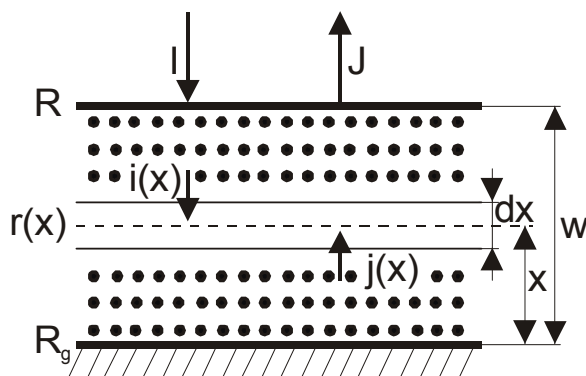
Član $-\ln(I/I_0)$ je optička gustoća materijala. Međutim, češće se optička gustoća definira preko logaritamske baze 10 (jedn. 9. 3.2):

$$D = -\log \frac{I}{I_0} = \varepsilon \cdot c \cdot L = A \quad \text{gdje je} \quad \varepsilon = \frac{k}{\ln 10} \quad 4. 3.4$$

Član A definira se kao apsorbancija materijala. Ako koncentracija c ima mjernu jedinicu mol/litra, ϵ se zove molarni ekstinkcijski koeficijent, a mjerna jedinica mu je $\text{litramol}^{-1}\text{cm}^{-1}$. Za raspršujuće materijale gustoća slike nema istu apsorbanciju. $A = \epsilon c L$ vrijedi samo za neraspršujuće, Beer-Lambertove sustave.

3.5 Kubelka –Munk sustav

Kada promatramo tokove svjetlosti koji prolaze okomito kroz obojeni sloj u obzir uzimamo dva difuzna toka od kojih jedan ide prema dolje kroz sloj, a drugi simultano prema gore^{44, 79} (slika 16).



Slika 16 Prikaz osnovnih veličina za izvod Kubelka-Munk jednadžbe. Uzorak debljine L osvjetljen izvorom svjetlosti intenziteta I postavljen je na podlogu reflektancije R_g , i reflektira svjetlost intenziteta J .

Prvo promotrimo što se događa s tokom svjetlosti usmjerenim prema dolje (I) tijekom njegovog prolaska kroz neki elementarni obojeni sloj. Bez raspršenja, promjenu upadnog zračenja opisuje Beer-Lambertov zakon ($dI = -KI_0 dx$). Međutim, i raspršenje smanjuje tok svjetlosti prema dolje. Debljina tog elementarnog obojenog sloja označena je s dx i ona je puno manja od ukupne debljine sloja bojila L , ali je veća od čestica pigmentata, tako da ne moramo uzeti u obzir djelovanje svake pojedine čestice pigmenta već njihov prosječni utjecaj. Taj utjecaj očituje se u smanjenju jakosti toka svjetlosti za $KI dx$ apsorpcijom, odnosno za $SI dx$ raspršenjem. K je postotak svjetlosti koji se izgubi apsorpcijom u elementarnom sloju bojila, dok je S postotak svjetlosti koji se izgubi zbog promjene smjera odnosno zbog raspršenja. K i S su poznati kao koeficijent apsorpcije, odnosno koeficijent raspršenja i direktno su povezani s materijalom od kojeg se obojeni sloj sastoji.

Kubelka i Munk su predložili^{45, 46} da raspršenje kao i apsorpcija predstavlja proces 1. reda. Dakle, dobije se diferencijalna jednadžba 1. reda s dva člana:

$$dI = -KI dx - SI dx + SJ dx \quad 1.3.5$$

S je koeficijent raspršenja i ima istu jedinicu kao i koeficijent apsorpcije, inverznu duljinu, i predstavlja mjeru vjerojatnosti raspršenja svjetlosti po jedinici duljine. Po Kubelka-Munk konvenciji o predznacima, tok svjetlosti I prema dolje je pozitivan, a prema gore je negativan, dok tok svjetlosti J ima upravo suprotne predznake (slika 16). Član +SJdx u jedn. 1. 3.5 nam kaže da je tok svjetlosti prema gore raspršen, pa se dodaje toku svjetlosti I prema dolje. Znači, da bismo opisali promjenu toka svjetlosti prema gore, pišemo drugu diferencijalnu jednačbu:

$$dJ = -KJ dx - SJ dx + SI dx \quad 2.3.5$$

pri čemu se zanemaruje tok svjetlosti u horizontalnom smjeru. Naime, pretpostavka dosadašnjeg razmatranja je materijal bekonačno velike podloge, što znači da su bočne dimenzije bitno veće od srednjeg slobodnog puta, $1/K$ i $1/S$, za apsorpciju i raspršenje u materijalu. Prema tome, svjetlost neće izaći iz materijala zbog pojave bočnog raspršenja.

Kubelka i Munk su riješili diferencijalne jednačbe 1. i 2. 3. 5, te dobili analitičke izraze za reflektanciju R i transmitanciju T. Detaljan izvod izraza reflektancije i transmitancije je u matematičkim dodacima, poglavlje 9.1. Rješenja za reflektanciju i transmitanciju su složene transcendentne funkcije¹³, ali ovise samo o 4 parametra promatranog sustava: S (koeficijent raspršenja), K (koeficijent apsorpcije), L (debljina sloja) i R_g (reflektancija materijala ispod sloja debljine L).

$$R = f_1(S, K, L, R_g) \quad \text{i} \quad T = f_2(S, K, L, R_g) \quad 3.3.5$$

Konkretni oblici funkcija f_1 i f_2 ovise o graničnim uvjetima sustava. Opće rješenje je izraženo preko hiperbolnih trigonometrijskih funkcija¹³:

$$R = \frac{1 - R_g [a - b \coth(bSL)]}{a - R_g + b \coth(bSL)} \quad 4.3.5$$

$$T = \frac{b}{a \sinh(bSL) + b \cosh(bSL)} \quad 5.3.5$$

$$\text{Gdje je } a = \frac{S + K}{S} \quad \text{i} \quad 6.3.5$$

$$b = \sqrt{a^2 - 1} \quad 7.3.5$$

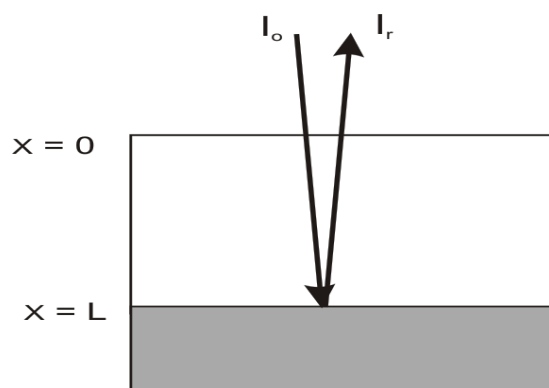
Neki važni specijalni slučajevi

$$R_g=0, S=0 \text{ i } K>0$$

Imamo sustav koji apsorbira, a ne raspršuje svjetlost, dakle Beer-Lambertov sustav. Ako krenemo od jedn. 6. 3.5 i izvedemo granični slučaj kad R_g i S teže nuli dobit ćemo jedn. 1. 3.4. odnosno Beer-Lambertov zakon. U tom slučaju gustoća slike D ista je kao i apsorbancija A , tj. $D=\epsilon cL$.

$$R_g>0, S=0 \text{ i } K>0$$

To je Beer-Lambertov sustav postavljen na Lambertov raspršujući reflektor (slika 17). Primjer za takav sustav je upravo bojilo (ink) na papiru.



Slika 17 Beer-Lambertov sustav (bojilo raspršenja $S=0$) na papiru koje raspršuje svjetlost.

Ako je difuzni, Lambertov reflektor pozadina, može se pokazati da se jednadžba 5. 3.5 reducira na:

$$R = R_g e^{-2KL} \quad \text{ili} \quad R = R_g 10^{-2\epsilon cL} \quad \text{ili} \quad R = R_g 10^{-2D_t} \quad 8. 3.5$$

Gdje je D_t transmisiona gustoća koju bi se mjerilo kad bi se makla pozadina reflektancije R_g . Zapravo, izraz za reflektanciju izgleda kao Beer-Lambertov zakon za duljinu sloja od $2L$. Budući da se refleksijska gustoća slike D_r uvijek definira kao $-\log R$ imamo slijedeće izraze:

$$D_r = 2D_t - \log R_g \Rightarrow D_r = 2D_t + D_g \quad 9. 3.5$$

Ako bi postavili zrcalo ispod Beer-Lambertovog apsorbera uočena reflektancija bi ovisila o Snellovom zakonu, odnosno o kutu upada i refleksije svjetlosti. Duljina koju prolazi svjetlost bit će $2L$ jedino kad su ti kutevi približno nula, za veće kuteve i ta

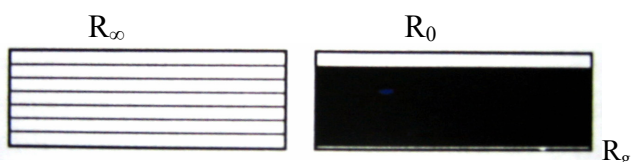
duljina će biti veća od $2L$. Kubelka-Munk jednačba, posebno u ovom graničnom slučaju, pretpostavlja difuznu podlogu i mjerenje reflektirane i transmitirane svjetlosti za svaki kut unutar integrirajuće sfere. Zbog toga Kubelka-Munk jednačbe konvergiraju u jednačbe 9. 3.5. u graničnom slučaju kad $S \rightarrow 0$.

$$S > 0, K > 0 \text{ i } L \rightarrow \infty$$

To je sustav koji je dovoljno deo, tako da reflektira istu količinu svjetlosti s pozadinom $R_g=1$ ili $R_g=0$. Većina bojila koja se danas koriste imaju velike koeficijente raspršenja i apsorpcije, tako da je dovoljan tanak premaz da kompletno sakrije boju objekta koja se želi promijeniti. U takvim sustavima vrijedi:

$$\frac{K}{S} = \frac{(1 - R_\infty)^2}{2R_\infty} \quad 10. 3.5$$

Član R_∞ označava reflektanciju beskonačno debelog uzorka. To je R u jednačbi 5. 3.5 u graničnom slučaju kada $L \rightarrow \infty$.



Slika 18 Uz definiciju reflektivnosti R_∞ i reflektancije R_0 .

Rješavajući jednačbu 10. 3.5 za R_∞ dobijemo izraz koji povezuje a i b (definirani u jednačbama 6. i 7. 3.5) s R_∞ :

$$R_\infty = a - b \quad 11. 3.5$$

U derivaciji (poglavlje 9.1) raspršenje svjetlosti s je integrirano kroz debljinu papira. Ako je gustoća homogena, tada se analiza može napraviti tako da se debljina zamjeni sa gramaturom papira w . Mjerne jedinice za raspršenje i apsorpciju svjetlosti su jednake i izražavaju se u m^2/kg . Izraz za koeficijent raspršenja je:

$$s = \frac{1}{w \left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty \right)} \cdot \ln \left[\frac{(1 - RR_\infty)(R_\infty - R_g)}{(R_\infty - R)(1 - R_g R_\infty)} \right] \quad 12. 3.5$$

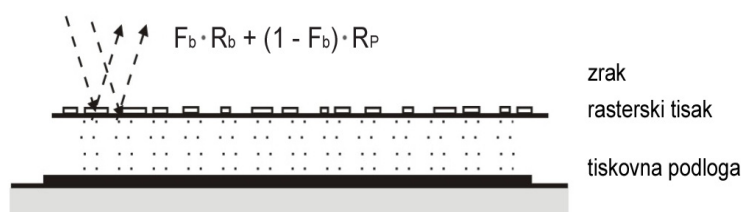
U slučaju da se koristi podloga crne boje tada u jednadžbu 12. 3.5 možemo uvrstiti faktor refleksije podloge $R_g = 0$ i $R = R_0$. Tada izraz 12. 3.5 poprima oblik⁶⁰:

$$s_i = \frac{1}{w\left(\frac{1}{R_{\infty i}} - R_{\infty i}\right)} \ln \left[\frac{(1 - R_{0i} R_{\infty i}) R_{\infty i}}{R_{\infty i} - R_{0i}} \right] \quad 13. 3.5$$

$$k = \frac{s \cdot (1 - R_{\infty})^2}{2R_{\infty}} \quad 14. 3.5$$

3.6 Murray-Daviesov model

Murray-Daviesova jednadžba je prvi optički model koji opisuje reprodukciju tona u procesu rastriranja. Taj model je direktna primjena zakona sačuvanja energije fotona i predstavlja model koji predviđa monokromatski rasterski tisak. U svom originalnom obliku⁵⁵ predviđa dio podloge pokriven bojom F_{bt} (slika 19) preko vrijednosti optičke gustoće rastera D .



Slika 19 Pretpostavljeni put svjetlosti prema Murray-Daviesovom modelu.

$$R_{\lambda t} = F_b \cdot R_b + (1 - F_b) \cdot R_p \quad 1. \ 3.6.$$

gdje je $R_{\lambda t}$ teoretska (procijenjena) spektralna reflektancija, R_b je spektralna reflektancija 100% obojene podloge, a R_p je spektralna reflektancija neobojenog dijela, dakle čiste podloge. Rješavajući jednadžbu za F_b umjesto procijenjene vrijednosti $R_{\lambda t}$ uvrstimo mjerenu reflektanciju $R_{\lambda m}$, te dobijemo za teoretsku (procijenjenu) vrijednost pokrivenog dijela podloge F_{bt} :

$$F_{bt} = \frac{R_{\lambda m} - R_p}{R_b - R_p} \quad \text{ili} \quad F_{bt} = \frac{1 - 10^{-D}}{1 - 10^{-D_b}} \quad 2. \ 3.6.$$

zato jer je

$$D = -\log_{10} \left(\frac{R_{\lambda m}}{R_p} \right) \quad 3. \ 3.6.$$

i

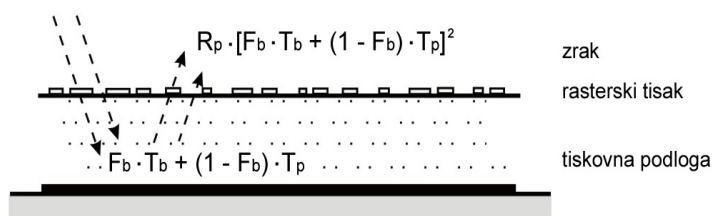
$$D_b = -\log_{10} \left(\frac{R_b}{R_p} \right) \quad 4. \ 3.6.$$

D_b je normalizirana gustoća monokromatskog bojila otisnutog tako da pokriva cijelu podlogu. Izraz pokazuje vezu između normaliziranih gustoća i spektra reflektancije.

Murray-Davies jednadžba pretpostavlja jednoliku obojene podloge i idealnu i jednoliku podlogu. Pod tim uvjetima ta jednadžba se može promatrati kao linearna interpolacija između reflektancije podloge i reflektancije otisnutog bojila. To je elementarni fizikalni pristup koji zanemaruje mnoge popratne pojave kao što su Fresnelova refleksija³⁴ i raspršenje svjetlosti.

3.7 Yule-Nielsenova korekcija

Raspršenje svjetlosti jedno je od glavnih razloga netočnosti Murray-Daviesove jednadžbe. Kao što se vidi na slici 20, elementarno usklađivanje, nazvano Yule-Nielsenova korekcija^{83, 84} se predlaže za tiskane podloge na kojima i u kojima se svjetlost difuzno raspršuje. Zanimajući Fresnelovu refleksiju na



Slika 20 Pretpostavljeni put svjetlosti prema Yule-Nielsenovom modelu.

tiskanoj podlozi, transmitirana svjetlost koja prolazi podlogom je djelomično apsorbirana homogenim filtrom. Primjenjujući Murray-Davies jednadžbu, spektralna transmitancija $T_{\lambda t}$ je:

$$T_{\lambda t} = F_b \cdot T_b + (1 - F_b) \cdot T_p \quad 1.3.7$$

gdje je T_p transmitancija neobojene podloge i ona je obično jednaka 1. T_b je transmitancija sloja bojila prema Lambertovom zakonu⁵⁹:

$$R_b = T_b \cdot R_p \cdot T_b \Rightarrow T_b = \sqrt{\frac{R_b}{R_p}} \quad 2.3.7$$

pretpostavljajući da svjetlost prolazi dva puta kroz sloj bojila. Povećavajući difuznu duljinu koju prevaljuje svjetlost, ulazna zraka može biti potpuno raspršena, tj. vjerojatnost da ona izađe kroz obojeni ili neobojeni dio podloge neovisna je o ulaznoj poziciji, a bit će proporcionalna sa pokrivenosti podloge F_b ⁶². Dakle, ulazno zračenje je difuzno reflektirano zbog unutarnje refleksije R_p i ponovo apsorbirano sa faktorom $T_{\lambda t}$:

$$R_{\lambda t} = R_p \cdot [F_b \cdot T_b + (1 - F_b) \cdot T]^2 \Rightarrow R_{\lambda t} = [F_b \cdot \sqrt{R_b} + (1 - F_b) \cdot \sqrt{R_p}]^2 \quad 3.3.7$$

$$\text{uz } T_p=1 \quad \text{i} \quad R_b = R_p \cdot T_b^2 \quad 4.3.7$$

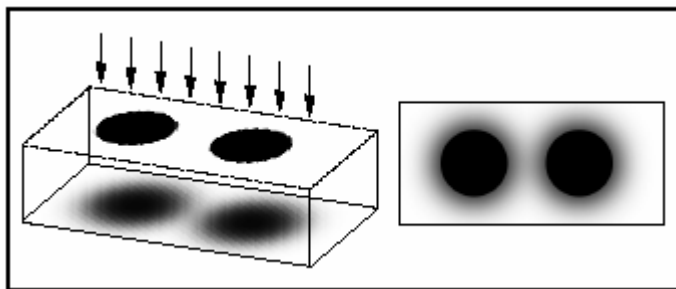
Da poboljšaju slaganje teorijskih vrijednosti reflektancija s eksperimentalnim rezultatima Yule i Nielsen pišu svoju jednadžbu u općenitijem obliku, uvodeći promjenljivi parametar n , zvan n -vrijednost, kao eksponent u jednadžbu 3. 3.7:

$$R_{\lambda t} = \left[F_b \cdot \sqrt[n]{R_b} + (1 - F_b) \cdot \sqrt[n]{R_p} \right]^n \quad 5. 3. 7$$

S fizikalne točke gledišta, ako za n -vrijednost pretpostavimo interval $1 \leq n \leq 2$, znači da jednadžba vrijedi u rasponu kada uopće nema raspršenja ($n=1$, Murray-Davies) do potpunog raspršenja svjetlosti ($n=2$) u podlozi⁶⁶. Ipak, eksperimentalni rezultati pokazuju bolja slaganja između mjerenih i teorijskih vrijednosti za n -vrijednost veću od 2, što predstavlja dodatnu korekciju za popratne pojave koje nisu bile uzete u obzir u jedn. 5. 3. 7, kao što su promjena u gustoći točke^{67, 68} ili unutarnje refleksije^{15, 65}.

Slika dobivena na tiskovnoj podlozi procesom rastriranja je naročito pod utjecajem raspršenja svjetlosti^{75, 71}. Svjetlost koja dolazi na neotisnuto područje između otisnutih točaka raspršuje se unutar podloge i pojavljuje se ispod obojenog dijela i obratno. To stvara efekt koji se zove optički prirast točke³¹. Posljedica tog efekta je svjetlija obojenost točke, dok se bijela okolina podloge oko točke doimlje tamnijom (slika 21). Budući da se u modernim pisačima visoke rezolucije veličina točaka sve više smanjuje, taj efekt postaje sve značajniji^{23, 35, 38}.

Slijedeći faktor koji djeluje na kvalitetu tiska je promjena u veličini i obliku tiskanih točaka. Porastom rezolucije mogućnost pisača da pouzdano reproduciraju izolirane točke je ograničena, tako da njihovo iskrivljenje tijekom tiska ima važan utjecaj na dobivenu sliku⁴⁷. Ta promjena oblika točke zove se fizikalni prirast točke.



Slika 21 Optičko povećanje veličine rasterskog elementa uslijed bočnog raspršenja.

Zanimljivo svojstvo Yule – Nielsenove jednadžbe je da veza između gustoće obojenja, $D = -\log R$, i F postaje linearna kako n teži beskonačnosti, tj. ona prelazi u Beer-Lambertov zakon. Iz toga možemo zaključiti, da Yule – Nielsenova jednadžba, koja je dobivena empirijski, ipak odražava neka fundamentalna ponašanja sustava papir-bojilo. Ipak, dvije pojave idu u prilog stava da taj izraz nije fundamentalno točan teorijski izraz.

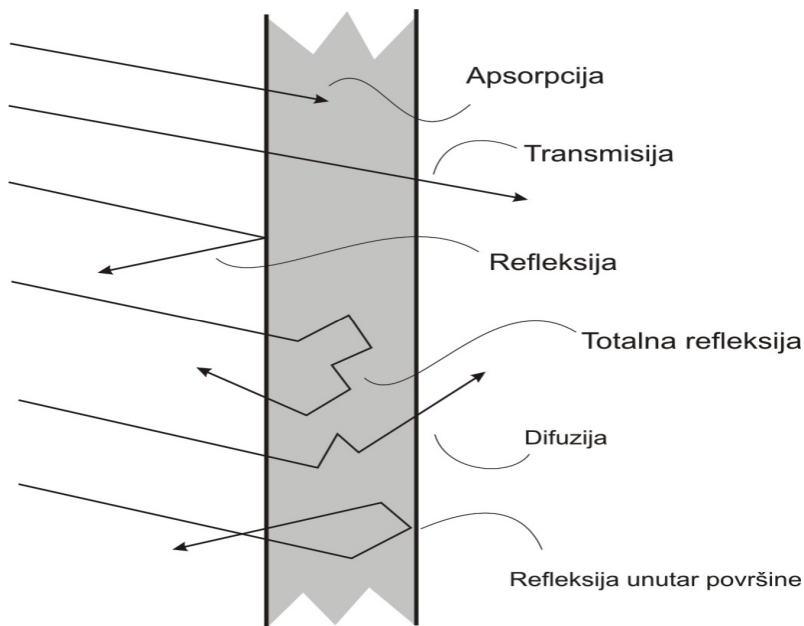
Prva pojava

Eksperimentalno je dobro poznata činjenica je da je nelinearnost između ukupne reflektancije rasterske slike R i rastertonske vrijednosti F uzrokovana raspršenjem svjetlosti (slika 23) unutar rasterske slike^{17, 61, 66}. n -faktor je funkcija frekvencije rastera i raznih optičkih svojstava sustava bojilo-papir. Iako su bili učinjeni mnogi pokušaji da se Yule–Nielsenova jednadžba izvede iz osnovnih fizikalnih principa, to nije bilo moguće bez uvođenja specijalnih pretpostavki^{66, 32}.

Druga pojava

Murray-Daviesova jednadžba je u biti zakon očuvanja energije, u ovom slučaju zakon očuvanja energije fotona. Vrijednosti reflektancije su linearno povezane s tokom fotona s podloge slike i očekujemo da će se reflektancije zbrojiti. Yule–Nielsenova jednadžba zbraja reflektancije i tok fotona na neku potenciju što je u suprotnosti sa zakonom očuvanja.

Da bi se sačuvala linearnost zbrajanja reflektancija, ali da bi se uzele u obzir i eksperimentalne činjenice, pretpostavlja se da R_b i R_p nisu konstante već da su neke funkcije od F .



Slika 22 Moguće putanje fotona u zamućenom sredstvu (turbid medium), odnosno papiru.

Svjetlost koja ulazi u papir između rasterskih točaka može se bočno raspršiti i pojaviti se ispod točke (slika 23). Isto tako svjetlost koja ulazi kroz točku može se raspršiti i izaći kroz papir između točaka. Posljedica takvih pojava je da R_b ima veću vrijednost od uočene za $F_b=1$, dok je vrijednost od R_p niža od uočene za papir za $F_b=0$. Utjecaj tih raspršenih fotona je da je ukupna reflektancija rasterskih točaka i papira između njih funkcija relativne veličine točaka, pa prema tome R_b i R_p nisu konstante već su funkcije od F_b . Označit ćemo tu ovisnost kao $R_b(F_b)$ i $R_p(F_b)$ da naglasimo razliku

između pretpostavljenih konstantnih vrijednosti u Murray-Davies i Yule–Nielsenovoj jednadžbi¹:

$$R_b(F_b) = R_g \left[1 - (1 - T_b) F_b^w \right] \cdot \left[1 - (1 - T_b) F_b^v \right] \quad 6.3.7.$$

$$R_p(F_p) = R_g \left[1 - (1 - T_b)(1 - F_p^w) \right] \cdot \left[1 - (1 - T_b)(1 - F_p^v) \right] \quad 7.3.7.$$

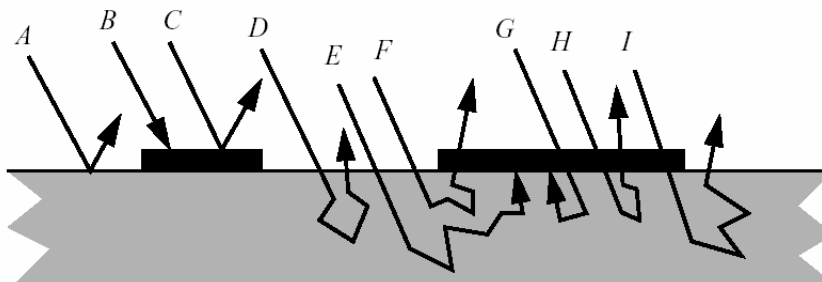
Ovakav oblik Murray-Daveisovog izraza je složeniji za račun, ali daje točniju fizikalnu sliku, jer ostaje linearan odnos između reflektancija. Kao i u Yule-Nielsenovom modelu w i v su proizvoljne konstante odabrane da osiguraju najbliže vrijednosti eksperimentalnim podacima¹⁶.

Optičko povećanje rasterskog elementa može se povezati s vjerojatnošću raspršenja svjetlosti, odnosno $p(r_1, r_2)$ je vjerojatnost ulaska fotona u papir kroz rasterski element na položaju r_1 i izlazak kroz neobojeni papir na poziciji r_2 ⁷³.

Reflektancija rasterske slike dana je izrazom:

$$R = R_b(F_b) \cdot F_b + R_p(F_p) \cdot F_p \quad 1.3.6.$$

gdje je $F_p = 1 - F_b$



Slika 23 Moguće putanje fotona u papiru otisnutom rasterskim elementima: A označava površinsku refleksiju, B predstavlja foton koji je apsorbiran slojem bojila prije nego što je stigao do papira, C je svjetlost reflektirana sa sloja bojila, putanja D ilustrira unutrašnju refleksiju. Optičko povećanje rasterskog elementa uzrokuje putanja fotona E. Ako bojilo ima mali koeficijent apsorpcije moguće su putanje fotona označene s F, G, H i I.

Uvrštavajući izraze za R_b ⁷³ i R_p ⁷³ u jednadžbu 1.3.6. dobivamo:

$$R = R_{M-D} - \Delta R \quad 8.3.7$$

$$\text{Gdje je } R_{M-D} = R_b^0 T^2 F_b + R_p^0 (1 - F_b) \quad 9.3.7$$

reflektancija bez efekta raspršenja svjetlosti, tj. Murray-Daviesova vrijednost. U gornjem izrazu T je transmitancija bojila. Raspršenje svjetlosti unutar podloge opisano je s:

$$\Delta R = (1 - T)^2 \cdot \bar{p} \cdot F \cdot (1 - F) \quad 10.3.7$$

S obzirom da je $\Delta R > 0$, prava, mjerena reflektancija R je manja od Murray-Davies vrijednosti R_{M-D} pa se čini da rasterska slika ima veću rastertonsku vrijednost nego što se predviđa kada zanemarimo raspršenje. Ako raspršenje nije modelirano tada se doimlje da mjerena reflektancija potječe od pokrivenosti bojlom jedinične površine veličine $F + \Delta F$ umjesto prave veličine F . Iz

$$R(F) = R_{M-D}(F + \Delta F) \quad 11.3.7$$

može se dobiti optičko povećanje točke ΔF kao funkcija optičkih svojstava materijala i penetracije bojila⁷⁴:

$$\Delta F = \frac{\Delta R}{R_p^0 (1 - \gamma T^2)} = \frac{(1 - T)^2 \bar{p} F (1 - F)}{R_p^0 (1 - \gamma T^2)} \quad 12.3.7$$

gdje γ opisuje efekt penetracije bojila.

Znači, iz eksperimentalno određenog optičkog povećanja rasterskog elementa može se procijeniti p , odnosno dobiti korisna informacija o funkciji širenja točke (PSF).

Maksimalna vrijednost optičkog povećanja točke dobije se iz uvjeta za maksimum funkcije, tj. kada prvu derivaciju funkcije izjednačimo s nulom:

$$\frac{d(\Delta F)}{dF} = 0 \quad 13.3.7$$

Budući da transparentija ne ovisi o rastertonskoj vrijednosti, dobivamo:

$$\frac{dp}{dF} \cdot F(1 - F) + p \cdot (1 - 2F) = 0 \quad 14.3.7$$

Za $dp/dF=0$ optičko povećanje ima jedan maksimum za vrijednost $F=0,5$ i simetričan profil oko maksimuma.

3.8 Kubelka-Munk teorija i Yule-Nielsenov efekt

Ukupna reflektancija R rasterske slike je opisana Murray-Daveisovom jednačbom 1.3.6, gdje su R_b i R_p vrijednosti reflektancija bojila i papira kada je udio pokrivenosti obojene podloge F_b između 0 i 1 i također su funkcije rastertonske vrijednosti^{25, 27}. To je zato jer se svjetlost raspršuje lateralno unutar podloge papira povećavajući vjerojatnost da naiđe na bojilo i da bude apsorbirana. Ipak uobičajena aproksimacija je da se za R_b i R_p uzmu vrijednosti reflektancije bojila za $F_b=1$ i papira za $F_b=0$. Kada se te aproksimacije uzmu u obzir, izračunata vrijednost $R_{\lambda t}$ je općenito veća nego izmjerena⁶⁴. Da se te razlike kompenziraju koristi se empirijski parametar n , odnosno Yule-Nielsenova jednačba^{1, 25, 27}. Ako se svjetlost u papiru lateralno ne raspršuje značajno tada je $n=1$ i Yule-Nielsenova jednačba se reducira na Murray-Daveisovu jednačbu. Ako se svjetlost raspršuje prolaskom kroz papir i potpuno se probije preko udaljenosti mnogo veće nego što je veličina rasterske točke tada je $n=2^{25, 27, 31}$. Znači, faktor n se može koristiti kao indeks efekta raspršenja svjetlosti na rasterskim slikama. S njim se može se modelirati tonska reprodukcija i reprodukcija boje u mnogim sustavima rastriranja, ali su često uočene vrijednosti $n > 2^{7, 52, 65, 67, 78}$. Važno je ispitati kako je parametar n povezan s drugim elementima koji utječu na raspršenje svjetlosti u tiskovnoj podlozi kao što je papir.

Dvije teorije koje se često koriste za opisivanje optičkih svojstava papira i drugih tiskovnih podloga su Kubelka-Munk teorija i teorija linearnog sustava (LS). Kubelka - Munk teorija opisuje reflektivna i transmitivna svojstva materijala u kojem se svjetlost raspršuje preko koeficijenata raspršenja S i apsorpcije K . Teorija LS koristi funkciju širenja točke (Point Spread Function), $PSF(r)$ koja opisuje vjerojatnost da svjetlost izađe iz papira na udaljenosti r od točke ulaska u papir^{62, 63}. $PSF(r)$ se često opisuje u Fourierovom području kao modulacijska prijenosna funkcija (Modulation Transfer Function), $MTF(\omega)$, gdje je ω prostorna frekvencija u jedinicama $1/r$. Yule-Nielsenov parametar n morao bi biti povezan i sa MTF podloge i sa S i K parametrima Kubelka-Munk teorije⁵³.

3.9. Modulacijska prijenosna funkcija (MTF) papira

Najčešće eksperimentalne tehnike mjerenja raspršenja svjetlosti su direktno mjerenje MTF papira mikrodensitometrijskim skeniranjem osvijetljenog ruba projiciranog na papir, zatim tehnika koja izvodi MTF ponašanje iz Kubelka-Munk jednadžbe preko eksperimentalnih mjerenja reflektancije papira, te modelom Yule-Nielsenovog efekta i podešavanjem modela eksperimentalnim podacima.

3.9.1. Direktno mjerenje bočnog raspršenja svjetlosti

Najdirektniju eksperimentalnu tehniku mjerenja bočnog raspršenja svjetlosti u papiru demonstrirali su Yule i Nielsen u svojim radovima^{83, 84}. Visoko precizna oštrica noža ili uska pruga svjetlosti se može projicirati na podlogu papira. S mikrodensitometrom se prati veličina toka svjetlosti koja izlazi iz papira kao funkcija udaljenosti od osvijetljenog ruba. Rezultirajuća funkcija je upravo funkcija širenja linije (Line Spread Function), LSF(x), i određuje direktnu mjeru udaljenosti koju svjetlost prođe od osvijetljenog ruba zbog bočnog raspršenja.

Sličan eksperiment projicira fokusiranu točku svjetlosti na papir^{40, 76}. Ako je dijаметar eksperimentalne točke svjetlosti mali u odnosu na udaljenost koju svjetlost prođe raspršujući se, tada je odklon u svjetlosnom toku s radijalnom udaljenošću x od osvijetljene točke direktna mjera od PSF(x). Veza između tih dviju funkcija je:

$$LSF(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} PSF(x, y) dy \quad 1. 3.9.1$$

Dodatna metrika bočnog raspršenja je modulacijska prijenosna funkcija, MTF, a definira se kao modul Fourierovog transformata od LSF:

$$MTF(\omega) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} LSF(x) e^{-2\pi i \omega x} dx \right| \quad 2. 3.9.1$$

Ta metrika opisuje raspršenje svjetlosti u papiru preko prostorne frekvencije ω u mm^{-1} što je prikladnije nego preko udaljenosti u mm. Ako pretpostavimo da se svjetlost raspršuje jednako u svim bočnim smjerovima, tada PSF, LSF i MTF daju iste informacije i često se određuju preko istih podataka. PSF je zapravo funkcija gustoće vjerojatnosti izlaska fotona na udaljenosti x od točke ulaska u papir. MTF je praktičnija metrika za opis rezolucije slike, budući da je MTF matematički produkt MTF komponenata sustava slike (leća, papir, emulzija). LSF je manje važna metrika, ali se lakše eksperimentalno određuje, tako da su MTF i PSF često izvođene iz eksperimentalnih mikrodensitometrijskih mjerenja funkcije širenja linije, LSF.

Yule i Nielsen sugeriraju da je LSF karakteristika papira Gaussian⁸⁴, pa je tog oblika i odgovarajuća MTF¹⁹, dok eksperimentalni podaci^{19, 57, 76} ukazuju da je LSF jednostavna eksponencijalna funkcija:

$$LSF(x) = e^{-\frac{2\pi x}{k}} \quad 3. 3.9.1$$

što odgovara MTF karakteristikici papira za $m=2$

$$MTF(\omega) = \frac{1}{1 + (k\omega)^m} \quad 4.3.9.1$$

MTF se često modelira empirijski:

$$k_{MTF} = \frac{1}{\omega_0} \quad \text{gdje je } \omega_0 = \omega \text{ za } MTF=1/2 \quad 5.3.9.1$$

Da bi se usporedili Kubelka-Munk parametri s MTF papira odabrana je veličina k_{MTF} koja opisuje MTF za ω u kojoj je $MTF=0,5$. U toj funkciji ω je prostorna frekvencija u cy/mm , k (mm) je konstanta proporcionalna srednjoj udaljenosti između ulazne i izlazne točke reflektirane svjetlosti, a što je uzrokovano upravo bočnim raspršenjem svjetlosti unutar papira. Za podešavanje funkcije što bliže eksperimentalnim podacima koristi se empirijski parametar m^{41} .

Ako prihvatimo jedn. 3. i 4. 3.9.1. kao model raspršenja svjetlosti u papiru možemo koristiti MTF konstantu k_{MTF} za uspoređivanje različitih vrsta papira.

Brojni radovi^{84, 58} sugeriraju da za većinu papira u svakodnevnoj upotrebi vrijedi $0,063 < k_{MTF} < 0,63$ mm.

3.9.2. Kubelka-Munk teorija i modulacijska prijenosna funkcija (MTF) papira

Kao što smo vidjeli, Murray-Davies izraz daje prevelike iznose za ukupnu reflektanciju rasterske slike u odnosu na rezultate što ih daju spektrofotometrijska mjerenja, upravo zbog fenomena optičkog prirasta točke uzrokovanog bočnim raspršenjem svjetlosti u papiru²⁵. Svjetlost koja ulazi u papir između rasterskih točaka može se bočno raspršiti unutar papira prije nego se vrati na podlogu kao reflektirana svjetlost. To bočno raspršenje unutar samog papira povećava vjerojatnost da će svjetlost naići na rastersku točku i da će biti apsorbirana. Zbog toga je efektivni udarni presjek apsorpcije rasterske točke veći nego fizička veličina točke (otuda i izraz optički prirast točke). Očekivana reflektancija rasterske slike može se procijeniti i pomoću slijedećih izraza²¹:

$$R(x, y) = R_p T(x, y) [T(x, y) * PSF(x, y)] \quad 1.3.9.2$$

$$R = \frac{1}{A} \iint_{x,y} R(x, y) dx dy \quad 2. 3. 9.2$$

Gdje je $T(x,y)$ transmitancija uzorka bojila na papiru, dok A predstavlja podlogu papira preko koje se mjeri prosječna reflektancija. $PSF(x,y)$ je funkcija gustoće vjerojatnosti koja opisuje vjerojatnost povratka fotona na podlogu papira na udaljenosti (x,y) od točke u kojoj je foton ušao u papir. Operator konvolucije $*$ se obično svodi na množenje Fourierovog transformata (FFT)^{12, 37} transmitancije T i funkcije širenja točke PSF , da bi se nakon toga izveo inverzni transform i :

$$T(x, y) * PSF(x, y) = iFFT\{FFT[T(x, y)]FFT[PSF(x, y)]\} \quad 3. 3.9.2$$

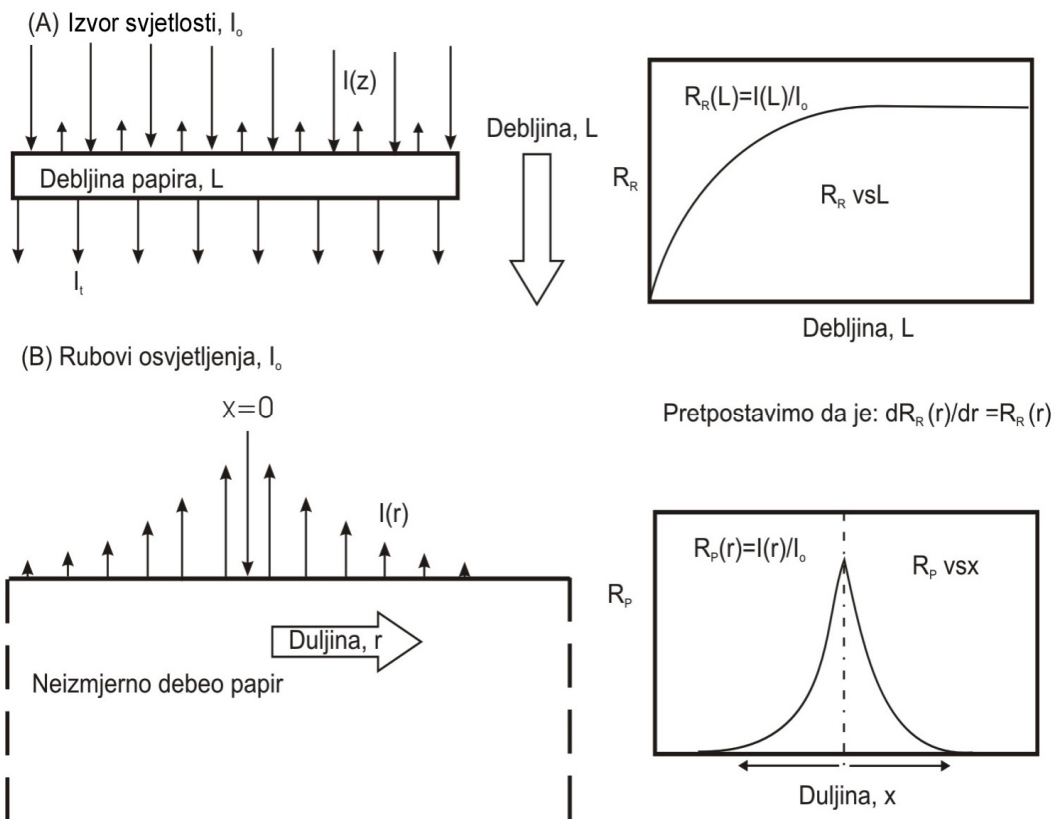
$$MTF(\omega, \nu) = FFT[PSF(x, y)] \quad 4. 3. 9.2$$

Dakle, modulacijska prijenosna funkcija papira, $MTF(\omega, \nu)$ je zapravo Fourierov transform funkcije širenja točke $PSF(x,y)$. Jednodimenzionalna funkcija papira $MTF(\omega)$ je Fourierov transform linijske funkcije širenja LSF (Line Spread Function). Bočno raspršenje karakteristično za papir se često opisuje ili sa PSF ili s MTF papira. Kubelka-Munk teorija opisuje reflektanciju i opacitet preko 4 parametra: debljine materijala $z(\text{mm})$, reflektancije podloge ispod ispitivanog uzorka R_g , te preko koeficijenta raspršenja $S(\text{mm}^{-1})$ i apsorpcije $K(\text{mm}^{-1})$. S i K su obrnuto proporcionalni sa srednjom udaljenošću koju foton prođe kroz materijal prije nego što bude apsorbiran ili raspršen.

Oittinen-Engeldrumov model

Osnovna ideja veze između Kubelka-Munk teorije i MTF papira koju su predložili Oittinen^{57, 58} i Engeldrum²⁶ je na slici 24a i b.

Slika 24a pokazuje smanjenje reflektancija papira $R_R(L)$ kako se smanjuje debljina papira L .



Slika 24 a i b Osnovne pretpostavke Oittinen-Engel drumovog modela

Ta veza je opisana preko Kubelka-Munk teorije, uz $R_g=0$, izrazom⁷⁹:

$$R = \frac{1 - R_g [a - b \operatorname{ctgh}(bSz)]}{a - R_g + b \operatorname{ctgh}(bSz)} \quad 5.3.9.2.$$

Slika 24b ilustrira promjenu u reflektanciji $R_p(r)$ kao funkciju udaljenosti r od točke ulaska svjetlosti u papir. Oittinen je pretpostavio da je krivulja na slici b, koja predstavlja PSF(r) isto što i derivacija krivulje na slici a, odnosno derivacija promjene reflektancije s debljinom papira L .

Engel drum sugerira kvantitativnu derivaciju MTF papira, tako da derivira Kubelka-Munk funkciju za refleksiju i nakon toga primijeni Hankelovu transformaciju⁷⁶. Uz neka pojednostavljena Engel drum je izveo MTF papira ($L=\infty$):

$$MTF(\omega) = \frac{1}{-\ln(1 - R_\infty^2)} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \frac{R_\infty^{2j}}{j} \cdot \left[1 + \left(\frac{2\pi\omega}{2jbS} \right)^2 \right]^{-3/2} \quad 6. 3. 9. 2.$$

gdje je $a=1+K/S$, $b=(a^2-1)^{1/2}$ i $R_\infty=a-b$.

MTF model sa $K=0$

Većina papira koja se svakodnevno koristi za rastersku reprodukciju ima nizak koeficijent apsorpcije, pa se nameće pojednostavljene rješenja Kubelka-Munk izraza sa $K=R_g=0$:

$$R = \frac{SL}{SL + 1} \quad 7. 3.9.2.$$

Prema Oittinenu i Engeldrumu PSF(r) je derivacija jedn.3.5.12. uz supstituciju $L=r$:

$$PSF(r) = \frac{S}{(Sr + 1)^2} \quad 8. 3.9.2.$$

Definiramo inverz koeficijenta raspršenja kao udaljenost $D=1/S$, koja je proporcionalna srednjoj udaljenosti koju svjetlost prođe između dvije točke raspršenja. Definira se i normalizirana udaljenost $d=Sr$ u jedinicama udaljenosti raspršenja D . U jedinicama udaljenosti raspršenja D koeficijent raspršenja je uvijek jednak jedinici, tako da je normalizirana PSF(d) za bilo koji koeficijent raspršenja:

$$PSF(d) = \frac{1}{(d + 1)^2} \quad 9. 3.9.2.$$

Jednodimenzionalna MTF(v) funkcija je Hankelov transform od PSF, gdje je J_0 Besselova funkcija¹³ 1. reda s frekvencijom v , izražena u ciklusima po duljini raspršenja ciklus/d:

$$MTF(\omega) = \int_0^{\infty} PSF(d) \cdot J_0(2\pi\omega d) dd \quad 10. 3.9.2.$$

$$MTF(v) = \frac{1}{1 + 5.4v} \quad 11. 3.9.2$$

Numerički, jednadžba 11. 3.9.2 je veoma dobra aproksimacija jednadžbe 10. 3.9.2. Frekvencija v u ciklus/d je povezana s frekvencijom ω u ciklus/mm:

$$\nu = \frac{\omega}{S} \quad 12. \ 3.9.2$$

Prema definiciji, MTF konstanta k_{MTF} je obrnuto proporcionalna prostornoj frekvenciji ω za koju je $MTF(\omega)=1/2$, pa iz jedn. 3.9.16. i 3.9.17, uz pretpostavku beskonačno debelog uzorka, slijedi:

$$k_{MTF} = \frac{5,4}{S} \quad 13. \ 3.9.2$$

Ovaj jednostavni model je dobro opisivao opće ponašanje između k_{MTF} i S , ali budući da je davao premale vrijednosti u odnosu na eksperimentalne podatke, učinjena je empirijska modifikacija MTF modela. Naime, rezultati mjerenja² pokazuju da kako $S \rightarrow \infty$ MTF papira asimptotski poprima vrijednost $k_{MTF} > 0$. Moguć razlog za asimptotu različitu od nule može biti unutrašnja mehanička struktura papira. Vlakna celuloze u papiru su orijentirana većinom u x,y ravnini, a ne u smjeru z koji određuje debljinu papira. Ako je komponenta bočnog prolaska svjetlosti posljedica light-piping efekta, koji ne ovisi o raspršenju, tada $k_0=0,25\text{mm}$ duljina puta može biti primjenljiva na sve papire koji se najčešće koriste:

$$k_{\text{mod}} = \frac{5,4}{S} + k_0 \quad 14. \ 3.9.2$$

Osnova ovog modela je jednadžba 3.9.11., koja pretpostavlja uzorak beskonačne debljine.

Iz tih podataka³ je očito da vrijednost funkcije bočnog širenja svjetlosti raspršenjem u papiru, koju izražavamo preko k_{MTF} , ovisi ne samo o S već i o K , a očekujemo da ovisi i o debljini papira L , te o reflektanciji podloge R_g . Na primjer, ako je papir beskonačno tanak i nalazi se na crnoj podlozi, tada će svjetlost biti apsorbirana u crnoj podlozi prije nego uopće dođe do bočnog raspršenja. U tom slučaju $k_{MTF}=0$ i $MTF=1$. Budući da se u ovom modelu ne pojavljuju R_g i L , jedn. 3.5.11. vrijedi za beskonačno debeli uzorak.

Za bilo koji uzorak, bilo koje debljine vrijedi²:

$$k_p = \left(\frac{5,4}{S} \right) \cdot (1 - e^{-LS}) + k_0 \quad 15. \ 3. \ 9.2$$

Jedn. 15. 3.9.2 opisuje utjecaj koeficijenta raspršenja S i debljine podloge L na MTF papira za vrijednosti $k_p < 0,5\text{mm}$, što je zadovoljavajuće za papire koji se najčešće koriste.

Kao što je diskutirano, direktna mjerenja MTF konstante k mikrodensitometrijski je teško izvedivo i prilično neprecizno, dok su spektrofotometrijska mjerenja potrebna za određivanje koeficijenata S i K veoma jednostavna i precizna. Dakle, veoma je važno ispitati korisnost Kubelka-Munk teorije kao metode mjerenja bočnog raspršenja, što je bitna karakteristika papira. Da bi se to učinilo, nezvisno određene vrijednosti parametra k_{MTF} su izvedene iz direktnog mjerenja Yule-Nielsenovog efekta.

3.9.3. Mjerenje MTF konstante k preko Yule-Nielsenovog efekta

Važnost bočnog raspršenja svjetlosti se jasno očituje u Yule-Nielsenovom efektu. Znači, ako se Yule-Nielsenov efekt može modelirati, bilo bi moguće dobiti MTF konstantu k_{MTF} preko eksperimentalnih mjerenja Yule-Nielsenovog parametra n . To je potrebno učiniti preko modela idealanog rasterskog sustava⁸.

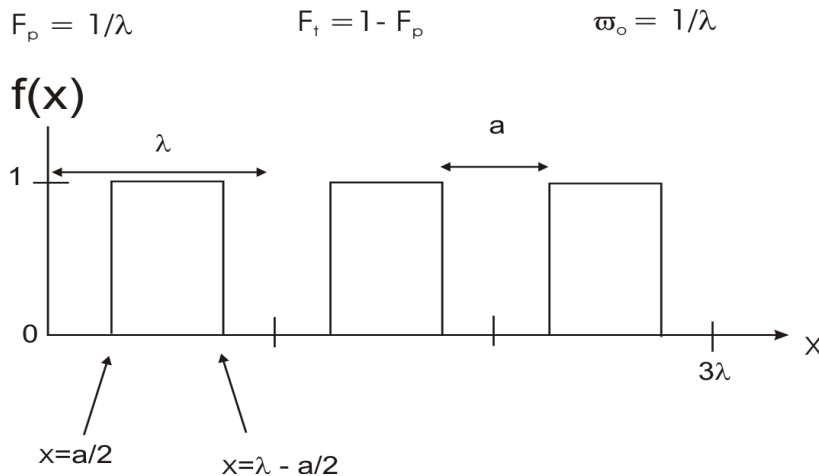
3.9.3.1. A priori model za idealni raster

Promatramo jednostavan, jednodimenzionalni linijski rasterski sustav i pretpostavljamo da bojilo zadovoljava Beer-Lambertov zakon pri refleksiji, odnosno pri transmisiji, te da ne penetrira u tiskovnu podlogu. Fourierov red daje osnovu za opis takvog idealiziranog rasterskog sustava:

$$f_b(x) = F_p + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-1^n}{n} \sin(n\pi F_p) \cos(2\pi n \omega_0 x) \quad 1. \ 3.9.3.$$

gdje je $F_p = 1 - F_b$, a ω_0 frekvencija linija zadanog rastera (slika 25). Transmitanciju rasterskih linija opisujemo funkcijom:

$$T_b(x) = f_b(x)(1 - T_b) + T_b \quad 2. \ 3.9.3$$



Slika 25 Jednodimenzionalni linijski rasterski sustav kojeg opisujemo Fourierovim redom.

Za linije koje nemaju savršeno oštre rubove, možemo modificirati Fourierov red dodajući funkciju MTF_b koja opisuje bočnu distribuciju bojila na rubovima linije:

$$f_b(x) = F_p + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-1^n}{n} \sin(n\pi F_p) \cos(2\pi n \omega_0 x) MTF_b(n\omega_0) \quad 3. 3. 9.3$$

Ako rasterska linija ili bilo kakav rasterski uzorak ima savršeno oštre rubove, tada je $MTF_b=1$ i jednačba 3.5.23. prelazi u jednačbu 3.5.21. Uvrštavajući jednačbu 3.5.23. u 3.5.21. vidimo da taj izraz ne opisuje samo transmitanciju rasterskog uzorka već također zračenje (iradijanciju) svjetlosti koja je ušla u papir nakon što je prošla sam rasterski uzorak, pri čemu se dio svjetlosti apsorbirao. Taj proces raspršenja opisujemo MTF_p funkcijom:

$$f_p(x) = F_p + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-1^n}{n} \sin(n\pi F_p) \cos(2\pi n \omega_0 x) MTF_b(n\omega_0) MTF_p(n\omega_0) \quad 4. 3.9.3$$

S faktorom reflektancije papira R_g (s kojim opisujemo apsorpciju svjetlosti) i izrazom 3.5.24. možemo modelirati ukupno zračenje (iradijanciju) reflektirano s papira:

$$I_r = R_g [f_p(x)(1 - T_b) + T_b] \quad 5. 3.9.3$$

Tom svjetlosnom uzorku dodajemo transmitirani uzorak rasterskih linija da bismo dobili konačni reflektancijski uzorak:

$$R(x) = I_r(x) \cdot T_b(x) \quad 6. 3.9.3$$

Ako uvrstimo $x=\lambda/2$ (slika 25) u jedn. 3.5.26. dobit ćemo reflektanciju $R(\lambda/2)$ za papir u točki koja je na jednakoj udaljenosti između dviju rasterskih linija. S druge strane, ako stavimo $x=0$ u jedn. 3.5.26. dobit ćemo reflektanciju $R(0)$ za centar rasterske linije. Te veličine se mogu mjeriti eksperimentalno mikrodensitometrom. Međutim, puno je jednostavnije, s obzirom na izvođenje eksperimenta, i puno preciznije, statistički ispitati histogram tih istih veličina.

Te srednje vrijednosti reflektancija mogu se modelirati integrirajući jedn.3.5.26. od $x=a/2$ do $x=\lambda-a/2$. Slično, srednja vrijednost reflektancije bojila dobije se integrirajući izraz 3.5.26. od $x=-a/2$ do $x=a/2$. Nakon matematičkog sređivanja dobijemo slijedeće izraze za R_p i R_b :

$$R_p(F_p) = R_g [G_p(F_p)(1 - T_b) + T_b] \cdot [G_b(F_p)(1 - T_b) + T_b] \quad 7. 3.9.3$$

$$R_p(F_p) = R_g [H_p(F_b)(1 - T_b) + T_b] \cdot [H_b(F_b)(1 - T_b) + T_b] \quad 8. 3.9.3$$

Gdje su $G_p(F_p)$, $G_b(F_p)$, $H_p(F_b)$ i $H_b(F_b)$ Fourierovi redovi dobiveni integracijom⁸. Predstavljani model sadrži tri nezavisno mjerene veličine (konstante):

R_g : reflektancija neotisnutog papira

T_b : transmitancija bojila za $F_b=1$

ω_0 : frekvencija rasterskih linija

Da bismo mogli izračunati $R_b(F_b)$ i $R_p(F_b)$ i uz jedn. 1. 3.6 za ukupnu makroskopsku reflektanciju rasterske slike potrebna su nam još dva člana, a to su MTF funkcije bočnog raspršenja svjetlosti u papiru i bočnog širenja rubova bojila. U MTF analizi papira bilo je pokazano³ da se lateralno raspršenje svjetlosti u papiru može opisati s:

$$MTF_p(\omega) = \frac{1}{1 + (k_p \cdot \omega)^{1.7}} \quad 9. 3.9.3.$$

Vrijednost MTF konstante k_p može se mjeriti eksperimentalno, ili preko koeficijenata raspršenja i apsorpcije Kubelka-Munk analize tiskovne podloge^{42, 43}, ili slikovnom analizom^{26, 84}. MTF funkcija koja opisuje mekoću otisnutih rubova rasterskog elementa izabrana je proizvoljno:

$$MTF_b(\omega) = \frac{1}{1 + (k_b \cdot \omega)^{1.7}} \quad 10. 3.9.3.$$

Iako se ovaj model čini složenim, on se lako primjenjuje. Započevši sa četiri nezavisno izmjerene veličine (konstante) i jednom proizvoljnom konstantom k_b mogu se izračunati reflektancije papira i bojila kao funkcije pokrivenosti podloge bojilom F_b . Tada se preko jednadžbe 1. 3.6 izračuna ukupna makroskopska reflektancija rasterske slike⁸.

Postoji veza između k_{MTF} i n metrike⁴, ali pokušaji da se parametar n kvantitativno izvede preko teorije linernog sustava (LS) vode samo na aproksimaciju zato jer je n ipak empirijski parametar kojim podešavamo empirijski model eksperimentalnim podacima. Ipak, unutar tipičnog ograničenja zbog greške pri mjerenju, eksperimentalno je pokazano da n i k_{MTF} možemo povezati preko relacije⁵:

$$n \cong 2 - e^{-A \cdot k_p \cdot v} \quad 11. 3. 9. 3.$$

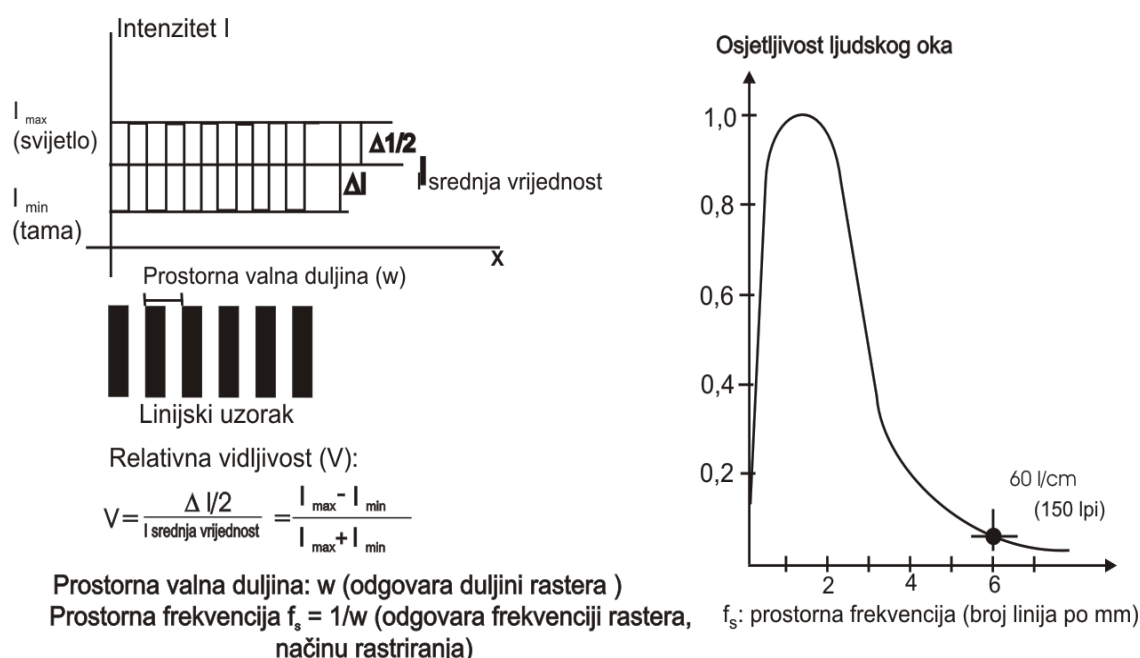
A je konstanta ovisna o geometriji uzorka korištenog rastera. Za amplitudno modulirani rasterski uzorak v (mm^{-1}) je frekvencija pojavljivanja rasterskih točaka, dok je za frekventno modulirani v (mm^{-1}) obrnuta udaljenost između središta točaka rastera.

3. 10 Rasterska reprodukcija

Suvremena grafička proizvodnja uglavnom je zasnovana na rasterskoj reprodukciji, što podrazumijeva proces pretvaranja nekog višetonskog originala u niz rasterskih elemenata.

Pretvaranje višetonskog originala u niz rasterskih elemenata (rastriranje) provodi se i klasičnim i digitalnim tehnikama. Crno bijela fotografija može se sastojati od stotine različitih tonova sivog, fotografija u boji i od tri milijuna različitih nijansi boja, a reproducira se pomoću samo jednog grafičkog bojila (jednobojni tisak) ili pomoću četiri bojila iz osnovne skale CMYK (tisak u boji).

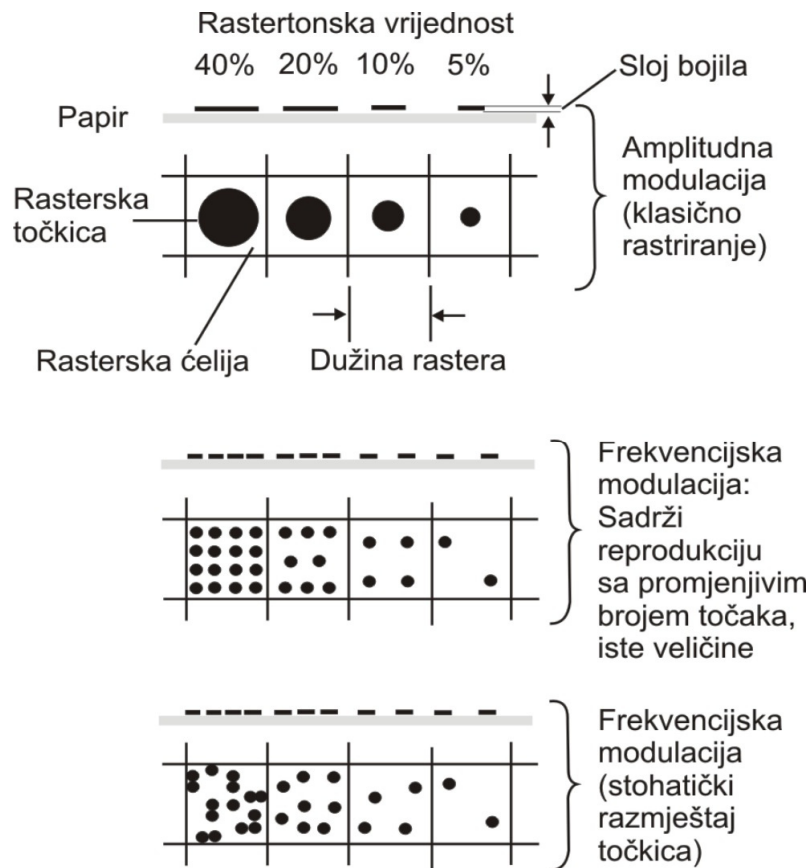
Znači, da bi se mogli reproducirati međutonovi slika je razbijena u sitne elemente koje ljudsko oko, na određenoj udaljenosti, ne može razlučiti.



Slika 26 Razlučivost linijske strukture s obzirom na vizualnu percepciju ljudskog oka pri udaljenosti od 25cm.

Jasnoća, odnosno oštrina detalja višetonske reprodukcije je povezana sa finoćom rastera⁵⁴. Većom finoćom rastera rasterski elementi postaju sve manji i sve teže vidljivi. Pri rastriranju amplitudnom modulacijom (slika 26), za linijature veće od 60 lin/cm rasterski elementi nisu vidljivi na normalnoj udaljenosti (25 cm) stvaranja oštre slike ljudskog oka. Uslijed tromosti oka i nemogućnosti razlučivanja pojedinih rasterskih elemenata dolazi do stapanja u određenu nijansu boje.

Ako se veličina rasterske točkice označava s postotkom pokrivenosti jedinične podloge, onda se ti postoci označavaju kao rastertonske vrijednosti, RTV, ili F (prema *fractional area of the image covered by halftone dots*). Tako će npr. 20% RTV-a označavati takvu veličinu rasterskih točkica da njihova podloga zauzima svega 20% jedinične podloge (slika 27).



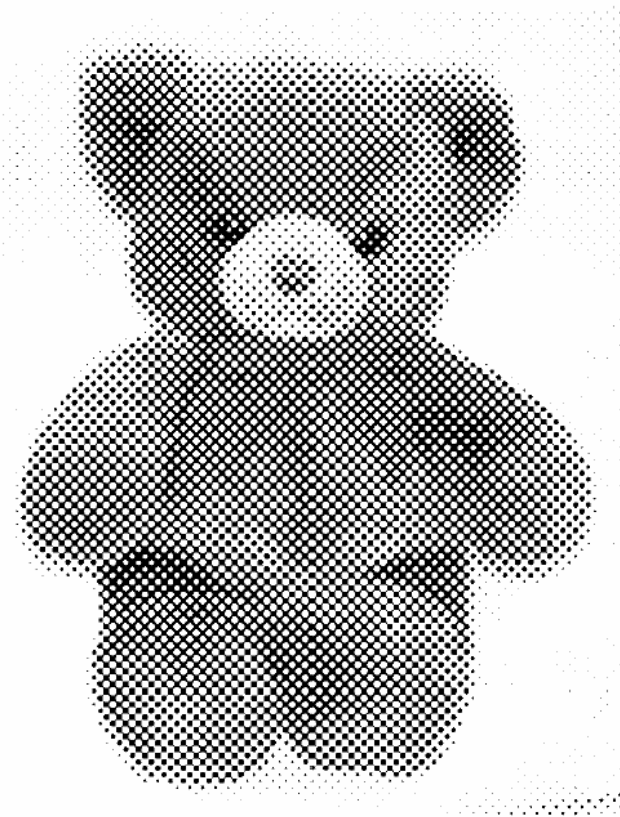
Slika 27 Postizanje različitih rastertonskih vrijednosti amplitudnom i frekventnom modulacijom.

3. 10.1 Amplitudna modulacija (periodično, tradicionalno rastriranje)

George Meisenbach je pri kraju 19. stoljeća pronalaskom amplitudno moduliranog, periodičnog rastriranja (tradicionalni raster) konačno pokrenuo modernu tehniku ilustriranja.

Pri tom tipu rastriranja centri elemenata rastera su uvijek na istim udaljenostima, ali imaju različite promjere ili podloge, ovisno o obliku rasterskog elementa.

Gradacija tona pri korištenju amplitudno moduliranog rastera je upravo proporcionalna s veličinom (amplitudom) rasterskog elementa, pri čemu je frekvencija konstantna i upravo karakteristična za odabrani raster.



Slika 28 Slika dobivena konvencionalnim, amplitudno moduliranim rasterom.

3. 10. 2 Frekventna modulacija

Pri tom tipu rastriranja individualni elementi imaju iste promjere, odnosno podloge, ali se mijenja njihova međusobna udaljenost, tj. frekvencija pojavljivanja u rasterskom polju (ne periodičko rastriranje).

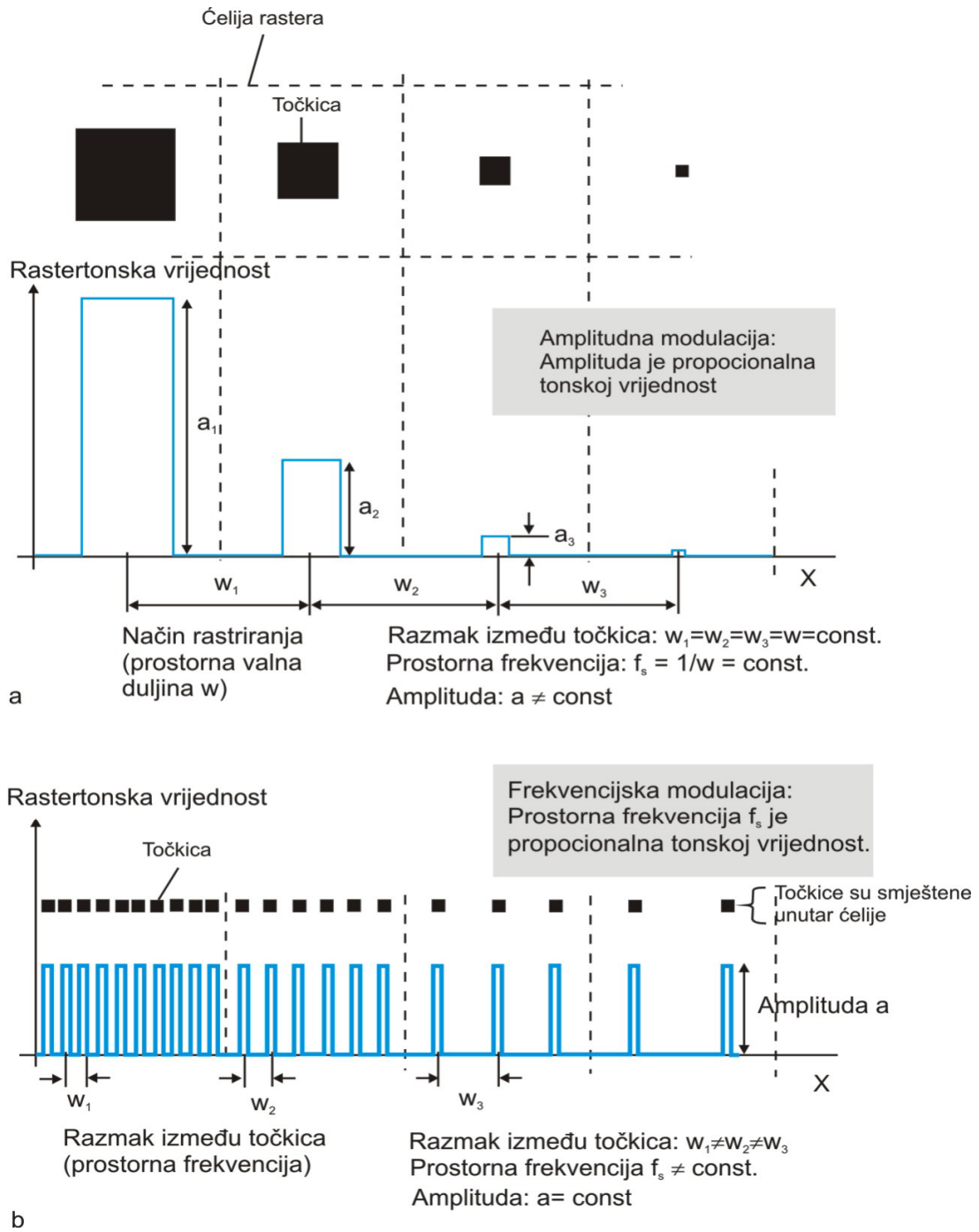
Frekventno moduliranih rastera se najčešće upotrebljavaju kod otiskivanja digitalnim tehnikama, dok klasične tiskarske tehnike više prakticiraju upotrebu amplitudno moduliranih rastera. Prednost frekventno moduliranih rastera je vidljiva u reprodukciji sitnih detalja gdje daju puno bolje rezultate od amplitudno moduliranih rastera.

Na slici 30 a i b je dan fizikalni opis amplitudno i frekventno moduliranog rastera.



Slika 29 Slika dobivena frekventno moduliranim rasterom.

Pri korištenju frekventno moduliranog rastera tonska gradacija je upravo proporcionalna s učestalošću (frekvencijom) pojavljivanja rasterskog elementa u definiranom rasterskom polju, dok je veličina (amplituda) rasterskog elementa konstanta, pa prema tome i karakteristična veličina za odabrani tip rastera.



Slika 30 a i b Postizanje tonske gradacije amplitudnom i frekventnom modulacijom.

4. Eksperiment

4.1 Cilj istraživanja

Opći cilj istraživanja je povezivanje optičkih karakteristika odabranih tiskovnih podloga s Yule-Nielsenovim opisom optičkog prirasta rasterskog elementa (točke) preko parametra n . To povezivanje će se učiniti s Murray-Daveisovim modelom, s jedne strane te, s Kubelka-Munk teorijom, i modulacijskom prijenosnom funkcijom (MTF) papira, s druge strane.

Dvije teorije koje se obično primjenjuju za opis optičkih svojstava papira i drugih tiskovnih podloga su Murray-Daveisova metoda, Kubelka-Munk teorija i teorija linearnih sustava (Linear System Theory). Kubelka-Munk teorija opisuje reflektivna i transmitivna svojstva tiskovne podloge preko koeficijenata apsorpcije K i raspršenja S . Teorija linearnog sustava koristi funkciju širenja točke (Point Spread Function), $PSF(r)$, koja opisuje vjerojatnost izlaska svjetlosti iz papira na udaljenosti r od točke u kojoj je ušla u papir, odnosno bočno raspršenje svjetlosti u papiru. $PSF(r)$ se često opisuje u Fourierovom području kao modulacijska prijenosna funkcija (Modulation Transfer Function), $MTF(\omega)$, gdje je ω prostorna frekvencija u jedinicama $1/r$. Ako Yule-Nielsenov parametar n ima fizikalno značenje, a nije samo empirijski faktor, morao bi biti u korelaciji s $MTF(\omega)$ papira i s koeficijentima apsorpcije K i raspršenja S Kubelka-Munk teorije.

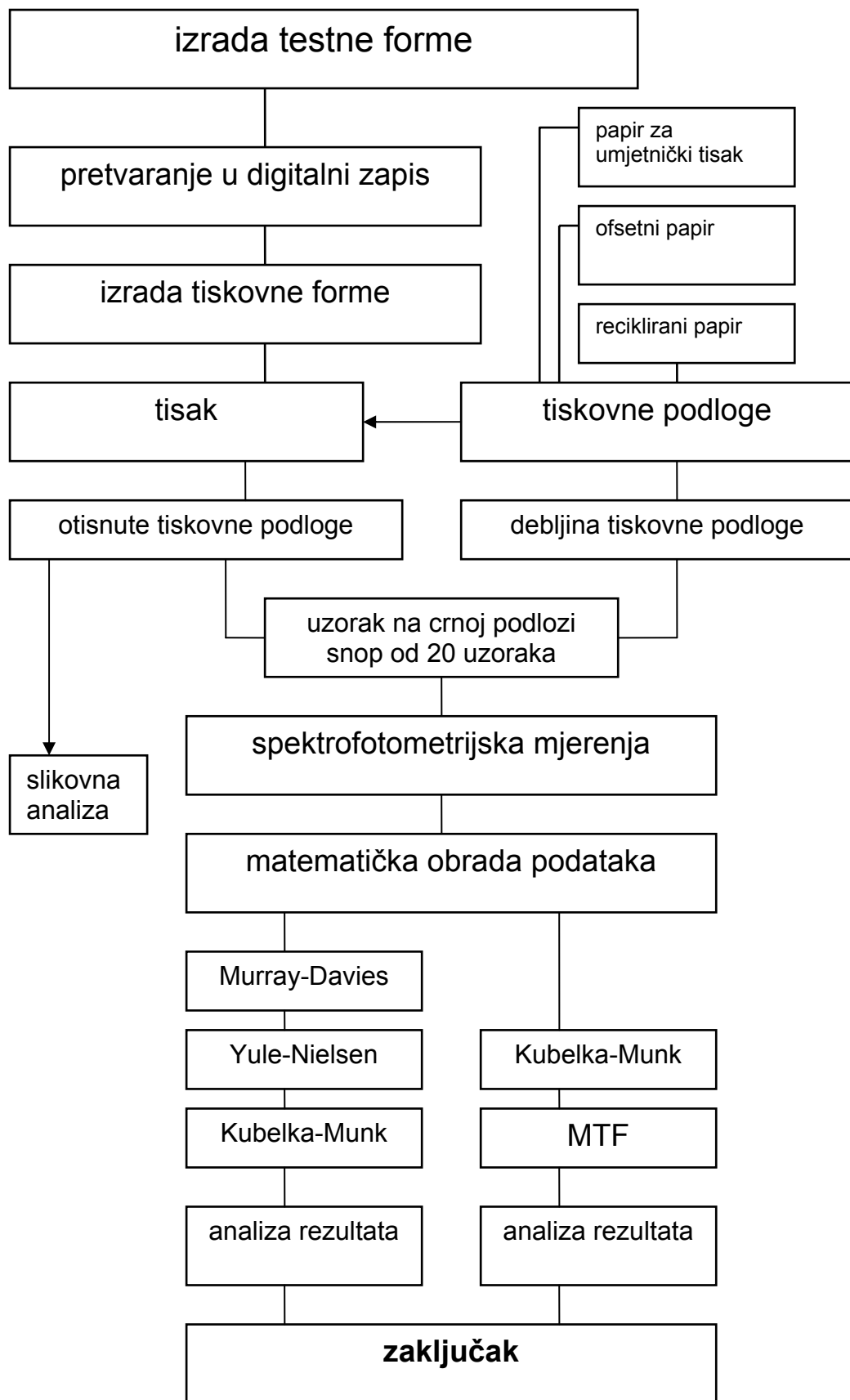
U skladu s rezultatima istraživanja, zadatak ovog rada je odrediti i područja primjene navedenih teorija s obzirom na realne uvjete grafičke reprodukcije.

Cilj istraživanja je kako promjena tiskovne podloge, postotka obojenja i primijenjene rasterske modulacije utječe na točnost Murray-Daveisove metode, promjenu koeficijenata apsorpcije i raspršenja, te na promjenu Yule-Nielsenovog parametra n .

Uočene promjene optičkih svojstava, kao posljedice promijenjenih parametara tiskovne podloge, doprinjet će boljem razumijevanju fizikalnih procesa koji ih uzrokuju. Na temelju dobivenih korelacija između relevantnih veličina omogućit će se bolje praćenje i kontrola upravo onih parametara koji su odgovorni za kvalitetu otisnutih tiskovnih podloga.

4.2 Plan rada

Plan rada je prikazan blok dijagramom (slika 31).



Slika 31 Plan rada

4.3 Izbor tiskovnih podloga

U ovom radu odabrane su četiri vrste tiskovnih podloga koje se veoma često koriste: papir za umjetnički tisak, sjajni i mat, kao predstavnici premazanih papira, te od nepremazanih ofsetni i, danas nezaobilazni, reciklirani papir. Gramature ispitivanih podloga bile su poznate od proizvođača (tablica 1), dok im je debljina izmjerena prema standardu TAAPI 411om-97 (Thickness of paper, paperboard and combined board).

Tablica 1 Gramatura (gm^{-2}) i debljina (mm) svih mjerenih tiskovnih podloga.

Tiskovna podloga	Premazani papir		Nepremazani papir	
	Papir za umjetnički tisak, sjajni	Papir za umjetnički tisak, mat	Ofsetni papir	Reciklirani papir
gramatura (gm^{-2})	120	120	100	100
debljina (mm)	0,068	0,079	0,091	0,108

4.4 Tisak odabranih tiskovnih podloga

Za potrebe istraživanja otisnut će se testna forma, C, M, Y i K stepenasti klinovi, tiskani klasičnim ofsetom^{10, 11} na odabranim tiskovnim podlogama (tablica 2), različitim rasterskim modulacijama.

Tiskovna forma će se realizirati frekventno moduliranim rasterom, finoće 20 μm (FM), te amplitudno moduliranim rasterom s okruglim rasterskim elementom, finoće 80 $lin\text{cm}^{-1}$ (AM). Naklade će se otisnuti klasičnim ofsetom na sedmerbojnom tiskarskom stroju Heidelberg SpeedMaster 74.

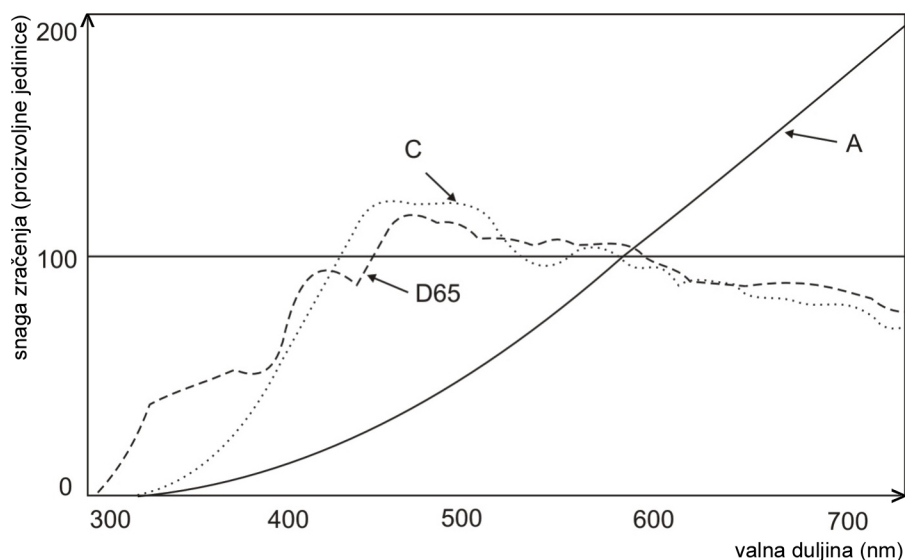
Svaki otisnuti uzorak će se sastojati od polja kontrolnog stripa s rasterskim elementima rastertonske vrijednosti od 0-100%.

4.5 Metode istraživanja

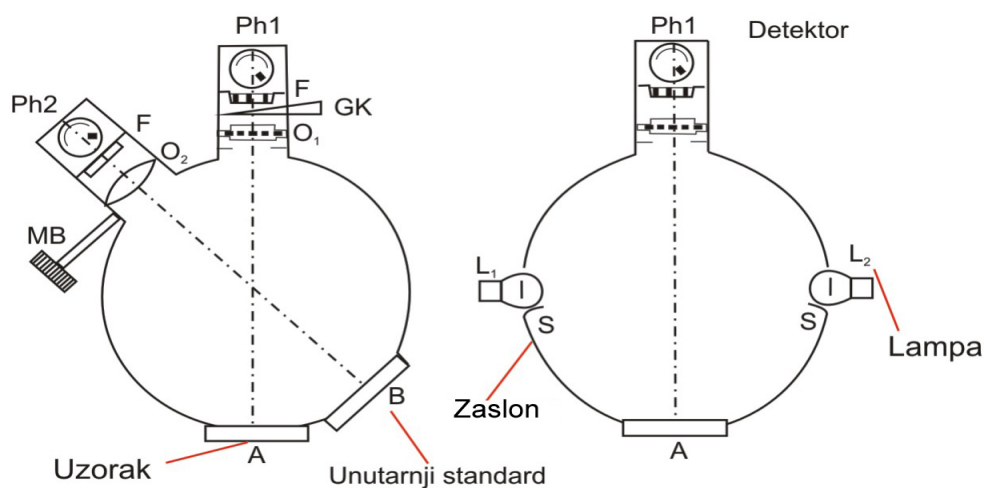
Neotisnuti i otisnuti uzorci će se mjeriti spektrofotometrijski u području vidljive svjetlosti (410-700nm), X-Rite spektrofotometrom uz podršku programa Color Shop 2.0, i to u refleksiji.

Za potrebe istraživanja izmjerit će se reflektancija R_0 i reflektivnost R_∞ koje su definirane prema standardu TAPPI 1214 sp-98 (Interrelation of reflectance, R_0 ; reflectivity R_∞ ; scattering S ; and absorption K). R_0 se definira kao reflektancija jednog uzorka na definiranoj crnoj podlozi, a R_∞ na snopu uzoraka koji mora zadovoljavati uvjet da se povećavanjem broja uzoraka u snopu ne mijenja vrijednost izmjerene reflektancije u vidljivom dijelu spektra (slika 18).

Reflektancije će se mjeriti pri definiranim uvjetima prema standardu TAPPI 519 om-96. Navedeni standard podrazumijeva izvor svjetlosti C (slika 32), kut opažanja 2^0 i $d/0^0$ geometriju, što znači difuzno osvjetljenje i mjerenje okomito na uzorak (slika 33).



Slika 32 Standardni izvori svjetlosti pri refleksijskim mjerenjima: C odgovara dnevnom svjetlu kao i D65 uz dodatak UV komponente, dok A predstavlja običnu lampu s volframovom niti.



Slika 33 Geometrija mjerenja $d/0^0$.

Uz spektrofotometrijska mjerenja, kao paralelna metoda, učinit će se mikroskopska analiza otisnutih tiskovnih podloga analizatorom slike (Personal Image Analysis System) s integriranim digitalnim mikroskopom visoke rezolucije.

Na taj način dobivene reflektancije rasterske slike za rastertonske vrijednosti od (20, 40, 60 i 80)%, te reflektancije neotisnutih tiskovnih podloga ($F = 0\%$) i bojila ($F=100\%$) omogućit će računanje relevantnih parametara za određivanje:

teoretskog iznosa reflektancije prema Murray-Davies metodi

Yule-Nielsenovog faktora n

S i K koeficijenata Kubelka-Munk teorije

MTF funkcije papira.

Dobivene reflektancije u vidljivom dijelu spektra će se matematički obraditi da bismo dobili optičke parametre prema pretpostavkama odabranih teorija.

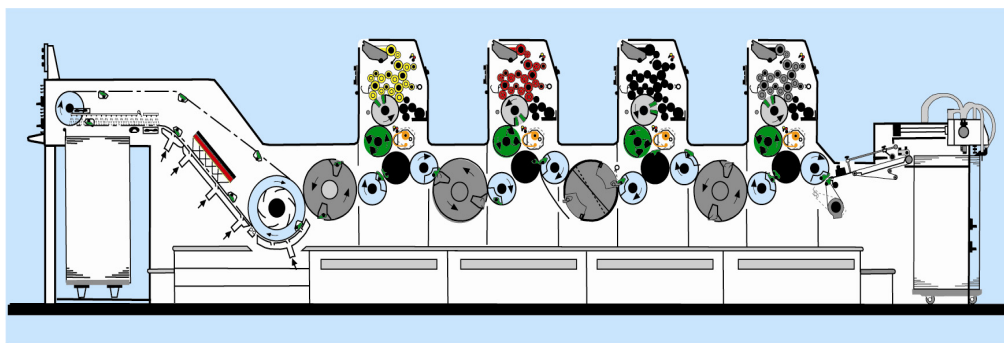
Matematička obrada eksperimentalnih podataka izvodi će se programima MathCAD 2002 Professional i Data Analysis and Technical Graphics Origin 6.0.

Na temelju eksperimentalnih mjerenja i matematičkih rezultata odredit će se područje primjene navedenih teorija s obzirom na realne uvjete grafičke reprodukcije i uspostaviti će se korelacija između relevantnih parametara.

4. 6 Korišteni uređaji i strojevi

Heidelberg SpeedMaster 74

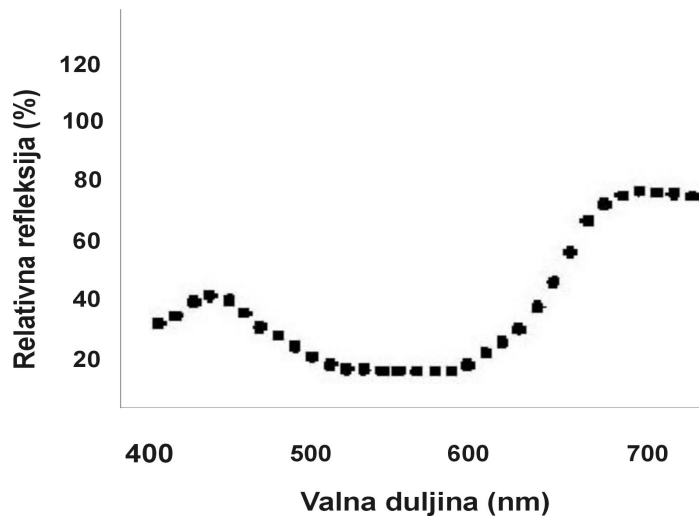
Odabrane tiskovne podloge navedene u poglavlju 4.3 su otisnute klasičnim ofsetom na Heidelberg SpeedMaster-u 74 (slika 34)⁸².



Slika 34 Shematski prikaz Heidelberg SpeedMaster-a 74.

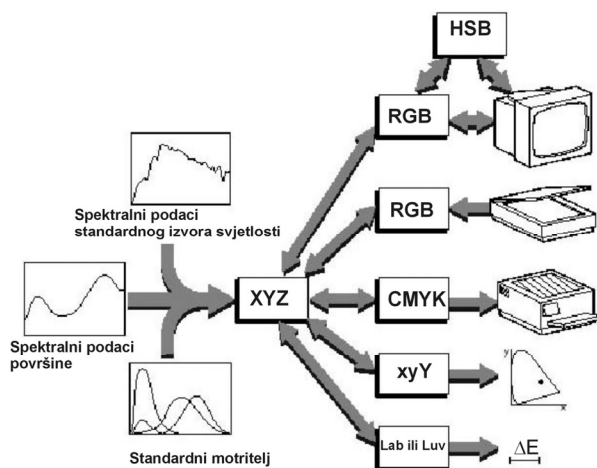
X-Rite spektrofotometar

Spektrofotometrijska mjerenja navedena u poglavlju 4.4 izvedena su X-Rite spektrofotometrom (Digital Swatchbook) koji direktno mjeri energiju svjetla na pojedinoj valnoj duljini, odnosno daje nam spektralne podatke⁴⁸, uz podršku programa za upravljanje bojama (Colorshop). Korišteni uređaj mjeri reflektiranu svjetlost s uzorka kružnim otvorom promjera 4mm u području vidljive svjetlosti u intervalu valnih duljina od 390nm do 700nm i to tako da razlaže taj karakteristični spektar na



Slika 35 Ovisnost reflektirane svjetlosti o valnoj duljini za karakteristični niz diskretnih vrpca.

niz diskretnih vrpca. Ovaj spektrofotometar dijeli vidljiv dio spektra u 16 vrpca, vrši interpolaciju podataka na taj način da nam daje relativne vrijednosti reflektirane energije svakih 10 nm. Grafički prikaz ovisnosti reflektirane svjetlosti o valnoj duljini dozvoljava za refleksiju vrijednosti veće od 100%.



Slika36 Pretvaranje spektralnih podataka odabranog uzorka u kolorimetrijske vrijednosti pomoću standardnog motritelja i standardnog izvora svjetlosti..

Te vrijednosti su moguće u slučaju fluorescentne boje, koja apsorbira svjetlo manje valne duljine (veće energije), a reemitira veće valne duljine. Prije pojave instrumenata kao što su Digital Swatchbook i Colortron, spektrofotometri su bili bitno skuplji, pa prema tome i nedostupniji mnogim korisnicima.

Digital Swatchbook⁸⁰ (slika 37) je opremljen s odgovarajućim standardnim filterima koji mu omogućuju i denzitometrijska mjerenja. Isto tako uređaj posjeduje podatke za CIE Standard Observer (standardni promatrač), spektralne emisije krivulje za mnoge standardne izvore svjetlosti i mikrokomputer za računanje CIE tristimulusnih vrijednosti. Na taj način ovaj spektrofotometar možemo koristiti kao kolorimetar za prikaz boja u raznim prostorima boja. CIE koordinate mogu se računati za boje osvijetljene različitim standardnim izvorima svjetlosti, pa je na taj način moguće ispitivati pojavu metamerizma na odabranim uzorcima.



Slika 37 Spektrofotometar, X-Rite Digital Swatchbook.

Analizator slike

Analizator slike (Personal Image Analysis System-IAS) je uređaj s integriranim digitalnim mikroskopom i CCD (Charge-Coupled Device) kamerom. Mikroskop ima rezoluciju od $5\mu\text{m}$ po pikselu i fiksno povećanje koje omogućuje promatranje podloge od $(2,4 \times 2,4) \text{ mm}^2$. Za prijenos podataka između uređaja i računala korišten je program Microsoft ActiveSync 3.1⁸¹.



Slika 38 Anlizator slike, Personal Image Analysis System-IAS, korišten u ovom radu.

4. 7 Istraživački rad

4. 7. 1 Mjerenje tiskovnih podlogaa i otisaka

Tiskovne podloge su izmjerene spektrofotometrijski prema standardima navedenim u poglavlju 4.5. Na taj način su dobiveni refleksijski spektri, R_0 , odnosno R_∞ potrebni za matematičku obradu podataka. Svaki uzorak je izmjereno 10 puta i rezultati su statistički obrađeni.

Debljina tiskovnih podloga je izmjerena prema standardu (poglavlje 4.3).

Otisci tiskani klasičnim ofsetom (prema poglavlju 4.4) osnovnim bojilima cijan, magenta, žuto i crno (C, M, Y i K) izmjereni su pri istim spektrofotometrijskim uvjetima (prema poglavlju 4.5). Uzorci za mjerenje su bili podijeljeni prema vrsti tiskovne podloge i prema načinu rasterske modulacije.

Svaki uzorak se sastojao od polja kontrolnog stripa s rasterskim elementima rastertonske vrijednosti od 0-100%. Mjerena su polja rastertonskih vrijednosti od 20, 40, 60, 80 i 100%. Svako polje je izmjereno 10 puta i rezultati su statistički obrađeni.

4. 7. 2 Matematička obrada eksperimentalnih rezultata

Svi uzorci, otisnuti i neotisnuti su statistički obrađeni, odnosno određena im je srednja vrijednost, standardna devijacija i relativna pogreška.

Kubelka –Munk metoda:

a) koeficijent apsorpcije i raspršenja

$$s_i = \frac{1}{w \left(\frac{1}{R_{\infty i}} - R_{\infty i} \right)} \ln \left[\frac{(1 - R_{0i} R_{\infty i}) R_{\infty i}}{R_{\infty i} - R_{0i}} \right] \quad i = 0, 1, \dots, 29 \quad 13. 3.5$$

$$k_i = \frac{s_i \cdot (1 - R_{\infty i})^2}{2R_{\infty i}} \quad i = 0, 1, \dots, 29 \quad 14. 3.5$$

U izrazima 13. i 14. 3.5 indeks i poprima vrijednosti od 0 do 29 što odgovara intervalu valnih duljina od 410 do 700nm, za svakih 10nm. Faktori reflektancija su izraženi kao brojevi između 0 i 1, gramatura papira, w , je u kgm^{-2} , tako da su koeficijenti raspršenja s i apsorpcije k u m^2kg^{-1} .

b) opacitet

$$O_i = \frac{R_{0i}}{R_{\infty i}} \quad 4.3.3$$

U izrazu (1 (7.1.2)) indeks i poprima vrijednosti od 0 do 29 što odgovara intervalu od 410 do 700 nm, za svakih 10 nm.

Modulacijska prijenosna funkcija (MTF) papira računana je preko Oittinen-Engeldrumovog modela:

$$MTF(\omega) = \frac{1}{-\ln(1 - R_{\infty}^2)} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \frac{R_{\infty}^{2j}}{j} \cdot \left[1 + \left(\frac{2\pi\omega}{2jbS} \right)^2 \right]^{-3/2} \quad j = 1, \dots, 500 \quad 6.3.9.2$$

gdje je $a=1+K/S$, $b=(a^2-1)^{1/2}$, $R_{\infty}=a-b$.

K (mm^{-1}) i S (mm^{-1}) su Kubelka-Munk koeficijenti apsorpcije i raspršenja

Murray-Daveisova metoda:

$$R_{M-D} = R_{\lambda i} = F_b \cdot R_{bi} + (1 - F_b) \cdot R_{pi} \quad i=0, \dots, 29 \quad 1.3.6$$

U ovoj jednadžbi R_{bi} i R_{pi} su jednostupčane matrice od 30 članova koje predstavljaju mjerene spektre u refleksiji od 410 do 700nm za svakih 10nm:

R_{bi} refleksija bojila (C, M, Y i K) za $F_b=1$

R_{pi} refleksija tiskovne podloge za $F_b=0$.

Yule-Nielsenov parametar n

$$R_{\lambda_t} = \left(F_b \cdot \sqrt[n]{R_b} + (1 - F_b) \cdot \sqrt[n]{R_p} \right)^n \quad 5.3.7.$$

U ovom radu uvedeni empirijski parametar n računa se podešavanjem (fitanjem) na dobivene refleksijske spektre:

$$R_{\lambda_{mi}}^x = F_b \cdot R_{b_i}^x + (1 - F_b) \cdot R_{p_i}^x, \quad x = \frac{1}{n} \quad i = 0, 1, 2, \dots, 29 \quad 1.4.7.2$$

U ovoj jednadžbi $R_{\lambda_{mi}}$, R_{b_i} i R_{p_i} su jednostupčane matrice od 30 članova koje predstavljaju mjerene spektre u refleksiji od 410 do 700nm za svakih 10nm:

$R_{\lambda_{mi}}$ ukupna refleksija rasterske slike za $F_b = 0,2; 0,4; 0,6$ i $0,8$

R_{b_i} refleksija bojila (C, M, Y i K) za $F_b = 1$

R_{p_i} refleksija tiskovne podloge za $F_b = 0$.

U literaturi korištenoj pri izradi ovog rada F je oznaka za udio pokrivenosti tiskovne podloge bojilom, odnosno za rastertonsku vrijednost, dok je u hrvatskoj stručnoj literaturi uobičajena oznaka RTV.

5. Rezultati istraživanja

U ovom radu, zbog kompleksnosti papira kao heterogene podloge i svih parametara kojima opisujemo složen proces interakcije s elektromagnetskim zračenjem, provedena je analiza tiskovnih podloga preko koeficijenata apsorpcije i raspršenja (poglavlje 5.1.1), opaciteta (5.1.2) i modulacijske prijenosne funkcije (5.1.3).

Analiza obojenih otisaka otisnutih frekventno i amplitudno moduliranim rasterom praćena je Murray-Daveisovom metodom (poglavlje 5.2.1), te je na iste otiske primijenjena Yule-Nielsenova korekcija (5.2.2) i Kubelka-Munk teorija (5.2.3).

5.1 Analiza tiskovnih podloga

5.1.1 Kubelka –Munk analiza: koeficijent apsorpcije i raspršenja

U cilju analize tiskovnih podloga (tablica 1) izračunati su koeficijenati apsorpcije i raspršenja prema Kubelka-Munk teoriji. Za potrebe računa izmjerena je reflektancija R_0 jednog uzorka na crnoj podlozi. Reflektancija R_g crne podloge se mogla zanemariti, budući da ne prelazi vrijednost od 0,5% (prema standardu TAAPI 519 om-96). Da bi se dobila reflektivnost, R_∞ (ili R_{00}), mjerenja su provedena uzastopno dodajući uzorak na uzorak dok se iznos reflektirane svjetlosti više nije mijenjao. Krenulo se od papira koji je za postizanje navedenog uvjeta zahtijevao najviše uzoraka, pa se je došlo do sloja od 20 uzoraka, što je u ovim mjerenjima predstavljalo standard.

Usporedba rezultata mjerenja reflektancije i reflektivnosti (slika 39) je važna zbog izraza za koeficijente raspršenja s i apsorpcije k , koji, prema jednadžbama 13. i 14. 3.5 ovise o odonosima između izmjerenih reflektancija R_0 i R_∞ :

$$s_i = \frac{1}{w \left(\frac{1}{R_{\infty i}} - R_{\infty i} \right)} \ln \left[\frac{(1 - R_{0i} R_{\infty i}) R_{\infty i}}{R_{\infty i} - R_{0i}} \right] \quad i = 0, 1, \dots, 29 \quad 13. 3.5$$

$$k_i = \frac{s_i \cdot (1 - R_{\infty i})^2}{2R_{\infty i}} \quad i = 0, 1, \dots, 29 \quad 14. 3.5$$

U izrazima 13. i 14. 3.5 indeks i poprima vrijednosti od 0 do 29 što odgovara intervalu valnih duljina od 410 do 700nm, za svakih 10nm. Faktori reflektancija su izraženi kao brojevi između 0 i 1, gramatura papira, w , je u kgm^{-2} , tako da su koeficijenti raspršenja s i apsorpcije k u m^2kg^{-1} .

Da bi se odredio koeficijent raspršenja s mora se postaviti uvjet da je $R_\infty > R_0$. Naime, kao što je vidljivo iz izraza 13. 3.5, taj uvjet mora biti zadovoljen u cijelom intervalu mjerenog spektra, zbog područja definicije funkcije prirodnog logaritma \ln . Međutim, potrebno je postaviti još jedan uvjet na odnose između veličina koji je uzrokovan

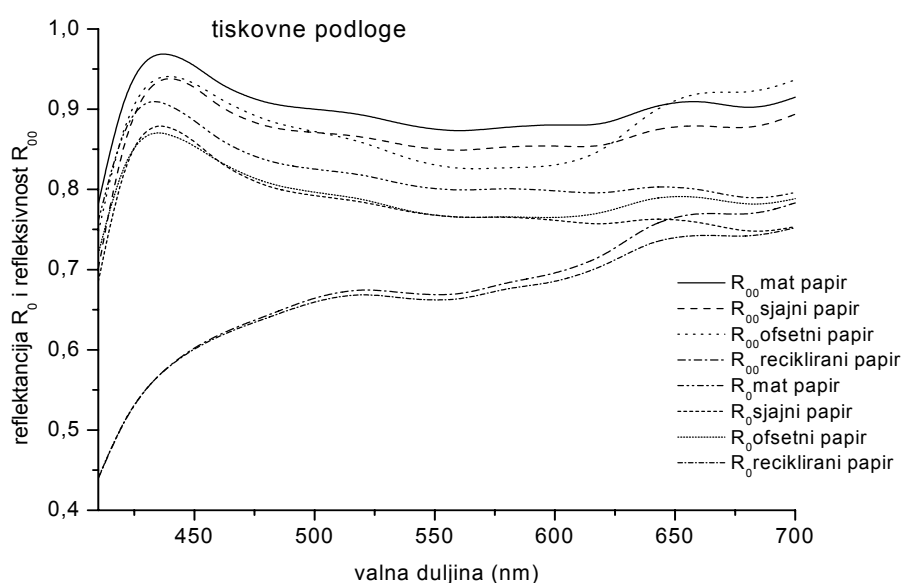
pogreškom prilikom mjerenja. Svaka od tiskovnih podloga je izmjerena 10 puta, te su rezultati statistički obrađeni. Na temelju Statističke obrade podataka dobiveno je područje (range) unutar kojeg se rasipaju mjerene veličine, koje je upravo jednako razlici između najvećeg R_{\max} i najmanjeg R_{\min} mjerenja:

$$R_{\text{Range}} = R_{\max} - R_{\min} \quad 1 \text{ (5.1.1)}$$

Mora vrijediti slijedeći odnos za cijelo područje mjerenja:

$$R_{\infty} - R_0 > R_{\max} - R_{\min} \quad 2 \text{ (5.1.1)}$$

Matematička obrada rezultata je provedena u programu Mathcad 2002 Professional, a dobivene vrijednosti su na slikama 40a-40d.

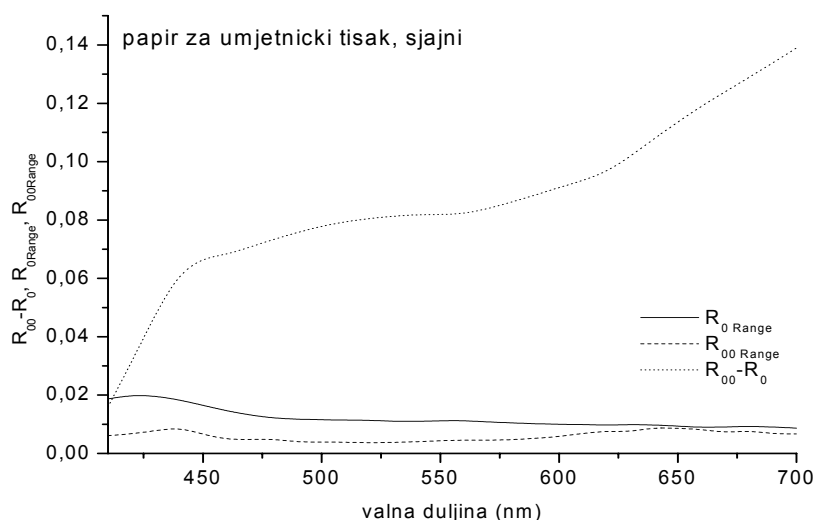


Slika 39 Refleksijski spektri mjereni na ofsetnoj i recikliranoj tiskovnoj podlozi, te na papirima za umjetnički tisak (sjajni i mat), na crnoj podlozi, R_0 i na sloju od 20 uzoraka, R_{∞} .

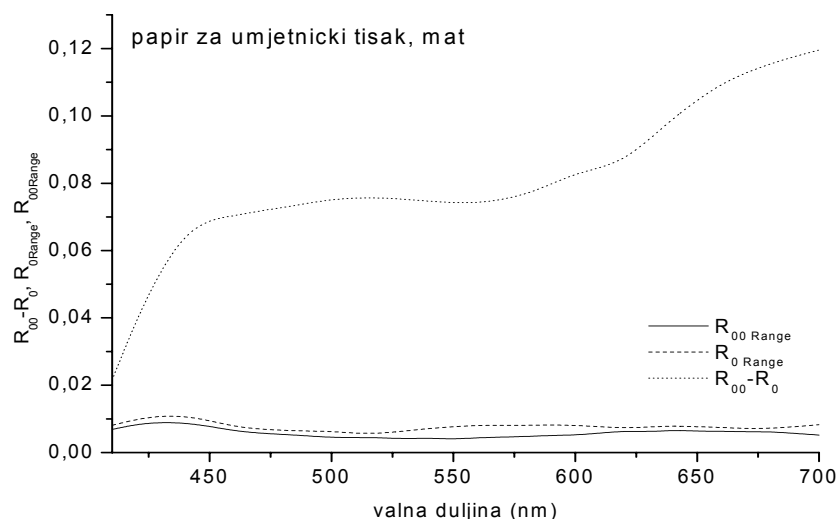
Iz slike 39 se vidi da papiri za umjetnički tisak, sjajni i mat, imaju istu ovisnost reflektancije o valnoj duljini, dok ofsetni papir pokazuje izraženu apsorpciju od 500 do 650nm. Kao što se i očekivalo, izrazito slaba reflektivna svojstva pokazuje reciklirani papir. Zbog specifičnosti izrade recikliranog papira (ref.), u odnosu na ostale odabrane tiskovne podloge, veoma je mala razlika između reflektancije i refleksivnosti, naročito u plavom dijelu spektra, od 410 do 480nm (slika 39). Upravo zbog toga nije zadovoljen spomenuti uvjet (2 (5.1.1)) da razlika između reflektancije

R_0 i reflektivnosti R_∞ mora biti veća od područja u kojem se rasipaju mjerene veličine.

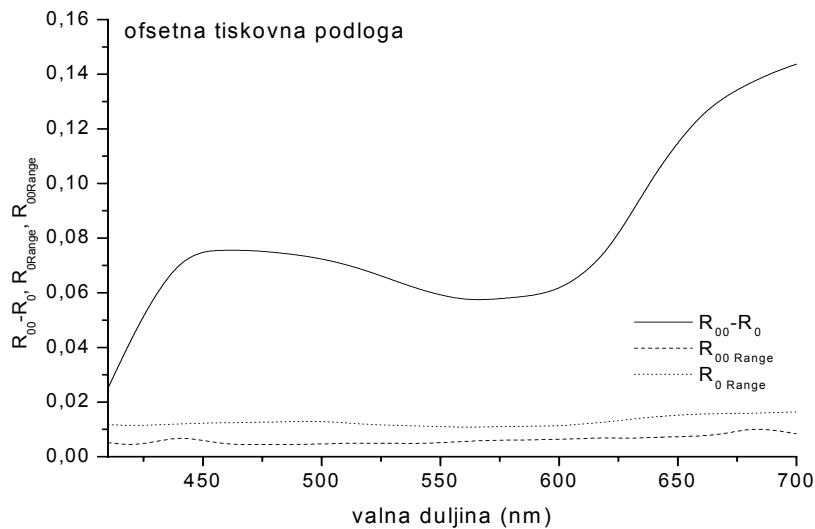
Na slikama 40a-40d se mogu vidjeti odnosi između $R_\infty-R_0$ te $R_{0Range}=R_{0max}-R_{0min}$ i $R_{\infty Range}=R_{\infty max}-R_{\infty min}$ kao funkcija valne duljine za sve analizirane tiskovne podloge. Jedino za reciklirani papir ne vrijedi uvjet 2 (5.1.1) u području od 410-600nm.



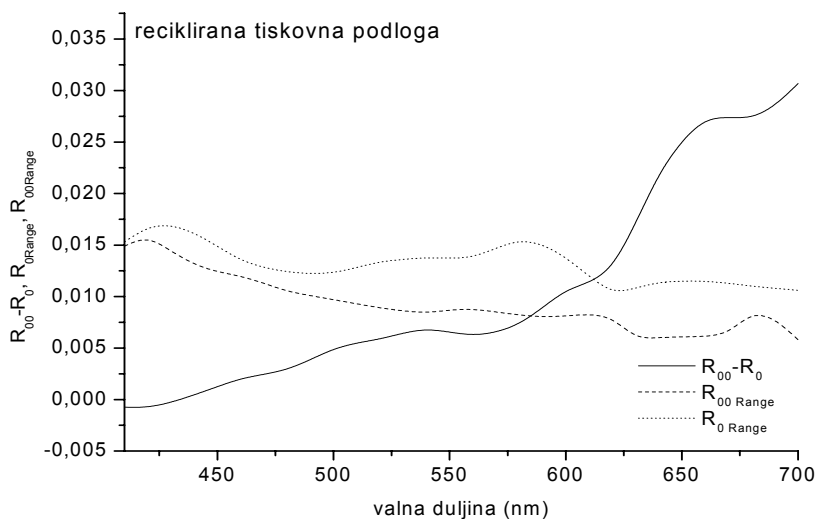
Slika 40a Područja rasipanja mjerenih vrijednosti reflektancija, $R_{0 Range}=R_{0max}-R_{0min}$ i reflektivnosti, $R_{\infty Range}=R_{\infty max}-R_{\infty min}$, te razlika između reflektivnosti i reflektancije, $R_\infty-R_0$ za papir za umjetnički tisak, sjajni.



Slika 40b Područja rasipanja mjerenih vrijednosti reflektancija, $R_{0 Range}=R_{0max}-R_{0min}$ i reflektivnosti, $R_{\infty Range}=R_{\infty max}-R_{\infty min}$, te razlika između reflektivnosti i reflektancije, $R_\infty-R_0$ za papir za umjetnički tisak, mat.



Slika 40c Područja rasipanja mjerenih vrijednosti reflektancija, $R_{0 \text{ Range}} = R_{0max} - R_{0min}$ i reflektivnosti, $R_{\infty \text{ Range}} = R_{\infty max} - R_{\infty min}$, te razlika između reflektivnosti i reflektancije, $R_{\infty} - R_0$ za ofsetnu tiskovnu podlogu.



Slika 40d Područja rasipanja mjerenih vrijednosti reflektancija, $R_{0 \text{ Range}} = R_{0max} - R_{0min}$ i reflektivnosti, $R_{\infty \text{ Range}} = R_{\infty max} - R_{\infty min}$ te razlika između reflektivnosti i reflektancije, $R_{\infty} - R_0$ za recikliranu tiskovnu podlogu.

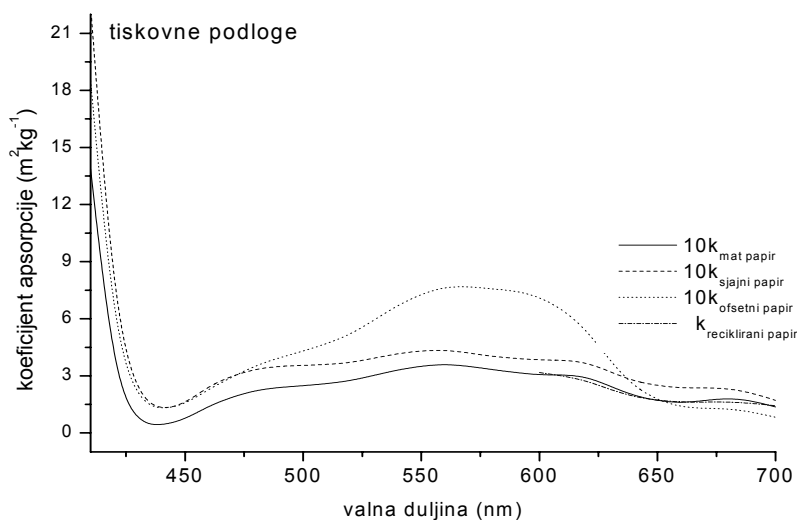
Dakle, s obzirom na područje spektra u kojem je zadovoljen uvjet 2 (5.1.1) moglo se je pristupiti matematičkoj obradi podataka za izračun koeficijenata apsorpcije i raspršenja u području od 410nm do 700nm, za sve odabrane tiskovne podloge, osim za reciklirani papir, kojem su zbog njegove specifičnosti bili mogući izračuni samo od 600nm do 700nm.

Kao što se vidi iz slika 41a i b, papiri za umjetnički tisak (premazani papiri) pokazuju identično ponašanje s obzirom na ovisnost koeficijenata apsorpcije i raspršenja o valnoj duljini, jedino što mat papir ima veće iznose raspršenja, a sjajni apsorpcije. Ofsetni papir pokazuje slično ponašanje koeficijenta raspršenja kao i papiri za umjetnički tisak, osim povećanog raspršenja u plavom dijelu spektra, ali je zato apsorpcija veoma velika (dvostruko veća) upravo između 530 i 630nm, što smo mogli i očekivati s obzirom na smanjenje refleksije u istom području spektra (slika 39). Apsolutno najveću apsorpciju ima reciklirani papir (10 puta veću od papira za umjetnički tisak), a i raspršenje je najveće upravo za tu vrstu papira u intervalu od 600 do 700nm.

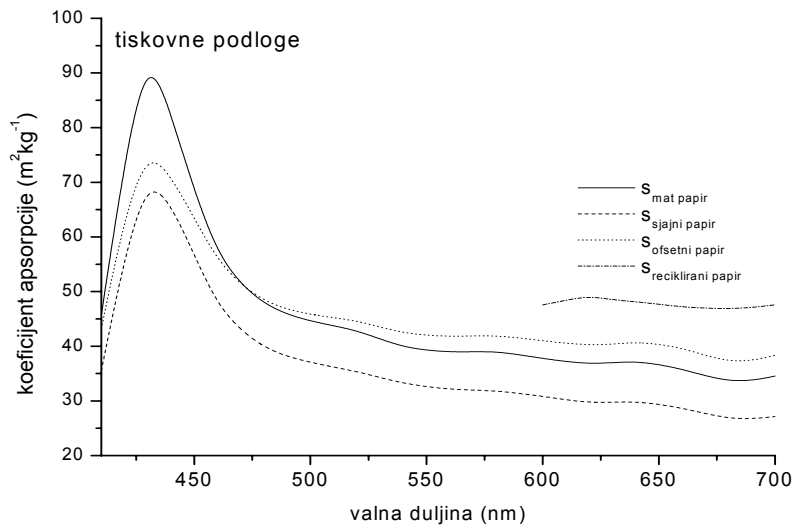
Iz slika 41a i b je očita ovisnost Kubelka-Munk koeficijenata o valnoj duljini. U cilju praćenja te ovisnosti odredile su se relativne promjene koeficijenata s obzirom na valnu duljinu od 430 do 700nm preko izraza:

$$\delta_k = \frac{k_{\max} - k_{\min}}{k_{\max}}, \text{ odnosno } \delta_s = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\max}} \quad 3 \text{ (5.1.1)}$$

Dobivene vrijednosti su u tablici 2.



Slika 41a Koeficijenti apsorpcije 10k kao funkcija valne duljine za ofsetni i umjetnički papir, sjajni i mat. Za recikliranu tiskovnu podlogu vrijednosti koeficijenta apsorpcije su k_{rec} .



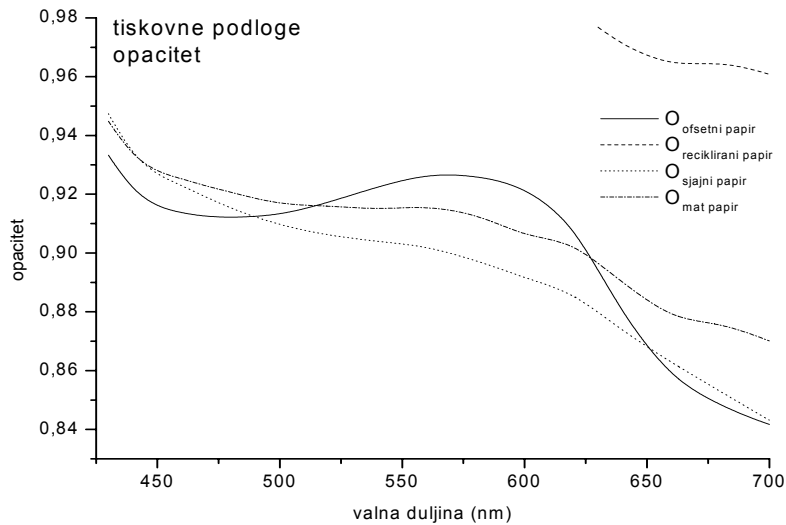
Slika 41b Koeficijenti raspršenja s kao funkcija valne duljine za umjetnički papir, sjajni i mat, te za ofsetnu i recikliranu tiskovnu podlogu.

5. 1. 2 Opacitet

Opacitet je računat iz izraza:

$$O_i = \frac{R_{0i}}{R_{\infty i}} \quad 4. 3.3$$

U izrazu 4. 3.3 indeks i poprima vrijednosti od 0 do 29 što odgovara intervalu od 410 do 700 nm, za svakih 10 nm. Na slici 42 se vide rezultati računa provedenih u programu Mathcad 2002 Professional za sve četiri mjerene tiskovne podloge. Za umjetničke papire, sjajni i mat, opacitet je po iznosu veći za mat papir, dok je ovisnost opaciteta o valnoj duljini podjednaka za oba premazana papira. Najneprozirniji je reciklirani papir u crvenom dijelu spektra u kojem su bili zadovoljeni uvjeti za izračun opaciteta. Ofsetna tiskovna podloga postiže najveću neprozirnost od 550 do 650nm, upravo u području spektra u kojem ima i najveće koeficijente raspršenja i apsorpcije (slika 41a i b).



Slika 42 Opacitet kao funkcija valne duljine za sve mjerene tiskovne podloge.

5. 1. 3 Modulacijska prijenosna funkcija (MTF) papira

Modulacijska prijenosna funkcija (MTF) papira računana je preko Oittinen-Engeldrumovog modela:

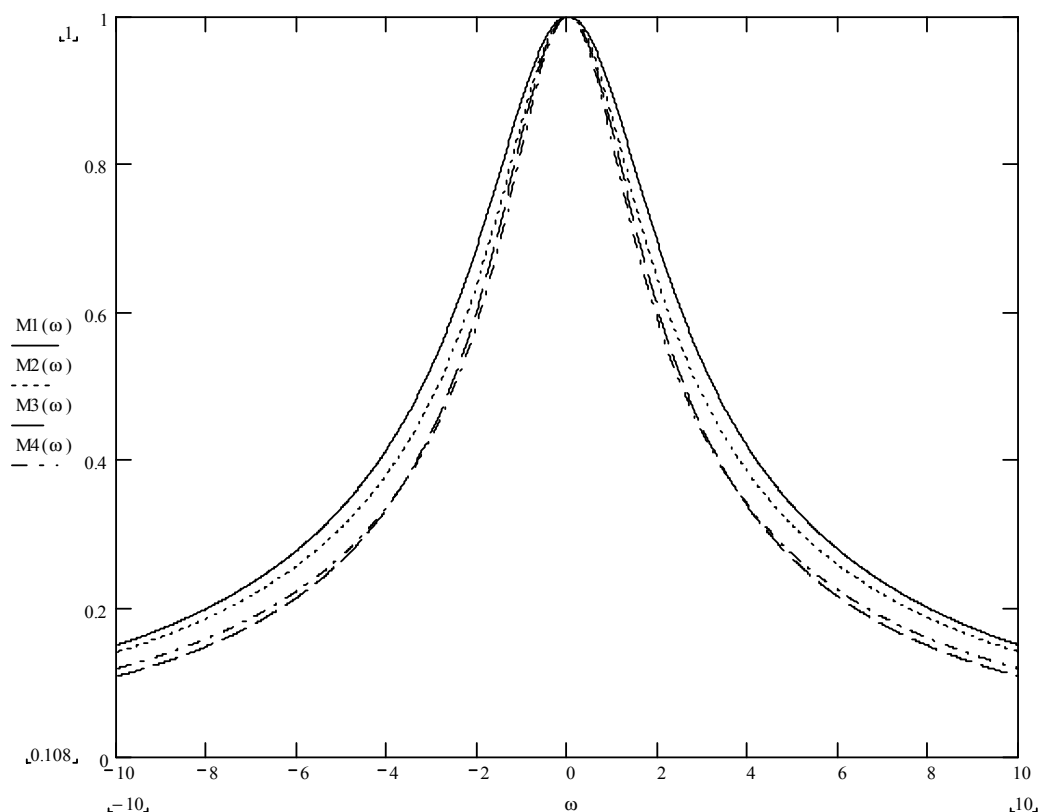
$$MTF(\omega) = \frac{1}{-\ln(1 - R_{\infty}^2)} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \frac{R_{\infty}^{2j}}{j} \cdot \left[1 + \left(\frac{2\pi\omega}{2jbS} \right)^2 \right]^{-3/2} \quad j = 1, \dots, 500 \quad 6. 3.9.2$$

gdje je $a=1+K/S$, $b=(a^2-1)^{1/2}$, $R_{\infty}=a-b$, K (mm^{-1}) i S (mm^{-1}) su Kubelka-Munk koeficijenti apsorpcije i raspršenja, ω (mm^{-1}) je vrijednost recipročne udaljenosti koju svjetlost prođe prije nego što bude apsorbirana ili raspršena.

Za svaku tiskovnu podlogu izračunata je srednja vrijednost refleksivnosti, R_{∞} , te srednje vrijednosti parametara raspršenja S i apsorpcije K za cijeli promatrani spektar. Statistička obrada podataka učinjena je u programu Origin.

Budući da su se parametri Kubelka-Munk teorije dobili preko izraza 1 i 2 (5.1.3), imali su dimeziju m^2kg^{-1} , pa se množenjem s gramaturom (tzv. snaga apsorpcije, odnosno raspršenja) i dijeljenjem s debljinom papira dobila dimezija mm^{-1} potrebna za točan izračun preko izraza 6. 3.9.2.

Matematička obrada tako dobivenih podataka za izračun $MTF(\omega)$ je napravljena u Mathcad-u 2002 Professional, a dobiveni rezultati su na slici 43. Iz grafova modulacijskih prijenosnih funkcija (MTF) (slika 43) očitane su vrijednosti od ω za $MTF=1/2$, što je zapravo recipročna vrijednost parametra k_{MTF} (tablica 2).



Slika 43 Modulacijske prijenosne funkcije (MTF) za sve četiri tiskovne podloge. $M1(\omega)$ i $M2(\omega)$ označavaju MTF papira za umjetnički tisak, sjajni i mat, dok su $M3(\omega)$ i $M4(\omega)$ oznake za ofsetnu, odnosno recikliranu tiskovnu podlogu. Za $MTF(\omega)=1/2$ očitava se vrijednost od ω .

Kao što se vidi iz slike 43 šira modulacijska prijenosna funkcija odgovara sjajnom i mat papiru za umjetnički tisak, dok je recikliranom i ofsetnom papiru pridružena uža MTF funkcija, što znači manji put fotona prije raspršenja ili apsorpcije, odnosno veći k_{MTF} parametar.

Naime, ako svjetlost prolazi kroz uzorak bez većih mogućnosti bočnog raspršenja, korelacija između k_{MTF} i S je slaba. To znači, manja vrijednost k_{MTF} , podrazumijeva veću vrijednost od ω za koju je $MTF=1/2$, pa to znači i širu MTF funkciju. Očito, široka MTF funkcija je „bolja“ jer veći ω znači veću udaljenost u mm koju svjetlost treba proći da bi se raspršila ili apsorbirala, što znači manju vjerojatnost interakcije s podlogom.

Prema eksperimentalnim podacima direktnog mjerenja MTF funkcije³, ovaj model daje prevelike rezultate za parametar k_{MTF} , pa se koristi model gdje se zanemaruje koeficijent apsorpcije K . Kao što je iz tablice 2 vidljivo, vrijednosti raspršenja S višestruko premašuju koeficijent apsorpcije K , pa je parametar k izračunan i prema modelu² sa $K=0$ uz dodatak empirijske konstante k_0 :

$$k_{model} = \frac{5,4}{S} + k_0 \quad 2. (5.1.3)$$

Iz dobivenih rezultata vidljivo je da empirijski model ima manji raspon vrijednosti parametra k_{mod} , odnosno bitno manje vrijednosti za reciklirani i ofsetni papir, što je u boljoj korelaciji sa Kubelka-Munk koeficijentom raspršenja S .

Tablica 2 Kubelka-Munk parametri apsorpcije $K(mm^{-1})$ i raspršenja $S (mm^{-1})$, njihove relativne promjene δ_K i δ_S , te MTF parametar $k_{MTF} = 1/\omega (mm)$ i $k_{model} (mm)$.

Tiskovna podloga	Premazani papir		Nepremazani papir	
	Papir za umjetnički tisak, sjajni	Papir za umjetnički tisak, mat	Ofsetni papir	Reciklirani papir
\bar{R}_∞	0,869	0,899	0,875	0,674
$K(mm^{-1})$	0,54	0,35	0,45	1.81
$S(mm^{-1})$	63.96	67,76	50,14	44,22
$\delta_K (\%)$	90	73	90	52
$\delta_S (\%)$	62	64	51	5
$k_{MTF} = 1/\omega(mm)$	0,310	0,346	0,386	0,397
$k_{model}(mm)$	0,334	0,330	0,357	0,372

5. 2 Analiza otisaka

Analiza obojenih otisaka navedenih refleksijskih veličina praćena je Murray-Daveisovom metodom (poglavlje 5. 2.1), Yule-Nielsenovim parametarom n uvedena je mjera bočnog raspršenja svjetlosti u otisnutom papiru (poglavlje 5. 2.2), te su se Kubelka-Munk teorijom dobile vrijednosti koeficijenata apsorpcije i raspršenja (poglavlje 5.2.3).

5. 2. 1 Murray-Daviesova metoda

U ovom dijelu istraživanja ispitan je utjecaj bojila, tiskovne podloge i rasterske modulacije na točnost izračuna ukupne refleksije rasterske slike preko Murray-Daviesove jednadžbe:

$$R_{M-D} = R_{\lambda t} = F_b \cdot R_b + (1 - F_b) \cdot R_p \quad 1. 3.6$$

U ovom izrazu je R_{M-D} , odnosno, $R_{\lambda t}$ reflektancija rasterske slike dobivena teoretski iz Murray-Daviesovog modela. F_b je pretpostavljena (idealna) rastertonska vrijednost, tj. udio pokrivenosti bojilom na otisnutoj podlozi. Odabrani iznosi za koje su računani i mjereni refleksijski spektri su 0,2; 0,4; 0,6 i 0,8. Dio podloge koji nije pokriven bojilom je udio podloge čistog papira, $F_p = 1 - F_b$. Reflektancija bojila R_b dobivena je spektrofotometrijskim mjerenjem za $F_b = 100\%$, a reflektancija tiskovne podloge za $F_p = 100\%$ ($F_b = 0\%$). Račun je proveden u programu Origin (matematički dodaci).

Iz razlike refleksijskih spektara:

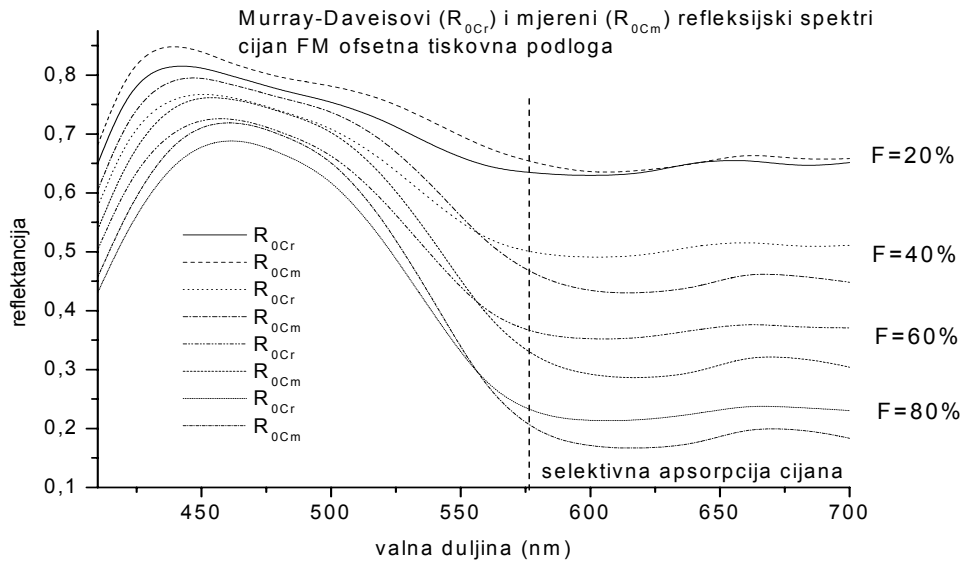
$$\Delta R = R_{M-D} - R_m \quad 1. 5.2.1$$

mjerenih, R_m , i računanih Murray-Daviesovom metodom, R_{M-D} , procijenila se je optička promjena rasterskog elementa i pratio se utjecaj bojila, primijenjene rasterske modulacije i tiskovne podloge na uočenu promjenu.

Ofsetna tiskovna podloga otisnuta frekventno moduliranim rasterom

Na slikama 44a-44d su rezultati spektrofotometrijskih mjerenja refleksije i teoretski refleksijski spektri računani prema Murray-Daviesovoj metodi (jedn. 1. 5.2.1) za osnovna bojila C, M, Y i K, tiskana klasičnim ofsetom frekventno moduliranim rasterom finoće 20 μ m (FM) na ofsetnoj tiskovnoj podlozi.

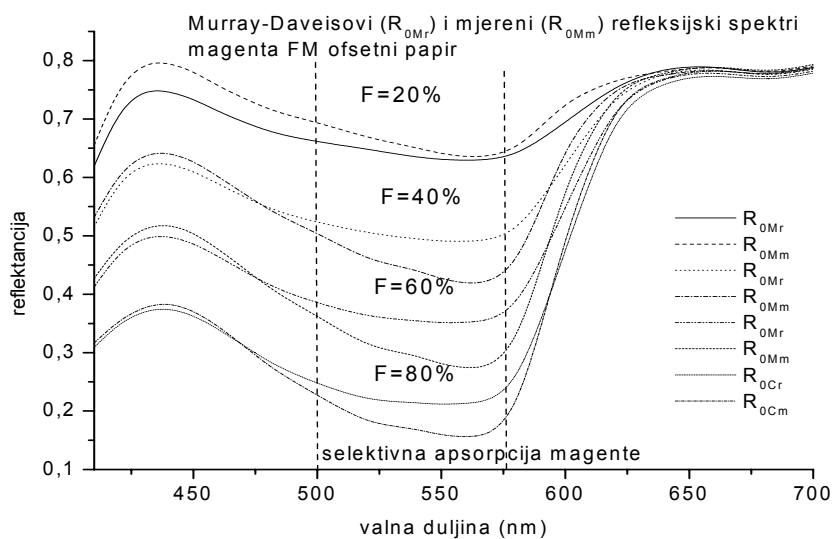
Rastertonske vrijednosti F mijenjale su se po 20% od 0 do 100%.



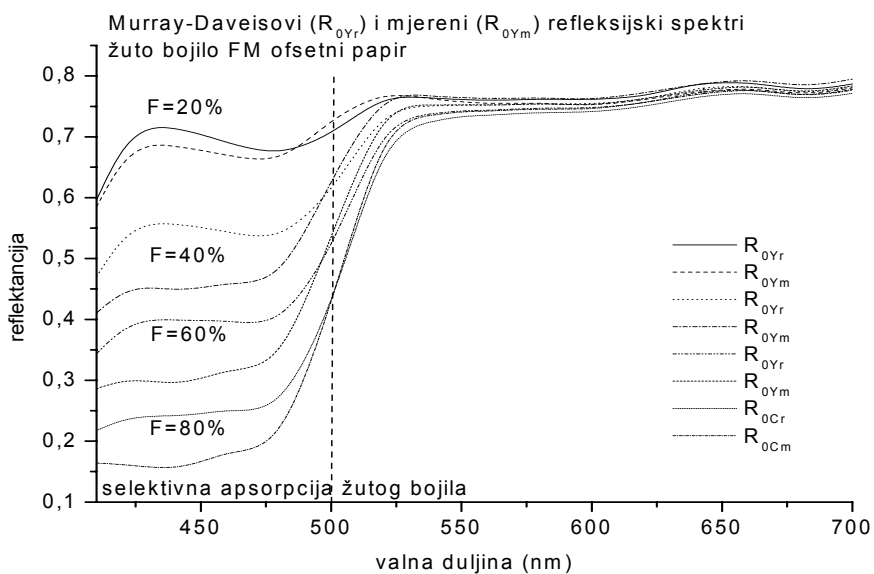
Slika 44a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0Cm}) i računani (R_{0Cr}), za cijan na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskan FM rasterom. Spektar je podijeljen s obzirom na dominantan tip interakcije između bojila i elektromagnetskog zračenja.

Na slici 44a može se pratiti promjena odnosa iznosa refleksijskih spektralnih vrijednosti dobivenih računom i mjerenjem za cijan s obzirom na rastertonsku vrijednost i s obzirom na tip interakcije između bojila i elektromagnetskog zračenja. Za najnižu promatranu rastertonsku vrijednost ($F=20\%$), mjereni refleksijski spektar ima veću vrijednost od računskog u cijelom vidljivom dijelu spektra (410-700nm), tj. $\Delta R < 0$ (jedn. 1. 5.2.1), da bi se povećanjem podloge koja je pokrivena bojilom ($F > 20\%$) takav odnos zadržao samo u području gdje cijan dominantno reflektira svjetlost (410-580) nm.

Na slici 44b su refleksijski spektri, računani i mjereni, za magentu i njihovi odnosi pokazuju isto ponašanje kao što je bilo rečeno za cijan. Međutim, za žuto bojilo postoje određene razlike (slika 44c). Za pokrivenost žutim bojilom od $F=20\%$ računске vrijednosti refleksijskih spektara su veće od mjenjenih ($\Delta R > 0$) u cijelom promatranom spektru.

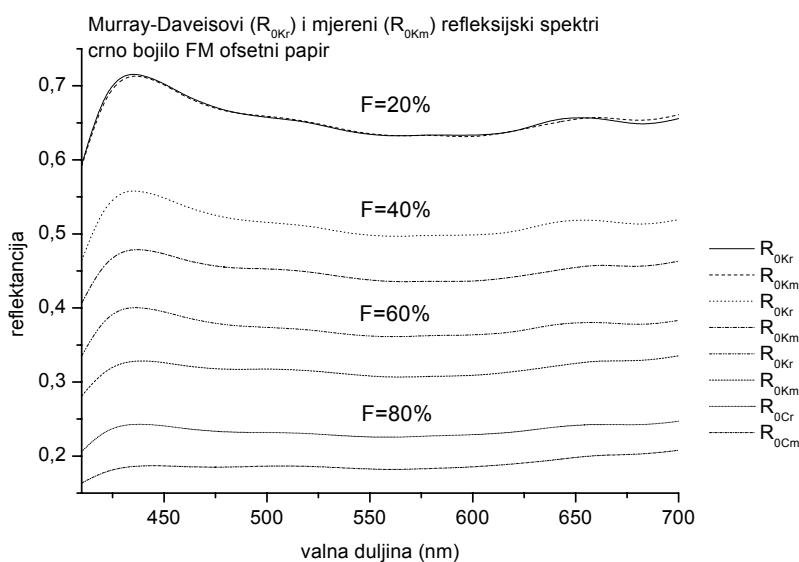


Slika 44b Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0Mm}) i računani (R_{0Mr}), za magentu na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskanu FM rasterom. Spektar je podijeljen s obzirom na dominantan tip interakcije između bojila i elektromagnetskog zračenja.



Slika 44c Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0Ym}) i računani (R_{0Yr}), za žuto bojilo (yellow) na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskano FM rasterom. Spektar je podijeljen s obzirom na dominantan tip interakcije između bojila i elektromagnetskog zračenja.

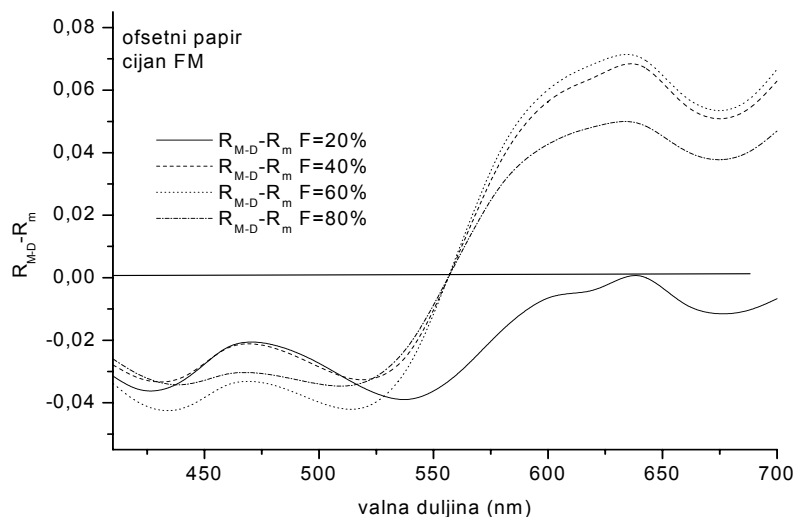
Crno bojilo se po svojstvima interakcije s elektromagnetskim zračenjem razlikuje od ostalih bojila suptraktivne smjese. Ono apsorbira podjednako u cijelom području vidljivog dijela spektra, kao što se vidi na slici 44d, pa su u cijelom promatranom spektru (410-700nm) računске vrijednosti refleksija veće od mjerenih ($\Delta R > 0$).



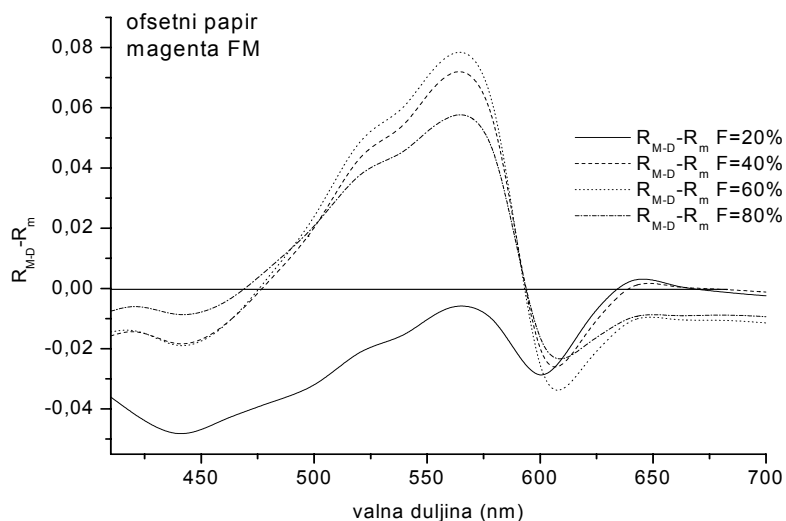
Slika 44d Refleksijski spektri dobiveni mjerenjem (R_{0Km}) i računom (R_{0Kr}) za crno bojilo na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskano FM rasterom.

Na slikama 44a-44d se uočava da je razlika reemisija u korelaciji sa zasićenjem, odnosno s rastertonskim vrijednostima i s otisnutim bojilom. Za sva bojila refleksijski spektri dobiveni Murray-Daveisovom metodom su veći od mjerenih ($\Delta R > 0$) u području selektivne apsorpcije.

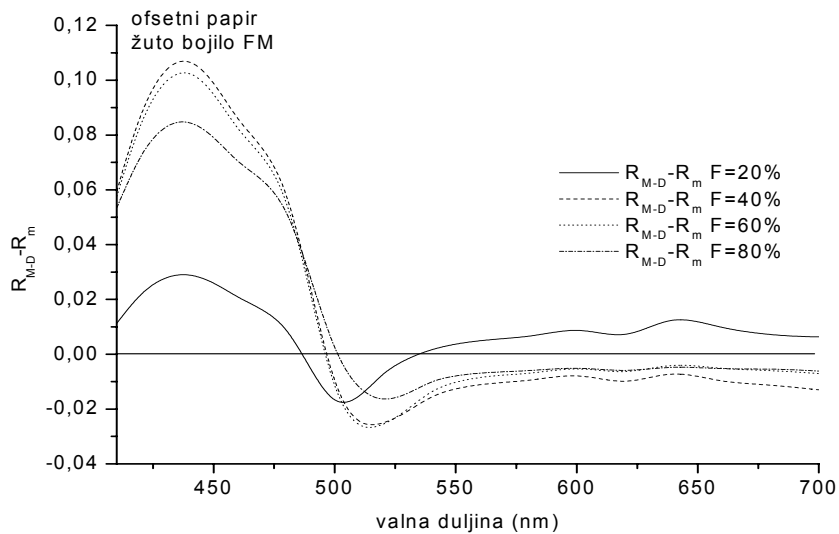
Budući da je ΔR mjera optičkog prirasta rasterskog elementa na slikama 45a-45d su eksplicite prikazane upravo razlike između teorijskih i eksperimentalnih refleksijskih spektara ΔR . Na tim slikama se može pratiti ovisnost iznosa razlike o rastertonskoj vrijednosti F , valnoj duljini λ , odnosno o vrsti otisnutog bojila.



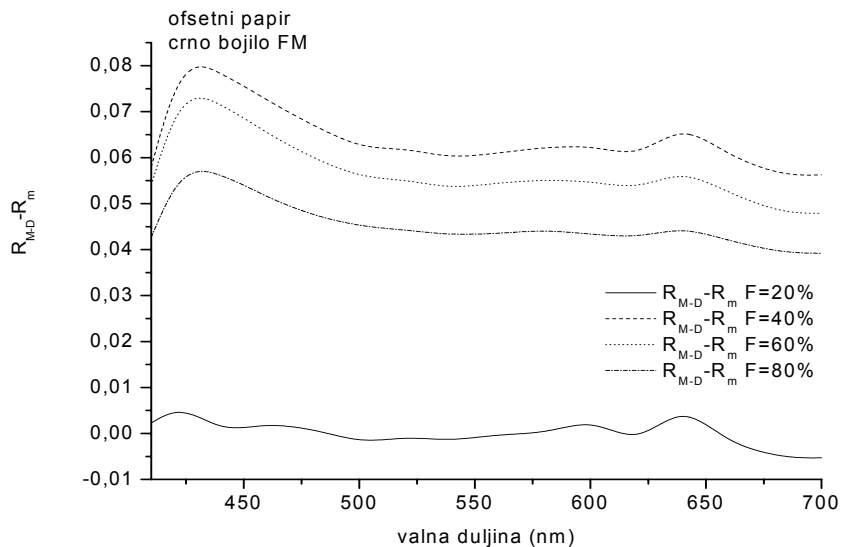
Slika 45a Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara ($\Delta R = R_{M-D} - R_m$) za cijan kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.



Slika 45b Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara ($\Delta R = R_{M-D} - R_m$) za magentu kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.



Slika 45 c Razlika računskih i mjerenih refleksijskih spektara ($\Delta R = R_{M-D} - R_m$) za žuto bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

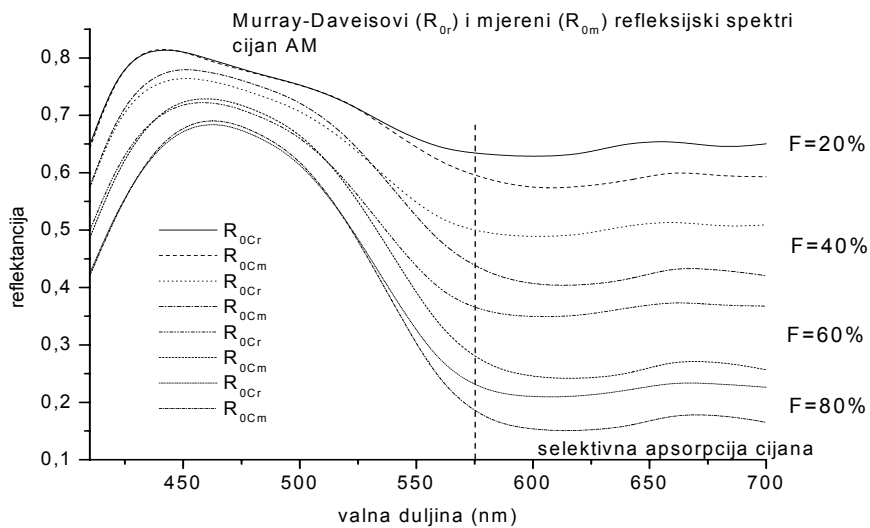


Slika 45 d Razlika računskih i mjerenih refleksijskih spektara ($\Delta R = R_{M-D} - R_m$) za crno bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti

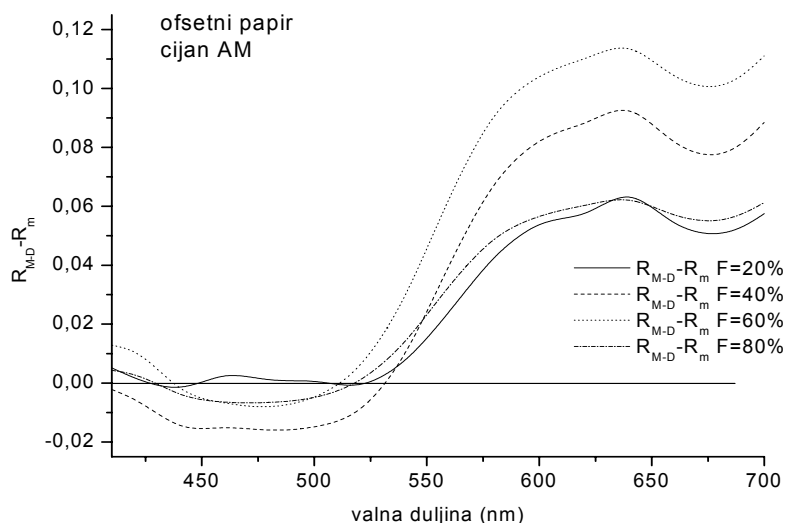
Na slikama 45a-45d se uočava da je razlika reemisija u korelaciji sa zasićenjem, odnosno s rastertonskim vrijednostima i s otisnutim bojilom. Za cijan i magentu ΔR raste s rastertonskom vrijednošću do 60%, da bi se ta vrijednost smanjila za $F=80\%$, dok je za žuto i crno bojilo razlika između računskih i mjerenih refleksijskih spektara najveća za pokrivenost od 40%.

Ofsetna tiskovna podloga otisnuta amplitudno moduliranim rasterom

Na slikama 46a-b do 49a-b su rezultati spektrofotometrijskih mjerenja refleksije i teoretski spektri prema Murray-Daviesovoj metodi, te njihova razlika, ΔR (jedn. 2. 7. 2.1), za osnovna bojila C, M, Y i K tiskana klasičnim ofsetom amplitudno moduliranim rasterom od 80 linija/cm (AM) na ofsetnoj tiskovnoj podlozi.

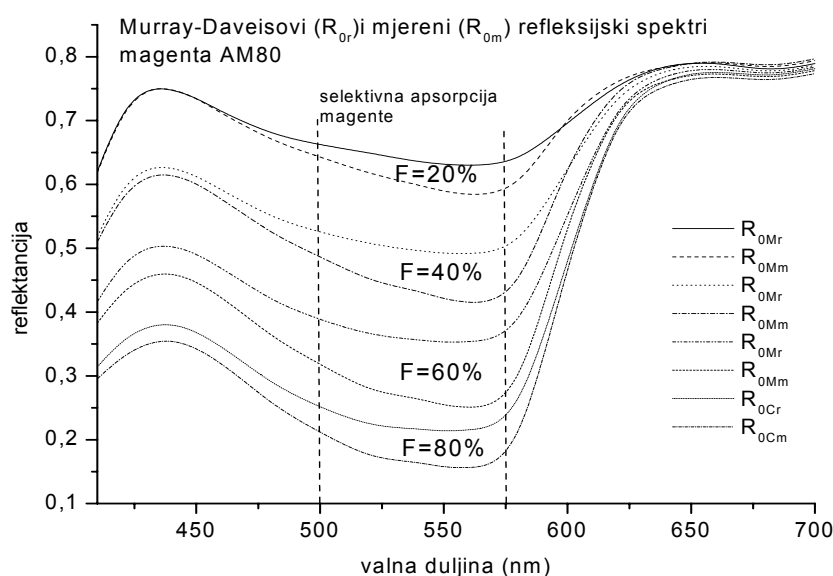


Slika 46 a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0mjC}) i računani (R_{0rC}) za cijan na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskan AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%. Spektar je podijeljen s obzirom na dominantan tip interakcije između bojila i elektromagnetskog zračenja.



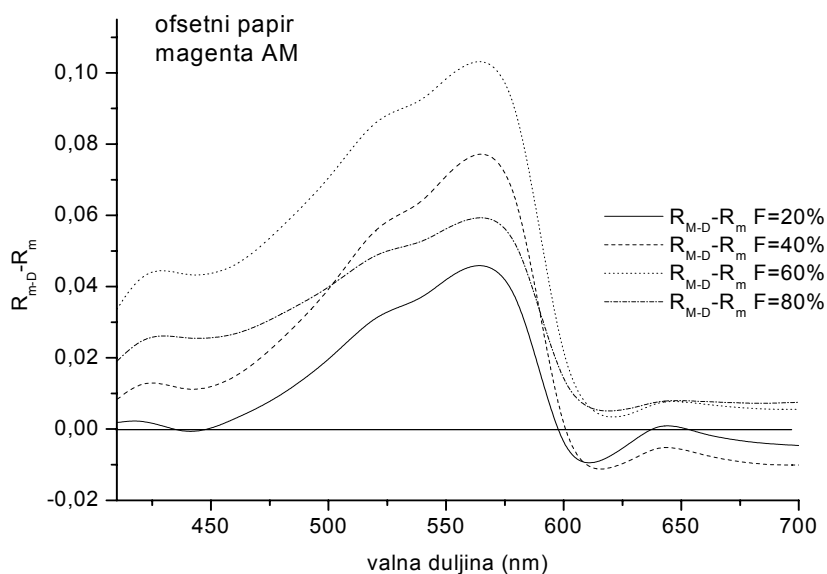
Slika 46 b Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara ($\Delta R = R_{M-D} - R_m$) za cijan kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

Na slici 46a se vide karakteristične promjene u refleksijskim spektrima s obzirom na promjenu rastertonskih vrijednosti i s obzirom na područje spektra u kojem cijan selektivno apsorbira elektromagnetsko zračenje s kojim interagira. Kako pokrivenost tiskovne podloge bojilom raste, iznos reflektancija je sve manji, posebno u području selektivne apsorpcije. Za rastertonsku vrijednost od $F=20\%$ razlika između računane i mjerene reflektancije je nula ili je pozitivna ($\Delta R \geq 0$) u cijelom promatranom spektru, dok je za $F=40, 60$ i 80% ta razlika negativna ($\Delta R < 0$) u području dominantne refleksije cijana. U području selektivne apsorpcije ($580-700\text{nm}$) $\Delta R > 0$.

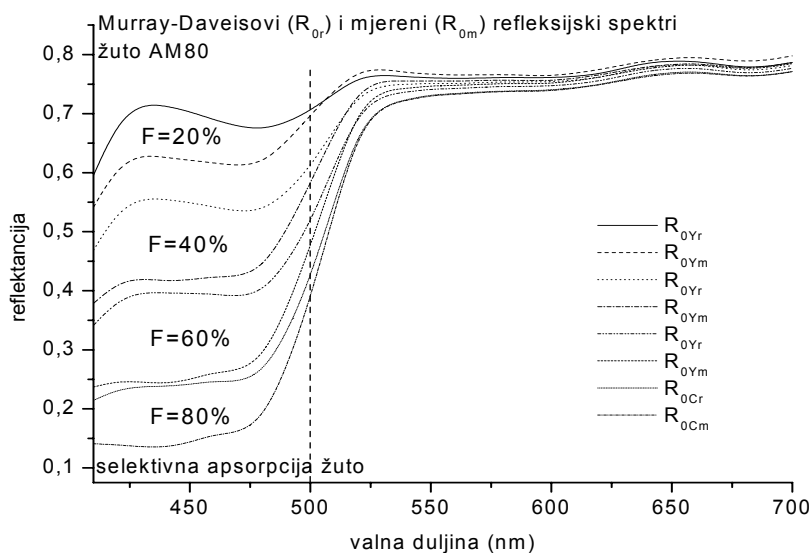


Slika 47a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0mM}) i računani (R_{0rM}), za magentu na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskanu AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%. Spektar je podijeljen s obzirom na dominantan tip interakcije između bojila i elektromagnetskog zračenja.

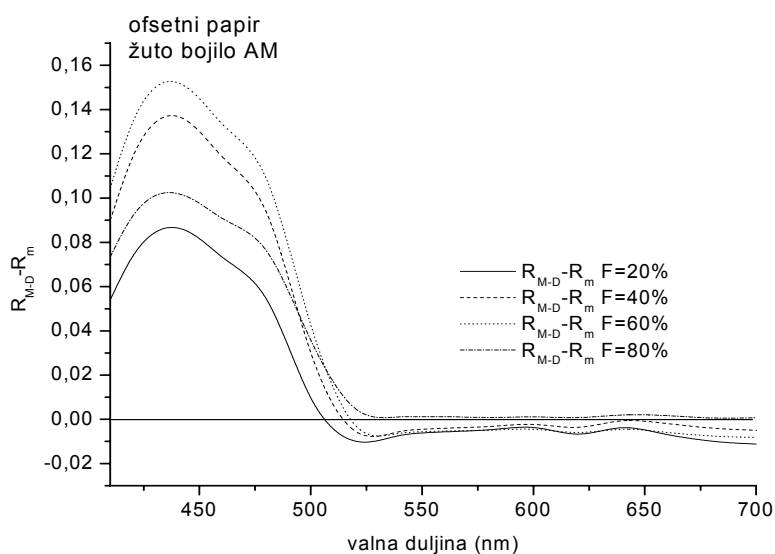
U području selektivne apsorpcije magente ($500-580\text{nm}$) i žutog bojila ($400-500\text{nm}$) računani refleksijski spektri imaju veće vrijednosti od mjerenih ($\Delta R > 0$) za sve rastertonske vrijednosti. U području dominantne refleksijske interakcije ($500-700\text{nm}$) ta razlika je negativna ili je jednaka nuli ($\Delta R \leq 0$) (slika 48b).



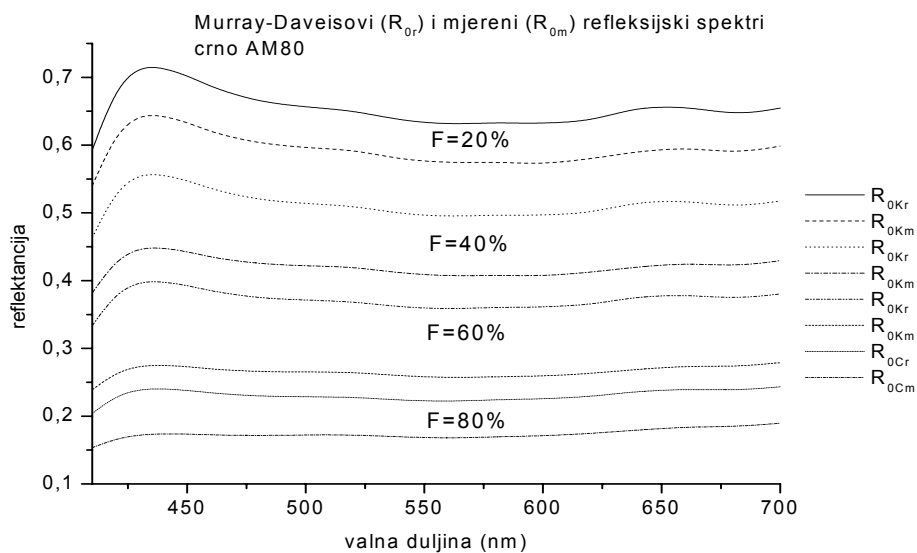
Slika 47b Razlika računskih i mjerenih refleksijskih spektara ($\Delta R = R_{M-D} - R_m$) za magentu kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.



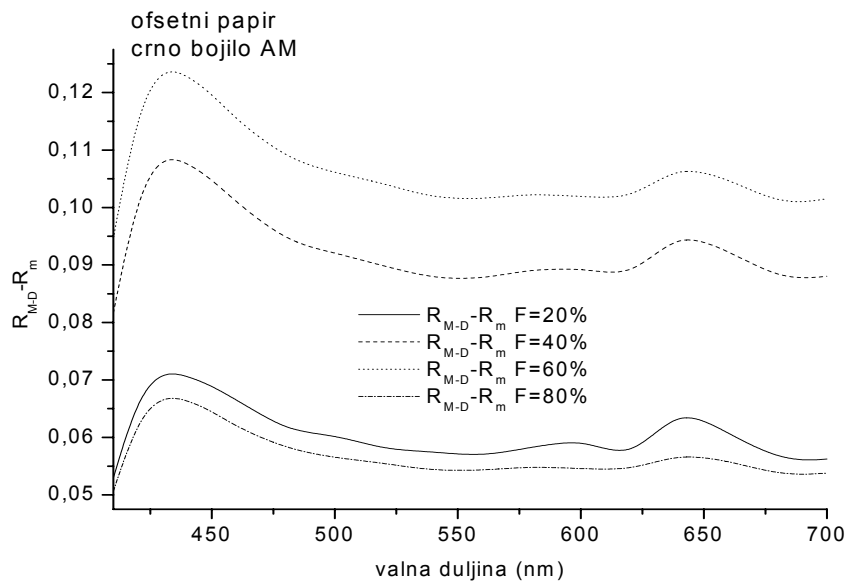
Slika 48 a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0mY}) i računani (R_{0rY}), za žuto bojilo na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskano AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%. Spektar je podijeljen s obzirom na dominantan tip interakcije između bojila i elektromagnetskog zračenja.



Slika 48 b Razlika računskih i mjerenih refleksijskih spektara ($\Delta R = R_{M-D} - R_m$) za žuto bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.



Slika 49 a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0mK}) i računani (R_{0rK}), za crno bojilo na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskano AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%.



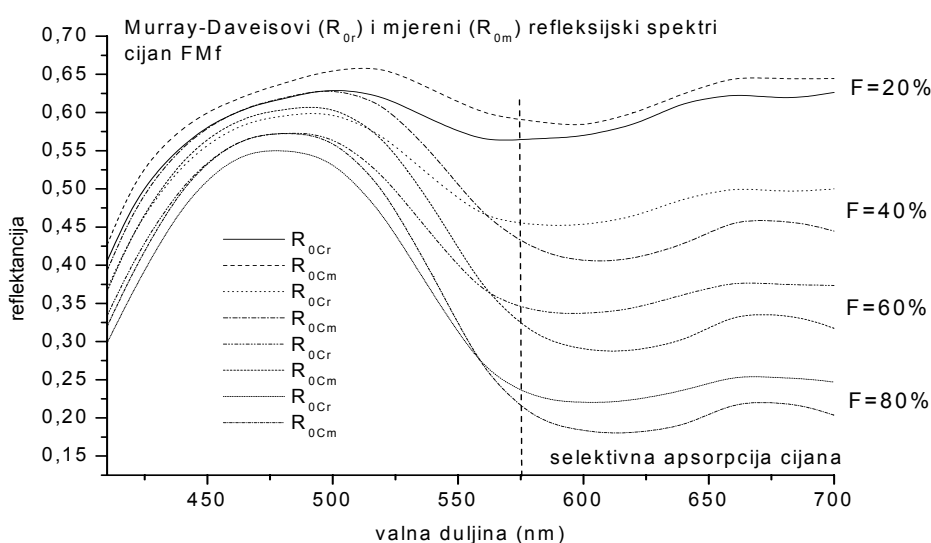
Slika 49b Razlika računskih i mjerenih refleksijskih spektara ($\Delta R = R_{M-D} - R_m$) za crno bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti. $\Delta R > 0$ u cijelom vidljivom dijelu spektra.

Karakterističan refleksijski spektar crnog bojila je na slici 49a. Zbog podjednake apsorpcije u cijelom vidljivom dijelu spektra $\Delta R > 0$ za sve promatrane rastertonske vrijednosti.

Na slikama 46a-d i 47a-d se uočava da je razlika reemisija u korelaciji sa zasićenjem, odnosno s rastertonskim vrijednostima i s otisnutim bojilom. Za sva bojila ΔR raste s rastertonskom vrijednošću do 60%, da bi se ta vrijednost smanjila za F=80%.

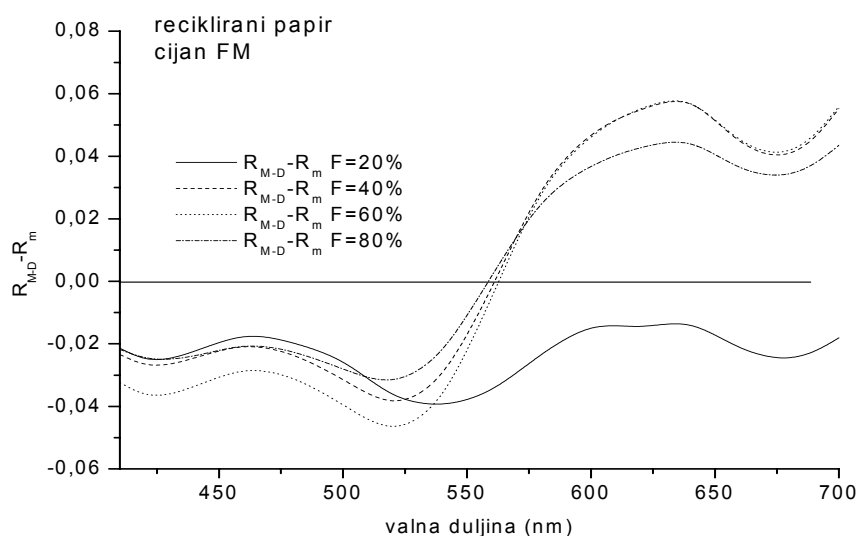
Reciklirana tiskovna podloga otisnuta frekventno moduliranim rasterom

Na slikama 50a-b do 53a-b su rezultati spektrofotometrijskih mjerenja refleksije i teoretski spektri prema Murray-Daviesovoj metodi, te njihova razlika, ΔR (jedn.2 (5.2.1)), za osnovna bojila CMYK tiskane klasičnim ofsetom frekventno moduliranim rasterom finoće 20 μm (FM) na recikliranoj tiskovnoj podlozi. Rastertonske vrijednosti F mijenjale su se po 20% od 0 do 100%.

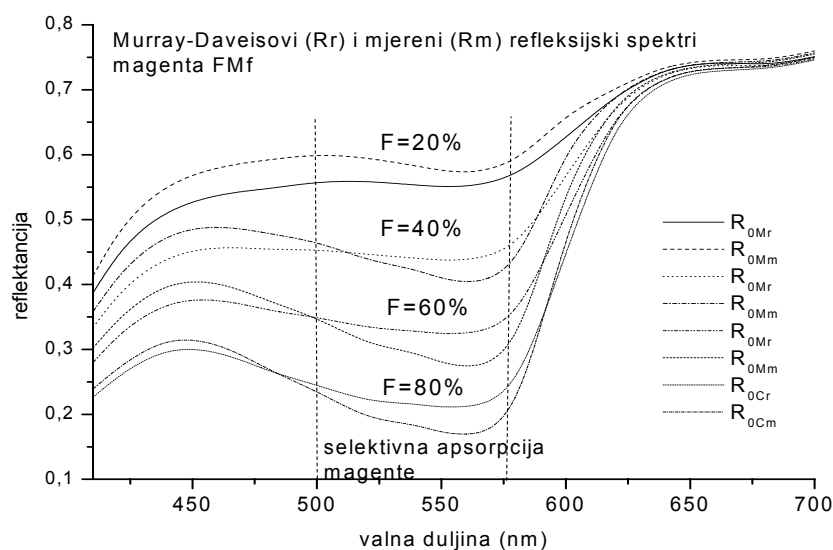


Slika 50 a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0mC}) i računani (R_{0rC}), za cijan na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskan FM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%. Spektar je podijeljen s obzirom na dominantan tip interakcije između bojila i elektromagnetskog zračenja.

Na slici 50a se vide već prije uočene promjene u predznaku razlike između računanih i mjenjenih refleksijskih spektara. Naime, za $F=20\%$ $\Delta R < 0$ u cijelom promatranom spektru (slika 50b), dok je za veće rastertonske vrijednosti $\Delta R > 0$ u području selektivne apsorpcije.

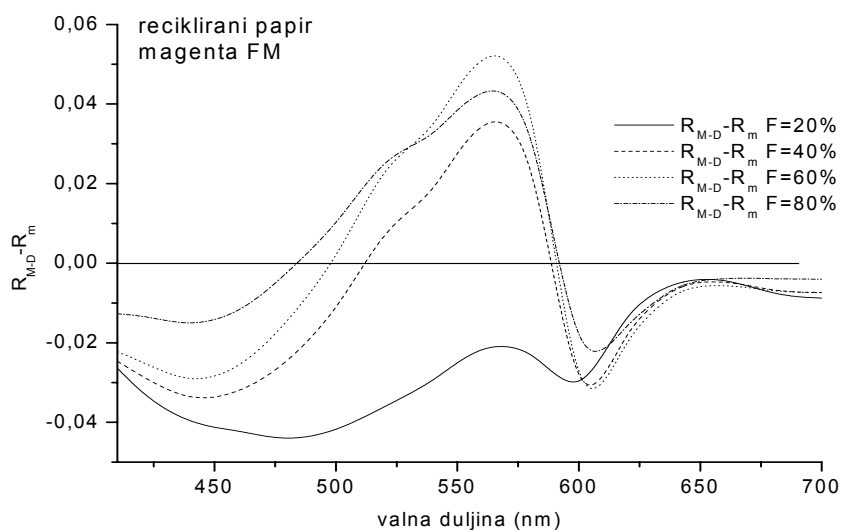


Slika 50b Razlika računskih i mjerenih refleksijskih spektara ($\Delta R = R_{M-D} - R_m$) za cijan kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

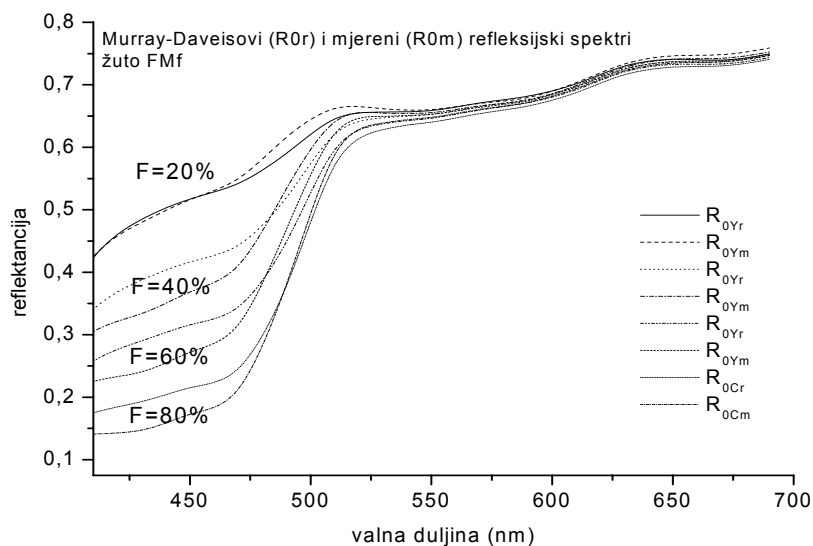


Slika 51 a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0mM}) i računani (R_{0rM}), za magentu na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskanu FM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%. Spektar je podijeljen s obzirom na dominantan tip interakcije između bojila i elektromagnetskog zračenja.

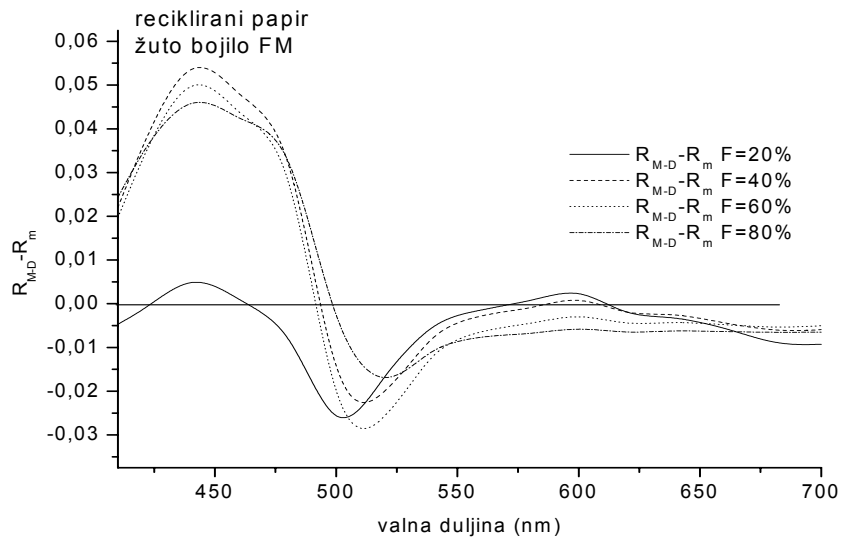
Slično ponašanje s obzirom na razliku između računanih i mjerenih refleksijskih spektara pokazuju magenta i žuto bojilo što se vidi na slikama 51a-b i 52a-b, dok za crno vrijedi $\Delta R > 0$ u cijelom promatranom spektru (slike 53a-b).



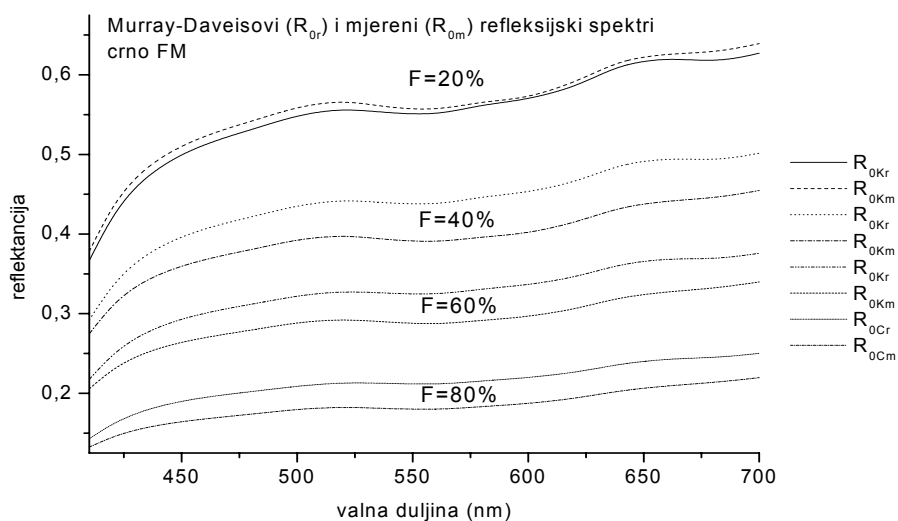
Slika 51b Razlika računskih i mjerenih refleksijskih spektara ($\Delta R = R_{M-D} - R_m$) za magentu kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.



Slika 52 a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0mY}) i računani (R_{0rY}), za žuto bojilo na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskano FM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%. Spektar je podijeljen s obzirom na dominantan tip interakcije između bojila i elektromagnetskog zračenja.

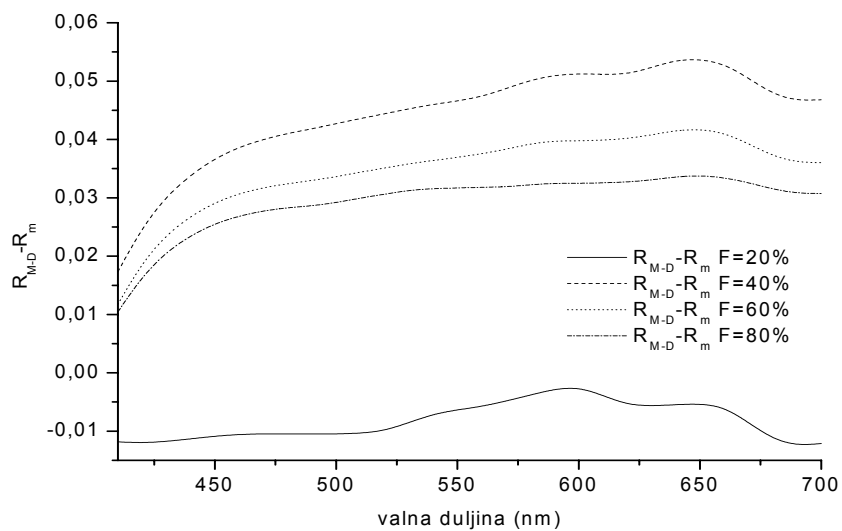


Slika 52 b Razlika računskih i mjerenih refleksijskih spektara ($\Delta R = R_{M-D} - R_m$) za žuto bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.



Slika 53a Refleksijski spektri dobiveni mjerenjem (R_{0mK}) i računom (R_{0rK}) za crno bojilo na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskano FM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%.

Na slici 53a može se vidjeti utjecaj tiskovne podloge na refleksiju čak i za rastertonsku vrijednost od $F=80\%$ (manji iznos reflektancije u plavom dijelu spektra u odnosu na crveni). Međutim, razlika između računanih i mjerenih refleksija (slika 53b) pokazuje istu ovisnost o valnoj duljini i rastertonskoj vrijednosti kao i za ofsetnu tiskovnu podlogu (slika 45d).

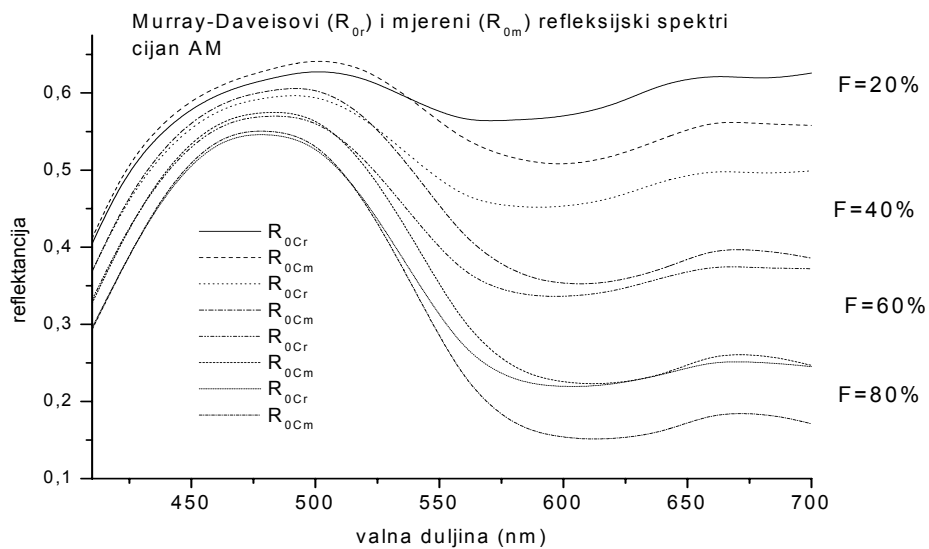


Slika 53 b Razlika računskih i mjerenih refleksijskih spektara ($\Delta R = R_{M-D} - R_m$) za crno bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

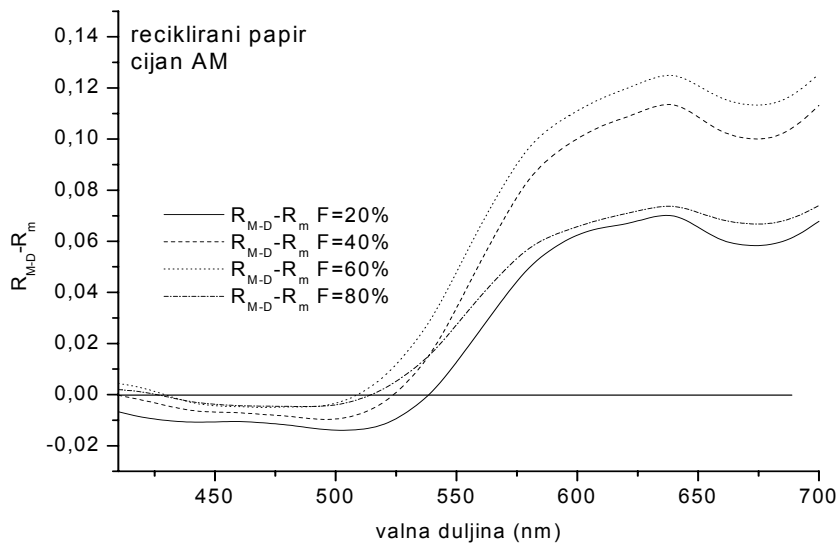
Kao što se može uočiti iz predočenih slika, opće ponašanje slijedi rezultate analize za ofsetnu tiskovnu podlogu, dok se utjecaj rastera očituje kroz iznose reflektancija i njihovih razlika.

Reciklirana tiskovna podloga otisnuta amplitudno moduliranim rasterom

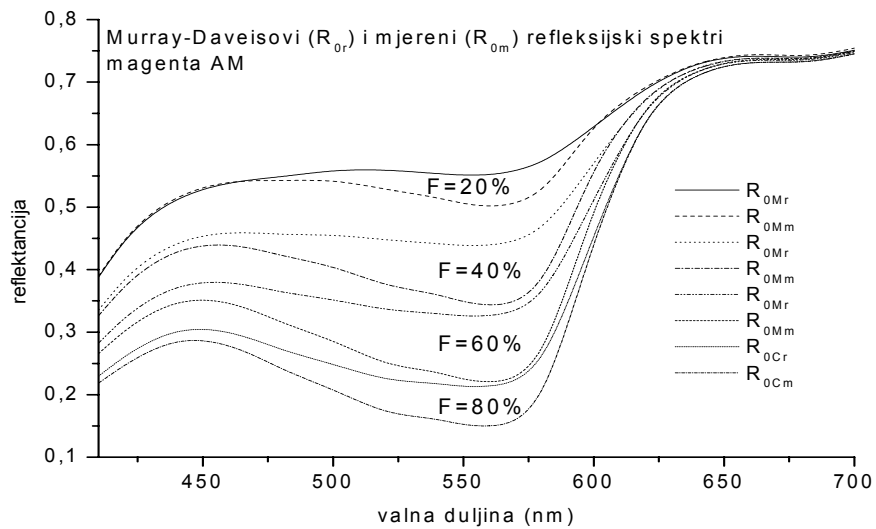
Na slikama 54a-b do 57a-b su dani refleksijski spektri, za osnovna bojila CMYK tiskana amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm (AM) na recikliranoj podlozi, računani Murray-Daviesovom metodom i dobiveni eksperimentom, te njihova razlika kao funkcija valne duljine.



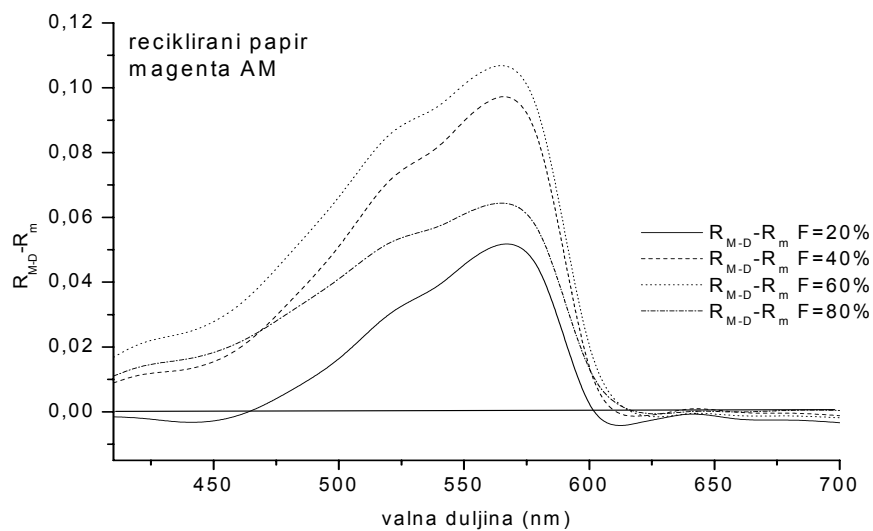
Slika 54 a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0mC}) i računani (R_{0rC}), za cijan na recikliranoj tiskovnoj podlozi tiskan AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%.



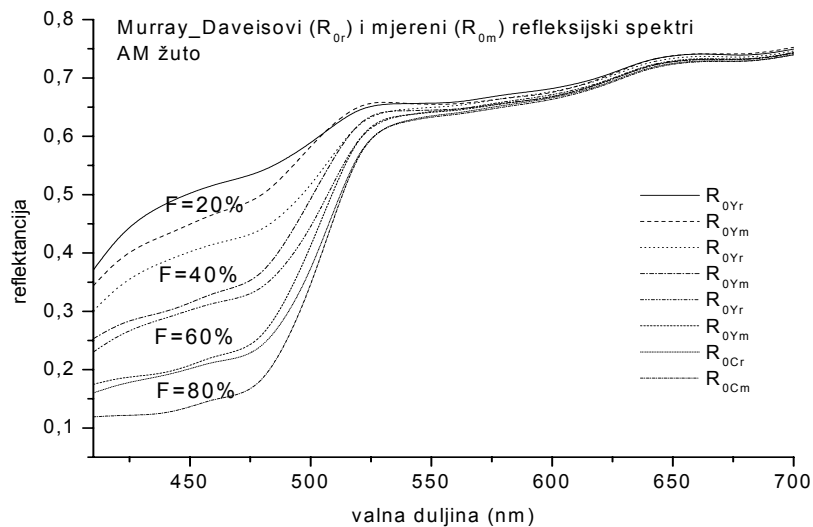
Slika 54b Razlika računskih i mjenih refleksijskih spektara ($\Delta R = R_{M-D} - R_m$) za cijan kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.



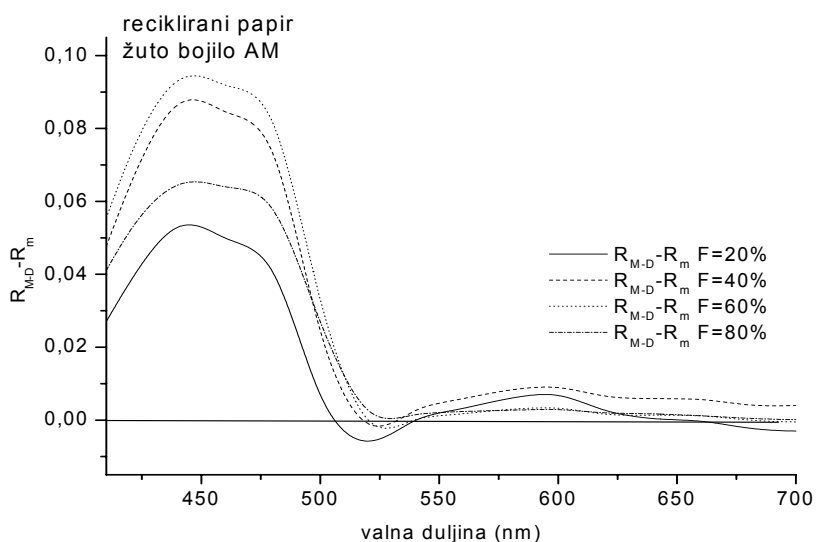
Slika 55a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0mM}) i računani (R_{0rM}), za magentu na recikliranoj tiskovnoj podlozi tiskanu AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%.



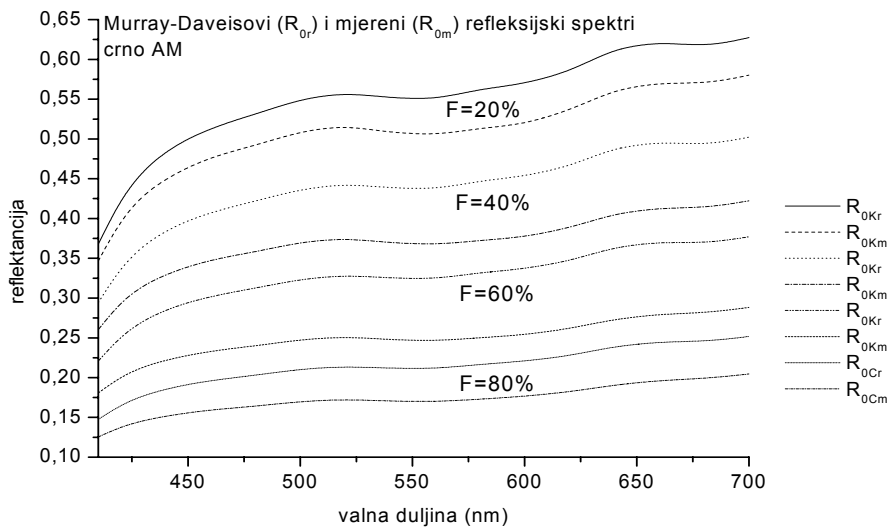
Slika 55b Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara ($\Delta R = R_{M-D} - R_m$) za magentu kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.



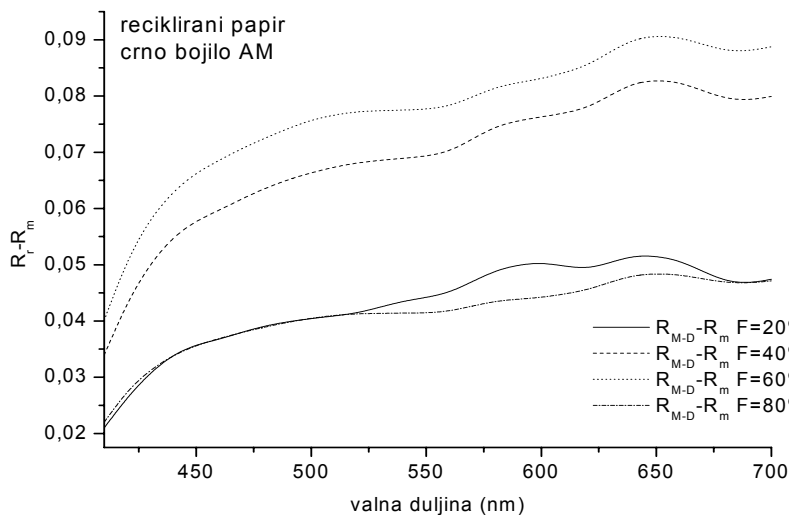
Slika 56 a Refleksijski spektri dobiveni mjerenjem (R_{0mY}) i računom (R_{0rY}) za žuto bojilo na recikliranoj tiskovnoj podlozi tiskano AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%.



Slika 56b Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara ($\Delta R = R_{M-D} - R_m$) za žuto bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.



Slika 57 a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0mK}) i računani (R_{0rK}), za crno bojilo na recikliranoj tiskovnoj podlozi tiskano AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%.

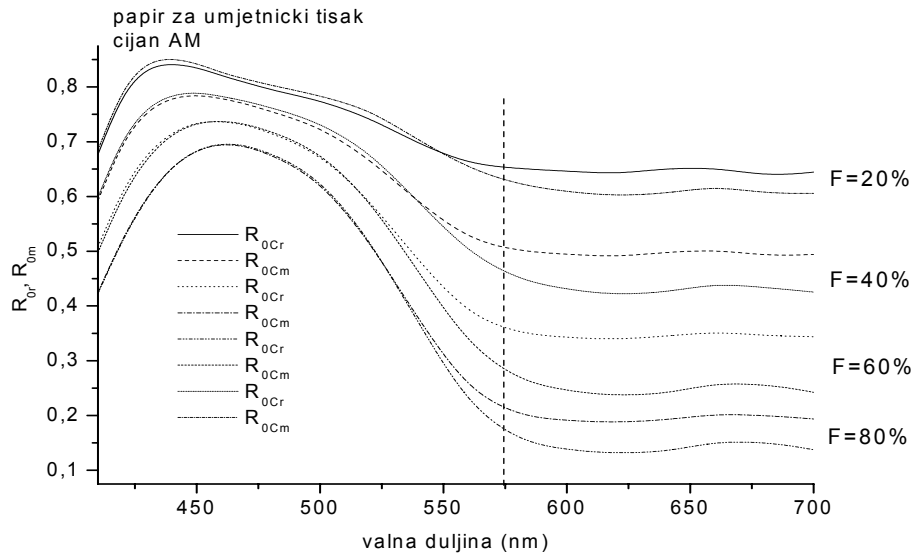


Slika 57b Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara ($\Delta R = R_{M-D} - R_m$) za crno bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

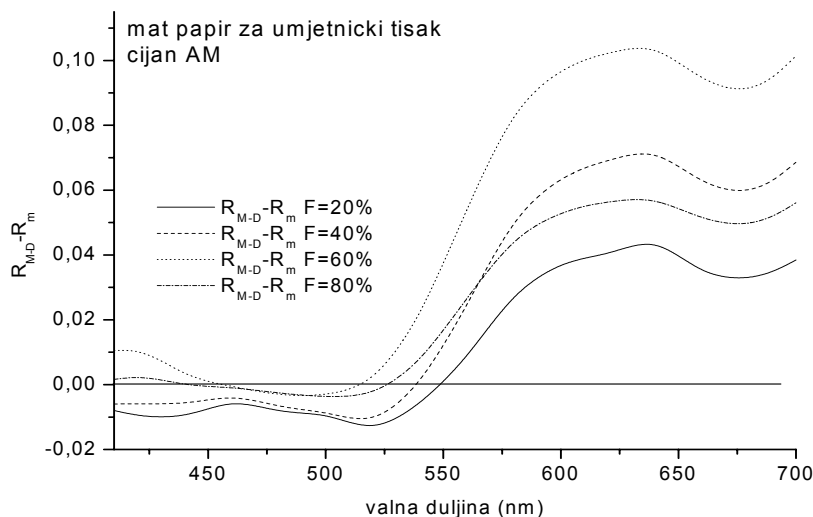
Kao što se može uočiti iz predočenih slika, opće ponašanje slijedi rezultate analize za ofsetnu tiskovnu podlogu, dok se utjecaj rastera očituje kroz iznose razlika reflektancija, računanih i mjenjenih.

Papir za umjetnički tisak, mat, otisnut amplitudno moduliranim rasterom

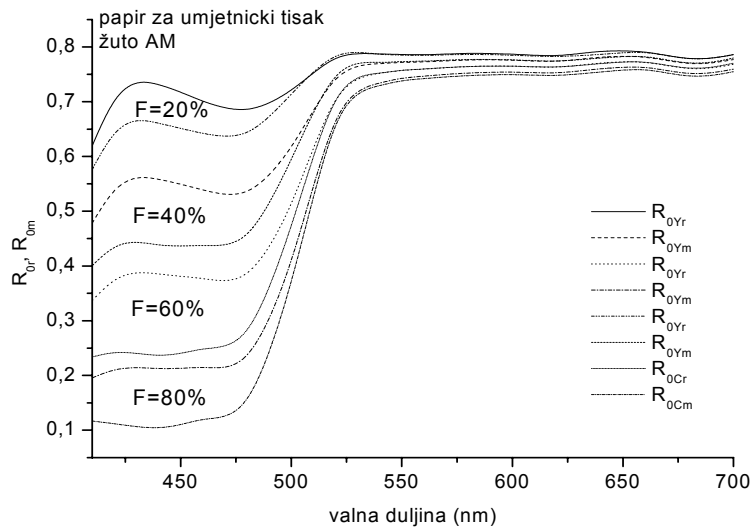
Na slikama 58a-b do 60a-d su dani refleksijski spektri, za osnovna bojila CMYK tiskana amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm (AM) na mat papiru za umjetnički tisak, računani Murray-Daviesovom metodom i dobiveni eksperimentom, te njihova razlika kao funkcija valne duljine.



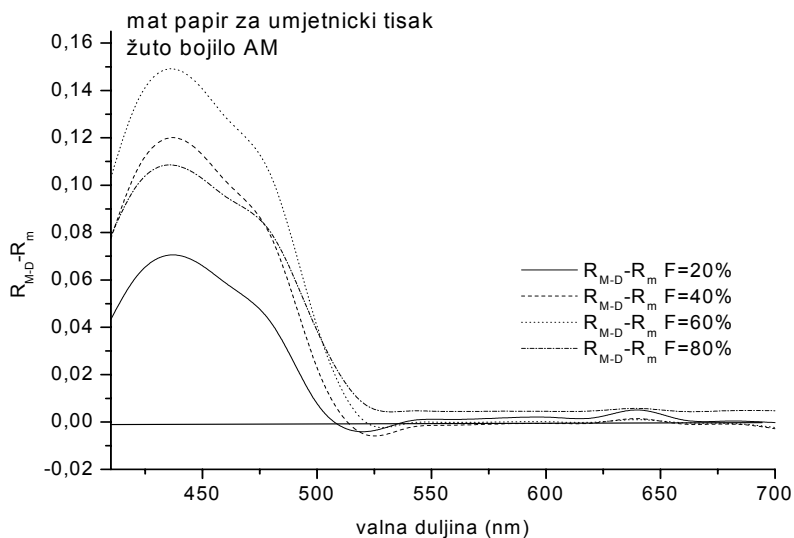
Slika 58a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0mC}) i računani (R_{0rC}), za cijan na mat papiru za umjetnički tisak tiskan AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%.



Slika 58b Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara ($\Delta R = R_{M-D} - R_m$) za cijan kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

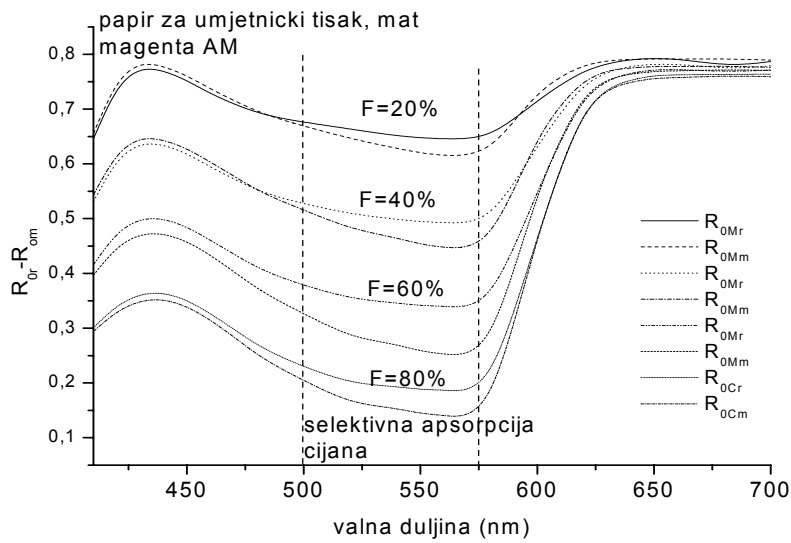


Slika 59a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0mY}) i računani (R_{0rY}), za žuto bojilo na mat papiru za umjetnički tisak tiskano AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%.

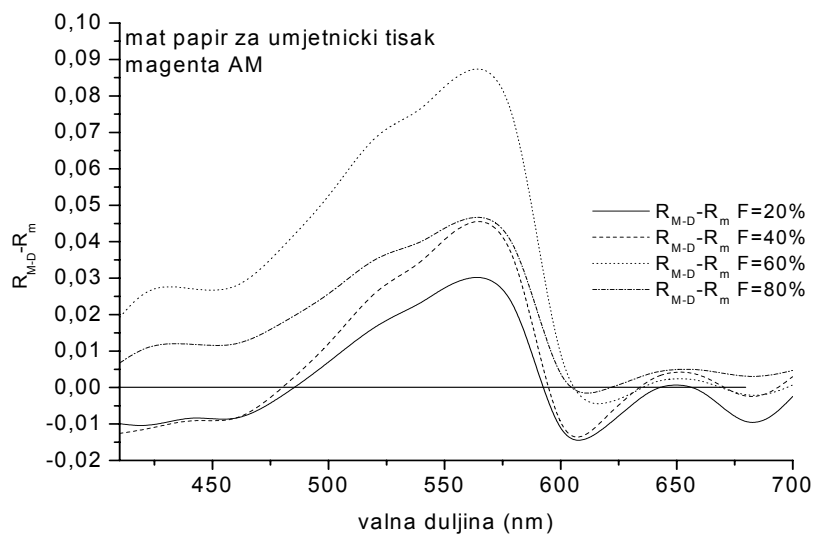


Slika 59b Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara ($\Delta R = R_{M-D} - R_m$) za žuto bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

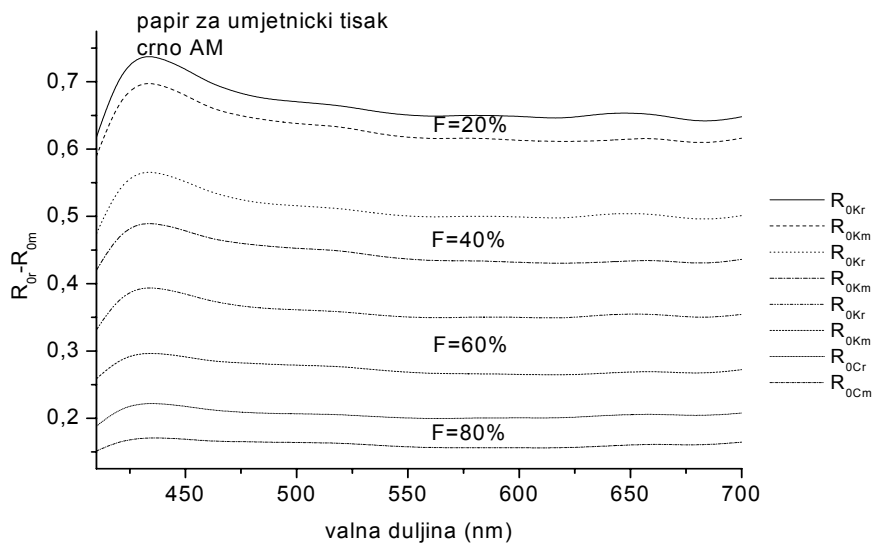
Kao što se može uočiti iz predočenih slika, opće ponašanje slijedi rezultate analize za ofsetnu i recikliranu tiskovnu podlogu, dok se utjecaj rastera očituje kroz iznose reflektancija i njihovih razlika.



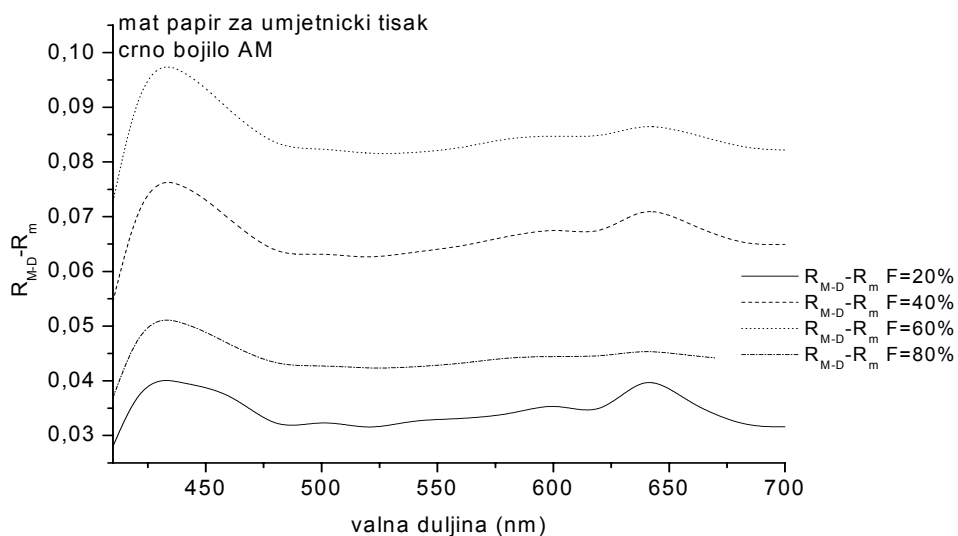
Slika 60a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0mM}) i računani (R_{0rM}), za magentu na mat papiru za umjetnički tisak tiskanu AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%.



Slika 60b Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara ($\Delta R = R_{M-D} - R_m$) za magentu kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.



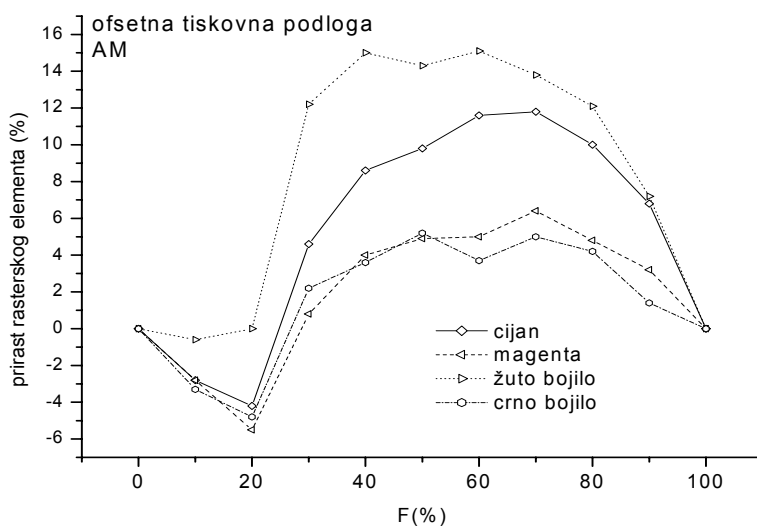
Slika 60c Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0mK}) i računani (R_{0rK}), za crno bojilo na mat papiru za umjetnički tisak tiskano AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%.



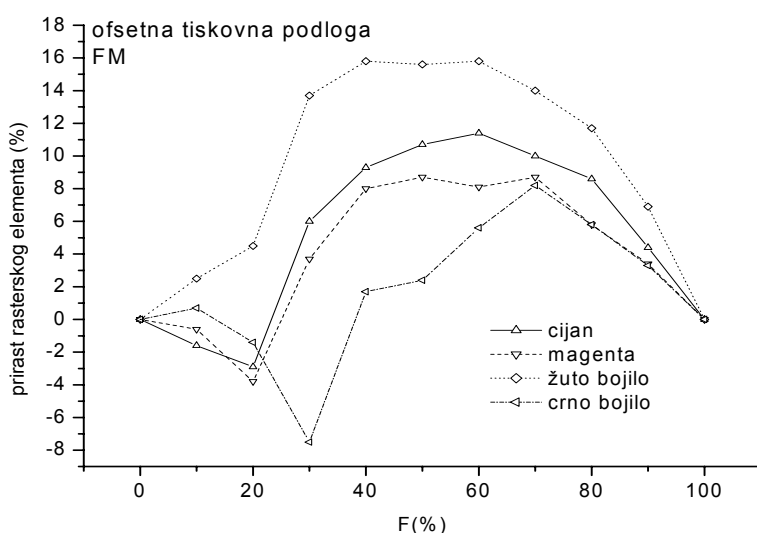
Slika 60d Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara ($\Delta R = R_{M-D} - R_m$) za crno bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

Slikovna analiza

U cilju potvrde Murray-Daviesove metode napravljena je analiza istih uzoraka uobičajenom metodom analize slike i dobiveni rezultati su na slikama 61 a i b.



Slika 61a Razlika između stvarne i teoretske rastertonske vrijednosti za ofsetnu tiskovnu podlogu za osnovna bojila C,M,Y i K otisnuta amplitudno moduliranim rasterom.



Slika 61b Razlika između stvarne i teoretske rastertonske vrijednosti za ofsetnu tiskovnu podlogu za osnovna bojila C,M,Y i K otisnuta frekventno moduliranim rasterom.

5. 2. 2 Yule-Nielsenova korekcija

Zbog uočenih neslaganja između teoretskih rezultata dobivenih Murray-Daveisovom metodom i eksperimentalnih rezultata spektrofotometrijskih mjerenja uvodi se Yule-Nielsenova korekcija- empirijski parametar n (jedn. 5. 3.7):

$$R_{\lambda t} = \left(F_b \cdot \sqrt[n]{R_b} + (1 - F_b) \cdot \sqrt[n]{R_p} \right)^n \quad 5. 3.7$$

U ovom radu uvedeni empirijski parametar n računa se podešavanjem (fitanjem) na dobivene refleksijske spektre:

$$R_{\lambda mi}^x = F_b \cdot R_{bi}^x + (1 - F_b) \cdot R_{pi}^x, \quad x = \frac{1}{n} \quad i = 0, 1, 2, \dots, 29 \quad 1. 5.2.2$$

U ovoj jednadžbi $R_{\lambda mi}$, R_{bi} i R_{pi} su jednostupčane matrice od 30 članova koje predstavljaju mjerene spektre u refleksiji od 410 do 700nm za svakih 10nm:

$R_{\lambda mi}$ ukupna refleksija rasterske slike za $F_b = 0,2; 0,4; 0,6$ i $0,8$

R_{bi} refleksija bojila (C,M,Y i K) za $F_b = 1$

R_{pi} refleksija tiskovne podloge za $F_b = 0$.

Dakle, u Yule-Nielsenovom izrazu 1. (5.2.2) $R_{\lambda t}$ je zamijenjen eksperimentalno dobivenim spektrima $R_{\lambda m}$, pa je jedina nepoznanica dobivene transcendentne jednadžbe upravo parametar n . Takav tip jednadžbi se rješava numerički, što je i učinjeno korištenjem matematičkog programa Mathcad, 2002 Professional.

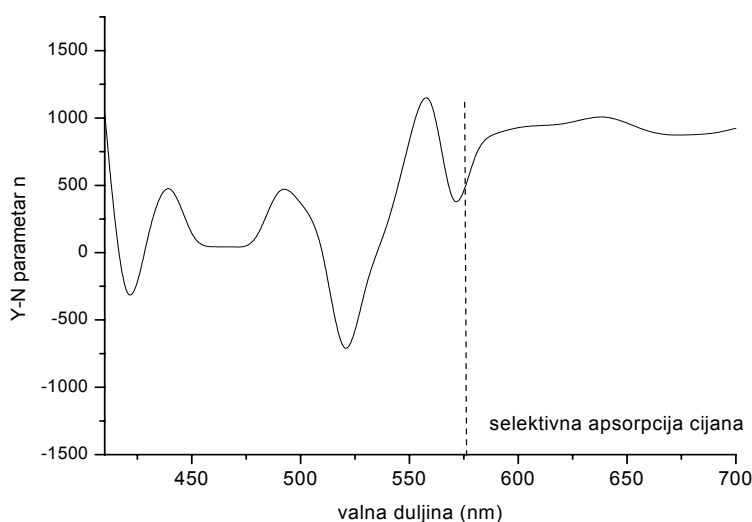
Račun je proveden za nepremazane tiskovne podloge, ofsetnu i recikliranu, te od premazanih za mat papir za umjetnički tisak. Otisci su dobiveni frekventno moduliranim rasterom finoće $20\mu\text{m}$ sa osnovnim bojilima CMYK.

Područja u kojima su rješenja transcendentne jedndžbe za Yule-Nielsenov parametar n kompleksna, negativna i nisu funkcija valne duljine su na slikama 62a-c za ofsetnu tiskovnu podlogu otisnutu frekventno moduliranim rasterom.

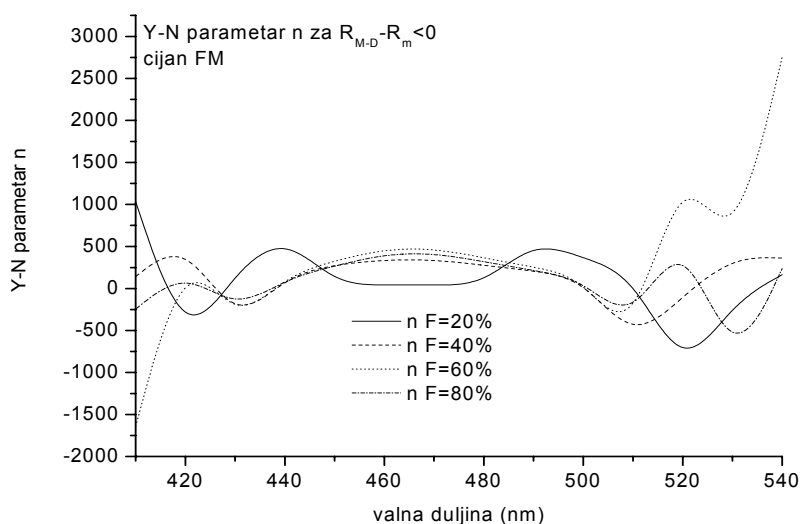
Područja u kojima su rješenja transcendentne jedndžbe za Yule-Nielsenov parametar n realna su na slikama 63a-d i 64a-d za ofsetnu tiskovnu podlogu, a za recikliranu na slikama 65a-d i 66a-d.

Ofsetna tiskovna podloga otisnuta frekventno moduliranim rasterom

U cilju analize Yule-Nielsenovog parametra n najprije su se odredila područja u kojima parametar n ima realna, fizikalno prihvatljiva rješenja.

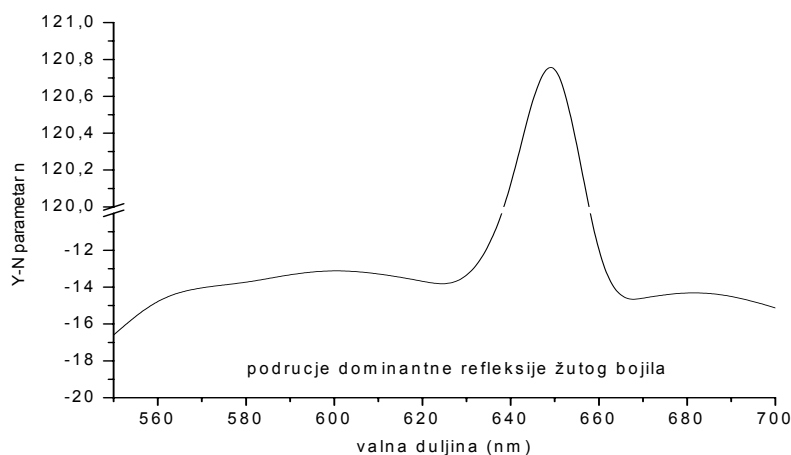


Slika 62a Rješenje transcendentne jednadžbe za cijan otisnut FM rasterom na ofsetnoj tiskovnoj podlozi za $F=20\%$.



Slika 62b Rješenja transcendentne jednadžbe za parametar n rastertonskih vrijednosti $F=20, 40, 60$ i 80% u području dominantne refleksije cijana za $\Delta R < 0$.

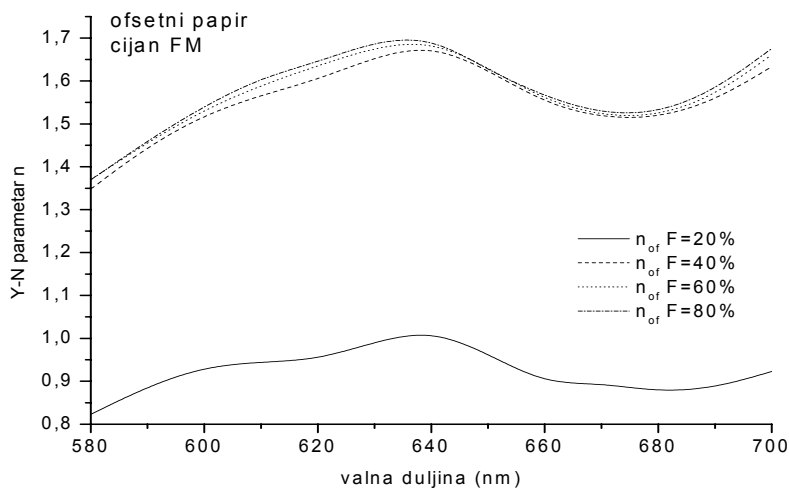
Na slici 62a vidi se rješenje transcendentne jedn. 1. 5.2.2 za parametar n u slučaju cijana, rastertonske vrijednosti od 20%. U cijelom promatranom području spektra vrijednosti Yule –Nielsenovog parametra n nisu u području fizikalnog rješenja.



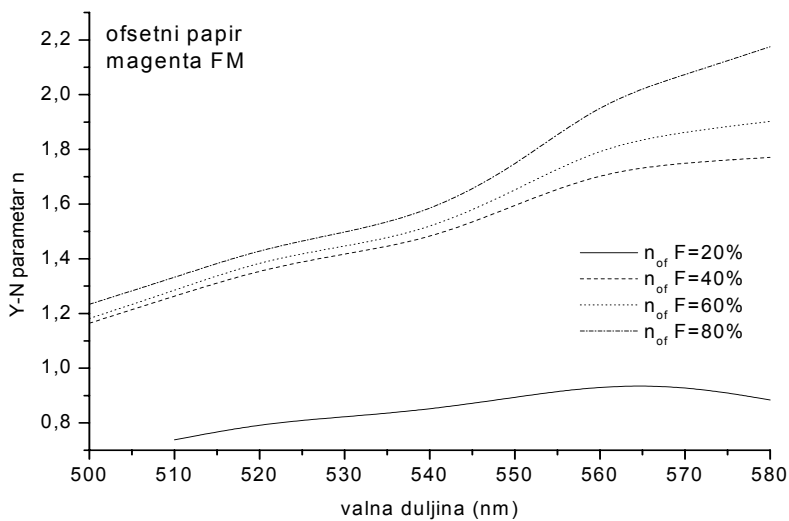
Slika 62c Rješenja transcendentne jednadžbe za parametar n za $F=20\%$, u području dominantne refleksije žutog bojila.

Iz slike 62b se uočava da nefizikalna rješenja za n ne ovise samo o rastertonskoj vrijednosti već i o tipu inercije između upadnog elektromagnetskog zračenja i podloge, odnosno bojila. Naime, bez obzira na rastertonsku vrijednost parametar n nema fizikalno prihvatljiva rješenja u području dominantne refleksije cijana ((410-580nm). Za žuto bojilo $\Delta R > 0$ je izvan područja selektivne apsorpcije, pa n poprima niz skokovitih (pozitivnih i negativnih), pa čak i kompleksnih, neprihvatljivih vrijednosti (slika 62c).

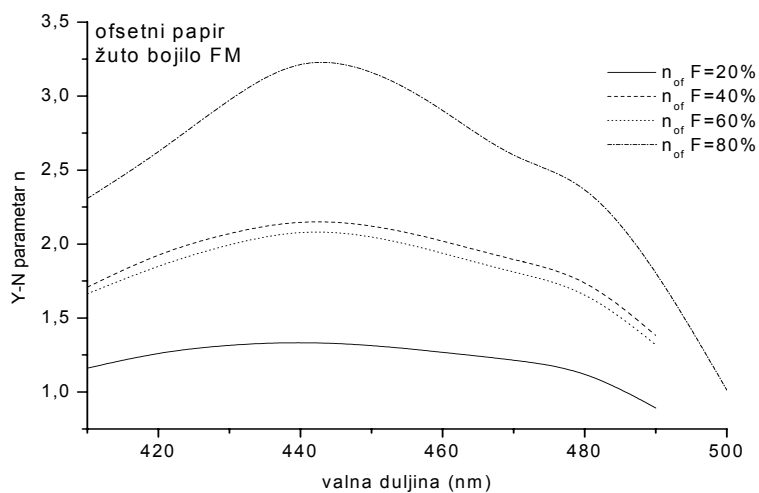
Dakle, na slikama 63a-d su realne vrijednosti Yule-Nielsenovog parametra n kao rješenja transcendentne jednadžbe u onim dijelovima spektra gdje osnovna bojila CMYK selektivno apsorbiraju upadno elektromagnetsko zračenje.



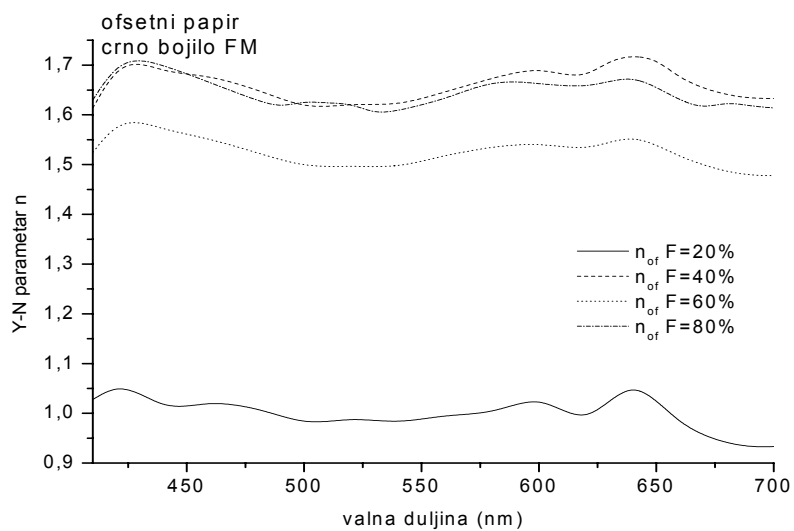
Slika 63a Yule-Nielsenov parametar n kao funkcija rastertonske vrijednosti i valne duljine u području selektivne apsorpcije cijana.



Slika 63b Yule-Nielsenov parametar n kao funkcija rastertonske vrijednosti i valne duljine u području selektivne apsorpcije magente.



Slika 63c Yule-Nielsenov parametar n kao funkcija rastertonske vrijednosti i valne duljine u području selektivne apsorpcije žutog bojila.



Slika 63d Yule-Nielsenov parametar n kao funkcija rastertonske vrijednosti i valne duljine u području selektivne apsorpcije crnog bojila.

Na slici 63d se može pratiti ovisnost realnih rješenja za parametar n s obzirom na rastertonsku vrijednost i valnu duljinu u cijelom promatranom spektru, jer crno bojilo nema selektivne apsorpcije.

Tablica 3: Srednje vrijednosti, te pripadne standardne devijacije parametra n , za ofsetnu podlogu otisnutu frekventno moduliranim rasterom od $20\mu\text{m}$, po rastućim rastertonskim vrijednostima od 20% do 80% u području selektivne apsorpcije.

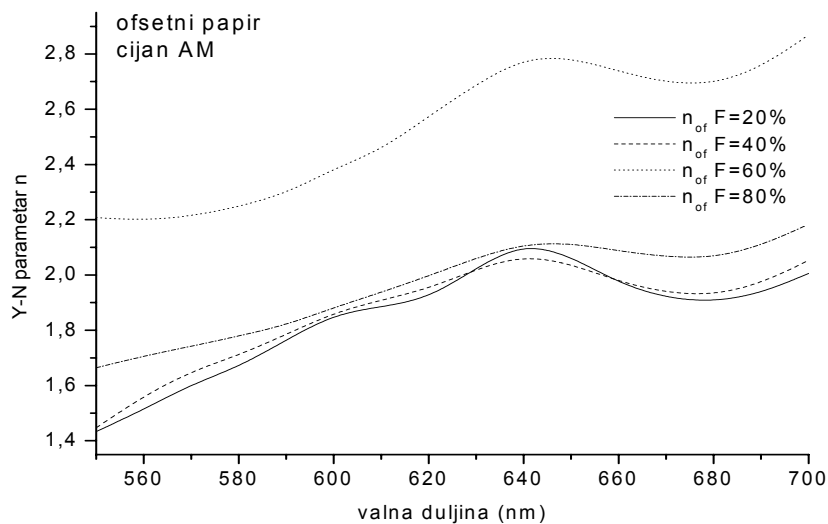
F (%)	$n_{\text{of cijan}}$	$n_{\text{of magenta}}$	$n_{\text{of žuto bojilo}}$	$n_{\text{of crno bojilo}}$
20	$0,922\pm 0,015$	$0,857\pm 0,025$	$1,215\pm 0,046$	$0,999\pm 0,026$
40	$1,531\pm 0,033$	$1,467\pm 0,074$	$1,901\pm 0,083$	$1,661\pm 0,017$
60	$1,545\pm 0,034$	$1,517\pm 0,086$	$1,828\pm 0,081$	$1,526\pm 0,048$
80	$1,553\pm 0,035$	$1,606\pm 0,106$	$2,515\pm 0,216$	$1,646\pm 0,056$

Kao što se vidi iz Tablice 3, najveće vrijednosti parametra n dobivene podešavanjem mjerenih vrijednosti prema Yule-Nielsenovom izrazu pridružene su žutom bojilu, dok su za ostala bojila vrijednosti podjednake.

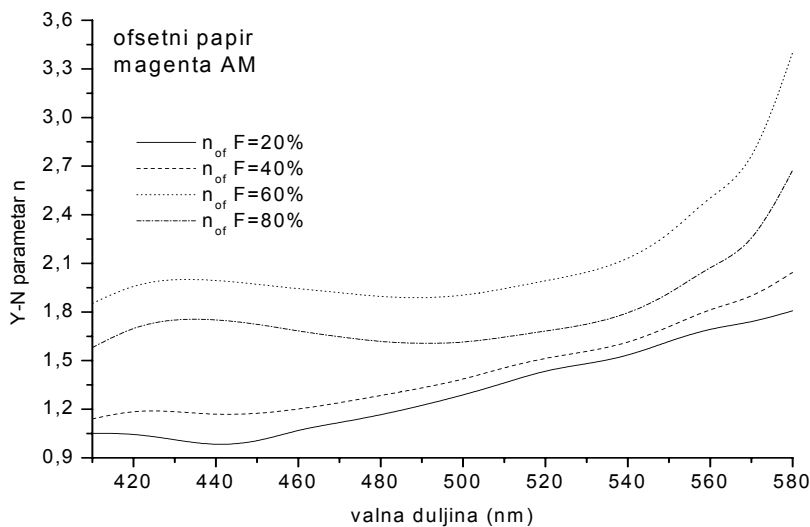
Za sva bojila vrijednosti parametra n rastu kako kako raste rastertonska vrijednost s izuzetkom crnog bojila.

Ofsetna tiskovna podloga otisnuta amplitudno moduliranim rasterom

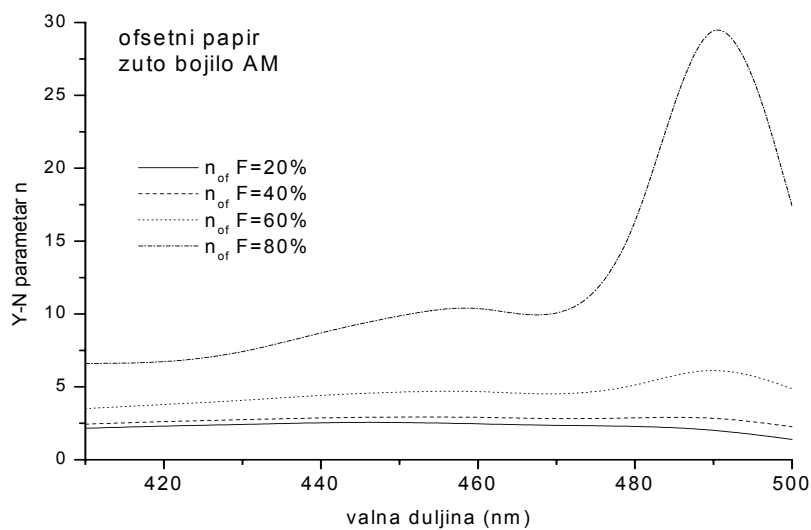
Rješenja transcendentne jedndžbe za Yule-Nielsenov parametar n kao funkcije valne duljine i rastertonske vrijednosti su na slikama 64a-d za ofsetnu tiskovnu podlogu otisnuta amplitudno moduliranim rasterom.



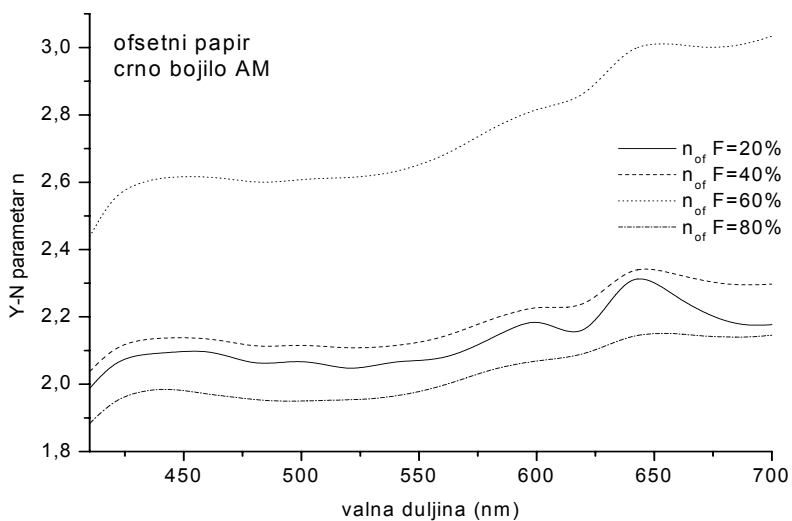
Slika 64a Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske pokrivenosti bojilom, za ofsetnu tiskovnu podlogu otisnutu cijanom, amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm.



Slika 64b Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske pokrivenosti bojilom, za ofsetnu tiskovnu podlogu otisnutu magentom, amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm.



Slika 64c Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske pokrivenosti bojilom, za ofsetnu tiskovnu podlogu otisnutu žutim bojilom, amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm.



Slika 64d Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske pokrivenosti bojilom, za ofsetnu tiskovnu podlogu otisnutu crnim bojilom, amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm.

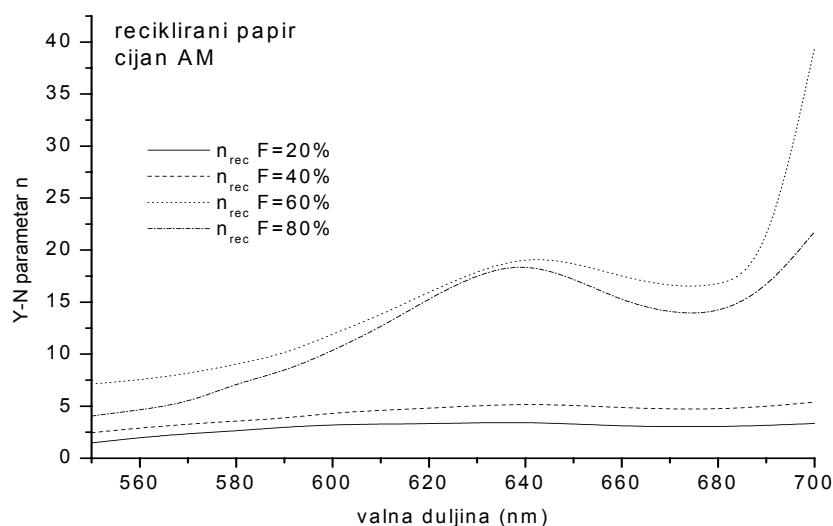
*Tablica 4: Srednje vrijednosti parametra **n** i pripadne standardne devijacije za CMYK sustav bojila otisnut amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm na ofsetnoj tiskovnoj podlozi.*

F (%)	n _{of} cijan	n _{of} magenta	n _{of} žuto bojilo	n _{of} crn bojilo
20	1,925±0,120	1,283±0,258	2,263±0,340	2,128±0,081
40	1,939±0,105	1,402±0,241	2,745±0,236	2,187±0,088
60	2,612±0,203	2,050±0,227	4,610±0,881	2,747±0,177
80	2,016±0,125	1,748±0,169	7,680±0,720	2,028±0,082

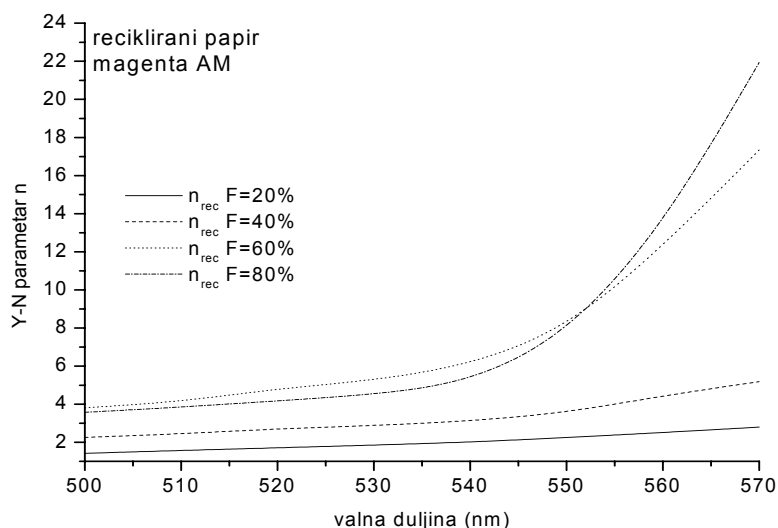
Kao što se vidi iz tablice 4 najveće vrijednosti parametra **n** za ofsetnu tiskovnu podlogu tiskanu frekventno moduliranim rasterom su pridružene žutom bojilu. Srednja vrijednost za F=80% je računana u području 410-470nm zbog velike promjene u iznosu parametra **n** od 480 do 500nm (slika 64c). Vrijednosti parametra **n** su maksimalne za sva bojila pri F=60%, s izuzetkom žutog bojila.

Reciklirana tiskovna podloga otisnuta amplitudno moduliranim rasterom

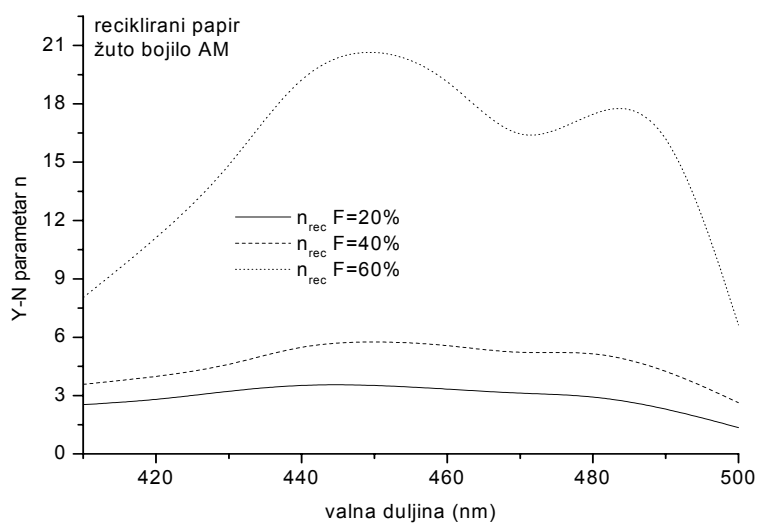
Rješenja transcendentne jedndžbe za Yule-Nielsenov parametar n kao funkcije valne duljine i rastertonske vrijednosti su na slikama 65a-d za recikliranu tiskovnu podlogu otisnuta frekventno moduliranim rasterom.



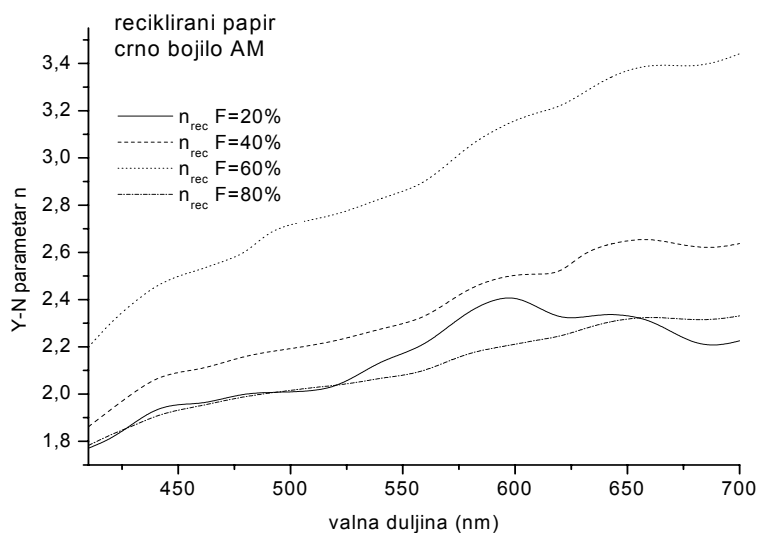
Slika 65a Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za recikliranu tiskovnu podlogu otisnuta cijanom, amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm.



Slika 65b Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za recikliranu tiskovnu podlogu otisnuta magentom, amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm.



Slika 65c Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za recikliranu tiskovnu podlogu otisnutu žutim bojilom, amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm.



Slika 65d Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za recikliranu tiskovnu podlogu otisnutu crnim bojilom, amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm.

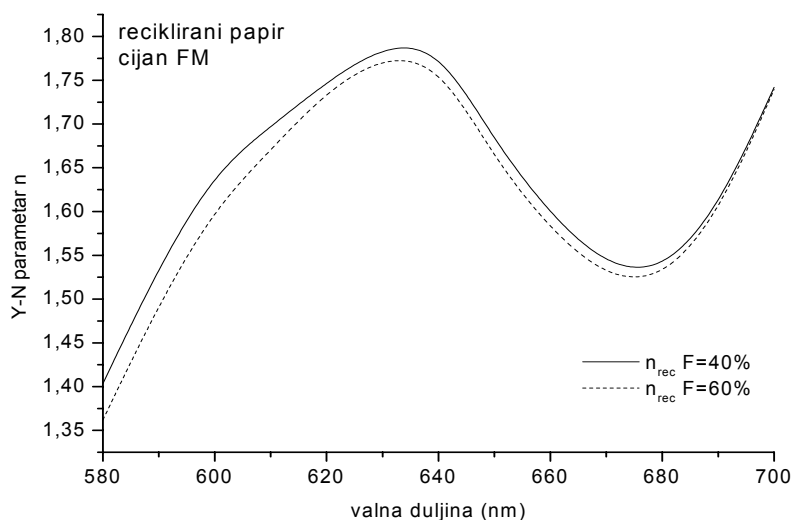
Tablica 5: Srednje vrijednosti parametra n i pripadne standardne devijacije za CMYK sustav bojila otisnut amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm na recikliranoj tiskovnoj podlozi

F (%)	n_{rec} cijan	n_{rec} magenta	n_{rec} žuto bojilo	n_{rec} crno bojilo
20	3,112 ±0,081	1,940±0,167	2,884±0,212	2,144±0,034
40	4,599 ±0,168	3,190±0,345	4,658±0,329	2,340±0,044
60	16,655 ±2,020	7,252±1,552	15,217±1,614	2,917±0,068
80	13,838 ±1,249	7,502±2,085		2,110±0,030

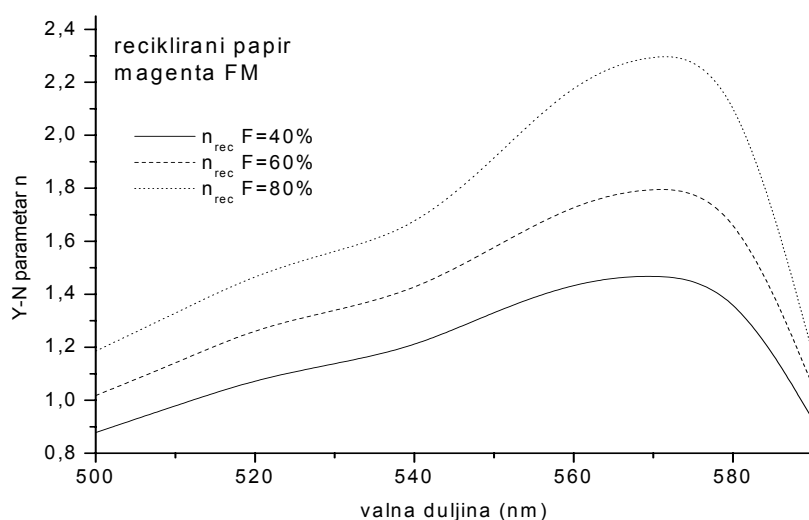
Iz slika 65a, b i d se može pratiti velika porast vrijednosti parametra n u crvenom dijelu spektra. Za cijan otisnut amplitudno moduliranim rasterom na recikliranom papiru dobivene su najveće vrijednosti parametra n , a sva bojila imaju maksimalan parametar n za F=60%.

Reciklirana tiskovna podloga otisnuta frekventno moduliranim rasterom

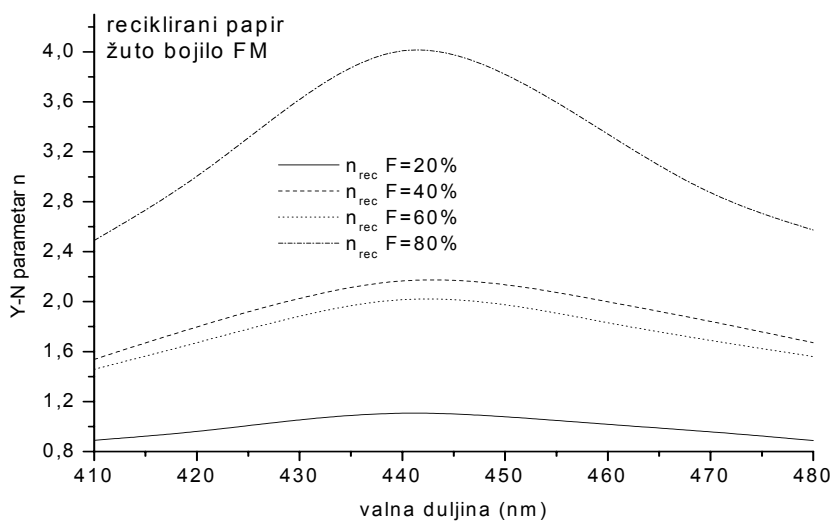
Rješenja transcendentne jedndžbe za Yule-Nielsenov parametar n kao funkcije valne duljine i rastertonske vrijednosti su na slikama 66a-d za recikliranu tiskovnu podlogu otisnuta frekventno moduliranim rasterom.



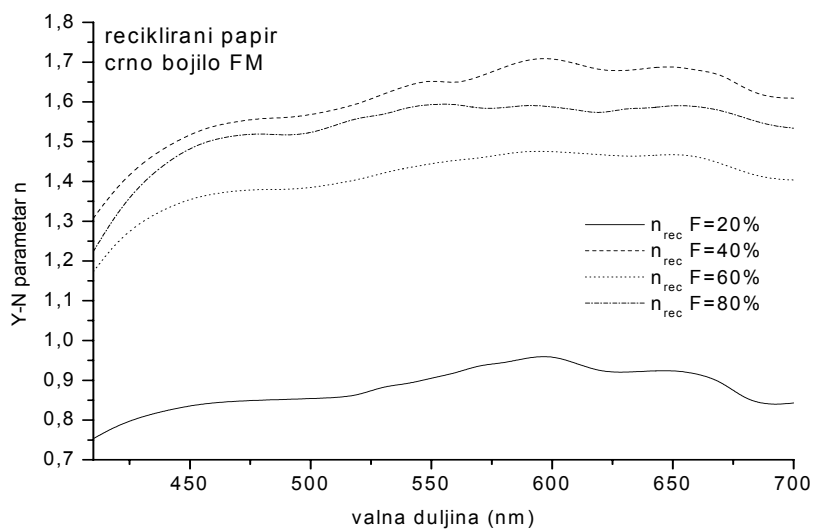
Slika 66a Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za recikliranu tiskovnu podlogu otisnutu cijanom, frekventno moduliranim rasterom od $20 \mu\text{m}$.



Slika 66b Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za recikliranu tiskovnu podlogu otisnutu magentom, frekventno moduliranim rasterom od $20 \mu\text{m}$.



Slika 66c Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za recikliranu tiskovnu podlogu otisnutu žutim bojilom, frekventno moduliranim rasterom od $20\ \mu\text{m}$.



Slika 66d Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za recikliranu tiskovnu podlogu otisnutu crnim bojilom, frekventno moduliranim rasterom od $20\ \mu\text{m}$.

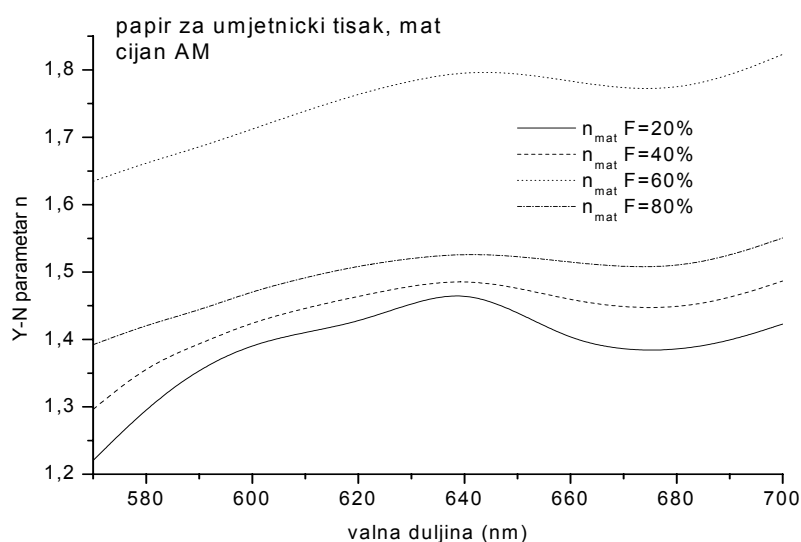
Tablica 6: Srednje vrijednosti parametra n i pripadne standardne devijacije za CMYK sustav bojila otisnut frekventno moduliranim rasterom od $20\mu\text{m}$ na recikliranoj tiskovnoj podlozi, u području selektivne apsorpcije.

F (%)	n_{rec} cijan	n_{rec} magenta	n_{rec} žuta	n_{rec} crna
20			$0,997\pm 0,031$	$0,878\pm 0,009$
40	$1,638 \pm 0,032$	$1,189\pm 0,071$	$1,906\pm 0,082$	$1,602\pm 0,018$
60	$1,618 \pm 0,034$	$1,414\pm 0,095$	$1,768\pm 0,074$	$1,407\pm 0,013$
80		$1,709\pm 0,139$	$3,232\pm 0,216$	$1,532\pm 0,016$

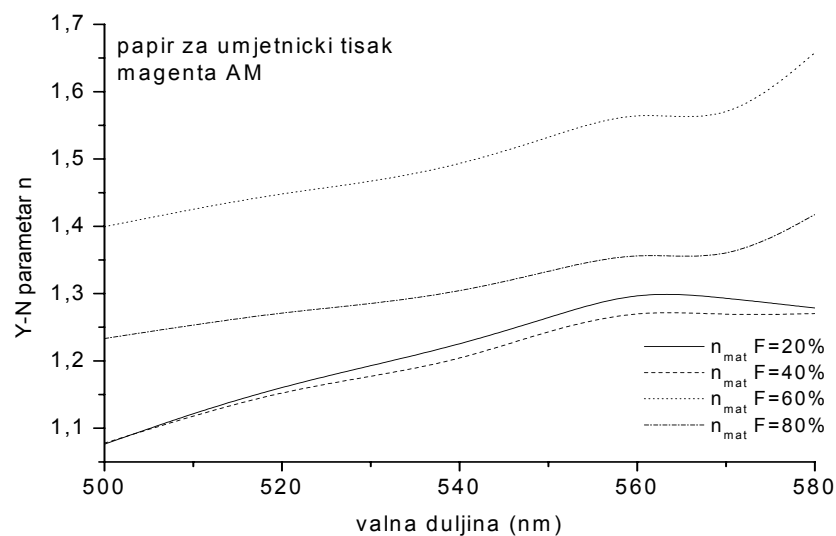
Za žuto bojilo parametra n poprima najveće vrijednosti u odnosu na druga bojila za sve rastertonske vrijednosti., s maksimalnim iznosom za $F=40\%$. Vrijednosti parametra n pridružene cijanu i magenti u danim uvjetima mjerenja nisu bila fizikalno prihvatljiva za određene rastertonske vrijednosti (tablica 6).

Papir za umjetnički tisak, mat, otisnut amplitudno moduliranim rasterom

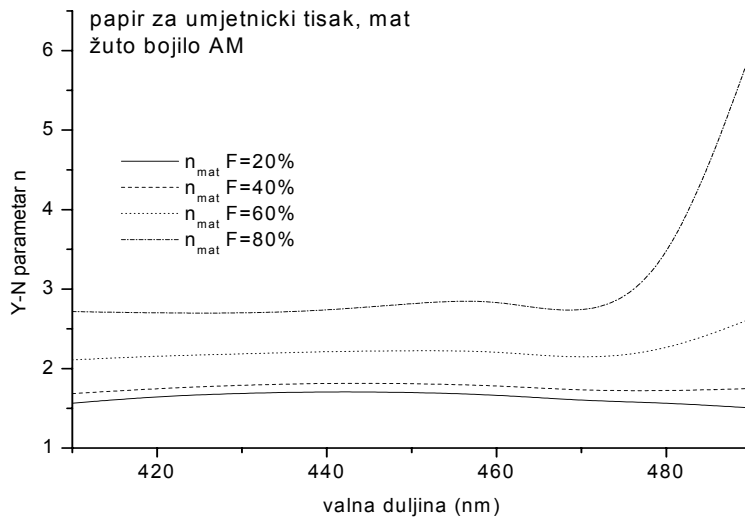
Rješenja transcendentne jedndžbe za Yule-Nielsenov parametar n kao funkcije valne duljine i rastertonske vrijednosti su na slikama 67a-d za papir za umjetnički tisak, mat, otisnut amplitudno moduliranim rasterom.



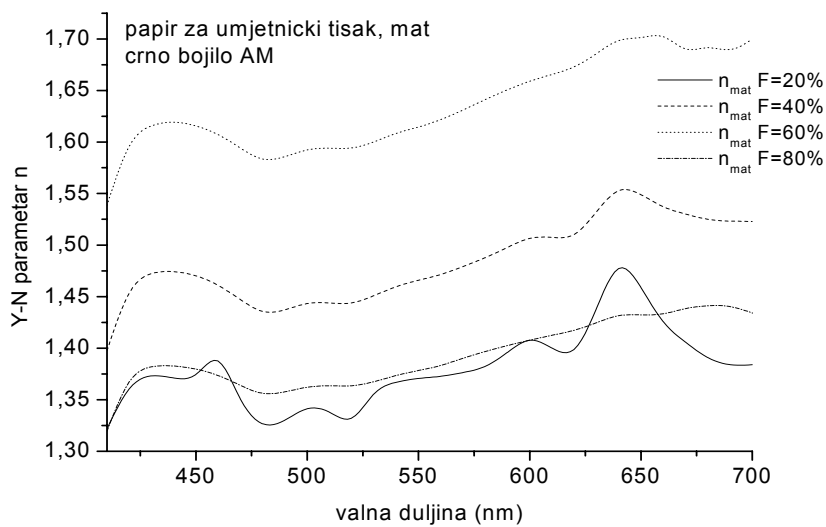
Slika 67a Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za papir za umjetnički tisak, mat, otisnut cijanom, amplitudno moduliranim rasterom.



Slika 67b Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za papir za umjetnički tisak, mat, otisnut magentom, amplitudno moduliranim rasterom.



Slika 67c Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za papir za umjetnički tisak, mat, otisnut žutim bojilom, amplitudno moduliranim rasterom.



Slika 67d Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za papir za umjetnički tisak, mat, otisnut crnim bojilom, amplitudno moduliranim rasterom.

Tablica 7 Srednje vrijednosti parametra n i pripadne standardne devijacije za C, M, Y i K bojila otisnuta amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm na mat papiru za umjetnički tisak, u području selektivne apsorpcije određenog bojila.

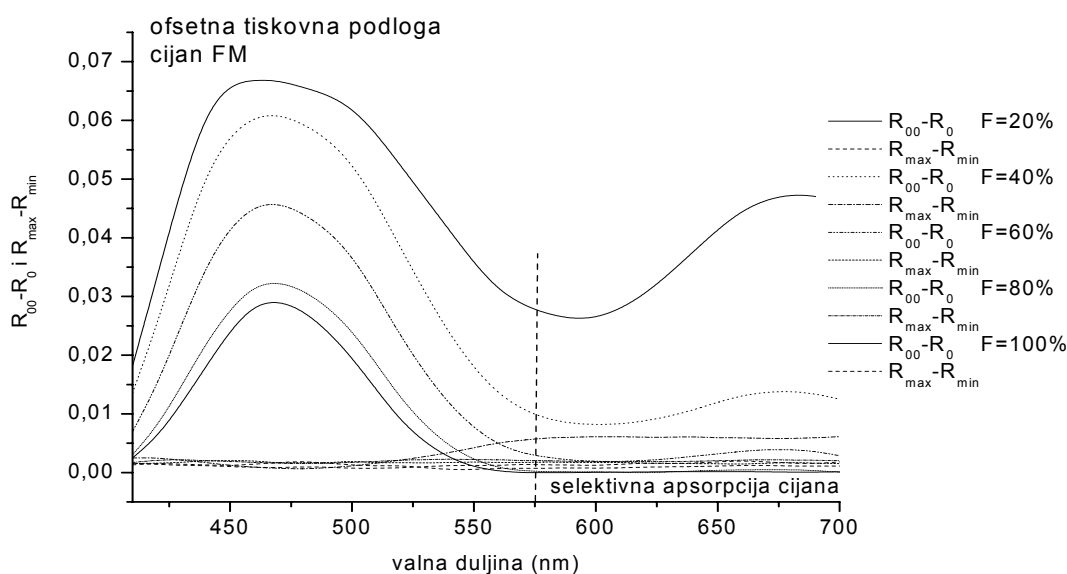
F (%)	$n_{\text{amat}} \text{ cijan}$	$n_{\text{amat}} \text{ magenta}$	$n_{\text{amat}} \text{ žuto bojilo}$	$n_{\text{amat}} \text{ crno bojilo}$
20	1,403 ±0,012	1,213 ±0,026	1,629±0,024	1,380±0,007
40	1,499 ±0,010	1,199 ±0,026	1,759±0,015	1,483±0,007
60	1,760 ±0,013	1505 ±0,027	2,230±0,052	1,635±0,008
80	1,501 ±0,010	1,312±0,019	2,800±0,050	1,393±0,006

Iz tablice 7 se uočava da parametra n poprima najveće vrijednosti za žuto bojilo .

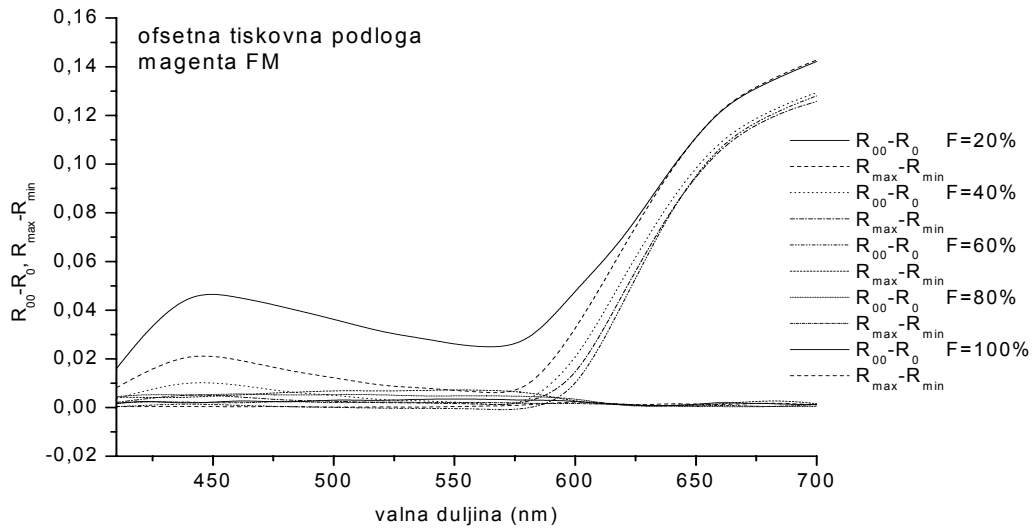
5. 2. 3 Kubelka-Munk analiza: koeficijenti apsorpcije i raspršenja

Pri izračunu koeficijenata s i k morali smo se držati već prije postavljenih ograničenja (poglavlje 5.1.1) koja su rezultat eksperimentalnih uvjeta, greške pri mjerenju i područja definicije funkcije koja povezuje eksperimentalne podatke i tražene parametre (jednadžbe 13. i 14. 3.5). Područje definice funkcije prirodnog logaritma \ln je samo za pozitivne vrijednosti argumenta, što znači da R_∞ , dobiven mjerenjem reflektancije snopa od 20 uzoraka, mora uvijek biti veći od reflektancije jednog uzorka na crnoj podlozi, R_0 ($R_\infty > R_0$).

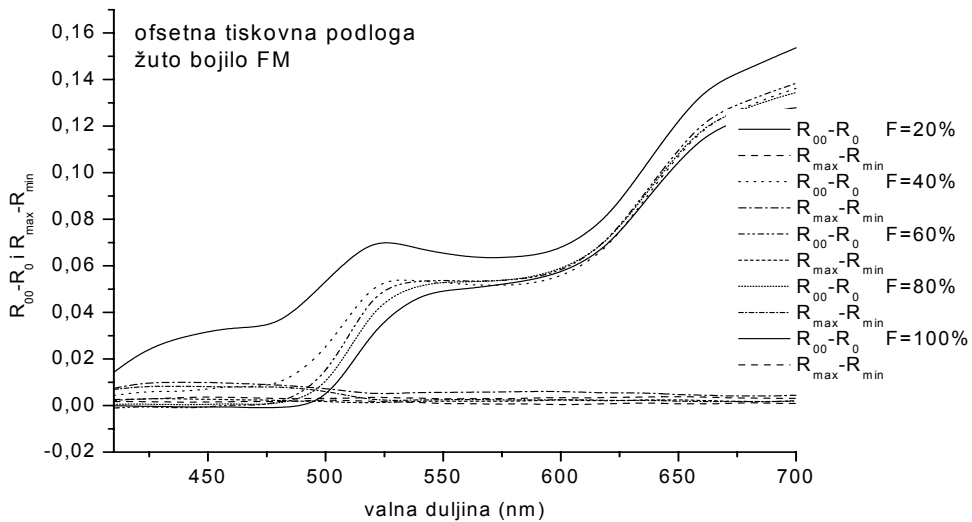
Na slikama 68a-d se mogu vidjeti razlike između R_∞ i R_0 , te interval (range) u kojem se rasipaju mjerene veličine ($R_{\max} - R_{\min}$) za cijan, magentu te žuto i crno bojilo otisnuti na ofsetnoj tiskovnoj podlozi frekventno moduliranim rasterom finoće 20 μ m.



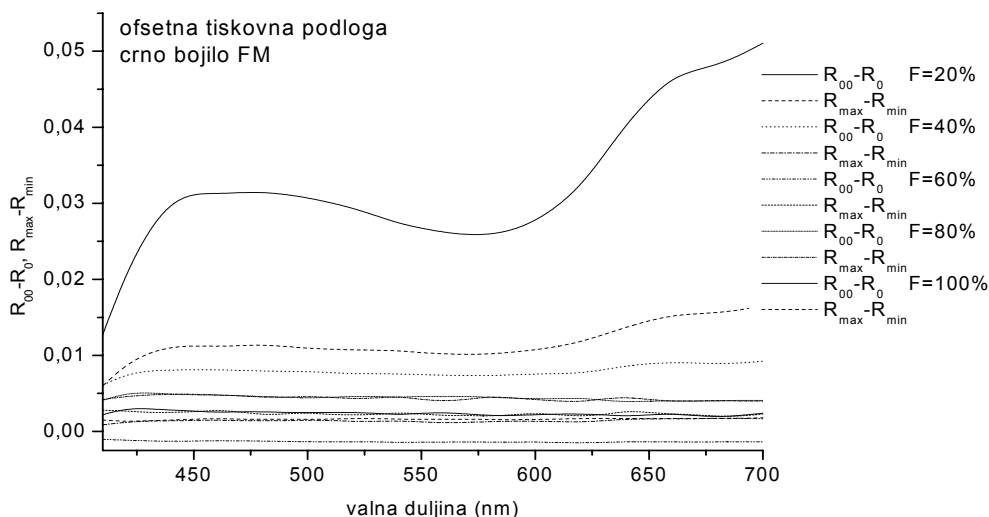
Slika 68a Razlika mjerenih refleksijskih spektara na snopu od 20 uzoraka, R_∞ i na crnoj podlozi, R_0 , $R_\infty - R_0$, te područje rasipanja mjerenih veličina za cijan $R_{\text{Range}} = R_{\max} - R_{\min}$ kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti ($F=20-100\%$).



Slika 68b Razlika mjerenih refleksijskih spektara na snopu od 20 uzoraka R_∞ i na crnoj podlozi, R_0 , $R_\infty - R_0$, te područje rasipanja mjerenih veličina za magentu $R_{Range} = R_{max} - R_{min}$ kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti ($F=20-100\%$).



Slika 68c Razlika mjerenih refleksijskih spektara na snopu od 20 uzoraka R_∞ i na crnoj podlozi R_0 , $R_\infty - R_0$, te područje (range) mjerenih veličina za žuto bojilo $R_{Range} = R_{max} - R_{min}$ kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti ($F=20-100\%$).



Slika 68d Razlika mjerenih refleksijskih spektara na snopu od 20 uzoraka, R_∞ i na crnoj podlozi R_0 , $R_\infty-R_0$, te područje (range) mjerenih veličina za crno bojilo $R_{Range} = R_{max}-R_{min}$ kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti ($F=20-100\%$).

U području **selektivne apsorpcije** bojila, pri rastertonskim vrijednostima $F \geq 60\%$, vrijednosti refleksija su male, razlike između R_∞ i R_0 su male (slika 1a-1d (5.2.3)), pa čak i negativne ($R_\infty < R_0$). U tim intervalima spektra (tablica 8) nije moguće računati koeficijente raspršenja, s , i apsorpcije, k , preko izraza 13 i 14 3.5 jer za $R_\infty - R_0 < 0$ ln funkcija nije definirana.

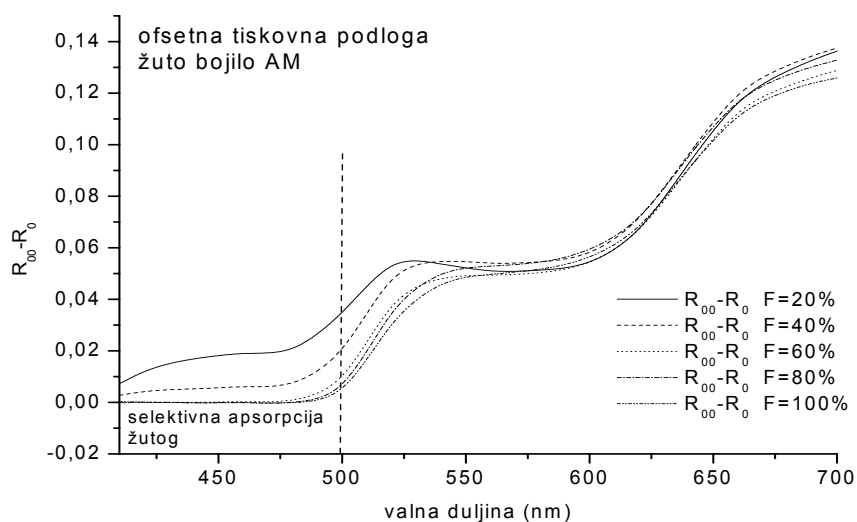
Tablica 8 Područja promatranog (vidljivog) dijela spektra za osnovna bojila otisnuta frekventno moduliranim rasterom na ofsetnoj tiskovnoj podlozi, u kojima se mogu računati koeficijenti apsorpcije i raspršenja.

$R_\infty - R_0 > R_{max} - R_{min}$				
F(%)	C	M	Y	K
20	410-700nm	410-700nm	410-700nm	410-700nm
40	410-700nm	410-700nm	410-700nm	450-700nm
60	410-700nm	410-700nm	510-700nm	410-700nm
80	410-560nm	410-700nm	410-700nm	410-700nm
100	410-560nm	410-510nm; 590-700nm	510-700nm	/

Kao što se vidi iz tablice 8, za sva bojila, osim žutog, zadovoljen je uvjet za izračun koeficijenata apsorpcije i raspršenja u cijelom vidljivom dijelu spektra za rastertonske vrijednosti od 20%, 40% i 60%. Kako se ta vrijednost povećavala, taj uvjet je bio ispunjen samo za područje **dominantne refleksije** određenog bojila, s izuzetkom crnog bojila. S obzirom da crno apsorbira u cijelom vidljivom području podjednako,

za veću pokrivenost bojilom razlika između R_{∞} i R_0 postaje manja od 1 u cijelom vidljivom dijelu spektra.

Slični rezultati (tablica 9) područja spektra i rastertonskih vrijednosti gdje je zadovoljen uvjet da ln funkcija ima realna rješenja su dobiveni i za uzorke otisnute amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm. Na slici 69a je odabrani primjer za žuto bojilo.



Slika 69 Razlika refleksijskih spektara, $R_{\infty}-R_0$, mjenjenih na snopu od 20 uzoraka, R_{∞} i na crnoj podlozi, R_0 , za žuto bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti ($F=20-100\%$).

Tablica 9 Područja promatranog (vidljivog) dijela spektra za osnovna bojila otisnuta amplitudno moduliranim rasterom na ofsetnoj tiskovnoj podlozi, u kojima se mogu računati koeficijenti apsorpcije i raspršenja.

$R_{\infty}-R_0 > R_{\max}-R_{\min}$				
F(%)	C	M	Y	K
20	410-700nm	410-700nm	410-700nm	410-700nm
40	410-700nm	410-700nm	410-700nm	450-700nm
60	410-690nm	410-700nm	430-700nm	410-700nm
80	410-550nm	410-520nm; 590-700nm	490-700nm	410-700nm
100	410-550nm	410-490nm; 590-700nm	490-700nm	410-700nm

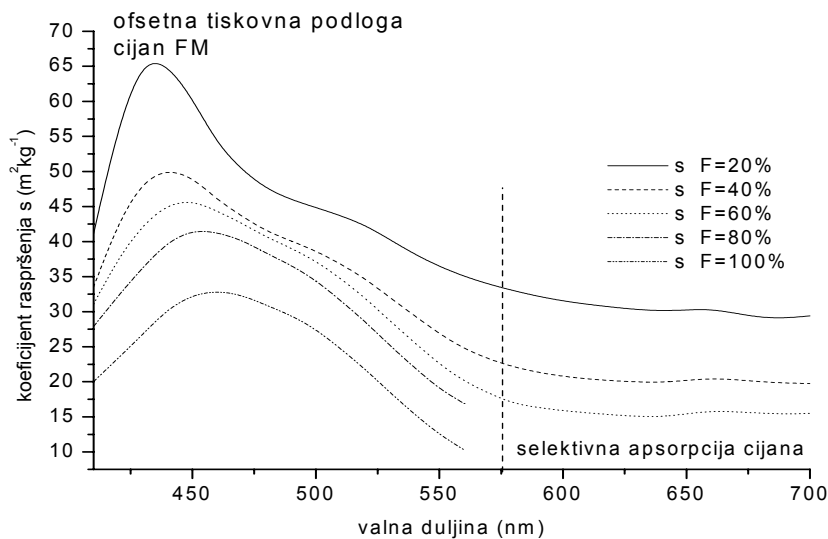
Za recikliranu tiskovnu podlogu otisnuta frekventno i amplitudno moduliranim rasterom nije bio moguć izračun koeficijenata apsorpcije i raspršenja prema izrazu 13 i 14. 3.5 jer je $R_{\infty}-R_0 \leq 0$ za sva bojila za skoro sve rastertonske vrijednosti. Takav rezultat se je očekivao prema analognoj analizi za neotisnute tiskovne podloge (poglavlje 5.1.1).

Ofsetna tiskovna podloga otisnuta frekventno moduliranim rasterom

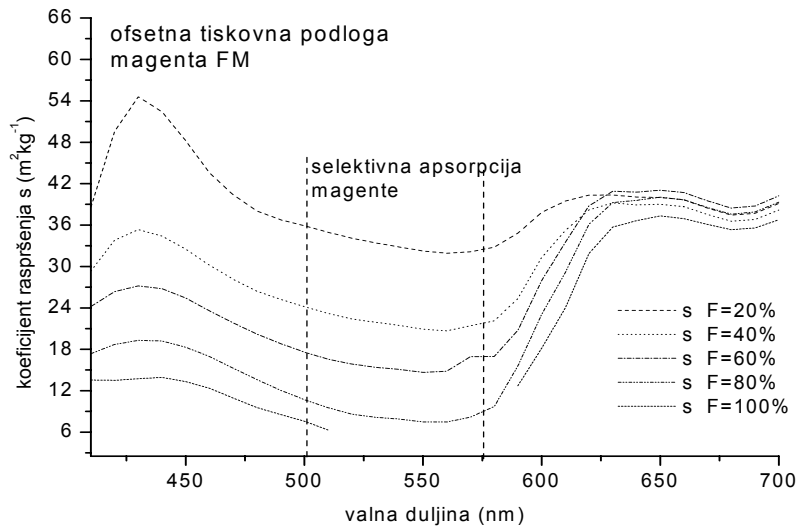
Na slikama 70a-d i 71a-d su rezultati računa koeficijenata raspršenja i apsorpcije provedenog programom Mathcad 2002 prema Kubelka-Munk teoriji, koristeći izraze 13 i 14. 3.5 za osnovna bojila CMYK, tiskana klasičnim ofsetom frekventno moduliranim rasterom finoće 20 μ m (FM) na ofsetnoj tiskovnoj podlozi.

Rastertonske vrijednosti F mijenjale su se po 20% od 0 do 100%.

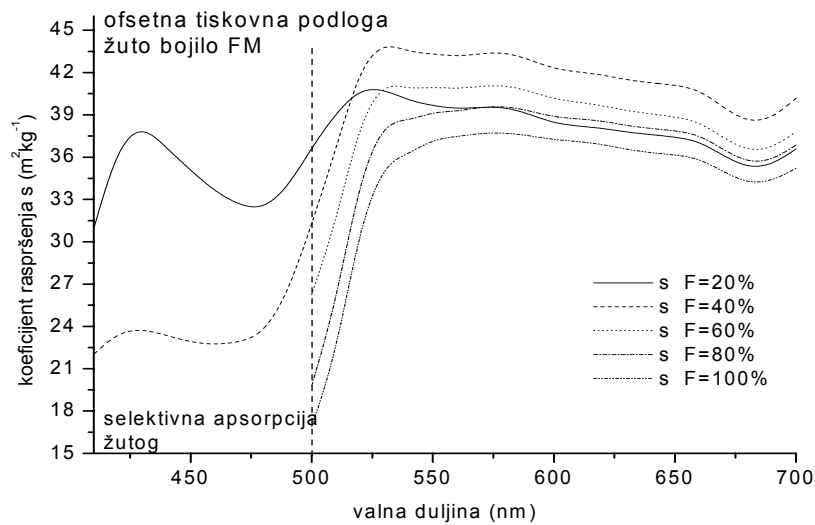
Utjecaj bojila uočava se prema karakterističnom području selektivne apsorpcije. Kao što se vidi iz slika 70a-d to su područja spektra u kojima jednadžba 13. 3.5 nema realna rješenja.



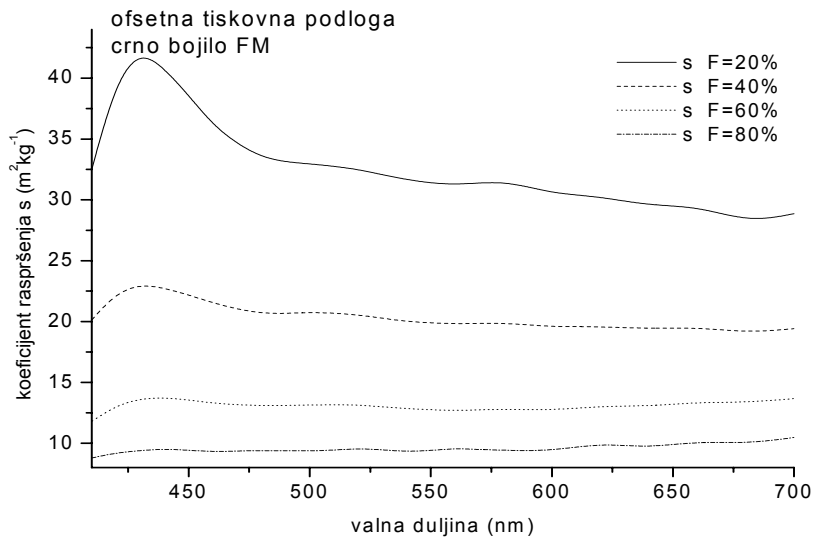
Slika 70a Koeficijent raspršenja kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za cijan. U području selektivne apsorpcije cijana za $F=80$ i 100% vrijednosti koeficijenta raspršenja nisu realne.



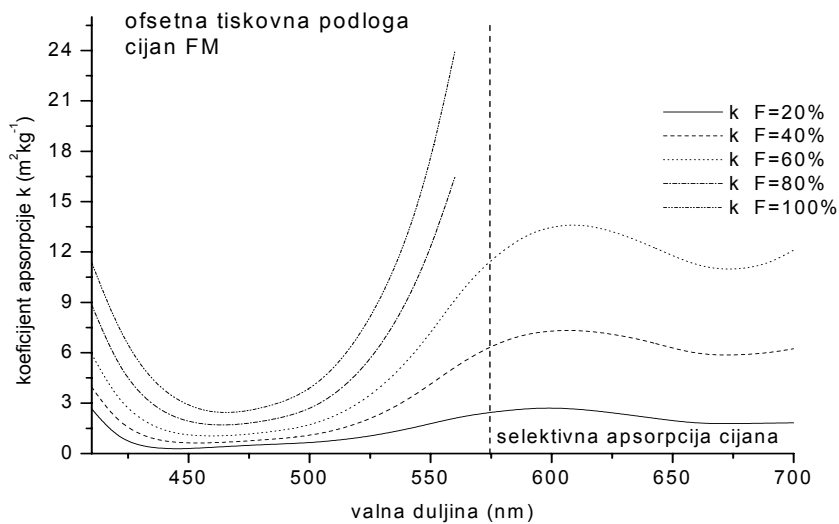
Slika 70b Koeficijent raspršenja kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za magentu. U području selektivne apsorpcije magente za $F=100\%$ vrijednosti koeficijenta raspršenja nisu realne.



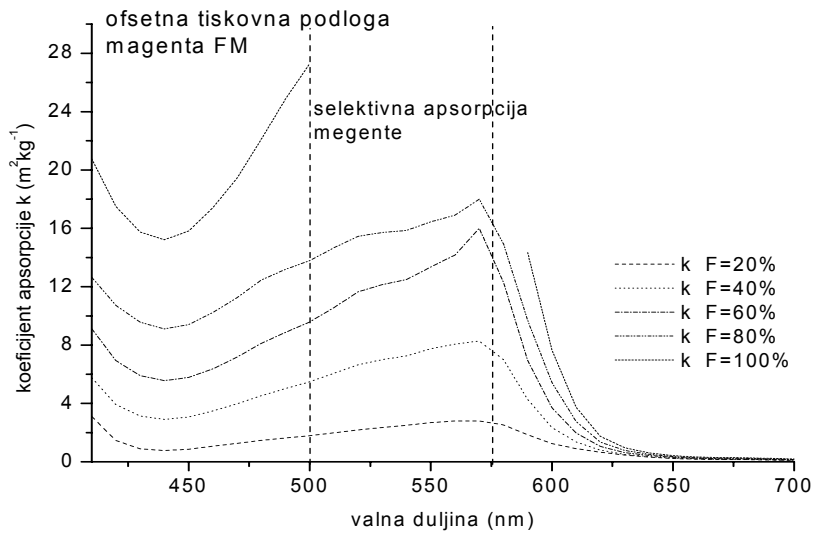
Slika 70c Koeficijent raspršenja kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za žuto bojilo. U području selektivne apsorpcije žutog za $F=60, 80$ i 100% vrijednosti koeficijenta raspršenja nisu realne.



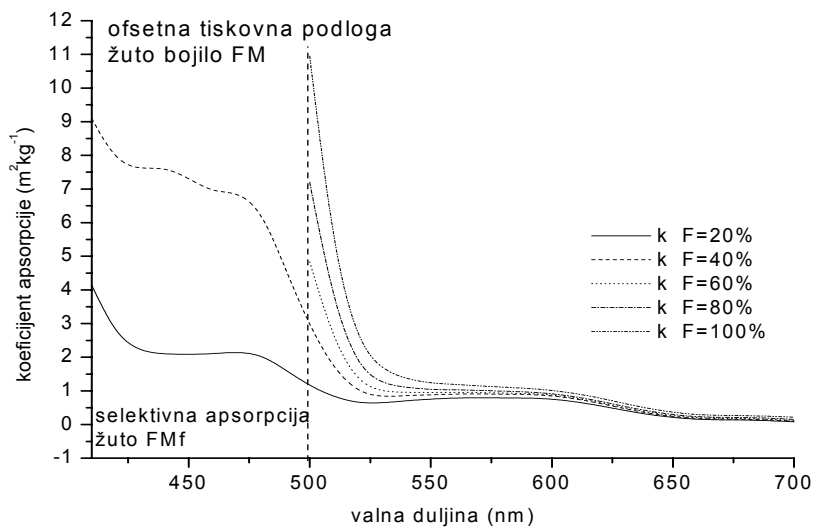
Slika 70d Koeficijent raspršenja kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za crno bojilo. Za $F=100\%$ vrijednosti koeficijenta raspršenja nisu realne.



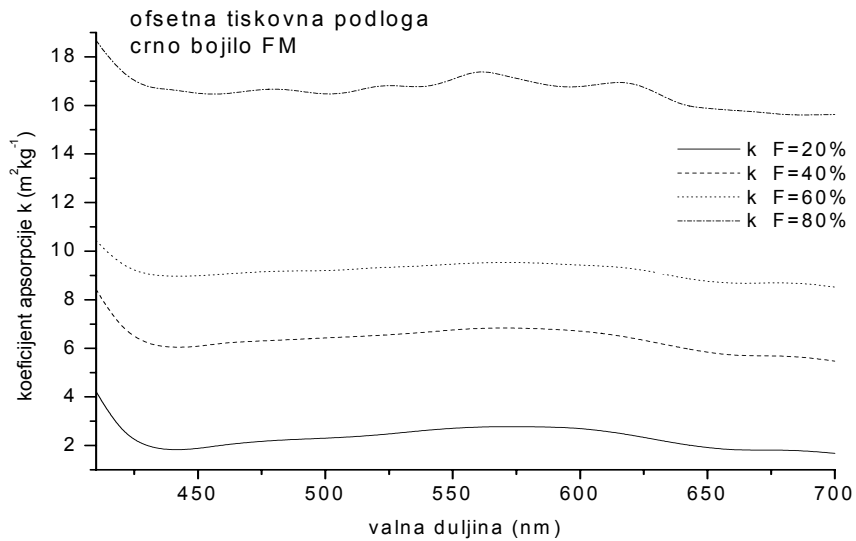
Slika 71a Koeficijent apsorpcije kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za cijan. U području selektivne apsorpcije cijana za $F=80$ i 100% vrijednosti koeficijenta apsorpcije nisu realne.



Slika 71b Koeficijent apsorpcije kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za magentu. U području selektivne apsorpcije magente za $F=100\%$ vrijednosti koeficijenta apsorpcije nisu realne.



Slika 71c Koeficijent apsorpcije kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za žuto bojilo. U području selektivne apsorpcije žutog za $F=60, 80$ i 100% vrijednosti koeficijenta apsorpcije nisu realne.



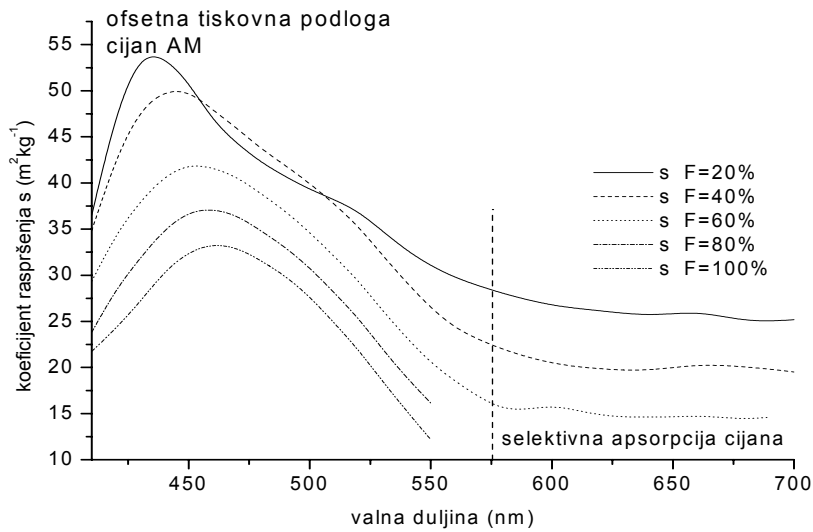
Slika 71d Koeficijent apsorpcije kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za crno bojilo. Za sve mjerene rastertonske vrijednosti, osim $F=100\%$, koeficijent apsorpcije je realan u cijelom vidljivom dijelu spektra.

Ofsetna tiskovna podloga otisnuta amplitudno moduliranim rasterom

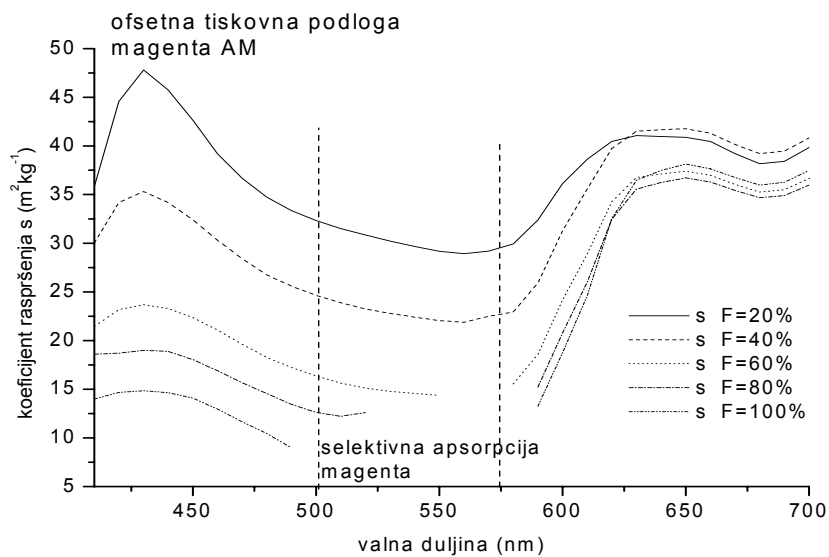
Na slikama 72a-d i 73a-d su rezultati računa koeficijenata raspršenja i apsorpcije provedenog programom Mathcad 2002 prema Kubelka-Munk teoriji, koristeći izraze 13 i 14 3.5 za osnovna bojila CMYK, tiskana klasičnim ofsetom amplitudno moduliranim rasterom na ofsetnoj tiskovnoj podlozi.

Rastertonske vrijednosti F mijenjale su se po 20% od 0 do 100%.

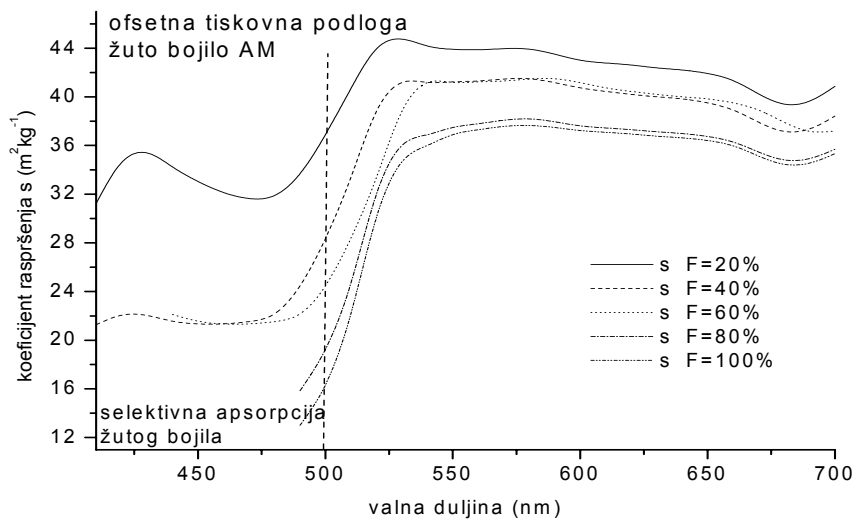
Utjecaj bojila uočava se prema karakterističnom području selektivne apsorpcije. Kao što se vidi iz slika 72a-d i 73a-d to su područja spektra u kojima jednadžba 13 3.5 daje kompleksna rješenja.



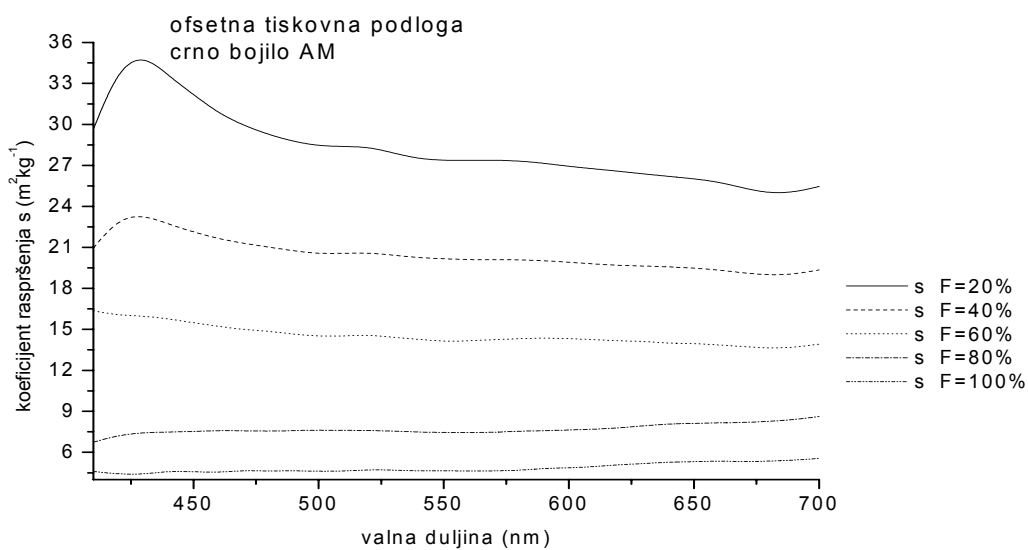
Slika 72a Koeficijent raspršenja kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za cijan. U području selektivne apsorpcije cijana za $F=80$ i 100% vrijednosti koeficijenta raspršenja nisu realne.



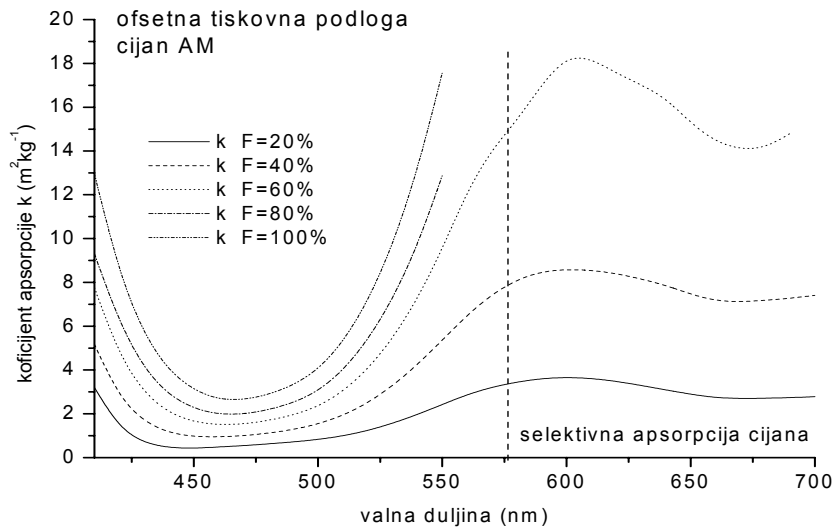
Slika 72b Koeficijent raspršenja kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za magentu. U području selektivne apsorpcije magente za $F=60$, 80 i 100% vrijednosti koeficijenta raspršenja nisu realne.



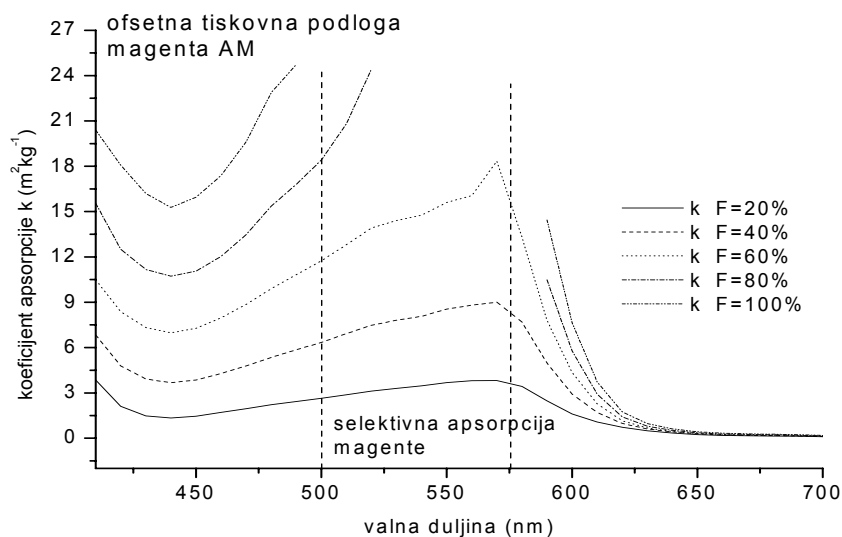
Slika 72c Koeficijent raspršenja kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za žuto bojilo. U području selektivne apsorpcije žutog za $F=60, 80$ i 100% vrijednosti koeficijenta raspršenja nisu realne.



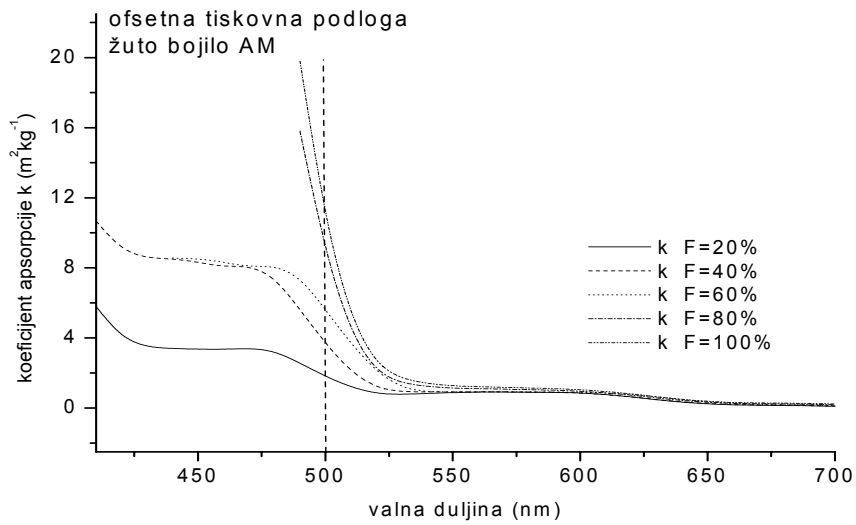
Slika 72d Koeficijent raspršenja kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za crno bojilo. U cijelom području vidljivog dijela spektra elektromagnetskog zračenja, za sve mjerene rastertonske vrijednosti, koeficijent raspršenja je realan.



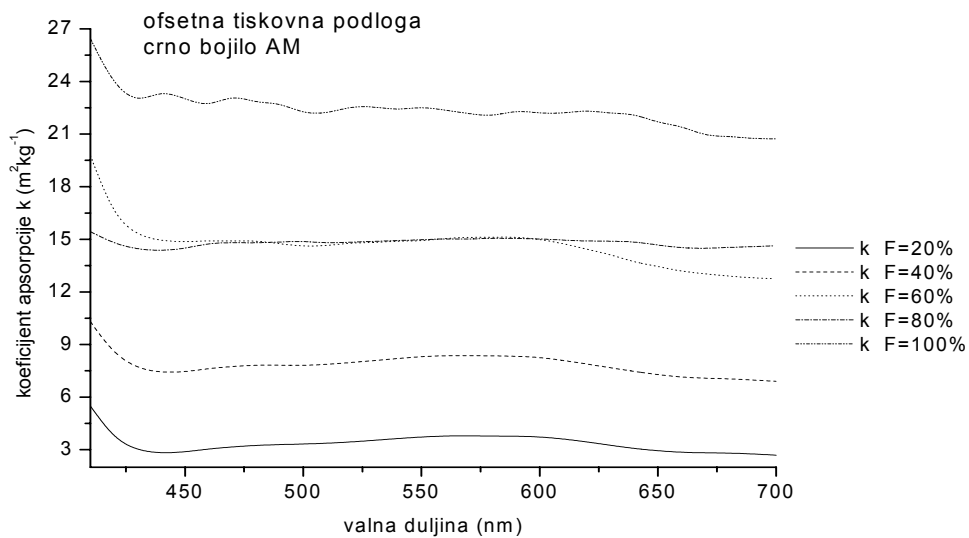
Slika 73a Koeficijent apsorpcije kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za cijan. U području selektivne apsorpcije cijana za $F=80$ i 100% vrijednosti koeficijenta apsorpcije nisu realne.



Slika 73b Koeficijent apsorpcije kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za magentu. U području selektivne apsorpcije magente za $F=80$ i 100% vrijednosti koeficijenta apsorpcije nisu realne.



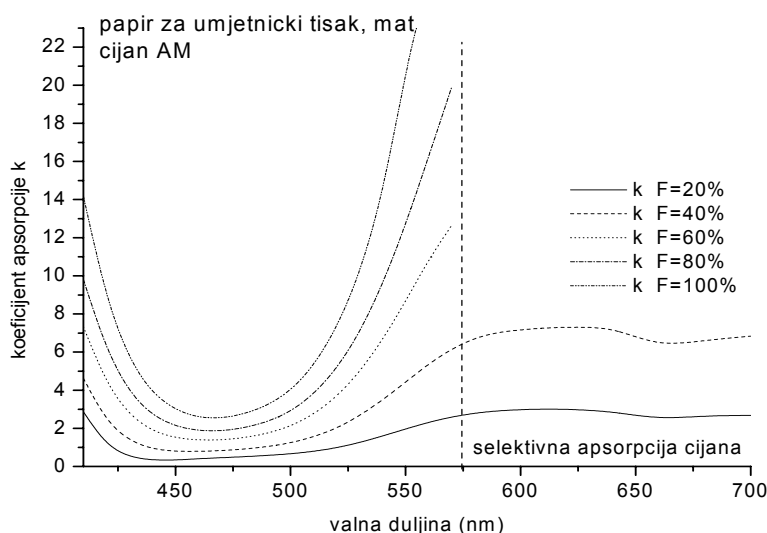
Slika 73c Koeficijent apsorpcije kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za žuto bojilo. U području selektivne apsorpcije žutog za $F=80$ i 100% vrijednosti koeficijenta apsorpcije nisu realne.



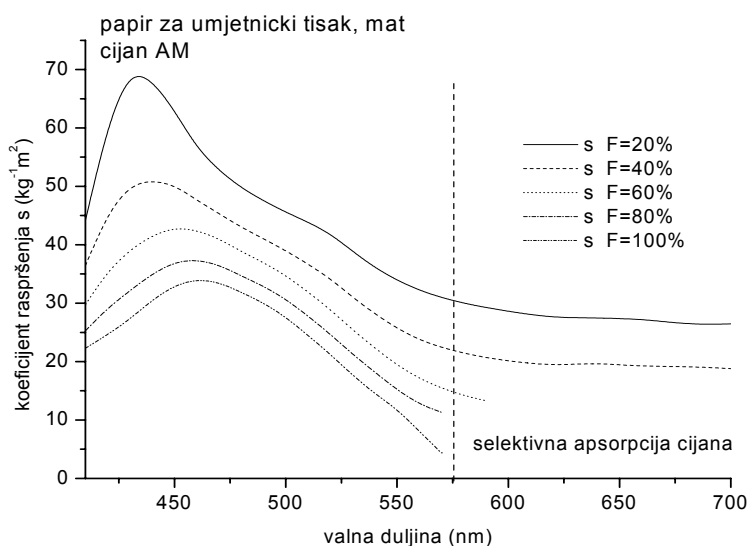
Slika 73d Koeficijent apsorpcije kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za crno bojilo. U cijelom području vidljivog dijela spektra elektromagnetskog zračenja, za sve mjerene rastertonske vrijednosti koeficijent apsorpcije je realan.

Mat papir za umjetnički tisak otisnut amplitudno moduliranim rasterom

Na temelju sličnih rezultata računa koeficijenata raspršenja i apsorpcije dobivenih za ofsetni i reciklirani papir za osnovna bojila CMYK otisnuta FM i AM rasterom, na slikama 74a i b su rezultati samo za cijan tiskan amplitudno moduliranim rasterom na papiru za umjetnički tisak.



Slika 74a Koeficijent apsorpcije kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za cijan. U području selektivne apsorpcije cijana za $F=60, 80$ i 100% vrijednosti koeficijenta apsorpcije nisu realne.



Slika 74b Koeficijent raspršenja kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za cijan. U području selektivne apsorpcije cijana za $F=60, 80$ i 100% vrijednosti koeficijenta raspršenja nisu realne.

6. Diskusija rezultata

U skladu s ciljem ove teze, a zbog veoma složene strukture podloge i velikog utjecaja na kvalitetu otiska, najprije su određena osnovna optička svojstva tiskovnih podloga (poglavlje 6.1), kako bi se mogla objasniti svojstva otisaka (poglavlje 6.2) i utjecaj same podloge na tisak.

6.1 Tiskovne podloge

Zbog različitosti u izračunu pojedinih matematičkih modela koji se koriste u ovoj disertaciji nužno je bilo provesti mjerenja na neotisnutim tiskovnim podlogama.

Prema rezultatima analize, poglavlje 5.1.1, slike 40a-d, na papirima za umjetnički tisak i ofsetnom papiru jednadžbe 13 i 14 3.5 preko kojih su dobiveni koeficijenti apsorpcije i raspršenja je moguće primijeniti u cijelom promatranom spektru (410-700nm), dok je za reciklirani papir uvjet $R_{\infty}-R_0 > R_{\max}-R_{\min}$ ispunjen samo u crvenom dijelu spektra (600-700nm).

U ovom radu izvršena su spektrofotometrijska mjerenja papira koji se svakodnevno koriste, te su određeni koeficijenti raspršenja i apsorpcije kao mjera fizikalnih procesa koji se zbivaju tijekom interakcije elektromagnetskog zračenja i podloge, a važni su za opis kvalitete rasterske slike

Na slikama 41a i b uočava se ovisnost Kubelka-Munk koeficijenata o valnoj duljini. Po iznosu najveće vrijednosti koeficijenata ima reciklirani papir. Koeficijent apsorpcije recikliranog papira je 10 puta veći (u crvenom dijelu spektra) od ostalih tiskovnih podloga zbog ostataka čestica (pigment, dye) koje apsorbiraju upadno zračenje bitno više nego što ga raspršuju.

Relativne promjene koeficijenta apsorpcije bitno su veće od promjena koeficijenta raspršenja (tablica 1). Za ofsetni i sjajni papir za umjetnički tisak iznose 90%, dok su za umjetnički mat 73%, a za reciklirani 52%. Tako velike relativne promjene apsorpcije, naročito u plavom dijelu spektra, su posljedica raznih dodataka za izbjeljivanje⁴⁹.

U području apsorpcije cijana ofsetna tiskovna podloga ima veliki koeficijent apsorpcije (575-635nm), zbog dodataka dye-a, pa je u tom dijelu spektra i veća promjena koeficijenta apsorpcije o valnoj duljini.

Relativne promjene koeficijenta raspršenja su oko 60% (papiri za umjetnički tisak, sjajni i mat, 62% i 64%, ofsetni papir 51%). Za reciklirani papir ne možemo govoriti o ovisnosti raspršenja o valnoj duljini, jer je relativna promjena koeficijenta s samo 5%.

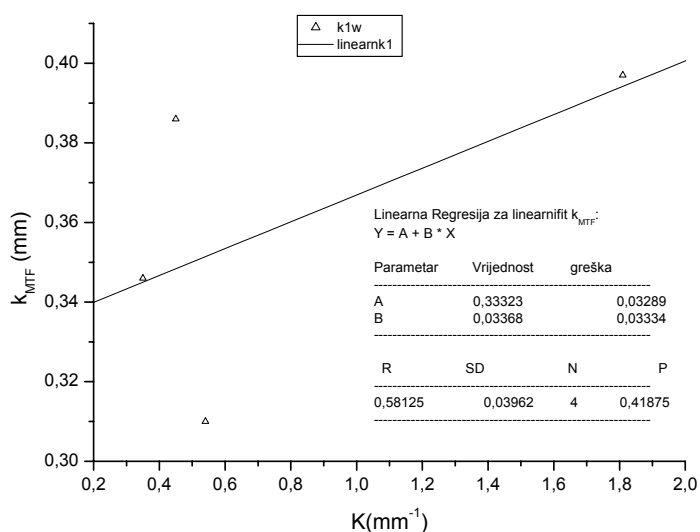
Iz navedenog možemo zaključiti da veća ili manja ovisnost Kubelka-Munk koeficijenata o valnoj duljini bitno ovisi o sastavu papira^{18, 20}.

S obzirom da se u daljnoj diskusiji promatraju samo dijelovi spektra gdje određeno bojilo selektivno apsorbira, potrebno je promatrati relativne promjene Kubelka-Munk koeficijenata u tim područjima.

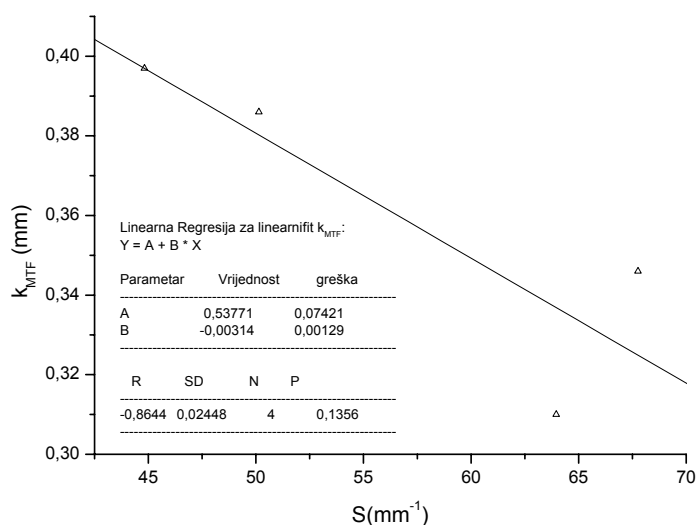
Premazani papiri, sjajni i mat, pokazuju ista svojstva reflektivnosti (slika 39), te apsorpcije i raspršenja (slike 41a i b) s obzirom na valnu duljinu, pa je za daljnju analizu obojenih otisaka izabran mat papir za umjetnički tisak .

Da bismo usporedili krivulje modulacijskih prijenosnih funkcija (MTF) tiskovnih podloga s Kubelka-Munk parametrima, za ispitivane uzorke papira odabrana je određena metrika koja će predstavljati MTF papira. Ta metrika je inverzna frekvencija^{2, 3} za čiju je vrijednost $MTF=1/2$, tzv. MTF konstanta $k_{MTF}=1/\omega_{1/2}$. Dobivene MTF ispitivanih papira su na slici 43⁵¹, a iz njih dobivene vrijednosti MTF konstanti k_{MTF} su u tablici 2.

Korelacije između koeficijenata K i S , te MTF konstante k_{MTF} dobivene preko jednadžbe 6. 3.9.2. su na slikama 75a i b. Kao što možemo vidjeti faktor korelacije između koeficijenta raspršenja i MTF parametra je zadovoljavajući ($R=-0,864$), dok za koeficijent apsorpcije ne možemo reći da je u korelaciji sa k_{MTF} ($R=0,581$).

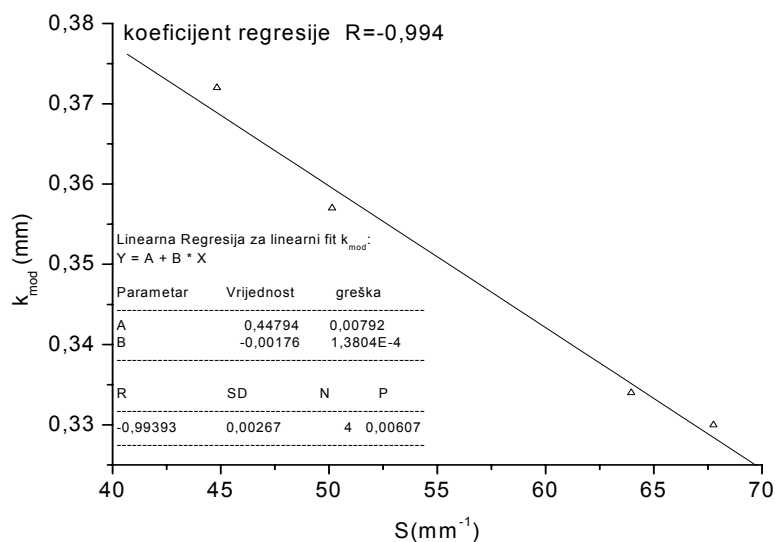


Slika 75a Korelacija između koeficijenta apsorpcije K i MTF parametra k_{MTF} .



Slika 75b Korelacija između koeficijenta raspršenja S i MTF parametra k_{MTF} .

Očito, veza između tih dviju metrika bi se trebala uspostaviti preko aproksimacije izraza 6. 3.9.2. za $K=0$, tj. u slučajevima kad se koeficijent apsorpcije može zanemariti u odnosu na koeficijent raspršenja ($S \gg K$), k_{mod} (14. 3.9.2).



Slika 75e Korelacija između koeficijenta raspršenja S i MTF parametra k_{mod} .

Korelacija između koeficijenta raspršenja S i k_{MTF} je izvrsna (koeficijent korelacije $R=-0,994$).

Bočno raspršenje svjetlosti određeno je MTF funkcijom preko Kubelka-Munk parametara, te preko modela koji zanemaruje koeficijent apsorpcije, ali dodaje empirijsku konstantu k_0 u kojoj su sadržani svi mehanizmi odgovorni za smanjenje ukupne reflektancije rasterske slike. Oittinen-Engeldrumov model daje preveliki utjecaj koeficijentu apsorpcije, što se vidi po najvećem iznosu parametra k_{MTF} za reciklirani papir. To je u empirijskom modelu regulirano konstantom k_0 .

Budući da taj model zanemaruje koeficijent apsorpcije, anulira se utjecaj bojila, pa model daje opću karakteristiku tiskovne podloge.

6.2 Obojeni otisci

U skladu s analizom eksperimentalnih podataka, u ovom poglavlju nastavlja se diskusija koja povezuje i uspoređuje dobivene rezultate mjerenja i teorijskih proračuna obojenih otisaka. Na temelju rezultata dobivenih za tiskovne podloge (poglavlje 6.1) diskutiraju se uzorci otisnuti amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm (AM) i frekventno moduliranim rasterom finoće 20 μ m (FM) na ofsetnoj i recikliranoj tiskovnoj podlozi, te na mat papiru za umjetnički tisak sa sva četiri osnovna bojila CMYK.

Budući da je jedan od ciljeva ovog rada analiza interakcije obojenog otiska i vidljivog dijela elektromagnetskog zračenja (410-700nm) primjenom Kubelka-Munk teorije i Yule-Nielsenovog parametra n , u tablici 10 su dana područja selektivne apsorpcije svakog od osnovnih bojila CMYK.

Tablica 10 Područja selektivne apsorpcije osnovnih bojila CMYK.

bojilo	područje selektivne apsorpcije
cijan	580-700nm
magenta	500-580nm
žuto	410-500nm
crno	410-700nm

6. 2. 1 Murray-Daviesova metoda

Da bi se točno opisao i izračunao Yule-Nielsenov parametar n , najprije se je ukupna reflektancija rasterske slike izračunala Murray-Daviesovom metodom (jedn.1. 3.6). Naime, empirijskom modifikacijom upravo Murray-Daviesove jednadžbe Yule i Nielsen uveli su parametar n kao mjeru bočnog raspršenja svjetlosti u otisnutom papiru.

Prema dobivenim rezultatima analize (poglavlje 5.2) područja promatranja svojstava reflektancije za otisnute podloge podijelila su se na karakteristične dijelove spektra u kojima određeno bojilo pokazuje dominantno svojstvo refleksije, odnosno apsorpcije.

Ofsetna tiskovna podloga otisnuta amplitudno i frekventno moduliranim rasterom

Prvo su se usporedili rezultati dobiveni na ofsetnoj tiskovnoj podlozi otisnuti različitim rasterskim modulacijama da bi se uočio utjecaj primijenjenog rastera na odnose između mjerenih i računskih refleksijskih spektara po Murray-Davies metodi. Na slikama 44a-d su refleksijski spektri dobiveni frekventno moduliranim rasterom, mjereni i računani, kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti. Da bi se

razdvojili utjecaji navedenih parametara, najprije se je promatrala ovisnost ΔR o valnoj duljini, $\Delta R = f(\lambda)$, prema vrsti otisnutog bojila.

Upravo s obzirom na tu ovisnost, spektar se je podijelio na karakteristična područja u kojem određeno bojilo dominantno reflektira ili apsorbira svjetlost (tablica 10). Zanimljivi rezultati su dobiveni u području dominantne refleksije određenog bojila. Naime, mjerene vrijednosti reflektancije, kada je udio pokrivenosti bojilom mali ($F=0,20$), u danim eksperimentalnim uvjetima, su veće od teoretskih prema izračunu po Murray-Davies aproksimaciji u skoro cijelom području spektra za sva bojila otisnuta frekventno moduliranim rasterom. Međutim, kako se rastertonska vrijednost povećava, takav odnos između mjerenih i računskih vrijednosti se zadržava samo u području dominantne refleksije, dok su u području u kojem bojilo dominantno apsorbira računске vrijednosti reflektancije veće od mjerenih (slike 45a-45d, tablica 11).

Drugi parametar po kojem se mijenja točnost izračuna po Murray-Davies metodi u odnosu na mjerene vrijednosti je udio pokrivenost bojilom ili rastertonska vrijednost. Za rastertonsku vrijednost od $F=20\%$, razlika između teoretskih i eksperimentalnih vrijednosti, ΔR , je najmanja po apsolutnom iznosu, što se i očekuje, međutim taj je iznos negativan u cijelom vidljivom dijelu spektra, za sva bojila osim žutog (tablica 11). Iznos razlike računskih i mjerenih reflektancija ima promjenu predznaka i nagli porast vrijednosti za $F=40\%$, odnosno $F=60\%$, dok se iznos smanjuje za $F=80\%$. Znači, $\Delta R = f(F, \lambda)$.

Tablica 11 Područja pozitivnih i negativnih razlika između računskih i mjerenih refleksijskih spektara dobivenih na ofsetnoj tiskovnoj podlozi sa osnovnim bojilima CMYK otisnutim frekventno moduliranim rasterom finoće $20\mu m$.

	$\Delta R=f(F, \lambda(\text{nm}))$							
	C		M		Y		K	
F (%)	$\Delta R < 0$	$\Delta R > 0$	$\Delta R < 0$	$\Delta R > 0$	$\Delta R < 0$	$\Delta R > 0$	$\Delta R < 0$	$\Delta R > 0$
20	Cijeli spektar		Cijeli spektar		500-530	410-490, 530-700	Cijeli spektar	
40	410-550	560-700	410-470, 600-630	480-590	500-700	410-490		Cijeli spektar
60	410-550	560-700	410-470, 600-700	480-590	500-700	410-490		Cijeli spektar
80	410-550	560-700	410-470, 600-700	480-590	500-700	410-490		Cijeli spektar

Kao što se može vidjeti iz tablice 11, predznak od ΔR ovisi o tipu interakcije između obojene tiskovne podloge i elektromagnetskog zračenja, te o pokrivenosti bojilom. U području **selektivne apsorpcije** određenog bojila je uvijek pozitivan, a u području dominantne refleksije je negativan.

Crno bojilo nije iznimka od pravila, budući da apsorbira u cijelom vidljivom dijelu spektra, pa je za $F \geq 20\%$ i $\Delta R > 0$ za cijeli vidljivi dio spektra.

Za sva otisnuta bojila je uočeno da su u području selektivne apsorpcije vrijednosti refleksijskih spektara dobivenih po Murray-Davies metodi veće po iznosu od mjerenih ($\Delta R > 0$).

Bočno raspršenje postaje uočljiva pojava, ukupna refleksija svjetlosti s mjerene podloge se smanjuje, a to je upravo fenomen koji Murray-Davies metoda zanemaruje. Može se zaključiti da Murray-Davies metoda nije primjenjiva za $F=20\%$, te u području dominantne refleksije bojila, odnosno u navedenim uvjetima rezultat metode je optičko smanjenje rasterskog elementa.

Ako promatramo učinkovitost Murray-Davies metode na amplitudno moduliranom rasteru (slike 46a-b, 49a-b) uočavamo da je ovisnost o valnoj duljini ista kao i za uzorke otisnute frekventno moduliranim rasterom, jer je u području selektivne apsorpcije $\Delta R > 0$ za sva bojila, čak i za $F=20\%$. U području dominantne refleksije mjereni spektri su veći po iznosu od računskih ($\Delta R < 0$) ili su sličnih iznosa ($\Delta R \approx 0$), s ponešto drugačijim ponašanjem magente (tablica 12).

Karakterističan refleksijski spektar magente na slici 47a pokazuje manji iznos reflektancije u plavom dijelu (410-500nm) u odnosu na crveni dio (600-700nm) područja dominantno refleksijske interakcije, pa je i razlika refleksijskih spektara u plavom negativna ili jednaka nuli ($\Delta R \leq 0$) za sve promatrane rastertonske vrijednosti, a u crvenom dijelu spektra ta je razlika pozitivna ($\Delta R > 0$) za $F=60$ i 80% .

Tablica 12 Područja pozitivnih i negativnih razlika između računskih i mjenjenih refleksijskih spektara dobivenih na ofsetnoj tiskovnoj podlozi sa osnovnim bojilima CMYK otisnutmi amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm

F (%)	$\Delta R = f(F, \lambda(\text{nm}))$						
	C		M		Y		K
	$\Delta R < 0$	$\Delta R > 0$	$\Delta R < 0$	$\Delta R > 0$	$\Delta R < 0$	$\Delta R > 0$	$\Delta R > 0$
20	410-550 $\Delta R \leq 0$	560-700	590-700	410-580	500-700	410-490	Cijeli spektar
40	410-550	560-700	590-700	410-580	500-700	410-490	Cijeli spektar
60	410-540	550-700		Cijeli spektar	500-700	410-490	Cijeli spektar
80	410-540	550-700		Cijeli spektar	510-700 $\Delta R \leq 0$	410-500	Cijeli spektar

Što se tiče ovisnosti o pokrivenosti bojilom, kako ona raste povećava se i iznos od ΔR , da bi postigao maksimum za $F=60\%$ ($\Delta R_{80\%} < \Delta R_{40\%}$).

Jedina razlika u odnosu na frekventno modulirani raster je u vrijednostima od ΔR koje su veće za amplitudno modulirani raster (tablica 13).

Iz tablice 13 se uočava da je za cijan i magentu maksimalna razlika između teorijskih i mjenjenih rezultata za $F=60\%$, bez obzira na vrstu rastera, dok se za crno i žuto bojilo pri frekventnoj modulaciji maksimalna razlika postiže za $F=40\%$.

Isti rezultati su dobiveni i slikovnom analizom, što se može vidjeti na slikama 61 a i b

Tablica 13 Maksimalne vrijednosti odstupanja računanih refleksijskih spektara u odnosu na mjerene, ΔR_{max} , kao funkcija primijenjenog rastera i rastertonske vrijednosti za ofsetnu tiskovnu podlogu.

Ofsetna tiskovna podloga $\Delta R_{max}=f(\text{rastera})$

F(%)	FM				AM			
	C	M	Y	K	C	M	Y	K
	$\lambda=640$ nm	$\lambda=570$ nm	$\lambda=440$ nm	$\lambda=430$ nm	$\lambda=640$ nm	$\lambda=570$ nm	$\lambda=520$ nm	$\lambda=430$ nm
20					0,064	0,046	0,088	0,072
40	0,069	0,072	0,109	0,081	0,093	0,078	0,139	0,109
60	0,072	0,079	0,104	0,074	0,114	0,104	0,154	0,124
80	0,050	0,058	0,086	0,058	0,062	0,060	0,103	0,067

Reciklirana tiskovna podloga otisnuta amplitudno i frekventno moduliranim rasterom

Nakon analize refleksijskih spektara, dobivenih računski i mjerenjem, na ofsetnoj tiskovnoj podlozi, da bi se razlučio utjecaj tiskovne podloge na složen proces koji se zbiva između svjetlosti, bojila i podloge, pod istim uvjetima se prišlo analizi otisnutih uzoraka na recikliranoj tiskovnoj podlozi.

Ovisnost ΔR o valnoj duljini (tablica 14) je ostala ista kao i za ofsetnu tiskovnu podlogu; u području dominantne refleksije razlika je negativna ili je $\Delta R \approx 0$ za sva bojila, dok je u području selektivne apsorpcije $\Delta R > 0$ za sva bojila, osim za najnižu rastertonsku vrijednost od 20%.

Ovisnost ΔR o rastertonskoj vrijednosti prati isti trend kao i za ofsetnu tiskovnu podlogu.

Da bi se razlučio utjecaj različite rasterske modulacije, nakon analize uzoraka otisnutih FM rasterom prišlo se analizi otisnuta otisnutih AM rasterom.

Slično ponašanje ovisnosti o valnoj duljini (tablica 15) i rastertonskoj vrijednosti uočavamo za amplitudno modulirani raster, uz porast iznosa razlike mjerenih i računanih refleksijskih spektara (tablica 16).

Tablica 14 Područja pozitivnih i negativnih razlika između računskih i mjerenih refleksijskih spektara dobivenih na recikliranoj tiskovnoj podlozi sa osnovnim bojilima CMYK otisnutim frekventno moduliranim rasterom finoće $20\mu\text{m}$.

F (%)	C		M		Y		K
	$\Delta R < 0$ $\Delta R = f(\lambda(\text{nm}))$	$\Delta R > 0$	$\Delta R < 0$	$\Delta R > 0$	$\Delta R \leq 0$	$\Delta R > 0$	$\Delta R > 0$
20	Cijeli spektar		Cijeli spektar		Cijeli spektar		$\Delta R \leq 0$
40	410-560	570-700	410-520 590-700	530-580	500-700	410-490	Cijeli spektar
60	410-560	570-700	410-510 590-700	520-580	500-700	410-490	Cijeli spektar
80	410-560	570-700	410-490 590-700	500-580	500-700	410-490	Cijeli spektar

Za otiske otisnute amplitudno moduliranim rasterom na recikliranoj tiskovnoj podlozi razlike između računanih i mjerenih refleksijskih spektara su bitno veće nego te iste razlike računane za frekventno modulirani raster za sva osnovna bojila suptraktivne smjese (tablice 14 i 15).

Tablica 15 Područja pozitivnih i negativnih razlika između računskih i mjerenih refleksijskih spektara dobivenih na recikliranoj tiskovnoj podlozi sa osnovnim bojilima CMYK otisnutim amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm.

F (%)	C		M		Y		K
	$\Delta R < 0$ $\Delta R = f(\lambda(\text{nm}))$	$\Delta R > 0$	$\Delta R < 0$	$\Delta R > 0$	$\Delta R \leq 0$	$\Delta R > 0$	$\Delta R > 0$
20	410-550 $\Delta R \leq 0$	560-700	410-480 590-700	490-580	500-700	410-490	Cijeli spektar
40	410-540	550-700	590-700	410-580	500-700	410-490	Cijeli spektar
60	410-530	540-700	600-700	410-600	500-700	410-490	Cijeli spektar
80	410-530	540-700	600-700	410-600	510-700	410-500	Cijeli spektar

Iz tablica 13 i 16 uočava se isto ponašanje magente i cijana, te žutog i crnog bojila za recikliranu i ofsetnu tiskovnu podlogu. Naime, cijan i magenta imaju maksimalne razlike između teoretskih i mjerenih refleksijskih spektara za F=60% za oba rastera, dok crno i žuto bojilo za FM raster taj iznos postižu pri rastertonskoj vrijednosti od 40%.

Tablica 16 Maksimalne vrijednosti odstupanja računanih refleksijskih spektara u odnosu na mjerene, ΔR_{max} , kao funkcija primijenjenog rastera i rastertonske vrijednosti za recikliranu tiskovnu podlogu.

reciklirana tiskovna podloga $\Delta R_{max} = f(\text{rastera})$

F(%)	FM				AM			
	C	M	Y	K	C	M	Y	K
	$\lambda=640$ nm	$\lambda=570$ nm	$\lambda=440$ nm	$\lambda=650$ nm	$\lambda=640$ nm	$\lambda=570$ nm	$\lambda=450$ nm	$\lambda=650$ nm
20					0,070	0,053	0,054	0,052
40	0,058	0,036	0,055	0,054	0,113	0,099	0,088	0,082
60	0,058	0,053	0,051	0,042	0,125	0,108	0,095	0,091
80	0,045	0,044	0,047	0,034	0,074	0,065	0,066	0,048

Ako uspoređujemo razlike ΔR između rasterskih modulacija AM i FM na recikliranoj i ofsetnoj tiskovnoj podlozi uočavamo da je ta razlika bitno veća na recikliranom papiru. To znači da dolazi do izražaja utjecaj tiskovne podloge.

Papir za umjetnički tisak, mat, otisnut amplitudno moduliranim rasterom

Na slikama 58a-b do 6a-d su refleksijski spektri, kao rezultat primjene Murray-Daveisove metode i spektrofotometrijskih mjerenja, te njihove razlike. Analizom dobivenih spektara dobila se ista funkcionalna ovisnost ΔR o valnoj duljini i rastertonskoj vrijednosti kao i za ofsetnu i recikliranu tiskovnu podlogu. Zbog ponovljivosti rezultata i lakšeg praćenja diskusije, promatrao se je tisak dobiven amplitudnom modulacijom.

Može se zaključiti da je Murray-Daveisova metoda primjenjiva u području selektivne apsorpcije određenog bojila za rastertonske vrijednosti veće od 20%.

6.2.2 Murray-Daveisova metoda i Yule-Nielsenov parametar

Računanjem **Yule-Nielsnovog parametra n** kao korijena transcendentne jednadžbe došlo se je do karakterističnih područja spektra u kojima su rješenja fizikalno prihvatljiva. Naime, podešavanjem (fitanjem) parametra n (jedn. 1.(5.2.2)) da bi se dobile teoretske krivulje što bliže po vrijednostima eksperimentalnim, pretpostavlja se da n poprima vrijednosti između 1 i 2. Dobivena rješenja za n u cijelom promatranom spektru (410-700nm) nisu sva u tom intervalu. Za neke valne duljine rješenja su negativna, pa čak i kompleksna (matematički dodaci).

Ti rezultati su se povezali s rezultatima dobivenim Murray-Daveisovom metodom. Naime, područja u kojima su teoretske vrijednosti refleksijskih spektara prema Murray-Daveisovom modelu veće od mjerenih, s obzirom na rastertonsku vrijednost i područje u kojem određeno bojilo selektivno apsorbira elektromagnetsko zračenje, odgovaraju područjima u kojima su fizikalno prihvatljiva rješenja Yule-Nielsenove jednadžbe za parametar n .

Na slici 62a vidi se rješenje transcendentne jedn. 1a (5.2.2) za parametar n u slučaju cijana, rastertonske vrijednosti od 20%. Naime, za područja spektra u kojima vrijedi $\Delta R < 0$, vrijednosti Yule –Nielsenovog parametra n nisu u području fizikalnog rješenja, a to je dio spektra, koje se podudara s područjem gdje bojilo nema svojstvo selektivne apsorpcije. Dakle, u dijelovima spektra gdje je $\Delta R < 0$ nema optičkog prirasta rasterskog elementa, zapravo on je u tim područjima negativan. Međutim, ako je $\Delta R < 0$ u području selektivne apsorpcije, dakle gdje očekujemo bočno raspršenje, Yule-Nielsenov parametar n je manji od 1, ali je njegova ovisnost o valnoj duljini u skladu sa spektrima od n za veću pokrivenost, tj. za $n > 1$. Znači, u području selektivne apsorpcije i za $\Delta R < 0$ $n = f(\lambda)$, ali je manji od 1. Da ta pojava nefizikalnih rješenja za n ne ovisi samo o rastertonskoj vrijednosti već i o tipu interakcije između upadnog elektromagnetskog zračenja i podloge, odnosno bojila, vidi se na slici 62b. Naime, i za veće rastertonske vrijednosti parametar n nema fizikalno prihvatljiva rješenja u području dominantne refleksije cijana ((410-580nm).

Prihvatljive vrijednosti za Yule-Nielsenov parametar n ($n > 1$) očekuju se ako su ispunjena dva uvjeta: **područje selektivne apsorpcije određenog bojila i $\Delta R > 0$** .

Npr. za žuto bojilo $\Delta R > 0$ je izvan područja selektivne apsorpcije, pa n poprima niz skokovitih (pozitivnih i negativnih), pa čak i kompleksnih, neprihvatljivih vrijednosti (slika 62c).

Budući da crno bojilo apsorbira u cijelom vidljivom dijelu spektra, reflektancije dobivene računski prema Murray-Davies metodi su veće od mjerenih u cijelom vidljivom dijelu spektra, odnosno rezultat je isti kao u području selektivne apsorpcije određenog bojila. Prema tome i vrijednosti za parametar n bi trebale biti realne za cijelo područje vidljivog dijela spektra (slika 63d). Za pokrivenost bojom od 20% razlike između računskih i mjerenih vrijednosti su zanemarive, što je očekivani rezultat, jer je apsorpcija mala, a oblik spektra je sličan reflektanciji same podloge jer nema selektivne apsorpcije. Upravo zbog navedenih razloga parametar n je otprilike 1 za pokrivenost od 20%, a kako pokrivenost raste i njegova vrijednost raste.

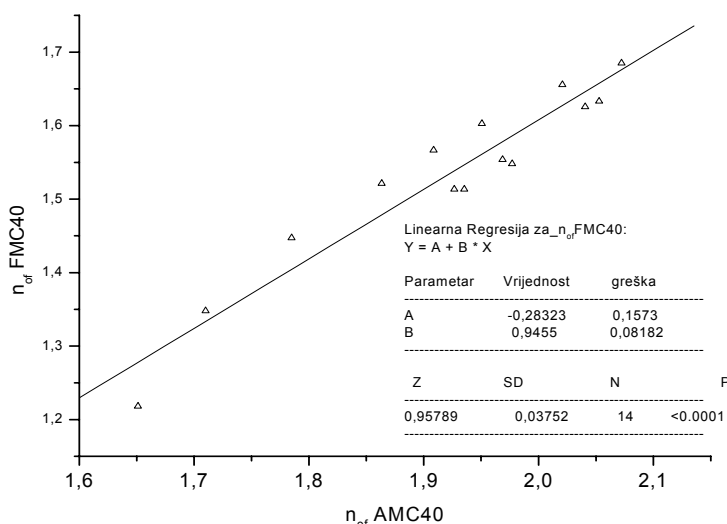
Za sva bojila otisnuta na ofsetnoj tiskovnoj podlozi frekventno moduliranim rasterom, parametar n ima realne, odnosno pozitivne vrijednosti veće od 1 samo u području selektivne apsorpcije određenog bojila, tj. u području gdje Murray-Daviesova metoda daje veće iznose reflektancija od mjerenih ($\Delta R > 0$).

Matematička obrada podataka prema transcendentnoj jednadžbi 1. 5.2.2 za Yule-Nielsenov parametar n dala je ista područja realnih rješenja, s malim odstupanjima, za sve obojene otiske, bez obzira na vrstu podloge i vrstu primijenjene rasterske modulacije. Analizom spektara Yule-Nielsenovog parametra n za osnovna bojila CMYK uočeno je da fizikalno prihvatljive vrijednosti ovise o tipu interakcije između promatranog bojila i upadnog elektromagnetskog zračenja, te o predznaku razlike između teoretske i mjerene reflektancije.

Za sve ispitane podloge i rastere vrijedi da je $n > 1$ kad je $\Delta R > 0$ u području selektivne apsorpcije.

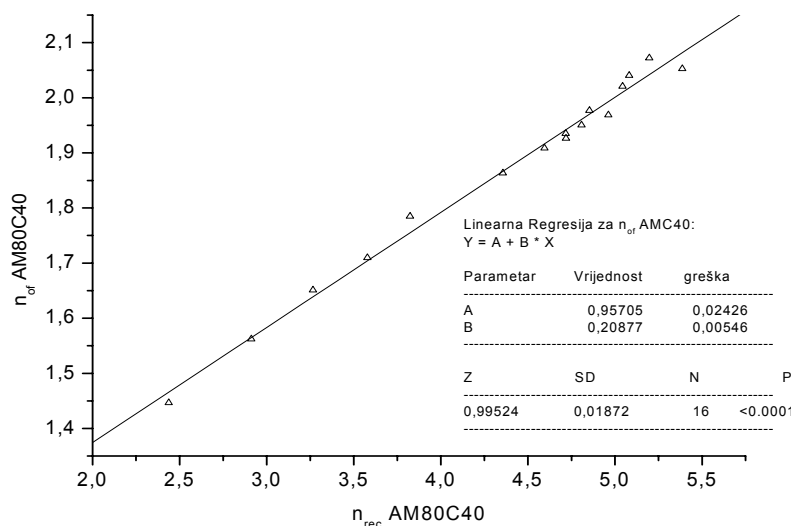
Na slikama 63a-d do 67a-d su dani spektri Yule-Nielsenovog parametra n u području realnih rješenja za sve mjerene uzorke.

Ovisnost o valnoj duljini se ne mijenja s obzirom na primijenjenu vrstu rastera, budući da faktor korelacije između $n_{of}(AM)=f(\lambda)$ i $n_{of}(FM)=f(\lambda)$ poprima vrijednosti od 0,80 do 0,96 što podrazumijeva istu ovisnost o valnoj duljini.



Slika 76 Korelacija vrijednosti parametra n za cijan tiskan amplitudno i frekventno moduliranim rasterom na ofsetnoj tiskovnoj podlozi za $F=40\%$ od 570 do 700nm.

Znači, ovisnost parametra n o valnoj duljini je posljedica bojila i podloge, a ne ovisi o vrsti primijenjenog rastera. Na slici 76 je primjer faktora korelacije između uzoraka otisnutih cijanom amplitudno i frekventno moduliranim rasterom za rastertonsku vrijednost $F=40\%$, koji je najbliži jedinici.



Slika 77 Korelacija vrijednosti parametra n za cijan tiskan amplitudno moduliranim rasterom na ofsetnom i recikliranom papiru za $F=40\%$ od 570 do 700nm.

Usporedbom parametara n za ofsetni i reciklirani papir dobiveni su faktori korelacije od 0,99 do 0,82 pri amplitudno moduliranoj rasterskoj reprodukciji. Iz tih rezultata je vidljivo da je ovisnost parametra n o valnoj duljini prvenstveno uzrokovana vrstom bojila. Na slici 77 je korelacija između n_{rec} i n_{of} za $F=40\%$.

U tablicama 3-7 su dane srednje vrijednosti parametra n , sa standardnom devijacijom i relativnom pogreškom. Iz njih se može uočiti da su najveće vrijednosti pridružene amplitudno moduliranom rasteru, za sve tiskovne podloge i bojila, što je i očekivani rezultat, jer je razlika teoretskih i eksperimentalnih refleksijskih spektara najveća upravo za amplitudnu modulaciju.

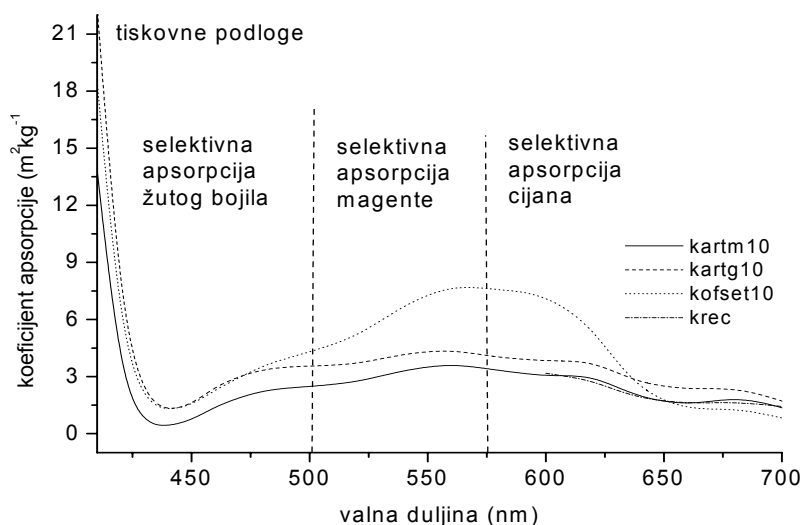
6.2.2 Yule –Nielsenov parametar i Kubelka-Munk koeficijenti

Ako usporedimo vrijednosti parametra n istog otisnutog bojila na odabranim tiskovnim podlogama (tablice 3-7) uočavamo razlike koje mogu biti uvjetovane jedino utjecajem podloge.

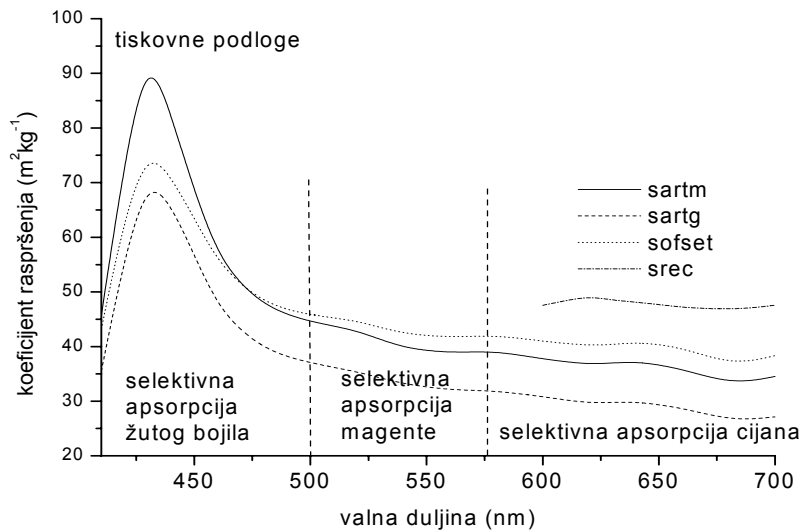
S obzirom da su fizikalna rješenja za parametar n u području selektivne apsorpcije određenog bojila, promatramo ovisnost parametra n o raspršenju i apsorpciji tiskovne podloge upravo u tom karakterističnom intervalu valnih duljina. Ako parametar n nije samo empirijski faktor morao bi biti u korelaciji s veličinama koje opisuju fizikalne procese apsorpcije i raspršenja, a to su koeficijenti apsorpcije i raspršenja Kubelka-Munk teorije.

Zbog lakšeg praćenja diskusije spektri koeficijenata apsorpcije i raspršenja za sve tiskovne podloge iz poglavlja 5.1 su prikazani na slikama 78 i 79 s naznačenim područjima selektivne apsorpcije za svako bojilo.

Razmatranja su provedena samo za amplitudno modulirani raster zbog iste ovisnosti parametra n o valnoj duljini bez obzira na tip primijenjene modulacije.



Slika 78 Spektri koeficijenta apsorpcije k za sve promatrane tiskovne podloge s naznačenim područjima selektivne apsorpcije za osnovna bojila CMYK.



Slika 79 Spektri koeficijenta raspršenja s za sve promatrane tiskovne podloge s naznačenim područjima selektivne apsorpcije za osnovna bojila CMYK.

Cijanu koji apsorbira u području gdje **reciklirana podloga** ima najveći koeficijent raspršenja i apsorpcije, u odnosu na druge podloge, pridružen je i najveći parametar n (od 3,11 do 16,66) s obzirom na druge tiskovne podloge ($n_{rec} > n_{offset} > n_{mat}$ zbog $s_{rec} > s_{offset} > s_{mat}$ i $k_{rec} > k_{offset} > k_{mat}$).

Magenta koja apsorbira u području gdje **ofsetna tiskovna podloga** ima bitno veći koeficijent apsorpcije od mat papira za umjetnički tisak (za reciklirani papir u tom području nije bio moguć izračun koeficijenta apsorpcije) pridružen je parametar n od 1,28 do 2,05, dok na mat papiru n poprima vrijednosti od 1,21 do 1,50. Koeficijenti raspršenja za ofsetni i mat papir imaju podjednake vrijednosti, pa je razlika parametra n između tih dviju podloga uzrokovana bitno većim koeficijentom apsorpcije ofsetne tiskovne podloge.

Žutom bojilu otisnutom na papiru za **umjetnički tisak** i na **ofsetnom papiru**, bi trebale biti pridružene najveće vrijednosti parametra n upravo za te tiskovne podloge, jer u području apsorpcije tog bojila (slika 79) koeficijenti raspršenja postižu svoj maksimalan iznos ($s_{mat} > s_{offset}$). Međutim, kao što se vidi iz tablice $n_{rec} > n_{offset} > n_{mat}$. Očito su i u tom području koeficijenti apsorpcije i raspršenja reciklirane podloge veći od apsorpcije i raspršenja ostalih tiskovnih podloga.

Budući da se područje apsorpcije žutog bojila podudara s područjem u kojem ofsetni i papir za umjetnički tisak imaju najveće iznose raspršenja (plavi dio spektra) zaključilo se je da je to razlog i najvećeg iznosa ΔR_{max} za sve analizirane uzorke (tablice 13 i 16). Naime za žuto otisnuto na recikliranom papiru FM rasterom ΔR poprima iznos do 0,055 za $F=40\%$, dok je za ofsetni papir $\Delta R = 0,109$. Slični odnosi vrijede za AM raster; $\Delta R_{rec} = 0,095$, a $\Delta R_{of} = 0,154$ ($F=60\%$). Utjecaj raspršenja tiskovne podloge na ΔR je značajan. S obzirom da je ΔR mjera Yule-Nielsenovog parametra n , najveći n očekujemo upravo za žuto bojilo otisnuto AM rasterom na ofsetnoj tiskovnoj podlozi.

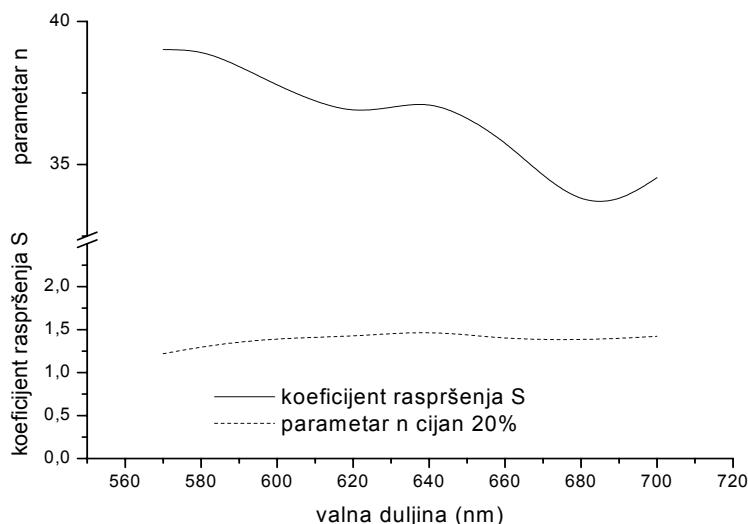
Crnom bojilu, koje podjednako apsorbira u cijelom vidljivom dijelu spektra najveće vrijednosti za n su pridružene također na recikliranoj podlozi. Slijedeći to razmišljanje očekujemo veliki parametar n za žuto bojilo otisnuto AM rasterom na ofsetnom papiru i mat papiru za umjetnički tisak, a da je tako vidimo iz tablice 19.

Ofsetna tiskovna podloga u području selektivne apsorpcije cijana ima veliki koeficijent apsorpcije, pa da se razluči eventualni utjecaj koeficijenta apsorpcije na iznos za parametar n usporedit ćemo ga s iznosom n -a za mat papir za umjetnički tisak otisnut cijanom, budući da je koeficijent apsorpcije u tom području cca 2,5. Iz tablice vidimo da je n_{mat} nešto manji po iznosu, ali s obzirom da je koeficijent apsorpcije cca 8, zaključujemo da nema takav utjecaj na parametar n kao raspršenje.

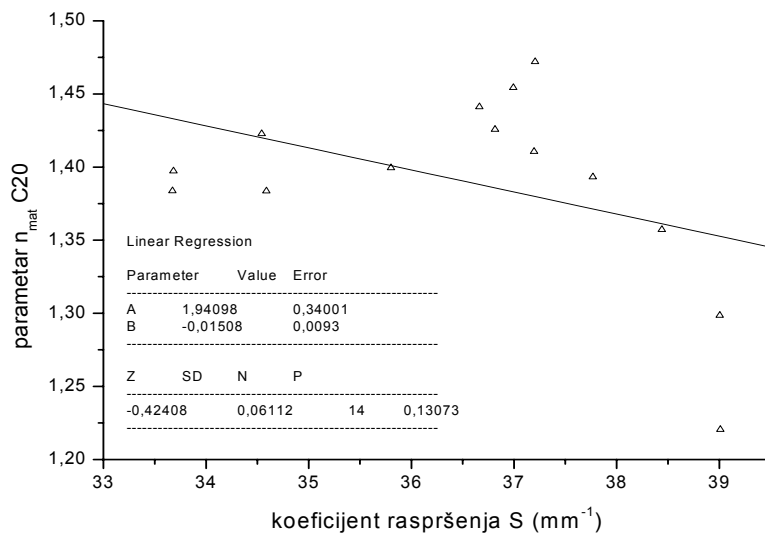
Korelacije parametra n s koeficijentima apsorpcije i raspršenja Kubelka-Munk teorije

Kao što se vidi iz tablica 17-20 korelacije između parametra n i koeficijenata apsorpcije i raspršenja za ofsetnu tiskovnu podlogu i mat papir za umjetnički tisak, se kreću od izvrsnih (koeficijent korelacije $R=0,981$, slike 83 i 84 6. 2.2) do veoma loših koji ne ukazuju na istu ovisnost o valnoj duljini za promatrana bojila, čak ni za male rastertonske vrijednosti ($Z=-0,425$, slike 80 i 81). Za reciklirani papir, s obzirom na područje primjene jednadžbe 13. 3.5 u intervalu od 600 do 700nm bilo je moguće provjeriti korelaciju samo za cijan koji u tom području selektivno apsorbira upadno zračenje.

Na slici 80 je spektar koeficijenta raspršenja i spektar parametra n za cijan otisnut na papiru za umjetnički tisak pri rastertonskoj vrijednosti $F=20\%$ koji nemaju istu ovisnost o valnoj duljini, pa je njihov faktor korelacije $Z=-0,425$ (slika 81).

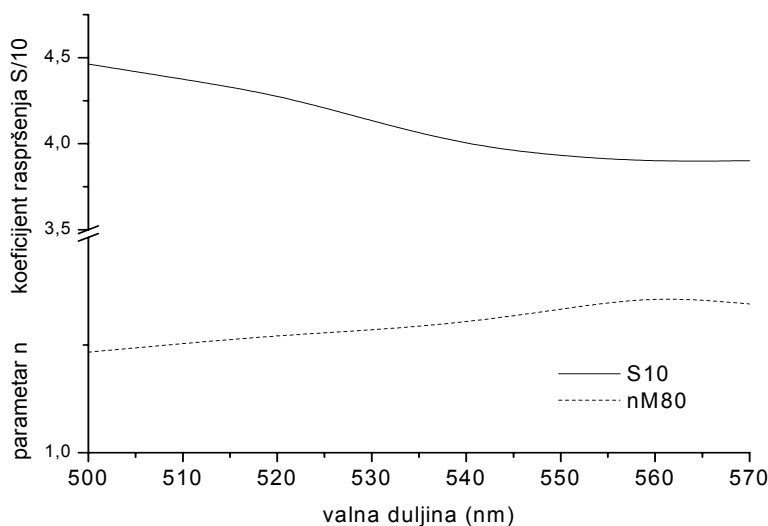


Slika 80 Spektri parametra n i koeficijenta raspršenja s za koje je faktor korelacije $Z=-0,425$.

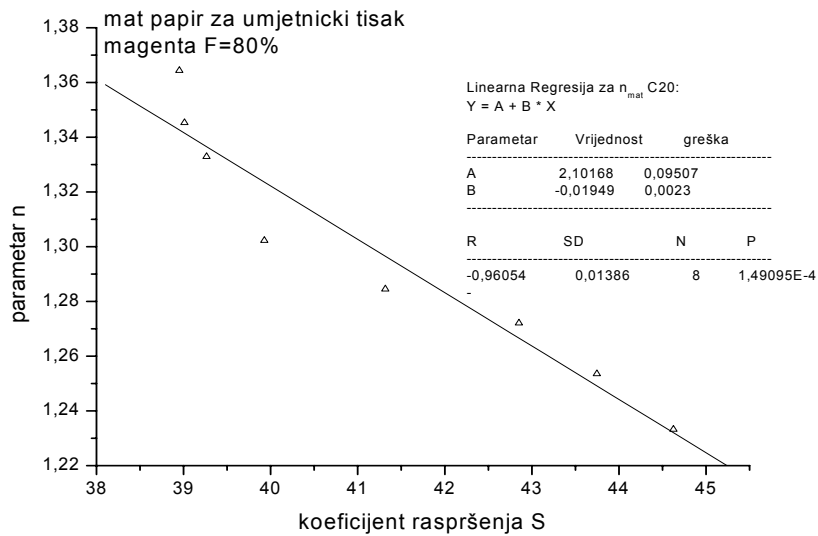


Slika 81 Primjer loše korelacije (faktor $Z = -0,425$) između koeficijenta raspršenja i parametra n za cijan pri rastertonskoj vrijednosti od 20% otisnut na mat papiru za umjetnički tisak.

Na slici 82 je primjer iste ovisnosti o valnoj duljini parametra n i recipročne vrijednosti koeficijenta S , što rezultira faktorom korelacije $Z = -0,96$ (slika 83) za magentu otisnutu na papiru za umjetnički tisak pri rastertonskoj vrijednosti $F = 80\%$.

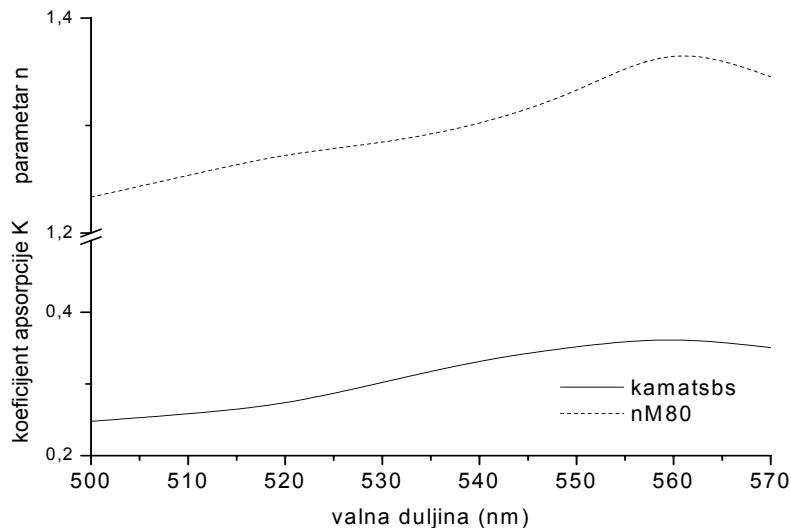


Slika 82 Spektri parametra n i koeficijenta raspršenja s za koje je faktor korelacije $Z = -0,96$.

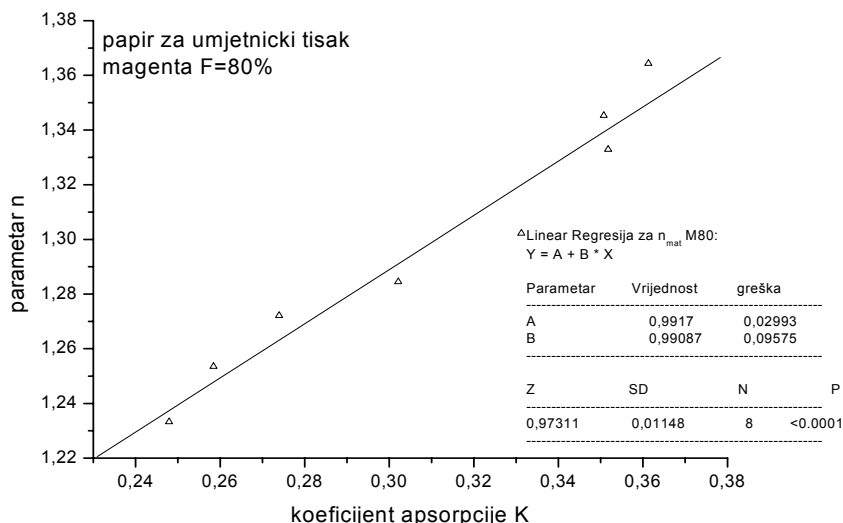


Slika 83 Korelacija faktora $Z = -0,96$ između koeficijenta raspršenja s i parametra n za magentu tiskanu na mat papiru za umjetnički tisak

Na slici 84 su spektri parametra n i koeficijenta apsorpcije za magentu otisnutu na mat papiru za umjetnički tisak pri rastertonskoj vrijednosti $F=80\%$ koji pokazuju istu ovisnost o valnoj duljini, pa je njihov faktor korelacije $Z=0,973$ (slika 85).



Slika 84 Spektri parametra n i koeficijenta apsorpcije k za koje je faktor korelacije $Z=0,973$.



Slika 85 Korelacija faktora $Z = 0,973$ između koeficijenta apsorpcije K i parametra n za magentu tiskanu na mat papiru za umjetnički tisak

Za cijan (tablica 17), parametar n je u zadovoljavajućoj korelaciji s recipročnom vrijednošću koeficijenta apsorpcije $1/K$, dok je korelacija s koeficijentom raspršenja slaba, naročito za reciklirani papir.

Tablica 17 Faktori korelacije između parametra n i koeficijenta apsorpcije K (Z_{niK}) i raspršenja S (Z_{niS}) Kubelka-Munk teorije za cijan u području selektivne apsorpcije Cijan

F (%)	reciklirani papir Z_{niS}	ofsetni papir Z_{niS}	mat papir za umjetnički tisak Z_{niS}	reciklirani papir Z_{niK}	ofsetni papir Z_{niK}	mat papir za umjetnički tisak Z_{niK}
20	-0,286	-0,313	-0,425	-0,401	-0,697	-0,575
40	-0,570	-0,434	-0,614	-0,836	-0,756	-0,730
60	-0,357	-0,667	-0,756	-0,668	-0,940	-0,879
80	-0,435	-0,730	-0,739	-0,802	-0,930	-0,835

Tablica 18 Faktori korelacije između parametra n i koeficijenta apsorpcije K (Z_{niK}) i raspršenja S (Z_{niS}) Kubelka-Munk teorije za magentu u području selektivne apsorpcije.

Magenta

F (%)	ofsetni papir Z_{niS}	Mat papir za umjetnički tisak Z_{niS}	ofsetni papir Z_{niK}	Mat papir za umjetnički tisak Z_{niK}
20	-0,930	-0,981	0,957	0,981
40	-0,867	-0,977	0,905	0,978
60	-0,701	-0,958	0,748	0,972
80	-0,729	-0,960	0,776	0,973

Najbolji faktori korelacije između parametra n i koeficijenta apsorpcije su za magentu (tablica 18) na papiru za umjetnički tisak, dok su za ofsetni papir nešto slabiji, ali znače još uvijek izvrsno slaganje u ovisnosti o valnoj duljini.. Koeficijent raspršenja je u korelaciji sa $1/n$.

Za žuto i crno bojilo (tablice 19 i 20) parametar n i koeficijenti raspršenja i apsorpcije imaju različitu ovisnost o valnoj duljini.

Tablica 19 Faktori korelacije između parametra n i koeficijenta apsorpcije K (Z_{niK}) i raspršenja S (Z_{niS}) Kubelka-Munk teorije za žuto u području selektivne apsorpcije.

žuto

F (%)	ofsetni papir Z_{niS}	mat papir za umjetnički tisak Z_{niS}	ofsetni papir Z_{niK}	mat papir za umjetnički tisak Z_{niK}
20	0,596	0,640	-0,259	-0,180
40	0,330	0,630	-0,554	-0,347
60	-0,321	-0,380	-0,382	-0,214
80	-0,444	-0,422	-0,436	-0,050

Tablica 20 Faktori korelacije između parametra n i koeficijenta apsorpcije K (Z_{niK}) i raspršenja S (Z_{niS}) Kubelka-Munk teorije za crno u području selektivne apsorpcije.

crno

F (%)	ofsetni papir Z_{niS}	mat papir za umjetnički tisak Z_{niS}	ofsetni papir Z_{niK}	mat papir za umjetnički tisak Z_{niK}
20	-0,392	-0,286	-0,472	-0,324
40	-0,484	-0,388	-0,500	-0,446
60	-0,567	-0,446	-0,480	-0,436
80	-0,500	-0,423	-0,482	-0,467

Ovi rezultati idu u prilog raspravama da je Yule –Nielsenov parametar n ipak samo empirijski parametar^{66, 32}, ali da pri tom ovisi o valnoj duljini³³.

Analiziranjem ofsetnog i recikliranog papira otisnutih osnovnim bojilima frekventno i amplitudno moduliranim rasterom zaključilo se da se parametar n mijenja po iznosu promjenom rasterske modulacije⁵, dok ovisnost o valnoj duljini ostaje nepromijenjena. Za sva bojila otisnuta na ispitanim tiskovnim podlogama srednje vrijednosti pridruženog parametra n i standardne devijacije su u tablicama 21-24.

Tablica 21 Srednje vrijednosti i standardne devijacije parametra n pridružene cijanu otisnutom na recikliranom, ofsetnom i mat papiru za umjetnički tisak.

F (%)	$n_{\text{amat}} \text{ cijan}$	$n_{\text{ofset}} \text{ cijan}$	$n_{\text{rec}} \text{ cijan}$
20	1,403 ±0,012	1,925±0,120	3,112 ±0,081
40	1,499 ±0,010	1,939±0,105	4,599 ±0,168
60	1,760 ±0,013	2,612±0,203	16,655 ±2,020
80	1,501 ±0,010	2,016±0,125	13,838 ±1,249

Tablica 22 Srednje vrijednosti i standardne devijacije parametra n pridružene magenti otisnutoj na recikliranom, ofsetnom i mat papiru za umjetnički tisak.

F (%)	$n_{\text{amat}} \text{ magenta}$	$n_{\text{of}} \text{ magenta}$	$n_{\text{rec}} \text{ magenta}$
20	1,213 ±0,026	1,283±0,258	1,940±0,167
40	1,199 ±0,026	1,402±0,241	3,190±0,345
60	1,505 ±0,027	2,050±0,227	7,252±1,552
80	1,312±0,019	1,748±0,169	7,502±2,085

Tablica 23 Srednje vrijednosti i standardne devijacije parametra n pridružene žutom bojilu otisnutom na recikliranom, ofsetnom i mat papiru za umjetnički tisak.

F (%)	$n_{\text{amat}} \text{ žuto}$	$n_{\text{of}} \text{ žuto}$	$n_{\text{rec}} \text{ žuto}$
20	1,629±0,024	2,263±0,340	2,884±0,212
40	1,759±0,015	2,745±0,236	4,658±0,329
60	2,230±0,052	4,610±0,881	15,217±1,614
80	2,800±0,050	12,614±9,020	

Tablica 24 Srednje vrijednosti i standardne devijacije parametra n pridružene crnom bojilu otisnutom na recikliranom, ofsetnom i mat papiru za umjetnički tisak.

F (%)	$n_{\text{amat}} \text{ crno}$	$n_{\text{of}} \text{ crno}$	$n_{\text{rec}} \text{ crno}$
20	1,380±0,007	2,128±0,081	2,144±0,034
40	1,483±0,007	2,187±0,088	2,340±0,044
60	1,635±0,008	2,747±0,177	2,917±0,068
80	1,393±0,006	2,028±0,082	2,110±0,030

6. 2. 4 Koeficijenti apsorpcije i raspršenja Kubelka –Munk teorije

Budući da Kubelka-Munk teorija uspješno opisuje interakciju svjetlosti i tiskovne podloge preko koeficijenata apsorpcije, K , i raspršenja, S , u ovom dijelu rada proučavana su svojstva tih optičkih veličina, u ovisnosti o parametrima realne grafičke reprodukcije.

Prema rezultatima analize (poglavlje 5.2.3) za sva otisnuta bojila došlo se je do istog područja primjene Kubelka-Munk jednadžbe 13. 3.5. Naime, u području selektivne apsorpcije bojila pri većim rastertonskim vrijednostima razlike između R_∞ i R_0 su male, čak i negativne. U tim područjima spektra nije moguće računati koeficijente raspršenja i apsorpcije, jer \ln funkcija nije definirana za negativne vrijednosti argumenta.

Dakle, prema jednadžbama 13 i 14 3.5 moguće je izračunati koeficijente raspršenja i apsorpcije za sve rastertonske vrijednosti samo u području dominantne refleksije određenog bojila.

Takav rezultat je dobiven za ofsetnu tiskovnu podlogu i za mat papir za umjetnički tisak otisnut frekventnom i amplitudnom modulacijom. Za reciklirani papir nije bio moguć izračun koeficijenata, zbog već bliskih vrijednosti R_∞ i R_0 za neotisnuti uzorak (poglavlje 5. 1.1).

Spektri raspršenja (slike 70a-d) su po obliku, dakle kao funkcija valne duljine, veoma slični refleksijskim spektrima određenog bojila (određene boje) (sl. 44a-d 5. 2.1)) i određene rastertonske vrijednosti. Naime, kako pokrivenost bojilom raste, vrijednosti raspršenja i refleksije su sve manje, jer vlada zakon čiste boje.

Izračun koeficijenta apsorpcije prema izrazu 14. 3.5 daje upravo recipročnu ovisnost o rastertonskoj vrijednosti u odnosu na koeficijent raspršenja (slike 71a-d); kako raste pokrivenost bojilom raste i koeficijent apsorpcije. Međutim, apsorpcija je po iznosu, čak i u području selektivne apsorpcije određenog bojila, bitno manja od raspršenja.

Za sva otisnuta bojila su koeficijenti raspršenja veći za frekventno modulirani raster, dok su koeficijenti apsorpcije veći za amplitudnu rastersku modulaciju.

Zaključci

Optička svojstva bojila, tiskovne podloge i njihova interakcija igraju važnu ulogu u reprodukciji boje. Uz optička svojstva same tiskovne podloge, na otisnutom papiru se javljaju dodatne pojave koje utječu na kvalitetu grafičke reprodukcije. Naime, kao posljedica bočnog raspršenja svjetlosti, koju opisujemo pomoću optičkog povećanja rasterskog elementa, znanog kao Yule-Nielsenov parametar n , dolazi do promjena u ukupnoj refleksiji rasterske slike i našem vizualnom doživljaju grafičkog proizvoda.

U ovoj doktorskoj disertaciji odabranim uzorcima spektrofotometrijski su određeni refleksijski spektri, a eksperimentalni podaci su matematički obrađeni prema Kubelka-Munk, Murray-Davies i Yule-Nielsenovoj metodi. Na temelju dobivenih rezultata, pri danim realnim uvjetima grafičke reprodukcije, zaključeno je:

Kubelka-Munk metoda najtočnije opisuje optička svojstva tiskovne podloge, apsorpciju i raspršenje, u cijelom vidljivom području elektromagnetskog zračenja (izuzetak je reciklirani papir) koja bitno utječu na bočno raspršenje rasterskog elementa. Utjecaj kompleksnosti podloge na primjenjivost metode očituje se na recikliranom papiru.

Kubelka-Munk metoda je primjenjiva za obojene uzorke rastertonske vrijednosti od $F \leq 60\%$, i to u području spektra u kojem određeno bojilo dominantno reflektira upadno elektromagnetsko zračenje. Kada je obojenost veća ne može se koristiti, jer vrijedi zakon čiste boje.

Murray-Davies i Yule-Nielsenova metoda su primjenjive za pokrivenost bojilom $F > 20\%$ i to u području selektivne apsorpcije određenog bojila.

U literaturi se pokazuje da parametar $n > 2$ znači da se ne mogu zanemariti i drugi oblici interakcije koji nisu opisani Yule-Nielsenovom metodom, što prema rezultatima ovog istraživanja podrazumijeva kompleksnost podloge (reciklirani papir) i utjecaj otisnutog bojila (naročito velike vrijednosti parametra n su pridružene žutom).

Što je podloga kompleksnija to je primjenjivost teorija slabija. Sustav se može zadovoljavajuća opisati jedino kombinacijom teorije i empirijskih modela.

Na temelju provedene sinteze matematički dobivenih podataka prema Kubelka-Munk i Yule-Nielsenovoj metodi utvrđeno je:

Dokazana je ovisnost iznosa parametra n o primijenjenoj rasterskoj modulaciji. Za sva bojila na ispitanim tiskovnim podlogama parametar n je veći za amplitudno modulirani raster.

Dokazana je ovisnost parametra n o valnoj duljini, koja se mijenja s bojilom, ovisno o tipu interakcije i s tiskovnom podlogom, ovisno o koeficijentima apsorpcije i raspršenja.

Dokazana je veza između koeficijenta raspršenja i apsorpcije tiskovne podloge s Yule-Nielsenovim parametrom **n**.

Dokazano je da je parametar **n** empirijski faktor, jer korelacije s parametrima Kubelka-Munk teorije ovise o primijenjenom bojilu i uvjetima tiska.

Zbog izvrsne korelacije parametra **n** i koeficijenata raspršenja i apsorpcije za magentu (tablica 18) se može predvidjeti parametar **n** s obzirom na korištenu tiskovnu podlogu. Za cijan (tablica 17), zadovoljavajuća je korelacija s koeficijentom apsorpcije, naročito za veću rastertonsku vrijednost, pa se i za to bojilo može predvidjeti parametar **n** s obzirom na korištenu tiskovnu podlogu. Za parametre **n** koji se javljaju za žuto i crno ne može se reći da su u korelaciji s koeficijentima Kubelka-Munk teorije (tablice 19 i 20).

Iz istraživanja se može vidjeti da na svim tiskovnim podlogama, s obzirom na iznose parametra **n**, najmanje promjene s promjenom podloge pokazuje crno bojilo (tablica 24), dok su najveće promjene optičkog povećanja rasterskog elementa nastale promjenom tiskovne podloge vezane uz žuto, zatim cijan, pa magentu (tablice 21-23).

Utvrđeno je da **reciklirani papir** ima najveće koeficijente apsorpcije i raspršenja, te su otiscima na tom papiru pridruženi najveći iznosi parametra **n** (tablica 5).

U istraživanju je dokazano da najmanje vrijednosti bočnog raspršenja nastaju kod otisaka na **papiru za umjetnički tisak**. Od otisnutih bojila na tom papiru najveći parametar **n** je pridružen žutom i cijanu.

Na temelju dobivenih rezultata utvrđeno je da su otisku na **ofsetnoj tiskovnoj podlozi** pridružene veće vrijednosti parametra **n** nego otisku na papiru za umjetnički tisak zbog dodataka koji uzrokuju povećanje koeficijenta apsorpcije ofsetnog papira.

U ovom radu dokazano je da na bočno raspršenje, odnosno optičko povećanje rasterskog elementa, bitno utječe podloga sa svojim karakterističnim spektrima apsorpcije i raspršenja koji ovise o sastavu papira, a što opet ovisi o planiranoj primjeni grafičkog proizvoda.

Prema rezultatima istraživanja, kombinacijom tiskovne podloge s obzirom na vrijednosti koeficijenta apsorpcije i raspršenja i zastupljenosti određenog bojila u originalu, može se postići optimalna grafička reprodukcija, tj. doživljaj boje najbliži originalu.

Predlaže se, zbog što boljeg slaganja grafičke reprodukcije s originalom, u program praćenja kvalitete ugraditi izraze koji opisuju raspršenje i apsorpciju tiskovne podloge (indeks i ovisi o intervalu mjerenja):

$$s_i = \frac{1}{w\left(\frac{1}{R_{\infty i}} - R_{\infty i}\right)} \ln \left[\frac{(1 - R_{0i} R_{\infty i}) R_{\infty i}}{R_{\infty i} - R_{0i}} \right]$$

$$k_i = \frac{s_i \cdot (1 - R_{\infty i})^2}{2R_{\infty i}}$$

koji prema rezultatima istraživanja direktno utječu na iznose parametra **n**.

8. Literatura

1. J. S. Arney, P. G. Engeldrum and H. Zeng, An Expanded Murray-Davies Model of Tone Reproduction in Halftone Imaging, *J. Imaging Sci. Technol.* **vol.39**, 502-508, (1995).
2. J. S. Arney, J. Chauvin, J. Nauman and P. G. Anderson, Kubelka-Munk Theory and MTF of Paper; *J. Imaging Sci. Technol.* **vol.47**, 339-345, (2003).
3. J. S. Arney, C. D. Arney and M. Katsube, An MTF Analysis of Papers, *J. Imaging Sci. Technol.* **vol.40**, 19-25, (1996).
4. J. S. Arney, A Probability Description of the Yule-Nielsen Effect I, *J. Imaging Sci. Technol.* **vol.41**, 633-642, (1997).
5. J. S. Arney and M. Katsube, A Probability Description of the Yule-Nielsen Effect II: The Impact of Halftone Geometry, *J. Imaging Sci. Technol.* **vol.41**, 637-642, (1997).
6. J. S. Arney, T. Wu and C. Blehm, Modeling the Yule-Nielsen Effect on Color Halftones, *J. Imaging Sci. Technol.* **vol.42**, 335-340, (1998).
7. J. S. Arney and E. Pray, Kubelka –Munk Theory and the Yule-Nielsenov Effect on Halftones, *J. Imaging Sci. Technol.* **vol.43**, 365-370, (1999).
8. J. S. Arney and C. D. Arney: Modeling the Yule-Nielsen Halftone Effect, *J. Imaging Sci. Technol.* **vol. 40**, 233-238, (1996).
9. A. Blayo, F. Medlege and E. Tournadre, Influence of the substrate properties on the offset printing ink colour matching,
10. S. Bolanča, Glavne tehnike tiska, *Acta Graphica*, Zagreb, (1997).
11. S. Bolanča, Suvremeni ofsetni tisak, *Školska knjiga*, Zagreb, (1991).
12. R. N. Bracewell, The Fourier Transform and its Applications, *McGraw-Hill*, 3rd. Edition, (2000).
13. I. N. Bronstein and K. A. Semendjajev, Handbook of Mathematics, *Springer*, reprint of 3rd. Edition, (1997).
14. D. Budiša, Počeci tiskarstva u Evropskih naroda, *Kršćanska sadašnjost i Nacionalan i sveučilišna biblioteka*, Zagreb (1984).
15. F. R. Clapper and J. A. Yule, *J. Opt. Soc. Am.* **A 42**-104, (1953)
16. A. Calabria, Experimental Study of Colorant Scattering Properties When Printed on Transparent Media, www.cis.rit.edu/thesis.html
17. F. P. Callahan, *J. Opt. Soc. Am.* **42**-104, (1952)
18. F. Curiel, W. E. Vargas and R. G. Barrera, Visible spectral dependence of the scattering and absorption coefficients of pigmented coatings from inversion of diffuse reflectance spectra, *Applied Optics*, **vol.41**, no.28, 5969-5978, (2002).
19. J. C. Dainty and R. Shaw, Image Science, *Academic Press*, New York, 244-258, (1974).
20. V. Dzimbeg-Malcic, V. Mikac-Dadic, Kubelka-Munk parameters of some unprinted surfaces, Slavonski brod (2005), to be published.
21. P. Edstrom, A Comparison Between the Coefficients of the Kubelka-Munk and DORT2002 Models, *Internal FSCN Report Number:R-03-46*, Sweden, (2003).
22. P. Edstrom, Some Ideas on Models and Methods for Light Scattering in Paper, *Internal FSCN Report Number:R-01-10*, Sweden, (2001).
23. P. Emmel and R. D. Hersch, A unified model for color prediction of halftoned prints, *J. Imaging Sci. Technol.* **vol.44**, 351 (2000).

24. GATF Encyclopedia of Graphic Communications, *GATF Press*, Pittsbrgh, (1998).
25. P. G. Engeldrum, The color between the dots, *J. Imaging Sci. Technol.* **vol.38**, 545 (1994).
26. P. G. Engeldrum and B. Pridham, Application of Turbid Medium Theory of Paper Spread Function Measurements, *TAGA Proceedings*, **vol.1**, 339-352, (1995).
27. P. G. Engeldrum, The color of halftone printing with and without the paper spread function, *J. Imaging Sci. Technol.* **vol.40**, 240 (1996).
28. G. G. Field: Color and its Reproduction, *GATF Press*, 2nd. Edition, 1999.
29. GATF Encyclopedia of Graphic Communications, *GATF Press*, Pittsbrgh, (1998).
30. J. Geuse broek, T. Gevers and A. Smeulders, The Kubelka-Munk Theory for Color Image Invariant Properties, The First European Conference on Colour in Graphics, Image and Vision, IS&T, Poitiers, France, (2002).
31. S. Gustavson, Dot Gain in Colour Halftones, *PhD Dissertation No. 492*, Dept. Of Electrical Engineering, Linkoping University, Sweden, (1997).
32. J. R. Huntsman, *J. Imaging Sci. Technol.* **vol. 13**, 136, (1987).
33. J. Janiak, Tha Wavelength Dependence of the Yule-Nielsen Factor, www.cis.rit.edu/thesis
34. F. A. Jenkins and H. E. White, Fundamentals of Optics, 4th ed., *McGraw-Hill Book Company*, Singapore, (1985).
35. P. Johansson, Optical Homogeneity of Prints, *PhD Dissertation*, Stockholm, (1999)
36. D. B. Judd and G. Wyszecki, *Color in Business, Science and Industry*, J. Wiley & Sons, New York, (1975).
37. J. Kauppinen and J. Partanen, Fourier Transforms in Spectroscopy, *Wiley-VCH Verlag*, ISBN: 3-527-60029-9, electronic, (2000).
38. B. Kruse and Mikael Wedin, Modeling of dot gain in halftone color prints, *MS Disseration*, Department Of Electrical Engineering, Linkoping University, Sweden, (1995).
39. H. Kipphan, Handbook of Print Media: Technologies and Production Methods, *Springer*, Heidelberg, (2001).
40. J. Kofender, Optical spread junction and noise characteristics of selected paper substratesmeasured in typocal reflectionoptical system configurations, *Master's Thesis*, Center for Imaging Science, Rochester Institute of Technology (1987).
41. C. Koopipat, N. Tsumura, M. Fujino, K. Miyata and Y. Miyake, MTF Measurement and Analysis of Ink Jet Images
42. B. Kruse and M. Wedin, Modeling of dot gain in halftone color prints, *MS Dissertation*, Department Of Electrical Engineering, Linkoping University, Sweden, (1995).
43. B. Kruse and M. Wedin, A new approach to dot gain modeling, *TAGA Proceeding*, 329, (1995).
44. P. Kubelka and F. Munk, Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche, *Z. Tech. Phys. (Leipzig)*, **vol.12**, 593-601, (1931).
45. P. Kubelka, New contributions to the optics intensely light-scattering materials. Part I, *Opt. Soc. Am.* **vol.38**, 448-457, (1948).

46. P. Kubelka, New contributions to the optics intensely light-scattering materials. Part II: Nonhomogeneous layers, *J. Opt. Soc. Am.* **vol.44**, 330-335, (1954).
47. D. L. Lau and G. R. Arce, Modern Digital Halftoning, *Signal Processing and Communications, Marcel Dekker*, (2001).
48. Mikac Dadić, Višnja; Džimbeg-Malčić, Vesna; Modrić, Damir: *Primjena X-Rite spektrofotometra u mjerenju spektralnih i kolorimetrijskih svojstava obojenih uzoraka*, 6. Znanstveno-stručni simpozij hrvatskih grafičara «Blaž Baromić», Zbornik radova, 81-86 (2002).
49. V. Mikac-Dadić, V. Džimbeg-Malčić, Neka optička svojstva ofsetnih podloga, Lovran (2004).
50. V. Mikac-Dadić, V. Džimbeg-Malčić i D. Modrić, Optička ispitivanja interakcije svjetlosti sa tiskovnim podlogama, 5. Znanstveno-stručni simpozij hrvatskih grafičara «Blaž Baromić», Zbornik radova, 58-66 (2001).
51. V. Mikac-Dadić, V. Džimbeg-Malčić, Z. Bolanča i S. Bolanča, Modulirana prijenosna funkcija odabranih tiskovnih podloga, Lovran (2005), bit će objavljeno
52. M. S. Mourad, Color Predicting Model for Electrophotographic Prints on Common Office Paper, *PhD Dissertation No. 40*, Lausanne, (2002).
53. M. S. Mourad, P. Emmel, K. Simon and R. D. Hersch, Extending Kubelka-Munk's Theory with Lateral Light Scattering, *IS&T's NIP 17: International Conference on Digital Printing Technologies*, 469-473, (2002).
54. N. Mrvac, Sinteza interakcija odabranih parametara grafičke reprodukcije, Doktorska disertacija, Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb (2003).
55. A. Murray, Monochrome Reproduction in Photoengraving, *Technical Report of the J. Franklin Institute* **vol.221**, (1936)
56. K. Nassau, The Physics and Chemistry of Color, *J. Wiley & Sons*, New York, (2001).
57. P. Oittinen and h. Saareima, *Paperi Ja Puu Paper & Timper*, **vol. 75**, 66 (1993).
58. P. Oittinen, in *Advances in Printing Science and Technology*, W. H. Banks, Ed, *Pentech Press*, London, **vol. 16**, 121-128, (1982).
59. M. Paić, Osnove Fizike, IV dio, Svjetlost-Holografija-Laseri, *Sveučilišna naklada Liber*, Zagreb, (1983).
60. N. Pauler, *Paper Optics*, AB Lorentzen & Wettre, Sweden, 2001
61. W. W. Pope, TAGA Proceedings, 142 (1989).
62. G. Rogers, Optical dot gain in a halftone print, *J. Imaging Sci. Technol.*, **vol. 41**, 643-656, (1997).
63. G. Rogers, Lateral Scattering Probabilities, *J. Imaging Sci. Technol.* **vol.42**, 336 (1998).
64. G. Rogers, Effect of light scatter on halftone color, *J. Opt. Soc. Am. A* **vol. 15**, 1813-1821, (1998).
65. G. Rogers, A generalized Clapper-Yule model of halftone reflectance, *Color Research and Application*, **vol. 25**, 402-407, (2000).
66. F. Ruckdeschel and O. Hauser, Yule-Nielsen Effect in Printing: a Physical Analysis, *Appl. Opt.* **vol. 17**, 3376-3383, (1978).
67. Y. Shiraiwa and T. Mizuna, Equation to predict colors of halftone prints considering the optical properties of paper, *J. Imaging Sci. Technol.* **vol. 39**, 385-391, (1993).

68. K. Simon, A Stochastic Interpretation of Kubelka-Munk, The First European Conference on Colour in Graphics, Image and Vision, IS&T, Poitiers, France, 468-472, (2002)
69. I. Supek, Teorijska fizika i struktura materije, drugi dio, Školska knjiga, Zagreb, (1977).
70. Tehnička enciklopedija
71. A. Ufuk Agar, A Spectral Model for Halftone Color Prediction, Hewlett-Packard Laboratories, Palo Alto, USA, (2000).
72. D. Y. Tzeng and R. S. Berns, Spectral Reflectance Prediction of Ink Overprints by Kubelka-Munk Turbid Media Theory, *TAGA Proceeding*, 682-697, (2001).
73. L. Yang, B. Kruse and R. Lenz, Light Scattering and Ink Penetration Effects on Tone Reproduction, *J. Opt. Soc. Am A*
74. L. Yang and B. Kruse, Scattering and Absorption in Turbid Media, Department of Science and Technology, Linkoping University, SE-601 74, Sweden, (2000).
75. L. Yang, S. Gooran and B. Kruse, Simulation of Optical Dot Gain in Multichromatic Tone Production, *J. Imaging Sci. Technol.* **vol. 45**, 198-204, (2001).
76. H. Wakeshima and T. Kunishi, *J. Opt. Soc. Am.*, **vol. 58**, 272 (1968).
77. V. F. Weiskoph, How Light Interacts with Matter, Lasers and Light, readings from Scientific American, W. H. Freeman and Company, San Francisco, (1979).
78. D. R. Wyble and R. S. Berns, A critical review of spectral models applied to binary color printing, *Color Research and Application*, **vol. 25**, 4-19, (2000).
79. G. Wyszecki and W. S. Stiles, *Color Science*, 2nd ed., J. Wiley & Sons, New York, (2000).
80. [www. X-rite.com](http://www.X-rite.com)
81. [www. qea.com](http://www.qea.com)
82. [www. Heidelberg.com](http://www.Heidelberg.com)
83. J. Yule and W. Nielsen, The penetration of light into paper and its effect on halftone reproduction, *TAGA Proceeding*, **vol. 3**, 65-76, (1951).
84. J. Yule, D. Howe and J. Altman, *TAPPI*, 337 (1967).

9. Prilozi

9.1 Matematički dodaci

9.1.1 Interakcije svjetlosti i materije

Interakcija svjetlosti s materijom se opisuje kao međudjelovanje elektromagnetskog vala i objekta (sustava) koji je prikazan pomoću prisilnog titranja čestica. Ozračeni atomi predstavljaju harmoničke oscilatore i od neutralnih atoma induciraju se u male električne dipole.

Zakon harmoničkog titranja najbolje ćemo uočiti ako promatramo uteg obješen na elastičnu oprugu (slika 86). Kada uteg izvučemo iz ravnotežnog položaja i pustimo zbog utjecaja elastične sile F uteg počinje titrati.

$$F = -k s$$

1. 9. 1.1

gdje je k konstanta opruge, a s elongacija (pomak iz ravnotežnog položaja).

Harmonička sila F ima negativni predznak pošto je njeno djelovanje suprotnog smjera od smjera izvlačenja utega i svaki sistem koji titra zbog nje nazivamo harmonički oscilator.

Pri takvom pravocrtном gibanju uz pretpostavku malenog trenja, smanjenje amplitude u malim vremenskim periodima je zanemarivo, pa ovakvo titranje možemo smatrati neprigušenim.

Da bi se utvrdilo kako titra harmonički oscilator, potrebno je riješiti jednadžbu gibanja za takvo titranje (2 Newtonov zakon).

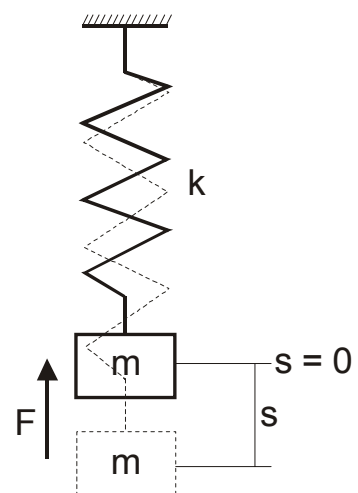
Drugi Newtonov zakon glasi:

$$F = m a \quad 2. 9. 1.1$$

$$F = m \frac{d^2 s}{dt^2} = -k s \quad 3. 9. 1.1$$

odnosno

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + \frac{k}{m} s = 0 \quad 4. 9. 1.1$$



Slika 86: Titranje tijela na opruzi

Ova jednadžba je homogena linearna diferencijalna jednadžba drugog reda. Iz nje možemo izračunati elongaciju s , brzinu v i akceleraciju a . Postoje dva linearno neovisna rješenja ove jednadžbe, a opće je rješenje linearna kombinacija tih dvaju rješenja:

$$s(t) = a \sin \omega t + b \cos \omega t \quad 5.9.1.1$$

Zamijenimo li $a = A \cos \varphi_0$ i $b = A \sin \varphi_0$ izraz poprima oblik:

$$s(t) = A \sin (\omega t + \varphi_0) \quad 6.9.1.1$$

Uvrštavanjem gornje jednadžbe u diferencijalnu jednadžbu 4.9.1.1 dobivamo:

$$-A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) + \frac{k}{m} A \sin(\omega t + \varphi_0) = 0 \quad 7.9.1.1$$

Jednadžba 7.9.1.1 mora vrijediti u svakom trenutku t , pa slijedi i izraz:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad 8.9.1.1$$

Jednadžba 4.9.1.1 ima rješenje u obliku sinusne (harmoničke) funkcije:

$$s(t) = A \sin \left(\sqrt{\frac{k}{m}} t + \varphi_0 \right) \quad 9.9.1.1$$

Rješenje funkcije $s(t)$ periodička je funkcija i s njom je opisano periodičko gibanje s periodom harmonijskog titranja:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad 10.9.1.1$$

Frekvencija titranja je recipročna vrijednost perioda T i dana je izrazom:

$$\nu = \frac{1}{T}$$

11. 9. 1.1

Veličina

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$$

12. 9. 1.1

je kružna frekvencija i izražava se jedinicom recipročne sekunde [s⁻¹].

Derivirajući po vremenu, iz elongacije dobivamo brzinu i akceleraciju. Kao rezultat prve derivacije je brzina tijela koje titra:

$$v(t) = \frac{ds}{dt} = A\omega \cos(\omega t + \varphi_0)$$

13. 9. 1.1

Rezultat druge derivacije je akceleracija:

$$a(t) = \frac{d^2s}{dt^2} = -A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 s(t)$$

14. 9. 1.1

Prisilno titranje, rezonancija

Prisilno titranje nastaje kada vanjska sila djeluje na sistem koji titra i time nadoknađuje trenjem izgubljenu energiju.

Kod harmoničkog oscilatora pretpostavili smo da nema gubitaka zbog trenja i da je ukupna mehanička energija održana. Pri takvom je titranju također i amplituda konstantna. Ako postoje gubici energije, amplituda će se s vremenom smanjivati i na kraju titranje prestaje. Takvo titranje za razliku od prethodnih nazivamo prigušeno titranje. Za uteg koji titra u zraku prigušenje je dosta slabo pa izgleda kao da je titranje neprigušeno, dok ako taj uteg uronimo u neku viskoznu tekućinu možemo opaziti prigušeno titranje.

Kada vidljiva svjetlost valne duljine u intervalu od 375 do 750 nm naiđe na materiju koja titra frekvencijom $\omega = 2\pi\nu_0$, materija vrši prisilno gibanje.

Rezultantna sila prisilnog gibanja glasi:

$$F_R = -kx + F_V$$

15. 9. 1.1

pri čemu je $k = m\omega_0^2$, a F_V je vanjska sila elektromagnetskog polja koje djeluje na materiju.

Titranje se odvija frekvencijom vanjskog polja, a amplituda je ovisna o odnosu frekvencije upadnog elektromagnetskog vala i vlastite frekvencije sistema.

Konačni oblik prisilnog titranja je:

$$x = A \sin \omega t = \frac{e}{m(\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega)} E_0 \sin \omega t \quad 16.9.1.1$$

Amplituda (ω) ovisi o omjeru kružnih frekvencija vanjskog oscilatora i vlastite frekvencije sistema koji titra (ω/ω_0) i prigušenju (γ). Amplituda doseže maksimum pri rezonantnoj frekvenciji ω_r , koju možemo odrediti izračunavanjem maksimalne amplitude.

9. 1.2 izvod Kubelka-Munk formule

Uz pretpostavku da čestice pigmenta daju, Fresnelovom refleksijom ili raspršenjem svjetlosti, savršenu difuziju, može se izraditi matematički model i izvesti teoretske relacije koje se koriste u praksi.

Za početak moramo pretpostaviti da će se tokovi svjetlosti koji su paralelni s rubovima sloja bojila međusobno poništiti. Koliko svjetlosti dolazi s lijeve strane isto toliko dolazi i s desne tako da se paralelni tokovi ne moraju uzeti u obzir. Čak i pri rubovima uzorka gdje svjetlosni tok izlazi i tako sprečava poništavanje možemo taj tok zanemariti jer on nema velik utjecaj na svjetlosne tokove okomite na podlogu.

Kada promatramo tokove svjetlosti koji prolaze okomito kroz obojeni sloj u obzir uzimamo dva difuzna toka od kojih jedan ide prema dolje kroz sloj, a drugi simultano prema gore.

Razmotrimo što se događa s tokom svjetlosti usmjerenim prema dolje (i) tijekom njegovog prolaska kroz neki elementarni obojeni sloj. Debljina tog elementarnog obojenog sloja označena je s dx i ona je puno manja od ukupne debljine sloja bojila X , ali je veća od podloge čestica pigmenta tako da ne moramo uzeti u obzir djelovanje svake pojedine čestice pigmenta već njihov prosječni utjecaj. Taj utjecaj očituje se u smanjenju jakosti toka svjetlosti za $Kidx$ apsorpcijom, odnosno za $Sidx$ raspršenjem. K je postotak svjetlosti koji se izgubi apsorpcijom u elementarnom sloju bojila dok je S postotak svjetlosti koji se izgubi zbog promjene smjera odnosno raspršenja. K i S su poznati kao koeficijent apsorpcije odnosno koeficijent raspršenja i direktno su povezani s materijalom od kojeg se obojeni sloj sastoji.

Kako kroz elementarni obojeni sloj prolazi tok svjetlosti iz drugog smjera (s donje strane sloja) i kod njega također dolazi do gubitka za $Kjdx$ i $Sjdx$. Dio toka svjetlosti koji se rasprši i tako promijeni smjer dodaje se primarnim tokovima svjetlosti pa dobivamo sljedeće izraze:

$$dj = -(S + K)jdx + Sidx \quad 1. 9.1.2$$

$$-di = -(S + K)idx + Sjdx \quad 2. 9.1.2$$

Razlika u predznaku je zbog različitog smjera dvaju tokova.

Ako 1. 9.1.2 podijelimo s j , a 2. 9.1.2 s i i zbrojimo dobivamo sljedeće:

$$\frac{dj}{j} - \frac{di}{i} = -2(S + K)dx + S\left(\frac{i}{j} + \frac{j}{i}\right)dx \quad 3. 9.1.2$$

Kako je:

$$\frac{d\left[\ln\left(\frac{j}{i}\right)\right]}{dx} = \frac{d[\ln(j) - \ln(i)]}{dx}$$

$$= \frac{\partial \ln(j)}{\partial j} \frac{dj}{dx} - \frac{\partial \ln(i)}{\partial i} \frac{di}{dx}$$

$$= \frac{l}{j} \frac{dj}{dx} - \frac{l}{i} \frac{di}{dx}$$

$$d \left[\ln \left(\frac{j}{i} \right) \right] = \frac{dj}{j} - \frac{di}{i} \quad 4.9.1.2$$

Slijedi:

$$d \left[\ln \left(\frac{j}{i} \right) \right] = -2(S+K)dx + S \left(\frac{i}{j} + \frac{j}{i} \right) dx \quad 5.9.1.2$$

Definiramo $R = \frac{I}{I_0}$ kao reflektanciju obojenog sloja, a $r = \frac{j}{i}$ kao reflektanciju elementarnog sloja i $d(\ln r) = \frac{dr}{r}$.

Tada je:

$$\frac{dr}{r} = \left[-2(S+K) + S \left(\frac{l}{r} + r \right) \right] dx \quad 6.9.1.2$$

$$\frac{dr}{r} = S \left[\left(\frac{l}{r} + r \right) - 2 \left(l + \frac{K}{S} \right) \right] dx \quad 7.9.1.2$$

$$\frac{dr}{r \left[\left(\frac{l}{r} + r \right) - 2 \left(\frac{S+K}{S} \right) \right]} = S dx \quad 8.9.1.2$$

te integracijom izraza dobivamo:

$$\int_{R_g}^R \frac{dr}{l + r^2 - 2\left(\frac{S+K}{S}\right)r} = S \int_0^x dx \quad 9.9.1.2$$

što daje R kao funkciju S , K i R_g .

Neka $a = \frac{S+K}{S} = 1 + \frac{K}{S}$, tada jednadžba 9.9.1.2 postaje:

$$\int_{R_g}^R \frac{dr}{r^2 - 2ar + 1} = S \int_0^x dx \quad 10.9.1.2$$

Lijevu stranu jednadžbe riješimo pomoću parcijalnih razlomaka.

Izjednačimo $r^2 - 2ar + 1 = 0$ i riješimo:

$$r = \frac{2a \pm \sqrt{4a^2 - 4}}{2} = a \pm \sqrt{a^2 - 1}$$

$$r^2 - 2ar + 1 = (r - a - \sqrt{a^2 - 1})(r - a + \sqrt{a^2 - 1})$$

$$\frac{1}{r^2 - 2ar + 1} = \frac{A}{(r - a - \sqrt{a^2 - 1})} + \frac{B}{(r - a + \sqrt{a^2 - 1})}$$

Svođenje desne strane jednadžbe pod zajednički nazivnik daje:

$$A(r - a + \sqrt{a^2 - 1}) + B(r - a - \sqrt{a^2 - 1}) = 1$$

Usporedimo koeficijente uz r :

$$A+B=0$$

Usporedimo konstante:

$$A(-a + \sqrt{a^2 - 1}) + B(-a - \sqrt{a^2 - 1}) = 1 \quad 11.9.1.2$$

Koristeći jednadžbu 11.9.1.2 dobivamo:

$$-B(-a + \sqrt{a^2 - 1}) + B(-a - \sqrt{a^2 - 1}) = 1$$

$$aB - B\sqrt{a^2 - 1} - aB - B\sqrt{a^2 - 1} = 1$$

$$B = \frac{1}{2\sqrt{a^2 - 1}}$$

$$A = \frac{1}{2\sqrt{a^2 - 1}}$$

Jednadžba 10.9.1.2 postaje:

$$\int_{R_g}^R \left(\frac{1}{r - a - \sqrt{a^2 - 1}} - \frac{1}{r - a + \sqrt{a^2 - 1}} \right) dr = 2\sqrt{a^2 - 1} S \int_0^x dx$$

$$\ln \left(\frac{r - a - \sqrt{a^2 - 1}}{r - a + \sqrt{a^2 - 1}} \right) \Big|_{R_g}^R = 2\sqrt{a^2 - 1} SX$$

$$\ln \left(\frac{R - a - \sqrt{a^2 - 1}}{R - a + \sqrt{a^2 - 1}} \cdot \frac{R_g - a + \sqrt{a^2 - 1}}{R_g - a - \sqrt{a^2 - 1}} \right) = 2\sqrt{a^2 - 1} SX$$

Uobičajena supstitucija je $b = \sqrt{a^2 - 1}$

koja daje:

$$\ln\left(\frac{R-a-b}{R-a-b} \cdot \frac{R_g-a-b}{R_g-a-b}\right) = 2bSX \quad 12.9.1.2$$

Razmotrimo granični uvjet gdje je $X = \infty$, $R = R_\infty$ i R_g bilo koja vrijednost, jer svjetlost ne dolazi do pozadine, u ovom slučaju $R_g = 0$.

Lijeva strana jednadžbe 12.9.1.2 mora biti jednaka ∞ , što znači da nazivnik mora biti jednak 0:

$$R_\infty = a - \sqrt{a^2 - 1} \quad 13.9.1.2$$

$$= 1 + \frac{K}{S} - \sqrt{\frac{K^2}{S^2} + \frac{2K}{S}} \quad 14.9.1.2$$

Jednadžbu 14.9.1.2 možemo aproksimirati kao:

$$R_\infty = 1 - \sqrt{\frac{2K}{S}}$$

Jednadžba 14.9.1.2 implicira da R_∞ može biti isključivo < 1 ako K nije 0. To zadovoljava jer ako nema apsorpcije sva svjetlost se mora raspršiti dok ne dođe do gornje granice obojenog sloja.

Izraz iz jednadžbe 13.9.1.2

$$a - R_\infty = \sqrt{a^2 - 1}$$

kvadriramo te dobivamo:

$$a^2 - 2aR_\infty + R_\infty^2 = a^2 - 1$$

$$a = \frac{R_\infty^2 + 1}{2R_\infty}$$

$$1 + \frac{K}{S} = \frac{R_\infty^2 + 1}{2R_\infty}$$

$$\frac{K}{S} = \frac{(R_\infty - 1)^2}{2R_\infty} \quad 15.9.1.2$$

$$\begin{aligned} \sqrt{a^2 - 1} &= \sqrt{\frac{(R_\infty^2 + 1)^2}{4R_\infty} - 1} \\ &= \frac{1}{2R_\infty} \sqrt{R_\infty^4 - 2R_\infty^2 + 1} \end{aligned}$$

i po dogovoru, $b = \frac{1 - R_\infty^2}{2R_\infty}$

Supstitucijom a i b u jednadžbi 12. 9.1.2 i pojednostavljenjem dobivamo:

$$SX = \frac{R_\infty}{1 - R_\infty^2} \ln \left[\frac{\left(R_g - R_\infty \right) \left(R - \frac{1}{R_\infty} \right)}{\left(R_g - \frac{1}{R_\infty} \right) (R - R_\infty)} \right] \quad 16.9.1.2$$

Korisno je iz jednadžbe 16. 9.1.2 pronaći R :

$$e^{\frac{(1-R_\infty^2)SX}{R_\infty}} = \frac{\left(R_g - R_\infty \right) \left(R - \frac{1}{R_\infty} \right)}{\left(R_g - \frac{1}{R_\infty} \right) (R - R_\infty)}$$

$$(R - R_\infty) e^{\frac{(1-R_\infty^2)SX}{R_\infty}} = \frac{\left(R_g - R_\infty \right) \left(R - \frac{1}{R_\infty} \right)}{R_g - \frac{1}{R_\infty}}$$

Preuređivanjem dobivamo:

$$R \left[e^{\frac{(1-R_\infty^2)SX}{R_\infty}} - \frac{R_g - R_\infty}{R_g - \frac{1}{R_\infty}} \right] = -\frac{1}{R_\infty} \left(\frac{R_g - R_\infty}{R_g - \frac{1}{R_\infty}} \right) + R_\infty e^{\frac{(1-R_\infty^2)SX}{R_\infty}}$$

$$R = \frac{\frac{1}{R_\infty} (R_g - R_\infty) - R_\infty \left(R_g - \frac{1}{R_\infty} \right) e^{SX \left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty \right)}}{R_g - R_\infty - \left(R_g - \frac{1}{R_\infty} \right) e^{SX \left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty \right)}}$$

17. 9.1.2

U tablici 25 su navedene varijable Kubelka-Munk teorije i njihove međusobne relacije.

Tablica 25 Relacije između varijabli Kubelka-Munk teorije

$R = f(SX, R_g, R_\infty)$	$R = \frac{1 - R_g(a - bctghbSX)}{a - R_g + bctghbSX}$
$R_0 = f(SX, R_\infty)$	$R_0 = 1/(a + bctghbSX)$
$T_i = f(SX, R_\infty)$	$T_i = b/(a \sinh bSX + b \cosh bSX)$
$SX = f(R, R_g, R_\infty)$	$SX = \frac{1}{b} \left(\text{Arctgh} \frac{a - R}{b} - \text{Arctgh} \frac{a - R_g}{b} \right)$
$SX = f(R_0, R_\infty)$	$SX = \frac{1}{b} \text{Arctgh} \frac{1 - aR_0}{bR_0}$
$SX = f(T_i, R_\infty)$	$SX = \frac{1}{b} \left(\text{Arsinh} \frac{b}{T_i} - \text{Arsinh} b \right)$
$R_0 = f(T_i, R_\infty)$	$R_0 = a - (T_i^2 + b^2)^{1/2}$
$T_i = f(R_0, R_\infty)$	$T_i^2 = (a - R_0)^2 - b^2$
$R_\infty = f(R_0, T_i)$	$a = \frac{1 + R_0^2 - T_i^2}{2R_0}$
$R = f(R_0, R_g, R_\infty)$	$R = \frac{R_0 - R_g(2aR_0 - 1)}{1 - R_0R_g}$
$R_0 = f(R, R_0, R_g)$	$R_0 = \frac{(R - R_g)}{1 - R_g(2a - R)}$
$R_\infty = f(R, R_0, R_g)$	$a = \frac{1}{2} \left(R + \frac{R_0 - R + R_g}{R_0R_g} \right)$
$R = f(R_0, T_i, R_g)$	$R = \frac{R_0 + T_i^2 R_g}{1 - R_0R_g}$
$T_i = f(R, R_0, R_g)$	$T_i^2 = (R - R_0)(1/R_g - R_0)$
$R = f(R_1, R_0, R_g)$	$R = \frac{R_0(1 - R_g) + R_1R_g(1 - R_0)}{1 - R_0R_g}$
$R_1 = f(R, R_0, R_g)$	$R_1 = \frac{R - R_0 + R_0R_g(1 - R)}{R_g(1 - R_0)}$

9. 1.3 Yule-Nielsenov parametar

Računanje Yule-Nielsenovog faktora n , kao eksponenta u transcendentnoj jednadžbi, koja se rješava numerički:

$$R_{\lambda mi}^x = F_b \cdot R_{bi}^x + (1 - F_b) \cdot R_{pi}^x \quad x=1/n \quad i = 0, 1, \dots, 29$$

U ovoj jednadžbi $R_{\lambda mi}$, R_{bi} i R_{pi} su jednostupčane matrice od 30 članova koje predstavljaju mjerene spektre u refleksiji od 410 do 700nm za svakih 10nm:

$R_{\lambda mi}$ ukupna refleksija rasterske slike za $F_b = 0,2; 0,4; 0,6$ i $0,8$

R_{bi} refleksija bojila (CMYK) za $F_b = 1$

R_{pi} refleksija tiskovne podloge za $F_b = 0$.

Matematička obrada podataka provedena je u programu Mathcad, 2002 Professional. U prilogu je primjer za crno bojilo otisnuto frekventno moduliranim rasterom na ofsetnoj podlozi, $F=20\%$.

$$i := 0..29 \quad L_i := (A \langle 0 \rangle)_i \quad n_values_off_FMf_K20R0$$

$$Rm_i := (A \langle 2 \rangle)_i$$

$$Rc_i := (A \langle 3 \rangle)_i \quad Rs_i := (A \langle 1 \rangle)_i$$

guess value: $0.5 \leq x \leq 1$

$$\text{root}[0.2 \cdot (Rc_i)^x + 0.8 \cdot (Rs_i)^x - (Rm_i)^x, x]$$

$$B(A) := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..29 \\ \text{for } x \in \frac{1}{2}..1 \\ V_i \leftarrow \text{root}[0.2 \cdot (Rc_i)^x + 0.8 \cdot (Rs_i)^x - (Rm_i)^x, x] \\ V \end{array} \right.$$

$$n(A) := \frac{1}{B(A)}$$

9.2 Popis slika i tablica

Slika 1 Johannes Gutenberg, ilustracija iz 1584. godine

Slika 2 Stranica iz Gutenbergove biblije

Slika 3 Osnovni prikaz interakcije elektromagnetskog zračenja i materije.

Slika 4 Amplituda valova elektromagnetskog zračenja kao posljedica rezonantne i nerezonantne interakcije s materijom

Slika 5 Disperzija bijele svjetlosti

Slika 6 Krivulja $n = f(\omega)$

Slika 7. Interakcija svjetlosti i tiskovne podloge: 1 - upadna zraka svjetlosti, 1'- površinska refleksija, 2'- difuzna refleksija, 3 i 6 – unutrašnja refleksija (zraka 6 ne izlazi iz podloge tiskovne podloge), 4- svjetlost je djelomično apsorbirana, 5- transmitirana svjetlost

Slika 8a i 8b Raspršenje i apsorpcija transmitirane svjetlosti prolaskom kroz objekt debljine L.

Slika 9 Reflektancija bojila velikog koeficijenta apsorpcije otisnutog na tiskovnu podlogu.

Slika 10 Svjetlost reemitirana s podloge djeluje na mrežnicu ljudskog oka i u mozgu izaziva bojeni osjet.

Slika 11 Spektralna raspodjela bojila cijana, magente i žutog bojila.

Slika 12 Prosječna krivulja luminoziteta za 200 promatrača za dnevno i noćno gledanje.

Slika 13 Tristimulusne vrijednosti spektralnih boja.

Slika 14 Promjena opaciteta s gramaturom za tiskovnu podlogu bez punila (0%) i s udjelom punila od 20%.

Slika 15 Sustav debljine L koji apsorbira svjetlost, ali je ne raspršuje.

Slika 16 Prikaz osnovnih veličina za izvod Kubelka-Munk jednadžbe.

Slika 17 Beer-Lambertov sustav (bojilo raspršenja $S=0$) na papiru koje raspršuje svjetlost.

Slika 18 Uz definiciju refleksivnosti R_{∞} i reflektancije R_0 .

Slika 19 Pretpostavljeni put svjetlosti prema Murray-Daveisovom modelu.

Slika 20 Pretpostavljeni put svjetlosti prema Yule-Nielsenovom modelu.

Slika 21 Optičko povećanje veličine rasterskog elementa uslijed bočnog raspršenja.

Slika 22 Moguće putanje fotona u zamućenom sredstvu (turbid medium), odnosno papiru.

Slika 23 Moguće putanje fotona u papiru otisnutom rasterskim elementima.

Slika 24 a i b Osnovne pretpostavke Oittinen-Engeldrumovog modela

Slika 25 Jednodimenzionalni linijski rasterski sustav kojeg opisujemo Fourierovim redom.

Slika 26 Razlučivost linijske strukture s obzirom na vizualnu percepciju ljudskog oka pri udaljenosti od 25cm.

Slika 27 Postizanje različitih rastertonskih vrijednosti amplitudnom i frekventnom modulacijom.

Slika 28 Slika dobivena konvencionalnim, amplitudno moduliranim rasterom.

Slika 29 Slika dobivena frekventno moduliranim rasterom.

Slika 30 a i b Postizanje tonske gradacije amplitudnom i frekventnom modulacijom.

Slika 31 Blok dijagram plana rada.

Slika 32 Standardni izvori svjetlosti pri refleksijskim mjerenjima: C odgovara dnevnom svjetlu kao i D65 uz dodatak UV komponente, dok A predstavlja običnu lampu s volframovom niti.

Slika 33 Geometrija mjerenja $d/0^0$.

Slika 34 Shematski prikaz Heidelberg SpeedMaster-a 74.

Slika 35 Ovisnost reflektirane svjetlosti o valnoj duljini za karakteristični niz diskretnih vrpci.

Slika 36 Pretvaranje spektralnih podataka odabranog uzorka u kolorimetrijske vrijednosti pomoću standardnog motritelja i standardnog izvora svjetlosti..

Slika 37 Spektrofotometar, X-Rite Digital Swatchbook.

Slika 38 Anlizator slike korišten u ovom radu.

Slika 39 Refleksijski spektri mjereni na ofsetnoj i recikliranoj tiskovnoj podlozi, te na papirima za umjetnički tisak (sjajni i mat), na crnoj podlozi, R_0 i na sloju od 20 uzoraka, R_∞ .

Slika 40a Područja rasipanja mjenjenih vrijednosti reflektancija, $R_0 \text{ Range} = R_{0\text{max}} - R_{0\text{min}}$ i reflektivnosti, $R_\infty \text{ Range} = R_{\infty\text{max}} - R_{\infty\text{min}}$, te razlika između reflektivnosti i reflektancije, $R_\infty - R_0$ za papir za umjetnički tisak, sjajni.

Slika 40b Područja rasipanja mjenjenih vrijednosti reflektancija, $R_0 \text{ Range} = R_{0\text{max}} - R_{0\text{min}}$ i reflektivnosti, $R_\infty \text{ Range} = R_{\infty\text{max}} - R_{\infty\text{min}}$, te razlika između reflektivnosti i reflektancije, $R_\infty - R_0$ za papir za umjetnički tisak, mat.

Slika 40c Područja rasipanja mjenjenih vrijednosti reflektancija, $R_0 \text{ Range} = R_{0\text{max}} - R_{0\text{min}}$ i reflektivnosti, $R_\infty \text{ Range} = R_{\infty\text{max}} - R_{\infty\text{min}}$, te razlika između reflektivnosti i reflektancije, $R_\infty - R_0$ za ofsetnu tiskovnu podlogu.

Slika 40d Područja rasipanja mjenjenih vrijednosti reflektancija, $R_0 \text{ Range} = R_{0\text{max}} - R_{0\text{min}}$ i reflektivnosti, $R_\infty \text{ Range} = R_{\infty\text{max}} - R_{\infty\text{min}}$ te razlika između reflektivnosti i reflektancije, $R_\infty - R_0$ za recikliranu tiskovnu podlogu.

Slika 41a Koeficijenti apsorpcije 10^*k kao funkcija valne duljine za ofsetni i umjetnički papir, sjajni i mat. Za recikliranu tiskovnu podlogu vrijednosti koeficijenta apsorpcije su k_{rec} .

Slika 42 Opacitet kao funkcija valne duljine za sve mjerene tiskovne podloge.

Slika 43 Modulacijske prijenosne funkcije (MTF) za sve četiri tiskovne podloge. $M1(\omega)$ i $M2(\omega)$ označavaju MTF papira za umjetnički tisak, sjajni i mat, dok su $M3(\omega)$ i $M4(\omega)$ oznake za ofsetnu, odnosno recikliranu tiskovnu podlogu. Za MTF $(\omega) = 1/2$ očita se vrijednost od ω .

Slika 44a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0Cm}) i računani (R_{0Cr}), za cijan na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskani FM rasterom. Spektar je podijeljen s obzirom na dominantan tip interakcije između bojila i elektromagnetskog zračenja.

Slika 44b Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0Mm}) i računani (R_{0Mr}), za magentu na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskani FM rasterom. Spektar je podijeljen s obzirom na dominantan tip interakcije između bojila i elektromagnetskog zračenja.

Slika 44c Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0Ym}) i računani (R_{0Yr}), za žuto bojilo (yellow) na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskani FM rasterom. Spektar je podijeljen s obzirom na dominantan tip interakcije između bojila i elektromagnetskog zračenja.

Slika 44d Refleksijski spektri dobiveni mjerenjem (R_{0Km}) i računom (R_{0Kr}) za crno bojilo na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskani FM rasterom.

Slika 45a Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara ($R_r - R_m$) za cijan kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

Slika 45b Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara ($R_r - R_m$) za magentu kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

Slika 45 c Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara ($R_r - R_m$) za žuto bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

Slika 45 d Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara ($R_r - R_m$) za crno bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti

Slika 46 a Refleksijski spektri (R_0), mjereni ($R_{0m}C$) i računani ($R_{0r}C$) za cijan na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskani AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%. Spektar je podijeljen s obzirom na dominantan tip interakcije između bojila i elektromagnetskog zračenja.

Slika 46 b Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara (dR_rR_mC) za cijan kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

Slika 47a Refleksijski spektri (R_0), mjereni ($R_{0m}M$) i računani ($R_{0r}M$), za magentu na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskani AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%. Spektar je podijeljen s obzirom na dominantan tip interakcije između bojila i elektromagnetskog zračenja.

Slika 47b Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara (dR_rR_mM) za magentu kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

Slika 48 a Refleksijski spektri (R_0), mjereni ($R_{0m}Y$) i računani ($R_{0r}Y$), za žuto bojilo na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskani AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%. Spektar je podijeljen s obzirom na dominantan tip interakcije između bojila i elektromagnetskog zračenja.

Slika 48 b Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara (dR_rR_mY) za žuto bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

Slika 49 a Refleksijski spektri (R_0), mjereni ($R_{0m}K$) i računani ($R_{0r}K$), za crno bojilo na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskani AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80% .

Slika 49b Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara (dR_rR_mK) za crno bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti. $\Delta R > 0$ u cijelom vidljivom dijelu spektra.

Slika 50 a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0m}) i računani (R_{0r}), za cijan na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskani FM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80% . Spektar je podijeljen s obzirom na dominantan tip interakcije između bojila i elektromagnetskog zračenja.

Slika 50b Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara ($R_r - R_m$) za cijan kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

Slika 51 a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0m}) i računani (R_{0r}), za magentu na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskani FM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%. Spektar je podijeljen s obzirom na dominantan tip interakcije između bojila i elektromagnetskog zračenja.

Slika 51b Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara ($R_r - R_m$) za magentu kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

Slika 52 a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0m}) i računani (R_{0r}), za žuto bojilo na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskani FM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%. Spektar je podijeljen s obzirom na dominantan tip interakcije između bojila i elektromagnetskog zračenja.

Slika 52 b Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara ($R_r - R_m$) za žuto bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

Slika 53a Refleksijski spektri dobiveni mjerenjem (R_{0m}) i računom (R_{0r}) za crno bojilo na ofsetnoj tiskovnoj podlozi tiskani FM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80% .

Slika 53 b Razlika računskih i mjenjenih refleksijskih spektara ($R_r - R_m$) za crno bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

Slika 54 a Refleksijski spektri (R_0), mjereni ($R_{0m}C$) i računani ($R_{0r}C$), za cijan na recikliranoj tiskovnoj podlozi tiskani AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%.

Slika 54b Razlika računskih i mjerenih refleksijskih spektara (dR_rR_mC) za cijan kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

Slika 55a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0mM}) i računani (R_{0rM}), za magentu na recikliranoj tiskovnoj podlozi tiskani AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%.

Slika 55b Razlika računskih i mjerenih refleksijskih spektara (dR_rR_mM) za magentu kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

Slika 56 a Refleksijski spektri dobiveni mjerenjem (R_{0mY}) i računom (R_{0rY}) za žuto bojilo na recikliranoj tiskovnoj podlozi tiskani AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%.

Slika 56b Razlika računskih i mjerenih refleksijskih spektara (dR_rR_mY) za žuto bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

Slika 57 a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0mK}) i računani (R_{0rK}), za crno bojilo na recikliranoj tiskovnoj podlozi tiskani AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%.

Slika 57b Razlika računskih i mjerenih refleksijskih spektara (dR_rR_mK) za crno bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

Slika 58a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0mC}) i računani (R_{0rC}), za cijan na mat papiru zaumjetnički tisak tiskani AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%.

Slika 59a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0mY}) i računani (R_{0rY}), za žuto bojilo na mat papiru zaumjetnički tisak tiskani AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%.

Slika 59b Razlika računskih i mjerenih refleksijskih spektara ($R_r dR_mY$) za žuto bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

Slika 60a Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0mM}) i računani (R_{0rM}), za magentu na mat papiru zaumjetnički tisak tiskani AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%.

Slika 60b Razlika računskih i mjerenih refleksijskih spektara ($R_r dR_mM$) za magentu kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

Slika 60c Refleksijski spektri (R_0), mjereni (R_{0mK}) i računani (R_{0rK}), za crno bojilo na mat papiru zaumjetnički tisak tiskani AM rasterom za rastertonske vrijednosti od 20, 40, 60 i 80%.

Slika 60d Razlika računskih i mjerenih refleksijskih spektara ($R_r dR_mK$) za crno bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti.

Slika 61a Razlika između pokrivenosti podloge bojom i rastertonske vrijednosti za ofsetnu tiskovnu podlogu za sva bojila suptraktivne smjese CMYK otisnuta frekventno moduliranim rasterom.

Slika 61b Razlika između pokrivenosti podloge bojom i rastertonske vrijednosti za ofsetnu tiskovnu podlogu za sva bojila suptraktivne smjese CMYK otisnuta frekventno moduliranim rasterom.

Slika 62a Rješenje transcendentne jednadžbe za cijan otisnut FM rasterom na ofsetnoj tiskovnoj podlozi za $F=20\%$.

Slika 62b Rješenja transcendentne jednadžbe za parametar n rastertonskih vrijednosti $F=20, 40, 60$ i 80% u području dominantne refleksije cijana uz $\Delta R < 0$.

Slika 62c Rješenja transcendentne jednadžbe za parametar n za $F=20\%$, u području dominantne refleksije žutog bojila.

Slika 63a Yule-Nielsenov parametar n kao funkcija rastertonske vrijednosti i valne duljine u području selektivne apsorpcije cijana.

Slika 63b Yule-Nielsenov parametar n kao funkcija rastertonske vrijednosti i valne duljine u području selektivne apsorpcije magente.

Slika 63c Yule-Nielsenov parametar n kao funkcija rastertonske vrijednosti i valne duljine u području selektivne apsorpcije žutog.

Slika 63d Yule-Nielsenov parametar n kao funkcija rastertonske vrijednosti i valne duljine u području selektivne apsorpcije crnog.

Slika 64a Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske pokrivenosti bojilom, za ofsetnu tiskovnu podlogu otisnutu cijanom, amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm.

Slika 64b Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske pokrivenosti bojilom, za ofsetnu tiskovnu podlogu otisnutu magentom, amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm.

Slika 64c Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske pokrivenosti bojilom, za ofsetnu tiskovnu podlogu otisnutu žutim bojilom, amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm.

Slika 64d Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske pokrivenosti bojilom, za ofsetnu tiskovnu podlogu otisnutu crnim bojilom, amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm.

Slika 65a Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za recikliranu tiskovnu podlogu otisnutu cijanom, amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm.

Slika 65b Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za recikliranu tiskovnu podlogu otisnutu magentom, amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm.

Slika 65c Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za recikliranu tiskovnu podlogu otisnutu žutim bojilom, amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm.

Slika 65d Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za recikliranu tiskovnu podlogu otisnutu crnim bojilom, amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm.

Slika 66a Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za recikliranu tiskovnu podlogu otisnutu cijanom, frekventno moduliranim rasterom od 20 μm .

Slika 66b Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za recikliranu tiskovnu podlogu otisnutu magentom, frekventno moduliranim rasterom od 20 μm .

Slika 66c Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za recikliranu tiskovnu podlogu otisnutu žutim bojilom, frekventno moduliranim rasterom od 20 μm .

Slika 66d Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za recikliranu tiskovnu podlogu otisnutu crnim bojilom, frekventno moduliranim rasterom od 20 μm .

Slika 67a Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za papir za umjetnički tisak, mat, otisnut cijanom, amplitudno moduliranim rasterom.

Slika 67b Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za papir za umjetnički tisak, mat, otisnut magentom, amplitudno moduliranim rasterom.

Slika 67c Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za papir za umjetnički tisak, mat, otisnut žutim bojilom, amplitudno moduliranim rasterom.

Slika 67d Parametar n kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti, za papir za umjetnički tisak, mat, otisnut crnim bojilom, amplitudno moduliranim rasterom.

Slika 68a Razlika mjerenih refleksijskih spektara na snopu od 20 uzoraka, R_{∞} i na crnoj podlozi, R_0 , $R_{\infty}-R_0$, te područje rasipanja mjerenih veličina za cijan $R_{\infty Range} = R_{max}-R_{min}$ kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti ($F=20-100\%$).

Slika 68b Razlika mjerenih refleksijskih spektara na snopu od 20 uzoraka, R_{∞} i na crnoj podlozi, R_0 , $R_{\infty}-R_0$, te područje rasipanja mjerenih veličina za magentu $R_{\infty Range} = R_{max}-R_{min}$ kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti ($F=20-100\%$).

Slika 68c Razlika mjerenih refleksijskih spektara na snopu od 20 uzoraka R_{∞} i na crnoj podlozi R_0 , $R_{\infty}-R_0$, te područje (range) mjerenih veličina za žuto bojilo difY = $R_{max}-R_{min}$ kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti ($F=20-100\%$).

Slika 68d Razlika mjerenih refleksijskih spektara na snopu od 20 uzoraka, R_{∞} i na crnoj podlozi R_0 , $R_{\infty}-R_0$, te područje (range) mjerenih veličina za crno bojilo $R_{Range} = R_{max}-R_{min}$ kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti ($F=20-100\%$).

Slika 69 Razlika refleksijskih spektara, difY = $R_{\infty}-R_0$, mjerenih na snopu od 20 uzoraka, R_{∞} i na crnoj podlozi, R_0 , za žuto bojilo kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti ($F=20-100\%$).

Slika 70a Koeficijent raspršenja kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za cijan. U području selektivne apsorpcije cijana za $F=80$ i 100% vrijednosti koeficijenta raspršenja nisu realne.

Slika 70b Koeficijent raspršenja kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za magentu. U području selektivne apsorpcije magente za $F=100\%$ vrijednosti koeficijenta raspršenja nisu realne.

Slika 70c Koeficijent raspršenja kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za žuto bojilo. U području selektivne apsorpcije žutog za $F=60, 80$ i 100% vrijednosti koeficijenta raspršenja nisu realne.

Slika 70d Koeficijent raspršenja kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za crno bojilo. Za $F=100\%$ vrijednosti koeficijenta raspršenja nisu realne.

Slika 71a Koeficijent apsorpcije kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za cijan. U području selektivne apsorpcije cijana za $F=80$ i 100% vrijednosti koeficijenta apsorpcije nisu realne.

Slika 71b Koeficijent apsorpcije kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za magentu. U području selektivne apsorpcije magente za $F=100\%$ vrijednosti koeficijenta apsorpcije nisu realne.

Slika 71c Koeficijent apsorpcije kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za žuto bojilo. U području selektivne apsorpcije žutog za $F=60, 80$ i 100% vrijednosti koeficijenta apsorpcije nisu realne.

Slika 71d Koeficijent apsorpcije kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za crno bojilo. Za sve mjerene rastertonske vrijednosti koeficijent apsorpcije je realan u cijelom vidljivom dijelu spektra.

Slika 72a Koeficijent raspršenja kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za cijan. U području selektivne apsorpcije cijana za $F=80$ i 100% vrijednosti koeficijenta raspršenja nisu realne.

Slika 72b Koeficijent raspršenja kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za magentu. U području selektivne apsorpcije magente za $F=60, 80$ i 100% vrijednosti koeficijenta raspršenja nisu realne.

Slika 72c Koeficijent raspršenja kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za žuto bojilo. U području selektivne apsorpcije žutog za $F=60, 80$ i 100% vrijednosti koeficijenta raspršenja nisu realne.

Slika 72d Koeficijent raspršenja kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za crno bojilo. U cijelom području vidljivog dijela spektra elektromagnetskog zračenja, za sve mjerene rastertonske vrijednosti, koeficijent raspršenja je realan.

Slika 73a Koeficijent apsorpcije kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za cijan. U području selektivne apsorpcije cijana za $F= 80$ i 100% vrijednosti koeficijenta apsorpcije nisu realne.

Slika 73b Koeficijent apsorpcije kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za magentu. U području selektivne apsorpcije magente za $F= 80$ i 100% vrijednosti koeficijenta apsorpcije nisu realne.

Slika 73c Koeficijent apsorpcije kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za žuto bojilo. U području selektivne apsorpcije žutog za $F= 80$ i 100% vrijednosti koeficijenta apsorpcije nisu realne.

Slika 73d Koeficijent apsorpcije kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za crno bojilo. U cijelom području vidljivog dijela spektra elektromagnetskog zračenja, za sve mjerene rastertonske vrijednosti koeficijent apsorpcije je realan.

Slika 74a Koeficijent apsorpcije kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za cijan. U području selektivne apsorpcije cijana za $F= 60, 80$ i 100% vrijednosti koeficijenta apsorpcije nisu realne.

Slika 74b Koeficijent raspršenja kao funkcija valne duljine i rastertonske vrijednosti za cijan. U području selektivne apsorpcije cijana za $F= 60, 80$ i 100% vrijednosti koeficijenta raspršenja nisu realne.

Slika 75 Korelacija između koeficijenta raspršenja S i MTF parametra k_{mod} .

Slika 76 Korelacija vrijednosti parametra n za cijan tiskan amplitudno i frekventno moduliranim rasterom na ofsetnoj podlozi za $F=40\%$.

Slika 77 Korelacija vrijednosti parametra n za cijan tiskan amplitudno moduliranim rasterom na ofsetnoj i recikliranoj podlozi za $F=40\%$.

Slika 78 Spektari koeficijenta apsorpcije k za sve promatrane tiskovne podloge s naznačenim područjima selektivne apsorpcije za sva bojila suptraktivne smjese CMYK.

Slika 79 Spektari koeficijenta raspršenja s za sve promatrane tiskovne podloge s naznačenim područjima selektivne apsorpcije za sva bojila suptraktivne smjese CMYK.

Slika 80 Spektri parametra n i koeficijenta raspršenja s za koje je faktor korelacije $R=-0,425$.

Slika 81 Primjer loše korelacije (faktor $-0,425$) između koeficijenta raspršenja i parametra n za cijan pri rastertonskoj vrijednosti od 20% otisnut na mat papiru za umjetnički tisak.

Slika 82 Spektri parametra n i koeficijenta raspršenja s za koje je faktor korelacije $R=-0,96$.

Slika 83 Korelacija faktora $R=- 0,96$ između koeficijenta raspršenja s i parametra n za magentu tiskanu na mat papiru za umjetnički tisak

Slika 84 Spektri parametra n i koeficijenta apsorpcije k za koje je faktor korelacije $R=0,973$.

Slika 85 Korelacija faktora $R= 0,973$ između koeficijenta apsorpcije K i parametra n za magentu tiskanu na mat papiru za umjetnički tisak

Tablica 1 Gramatura (kgm^{-2}) i debljina (mm) svih mjerenih tiskovnih podloga.

Tablica 2 Kubelka-Munk parametri apsorpcije $K(\text{mm}^{-1})$ i raspršenja $S(\text{mm}^{-1})$, njihove relativne promjene δ_K i δ_S , te MTF parametar $k_{MTF} = 1/\omega(\text{mm}^{-1})$ i $k_{model}(\text{mm}^{-1})$.

Tablica 3 Srednje vrijednosti, te pripadne standardne devijacije parametra n , za ofsetnu podlogu otisnutu frekventno moduliranim rasterom od $20\mu\text{m}$, po rastućim rastertonskim vrijednostima od 20% do 80% u području selektivne apsorpcije.

Tablica 4 Srednje vrijednosti parametra n i pripadne standardne devijacije za CMYK sustav bojila otisnut amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm na ofsetnoj tiskovnoj podlozi.

Tablica 5 Srednje vrijednosti parametra n i pripadne standardne devijacije za CMYK sustav bojila otisnut amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm na recikliranoj tiskovnoj podlozi

Tablica 6 Srednje vrijednosti parametra n i pripadne standardne devijacije za CMYK sustav bojila otisnut frekventno moduliranim rasterom od 20 μ m na recikliranoj tiskovnoj podlozi, u području selektivne apsorpcije.

Tablica 7 Srednje vrijednosti parametra n i pripadne standardne devijacije za cijan i žuto bojilo otisnute amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm na mat papiru za umjetnički tisak, u području selektivne apsorpcije određenog bojila.

Tablica 8 Područja promatranog (vidljivog) dijela spektra za osnovna bojila suptraktivne smjese, otisnuta frekventno moduliranim rasterom na ofsetnoj tiskovnoj podlozi, u kojima se mogu računati koeficijenti apsorpcije i raspršenja.

Tablica 9 Područja promatranog (vidljivog) dijela spektra za osnovna bojila suptraktivne smjese, otisnuta amplitudno moduliranim rasterom na ofsetnoj tiskovnoj podlozi, u kojima se mogu računati koeficijenti apsorpcije i raspršenja.

Tablica 10 Područja selektivne apsorpcije osnovnih bojila suptraktivne smjese CMYK.

Tablica 11 Područja pozitivnih i negativnih razlika između računskih i mjerenih refleksijskih spektara dobivenih na ofsetnoj tiskovnoj podlozi za osnovne boje suptraktivne smjese CMYK otisnute frekventno moduliranim rasterom finoće 20 μ m.

Tablica 12 Područja pozitivnih i negativnih razlika između računskih i mjerenih refleksijskih spektara dobivenih na ofsetnoj tiskovnoj podlozi za osnovne boje suptraktivne smjese CMYK otisnute amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm.

Tablica 13 Maksimalne vrijednosti odstupanja računanih refleksijskih spektara u odnosu na mjerene, ΔR_{max} , kao funkcija primijenjenog rastera i rastertonske vrijednosti za ofsetnu tiskovnu podlogu.

Tablica 14 Područja pozitivnih i negativnih razlika između računskih i mjerenih refleksijskih spektara dobivenih na recikliranoj tiskovnoj podlozi za osnovne boje suptraktivne smjese CMYK otisnute frekventno moduliranim rasterom finoće 20 μ m.

Tablica 15 Područja pozitivnih i negativnih razlika između računskih i mjerenih refleksijskih spektara dobivenih na recikliranoj tiskovnoj podlozi za osnovne boje suptraktivne smjese CMYK otisnute amplitudno moduliranim rasterom od 80lin/cm.

Tablica 16 Maksimalne vrijednosti odstupanja računanih refleksijskih spektara u odnosu na mjerene, ΔR_{max} , kao funkcija primijenjenog rastera i rastertonske vrijednosti za recikliranu tiskovnu podlogu.

Tablica 17 Faktori korelacije između parametra n i koeficijenata apsorpcije K ($Z_{n i K}$) i raspršenja S ($Z_{n i S}$) Kubelka-Munk teorije za cijan u području selektivne apsorpcije

Tablica 18 Faktori korelacije između parametra n i koeficijenata apsorpcije K ($Z_{n i K}$) i raspršenja S ($Z_{n i S}$) Kubelka-Munk teorije za magentu u području selektivne apsorpcije.

Tablica 19 Faktori korelacije između parametra n i koeficijenata apsorpcije K ($Z_{n i K}$) i raspršenja S ($Z_{n i S}$) Kubelka-Munk teorije za žuto u području selektivne apsorpcije.

Tablica 20 Faktori korelacije između parametra n i koeficijenata apsorpcije K ($Z_{n i K}$) i raspršenja S ($Z_{n i S}$) Kubelka-Munk teorije za crno u području selektivne apsorpcije.

Tablica 21 Srednje vrijednosti i standardne devijacije parametra n za cijan na recikliranom, ofsetnom i mat papiru za umjetnički tisak.

Tablica 22 Srednje vrijednosti i standardne devijacije parametra n za magentu na recikliranom, ofsetnom i mat papiru za umjetnički tisak.

Tablica 23 Srednje vrijednosti i standardne devijacije parametra n za žuto bojilo na recikliranom, ofsetnom i mat papiru za umjetnički tisak.

Tablica 24 Srednje vrijednosti i standardne devijacije parametra n za crno bojilo na recikliranom, ofsetnom i mat papiru za umjetnički tisak.

Tablica 25 Relacije između varijabli Kubelka-Munk teorije.