

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET ZAGREB

ZAVRŠNI RAD

Marijana Martinac



Sveučilište u Zagrebu
Grafički fakultet

Smjer: Tehničko – tehnološki

ZAVRŠNI RAD

MODELI OPISA RASTERTONSKE SLIKE

Mentor:

Prof. dr. sc. Vesna Džimbeg-Malčić

Student:

Marijana Martinac

Zagreb, 2014.

SAŽETAK:

Rastertonska slika se sastoji od niza točaka umjesto punog tona. Te točke mogu biti različite veličine, boje, pa čak i različitog oblika. Veće točke se koriste za tamnije, gušće tonove slike, dok se manje točke koriste za svjetlija područja. Za vrijeme proizvodnog procesa dolazi do promjene u veličini rasterskog elementa, odnosno stvarna veličina rasterske točke na papiru veća je od njenog digitalnog originala. Ova pojava naziva se prirast rasterske točke. Prirast rasterske točke može utjecati na tonske vrijednosti stvarne slike. Ovo se događa dijelom zbog prodiranja bojila na i unutar papira, što se naziva mehanički prirast, a dijelom zbog raspršenja svjetlosti unuta papira, što se naziva optički prirast. Jedan od najvažnijih parametara kvalitete tiska je definiranje prirasta RTV-a koji se mora uskladiti s postojećim standardima.

Cilj ovog završnog rada je prikazati i objasniti modele kojima se opisuju te promjene unutar papira, a to su Murray-Daviesov i Yule-Nielsenov model.

KLJUČNE RIJEČI:

Prirast rasterske točke, raspršenje svjetlosti, RTV - rastertonska vrijednost, Murray - Daviesov model, Yule - Nieleseenov model

ABSTRACT:

A halftone image is made up of a series of dots rather than a continuous tone. These dots can be different sizes, different colours, and sometimes even different shapes. Larger dots are used to represent darker, more dense areas of the image, while smaller dots are used for lighter areas. During the printing process, we have some changes in the size of the halftone print, in other words, the printed dots appear bigger than the dots in the original digital bitmap. This phenomenon is called dot gain. Dot gain can affect the tone characteristics of a printed image. This is partly because of the spreading and penetrating of the ink on and in the paper, called physical dot gain, and partly because of the diffusion of the light in paper, which is referred to as optical dot gain. One of the most important parameters of the printing quality is defining the increase of TVI, which has to be synchronised with current standards.

The goal of this final work is to show and to define models that are used to describe these changes that happen within paper, the Murray-Davies model and the Yule-Nielsen model.

KEY WORDS:

Dot gain, light scattering, TVI - tone value increase, the Murray - Davies model, the Yule-Nielsen model

SADRŽAJ:

1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKI DIO.....	2
2.1. RASTER.....	3
2.2. POGREŠKE PRI PROCESU TISKA.....	4
2.3. VRSTE DEFORMACIJA RASTERSKIH ELEMENATA	4
2.4. MEHANIČKE DEFORMACIJE.....	5
2.5. OPTIČKE DEFORMACIJE.....	6
3. MODELI ZA OPIS RASTERTONSKE SLIKE.....	16
3.1. MURRAY – DAVIESOV I NEUGEBAUEROV MODEL OPISA..	17
3.2. YULE – NIELSENOV MODEL OPISA.....	22
4. REZULTATI I RASPRAVA.....	28
4.1. REFLEKSIJA S RASTERTONSKE SLIKE I OPTIČKI PRIRAST RASTERSKOG ELEMENTA.....	29
4.2. OPTIČKI EFEKTI PENETRACIJE BOJILA.....	32
5. ZAKLJUČAK.....	34
6. LITERATURA.....	35

1. UVOD

Izumom tiska i pomičnih slova omogućen je prijenos informacija. Stotinama godina tiskovine su rađene tako da je reproducirana samo jedna tonska vrijednost, što je i logično s obzirom na tehnološku razvijenost tehnike tiska koja je u to doba postojala. Kako je količina tiskanih informacija sporo, ali i konstantno rasla, a posebno nakon izuma fotografije, porasla je i želja ljudi da reproduciraju kvalitetnije reprodukcije u više tonskih vrijednosti, te se još nastojalo ubrzati sam proces. Danas je vrlo jednostavno iz udobnosti doma napraviti neku reprodukciju, zahvaljujući računalima, digitalnim printerima, digitalnim fotoaparatom, internetu i sličnom. Sa svakodnevnim novim dostignućima i tehnologijama, tako će ostati još dugo vremena. Korisno je znanje o procesu tiska budući da se mnoge slike obrađuju u kontekstu reprodukcije ili prijenosa. Koliko god da je uznapredovala grafička industrija, još uvijek imamo problema koje je potrebno objasniti i što je više moguće ukloniti.

Kvaliteta i vjernost rasterske reprodukcije u suvremenoj grafičkoj tehnologiji vezana je prije svega uz dobro reproduciranje rasterskih elemenata. Rastertonska slika je formirana varijacijama u prosječnoj refleksiji, koja se određuje prema veličini otisnutog rastertonskog elementa. Za vrijeme proizvodnog procesa dolazi do važnog fenomena koji se naziva prirast rastertonske vrijednosti (*dot gain*). Zbog toga dolazi do pomaka u oštini, tonu i obojenju tiskane slike. Prirast rastertonske vrijednosti zapravo se događa zbog dva različita važna fenomena. Mehanički prirast odnosi se na to da se stvarna točka na papiru razlikuje veličinom od normalne veličine, što se događa zbog raznih procesa u tisku. Optički prirast se događa zbog raspršenja svjetlosti unutar papira, što uzrokuje razmjenu svjetlosti između različitih kromatskih područja. Zbog svoje različite prirode mehanički i optički prirast treba promatrati odvojeno. Ove pojave su neizbježne i nastoje se kompenzirati i standardizirati.

Kod otisnutih slika, papirna podloga djeluje kao slikovni sustav. Pod pojmom slika podrazumijevamo otisak na tiskovnoj podlozi koji sadrži i slike i tekst. Može se smatrati da se reprodukcija slike sastoji od dva dijela. Prva slika je formirana na podlozi (ulazna slika), a zatim je slika detektirana od optičkog sustava (slika promatrana u reflektiranoj svjetlosti – izlazna slika). Stupanj optičkog prirasta rastertonske vrijednosti ovisi o udaljenosti koju fotoni prolaze u papiru, što opet ovisi o karakteristikama raspršenja i apsorpcije u papiru, postojanju ili odsutnosti završnog premaza papira, debljini papira, tehnici ispisa i tako dalje.

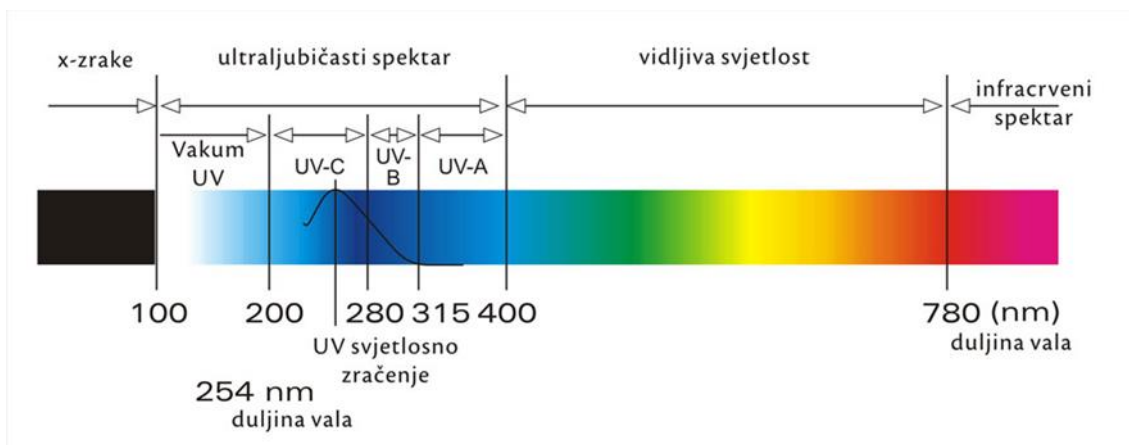
Cilj i zadatak ovog završnog rada je opis modela koji opisuju nastanak rastertonske slike kako bi bolje razumjeli sami process, te deformacije koje se pri njemu događaju.

2. TEORIJSKI DIO

Bojilo je zapravo obojana tvar s afinitetom kemijskog vezivanja na supstrat na koji se nanosi, dok je boja subjektivan psihofizički doživljaj ili osjet. Taj osjet u oku nastaje kao posljedica djelovanja elektromagnetskog zračenja koje izaziva fizikalni podražaj ili stimulus. Isti fizikalni podražaji (stimulusi) mogu izazvati različite osjete boja kod različitih ljudi, odnosno isti spektralni sastav svjetla kod različitih uvjeta promatranja izazvat će različite osjete kod istog promatrača. Boje ne bi postojale bez svjetla, jer se boja reflektira s određenog objekta u obliku svjetla u određenoj valnoj duljini. Obojena tijela reflektiraju, apsorbiraju ili propuštaju primljenu energiju zračenja. Upravo o toj refleksiji, apsorpciji ili transmisiji ovisi boja tijela. Prilikom refleksije ili transmisije svjetlosti tijelo će uvijek dio primljene svjetlosti apsorbirati tako da će boja tijela ovisiti o apsorpcijskim svojstvima njegove površine. Ljudsko oko osjetljivo je samo na „vidljivo“ svjetlo, odnosno na elektromagnetske valove valne duljine od oko 380 do 760 nm. Bijela površina u jednakoj mjeri reflektira sva valna područja „vidljive“ svjetlosti, dok crna površina potpuno apsorbira takvu svjetlost, siva površina će djelomično, ali u jednakoj mjeri reflektirati sva valna područja bijele svjetlosti. Te boje nemaju svoje karakteristično valno područje, pa se zato ne smatraju pravim (kromatskim), već akromatskim ili neutralnim bojama. Pravom kromatskom bojom biti će obojeno neko tijelo ukoliko ono pokazuje selektivnu apsorpciju, odnosno ako njegova površina apsorbira samo određena valna područja bijele svjetlosti. Boja koju će ta površina tijela imati, odnosno reflektirati je komplementarna apsorbiranoj boji. Možemo konstatirati da će tijelo imati žutu boju ako ga osvijetlimo bijelom svjetlosti. Ono najjače apsorbira ljubičasto - plavi dio spektra ($\lambda = 450$ nm), a najjače reflektira zračenje koje odgovara žutom dijelu spektra ($\lambda = 580$ nm). Ako je tijelo transparentno ono će propustiti primljenu energiju zračenja. Na primjer, crveni predmeti upijaju svjetlost svih valnih duljina, a reflektiraju samo svjetlo koje imaju valnu dužinu crvene boje. Ukoliko su povoljni uvjeti možemo razaznati velik niz (spektar) boja. Osjet ljubičaste boje daje zračenje valne duljine od 390 do 450 nm, plave od 450 do 500 nm, zelene od 500 do 570 nm, žute od 570 do 600 nm, narančaste od 600 do 620 nm i crvene od 620 do 760 nm. Ljudsko oko može razlikovati u vidljivom spektru oko 160 različitih nijansi boja. Najveća osjetljivost oka je kod većeg intenziteta osvijetljenja kao uz dnevno svjetlo kada su pobuđeni štapići i čunjići kod valne duljine od 555 nm. Nižu frekvenciju od „vidljivih“ boja imaju infracrveni spektar, mikrovalovi, radio i TV-valovi, te električna energija. Višu frekvenciju imaju ultraljubičasti valovi, X zrake i gama zrake.

Tri primarne boje koje ljudsko oko percipira čine RGB sistem (*Red, Green, Blue*). Taj sistem se primjenjuje na ekranima naših računala, televizora i mobitela. Postoji još jedan sistem boja koji se naziva subtraktivni sistem ili popularno nazvan CMYK (*cyan, magenta, yellow, key*, odnosno cijan, magenta, žuta i četvrta, crna boja). Miješanjem tih boja možemo dobiti cijelu lepezu drugih boja.

Za razliku od RGB sistema, CMYK se koristi u pripremi za tisak i samom tisku. Bitno je zapamtiti da ukoliko na računalu koristimo RGB sistem boja, za tisak ćemo morati koristiti CMYK, odnosno morat ćemo podesiti boje. Slike na ekranima su uvijek mnogo lijepše i raspoložu širokim spektrom boja. Nažalost, kada se pretvore u CMYK sistem i kada se otisnu, dobiju se drugačiji tonovi boja.



Slika 1. Spektar boja (Preuzeto s: <http://www.nobel.ba/nobel-filters/products/product/?i=24&c=5>)

2.1. Raster

Svaka tehnika tiska je vrlo kompleksan proces koji za tisak koristi različite strojeve po konstrukciji, brzini tiska, tiskovnoj formi, vrsti tiskovne podloge na koju se tiska, te njima odgovarajućih tiskarskih boja. Krajnji rezultat tiska i dorade je što vjernije reproducirati dizajnerski uradak na odgovarajućem grafičkom proizvodu. Kao što je već navedeno, u svim tehikama tiska, tisak višebojne reprodukcije (*njem. Farbige Reproduktion, engl. colour reproduction*) ostvaruje se tiskanjem pojedinačnih osnovnih boja (cijan, magenta i žuta) i crne boje. Raster je sredstvo pomoću kojeg višetonsku sliku pretvaramo u jednotonsku, jer tiskarski strojevi, osim tehnike dubokog tiska, ne mogu nanositi različite nanose boja. Kao produkt rastriranja nastaje rasterski element. Neovisno da li se radi o analognom ili digitalnom rastriranju nastanak višetonskih reprodukcija moguć je zbog tromosti ljudskog oka i nemogućnosti raspoznavanja pojedinačnih sitnih rasterskih elemenata. Što je rasterski element manji, to je uočavanje rasterskog elementa na otisku teže. Stoga je osnovna razlika među rasterima upravo u veličini i razmaku rasterskih elemenata koji definiraju finoću ili linijaturu rastera ovisno o vrsti rastera. Kod analognog rastriranja se koriste stakleni raster i kontakti raster, dok kod digitalnog rastriranja ulogu rastriranja preuzima RIP (Raster image processor). Da bi se reproducirao višebojni original, potrebno je za svaku boju izraditi posebnu tiskovnu formu. U toku snimanja višebojnih originala vrši se izdvajanje boja i dobiva se film sa elementima sa originala koji sadrže jednu od osnovnih primarnih boja. Dakle, dobije se, na primjer, film (negativ ili dijapozitiv) sa elementima koji su na originalu obojeni žutom bojom ili sadrže žutu boju. Odvajanja boja zasniva se na korištenju filtera odgovarajuće boje. Uloga obojenog filtera je da pri snimanju propusti sve svjetlosne zrake osim onih koji odgovaraju boji koja se izdvaja. Da bi se reproducirali tonovi osnovnih

boja istovremeno se vrši i rastriranje. Da bi se izbjegla pojava *Moire*-a, odnosno optičkog efekta nastalog ulijed preklapanja rasterskih elemenata, mora se raster postavljati pod određeni kut. Kut rasterskih točki može biti različit što ovisi o obliku točke (kvadratna, okrugla, elipsasta...), vrste rastera ili primjenjenog standarda za određene tipove tiskovnih formi. Bitno je da se kutevi rastera za pojedine boje na otisku razlikuju kako ne bi došlo do preklapanja točkica. U toku procesa tiska mora se voditi računa o tome da na otisku ne dođe do promjene oblika i veličine rasterske točke. Promjena oblika i veličine točke dovodi do promjene rasterstonske vrijednosti boje na otisku, odnosno vrijednosti otisnutih tonova će biti različite od tonova originala koji se umnožava. Također, važno je znati karakteristike bojila koje koristimo. Različita bojila upotrebljavaju se za različite tehnike tiska. Razlikuju se po mehanizmu sušenja, ovisno o primjeni, posjeduju specijalna svojstva kao na primjer: otpornost na površinska oštećenja, otpornost na izbjeljivanje pri izloženom danjem svjetlu i atmosferi, netoksičnost kao uvjet najviše za prehrambenu ambalažu, ambalažu za lijekove, vidljivost bez prisustva svjetla (natpisi i znakovi u rudnicima...) i tako dalje.

2.2. Pogreške pri procesu tiska

Najvažniji proces proizvodnje u kojem može doći do pada kvalitete grafičkog proizvoda je upravo tisak. Greške koje se za to vrijeme događaju mogu dovesti do trajnog oštećenja proizvoda. Kvalitetan otisak postiže se podešavanjem optimalnog odnosa svih parametara. Zbog toga je vrlo važno ustanoviti problem, kvalitetno ga definirati, određenim znanstvenim i stručnim metodama ga riješiti. Važno je znati da se proces proizvodnje sastoji od faza u kojima se događaju fizikalne i kemijske interakcije. Jedan od najvažnijih parametara u smanjenju kvalitete tiska je deformacija rasterskih elemenata. Može se reći da je kvalitetno ustanovljen problem deformacije rasterskih elemenata i kvalitetno postavljen sistem koji na adekvatan način minimizira deformacije rasterskih elemenata osnovni i najvažniji uvjet omogućavanja kvalitetnog tiska. Osim deformacije rasterskih elemenata, ostali parametri o kojima ovisi kvaliteta reprodukcije su: prihvaćanje bojila (*trapping*), pokrivenost bojilom (*ink coverage*), sivi balans i akromatska zamjena (*UCR, GCR, UCA*).

2.3. Vrste deformacija rasterskih elemenata

Deformacije rasterskih elemenata dijele se na dvije vrste, to su: mehanička i optička deformacija. Uzroci deformacije rasterskih elemenata mogu biti različiti, kao na primjer sile pritiska između valjka, cilindara i bubnjeva. Količina bojila koja se nalazi na rasterskom elementu nije ista kroz cijeli proces tiska. Uzrok tome je niz različitih parametara koji se javljaju u toku proizvodnje uslijed promjena temperature, vlage,

kemijskih karakteristika bojila i otopine za vlaženje, adhezijskih i kohezijskih sila bojila i tiskarskog materijala, i tako dalje.

2.4. Mehanička deformacija

Mehanička deformacija je širenje rasterskih elemenata uslijed mehaničkih djelovanja na rasterski element za vrijeme i poslije tiska, a najčešće se događa uslijed:

- a) smicanja (*slurring*)
- b) dubliranja (*doubling*)
- c) razmazivanja (*smearing*)

Smicanje je deformacija rasterskog elementa kod koje rasterski element postane izdužen u jednom od smjerova. Razlog takvih deformacija je najčešće različita obodna brzina temeljnog, ofsetnog i tiskovnog cilindra koja može nastati zbog istrošenosti i nepravilnog postavljanja ofsetne gume ili radi tehničke neispravnosti stroja.

Dubliranje je pojava kad se pokraj otisnute rasterske točkice pojavljuje još jedna slabija točkica koja se s prvom točkom ne pokriva u potpunosti. Ton tih točkica je različit.

Najčešće se događa uslijed dodira cilindara kada je gumena navlaka nedovoljno nategnuta ili kada su nepravilne vrijednosti debljine podloge ispod gumene navlake.

Vrlo česta pojava dubliranja događa se prilikom obostranog tiska kad dio bojila ostaje na tiskovnom cilindru prvog tiskovnog agregata te se nakon okreta arka taj dio tiska na poledinu. Razmazivanje rasterskog elementa najčešće se ne događa u tisku, već nakon tiska ukoliko dođe do pojave struganja nekih dijelova stroja. Može se dogoditi na onim mjestima na stroju na kojima dolazi svježije tiskani arak u mehanički dodir sa strojem.

Razmazivanje se može dogoditi i prilikom višebojnog tiska kad je količina ukupnog bojila na tisku tolika da se, prilikom tiska slijedeće boje, rasterski element razmazuje zbog zadržavanja na površini materijala uslijed pritiska cilindra nadolazećih boja.

Ovakva pojava je česta kod tiska na neupojnim materijalima. [1]

2.5. Optička deformacija

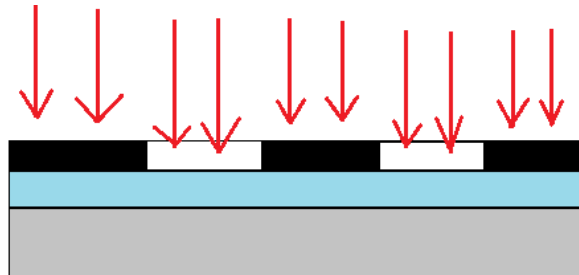
Optičke deformacija nastao kao posljedica raspršenja svjetlosti unutar podloge. Kod interakcije elektromagnetskog zračenja s tiskovnom podlogom, vrijedi zakon očuvanja energije:

$$I_0 = IR + IT + IA \quad (1)$$

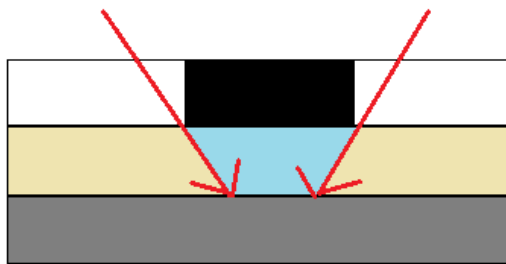
$$1 = R + T + A \quad (2)$$

Pri čemu je R refleksija, A apsorpcija, a T transmisija.

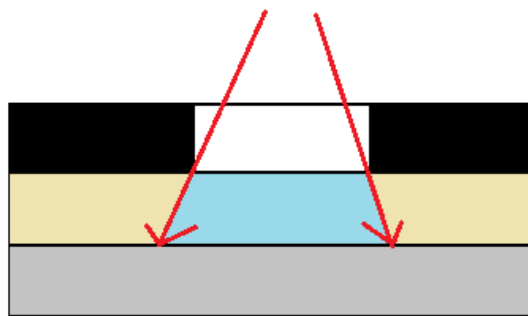
Transmitirana svjetlost može biti apsorbirana ili raspršena prolaskom kroz materiju. Raspršenje se događa kad svjetlost mijenja smjer širenja zbog sudara sa česticama u sredstvu. Ono povećava reflektanciju, a smanjuje transmitirani dio svjetlosti. Apsorpcija svjetlosti na bojilima i raspršenje svjetlosti na svim tiskovinama je važan dio percepcije samog grafičkog medija. Većina podloga, kao što je papir, i mnoga bojila (*dye, pigment, toner*) raspršuju svjetlost. Pri konstrukciji uređaja za kopiranje nastoji se dobiti što je moguće bolji paralelni snop zraka svjetla iz izvora svjetla koji služi za kopiranje, kako bi se što je moguće točnije formirali tiskovni elementi. Pri tome se najčešće koriste točkasti izvori elektromagnetskog zračenja. Osnovna karakteristika točkastog izvora je da se svjetlo iz njega širi podjednako u svim smjerovima. Odnosno, iz točkastog se izvora svjetlost u prostor širi u obliku kugle, a točkasti je izvor centar kugle. Budući da se svjetlost giba u svim smjerovima, na tiskovnu podlogu dolaze i kose zrake svjetlosti. Upravo zbog tih kosih zraka, na rubu tiskovnog elementa dolazi do ogiba svjetlosti, te se taj rub elementa ponaša kao novi točkasti izvor svjetlosti, odakle se svjetlost ponovno raspršuje u svim smjerovima, što se manifestira kao optička deformacija, tj. prirast rasterskog elementa ili skraćeno RTV (*Dot gain* ili *TVI - Tone Value Increase*). Kose zrake osvjetljavaju djelomično i ona područja kopirnog sloja koja se nalaze ispod neprozirnih dijelova reprofotografskog predloška. Kod pozitivskih kopirnih slojeva "potkopiranje" dovodi do smanjenja tiskovnih elemenata (negativna deformacija, *slika 2*). Za razliku od pozitivskih kopirnih slojeva, kod negativskih kopirnih slojeva takav upad zraka svjetla dovodi do povećanja dimenzija budućih tiskovnih elemenata na tiskovnoj formi (pozitivna deformacija, *slika 3*).



Slika 2. Proces kopiranja s paralelnim snopom zraka iz izvora zračenja

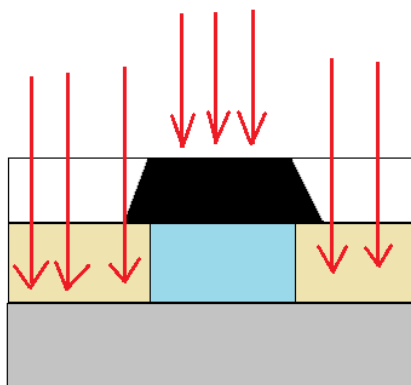


Slika 3. Deformacija tiskovnih elemenata uvjetovana kosim padom zraka svjetla kod pozitivskih kopirnih slojeva



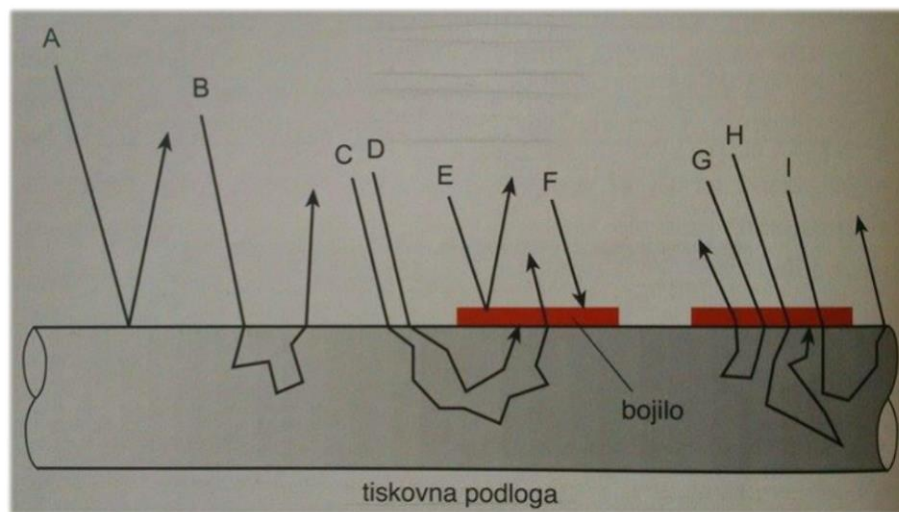
Slika 4. Deformacija tiskovnih elemenata uvjetovana kosim padom zraka svjetla kod negativskih kopirnih slojeva

Odstupanja pri kopiranju mogu nastati i ako su rubovi tiskovnih elemenata na predlošku manje gustoće zacrnljenja nego što je ostala površina. U tom slučaju svjetlo prodire i kroz ta rubna područja te u kopirnom sloju izazva fotokemijsku reakciju (*slika 5*). To će kod pozitivskih kopirnih slojeva opet dovesti do smanjenja tiskovnih elemenata, a kod negativskih kopirnih slojeva do povećanja tiskovnih elemenata.



Slika 5. Deformacija tiskovnih elemenata uvjetovana smanjenjem gustoće zacrnljenja reprofotografskog predloška

Deformacija izazvana kosim padanjem zraka svjetlosti je jače izražena ako je kopirni sloj deblji, a izvor svjetla bliži površini kopirnog okvira, zatim što se tiskovni element nalazi bliže rubu ploče i što je duže vrijeme osvjetljavanja. Takve deformacije mogu se ublažiti ako se primjenjuju vrlo tanki kopirni slojevi, ako se izabere ispravno vrijeme osvjetljavanja i ako se izvor svjetla udalji od kopirnog okvira. Prema Lambertovom zakonu, jakost zračenja točkastog izvora svjetla opada s kvadratom udaljenosti od njegovog izvora, što znači da je na dva metra udaljenosti jakost zračenja četiri puta slabija nego na jedan metar udaljenosti. No, ako bi previse udaljili izvor svjetla, morali bi produljiti vrijeme osvjetljavanja. U praksi se preporuča da udaljenost izvora svjetla od stakla na kopirnom okviru iznosi od 30 do 50% duljine dijagonale tiskovne ploče na koju se kopira. [2]



Slika 6. Prikaz najčešćih mogućih pojava koje djeluju na upadnu svjetlost (Preuzeto iz knjige: Upravljanje ofsetnim tiskom, Zjakić I.)

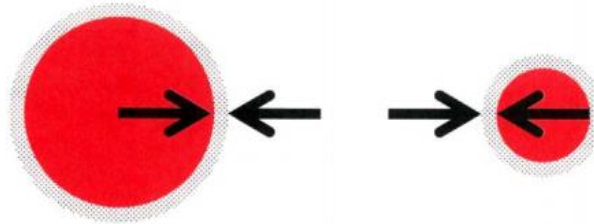
Ulazna svjetlost koja se reflektira s površine materijala ovisi o (Slika 6.):

- A – refleksiji s površine tiskovne podloge,
- B – debljini, gustoći i strukturi tiskovne podloge,
- C – propusnosti sloja bojila povratne svjetlosti,
- D – apsorpciji sloja bojila povratne svjetlosti,
- E – refleksiji sloja bojila,
- F – apsorpciji svjetlosti na sloju bojila,
- G – propusnosti upadne i povratne svjetlosti,
- H – apsorpciji upadne i povratne svjetlosti,
- I – refleksiji djelomično apsorbirane svjetlosti kroz sloj bojila i tiskovnog materijala.

Reflektirana svjetlost u “idealnoj” refleksiji reflektirala bi se samo u slučajevima 100%-tne refleksije s netiskovnih dijelova površine tiskovne podloge (A) i refleksije s tiskovnih dijelova površine tiskovne podloge (E), kod koje se svjetlost reflektira s gornje površine tiskovnih elemenata.

Bez obzira koja se od navedenih vrsta deformacija rasterskih elementa pojavi u tisku, krajnji rezultat je smanjenje kvalitete grafičkog proizvoda. Zbog toga je vrlo bitno ustanoviti deformacije kako bi se iste kvalitetno mogle predvidjeti prilikom izrade proizvoda.

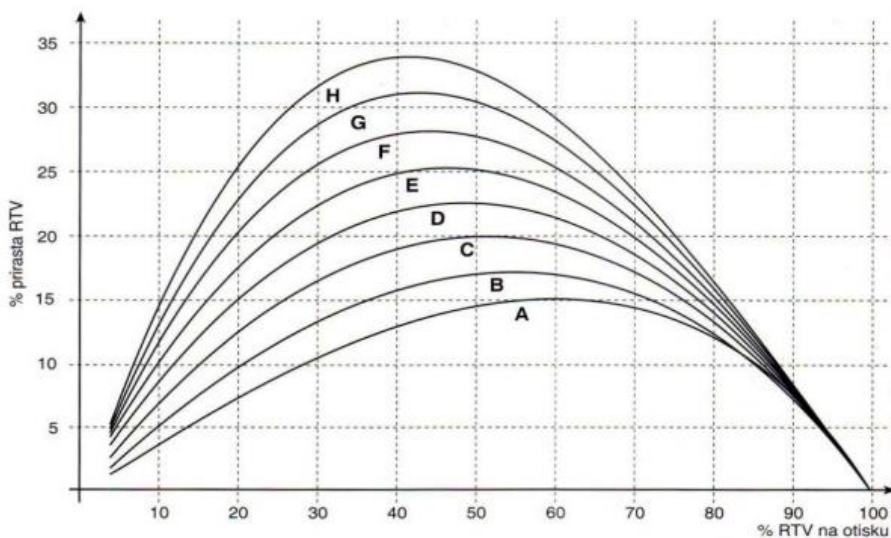
Prirast rasterskog elementa je definiran pomoću površine kružnog vijenca oko rasterske točkice. Izražava se u postocima. Kružni vijenac oko rasterske točkice je razlika između površine rasterske točkice na originalu (teoretski definirane rasterske točkice) i rasterske točkice koja je dobivena u tisku. Širina kružnog vijenca je uvijek ista, bez obzira na veličinu rasterske točkice. (Slika 7.)



Slika 7. Prirast rasterskog elementa s kružnim vijencem (Preuzeto s: http://repro.grf.unizg.hr/media/download_gallery/8.i%209.predavanje%20-%20KARAKTERISTIKE%20VISEBOJNE%20REPRODUKCIJE.pdf)

Prirast rasterskih elemenata ovisi o vrsti i linijaturi rastera, vrsti tiskovne podloge (upojnost, glatkoća), svojstvima bojila (viskoznost, koncentracija), uvjetima prilikom tiska (gumena navlaka na cilindru, podešenost stroja, pritisak) i dr.

Što je rasterski element manji, veća je deformacija (sve greške očituju se jače na finom nego na grubom rasteru). Ta se pojava može objasniti s dužinom konture rasterskih točkica; grubi raster ima manji broj točkica na jediničnoj površini pa ima manju dužinu konture nego fini raster. Što je raster finiji, veći je broj točkica na jediničnoj površini, pa je ukupna dužina konture veća, što znači da je veći prirast.



Vrsta materijala	% prirasta 50% RTV.
Sjajni premazani, bezdrvni	17
Mat premazani, bezdrvni	17
Sjajni premazani za rototisak	19
Nepremazani bijeli	23
Nepremazani žučkasti	23

Optimalni prirast na 50% RTV prema vrsti tiskovne podloge

Slika 8. Prirast rasterskih elemenata ovisno o vrsti tiskovne podloge – Prema standardu ISO 12647-2 definirano je 8 kvalitativnih kategorija prirasta RT-a u ovisnosti o vrsti tiskovne podloge (površina papira i njegova sposobnosti da apsorbira boju) – (Preuzeto s:

http://repro.grf.unizg.hr/media/download_gallery/8.i%209.predavanje%20-%20KARAKTERISTIKE%20VISEBOJNE%20REPRODUKCIJE.pdf)

Najčešće korištena teorija za praktičnu upotrebu optičke analize slike je *Kubelka-Munk* teorija preko procesa apsorpcije i raspršenja.

Prvo ćemo promatrati sustav koji samo apsorbira, a ne raspršuje svjetlost (Beer-Lambertov sustav), a zatim sustav koji i raspršuje i apsorbira svjetlost (*Kubelka-Munk* sustav).

Beer – Lambertov sustav

Beer – Lambertov zakon je linearni odnos između apsorpcije i koncentracije apsorberajuće tvari u kojem se pretpostavlja da nema raspršenja svjetlosti.

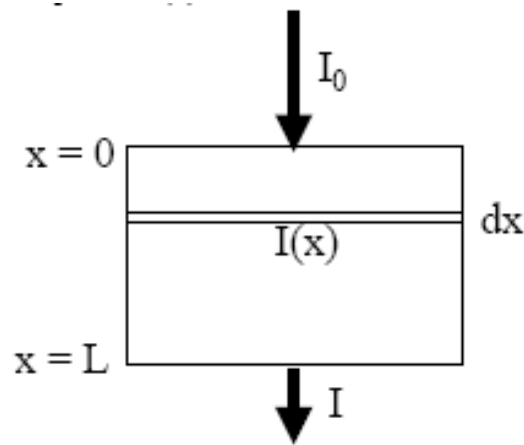
Apsorpcija je rezonantni proces, molekule bojila imaju upravo takvu elektronsku konfiguraciju koja omogućuje selektivnu apsorpciju u određenom dijelu vidljivog spektra elektromagnetskog zračenja.

Apsorpcija svjetlosti je proces 1. reda:

$$KI = \frac{-dl}{dx} \quad (3)$$

Gdje je:

K - karakteristika materijala koji apsorbira svjetlost (Kubelka-Munk koeficijent apsorpcije).



Slika 9. Apsorpcija svjetlosti unutar tiskovne podloge (Preuzeto s predavanja iz kolegija Fizika u grafičkoj tehnologiji: Interakcija svjetlosti i materije. Džimbeg-Malčić, V.)

$$K = \epsilon c \quad (4)$$

Gdje je:

c - koncentracija, odnosno broj molekula bojila u jediničnom volumenu,
 ϵ - (ili k) ekstinkcija, osnovno svojstvo molekularne strukture bojila.

Rješenje diferencijalne jednačbe je Beer – Lambertov zakon:

$$K dx = \frac{-dI}{I} \quad (5)$$

$$\int_{I=I_0}^{I=I_t} \frac{dI}{I} = -K \int_{x=0}^{x=L} dx \quad (6)$$

$$\ln \frac{I_t}{I_0} = -KL \rightarrow I_t = I_0 e^{-KL} \quad (7)$$

Gdje je:

L – duljina puta kojeg svjetlost prođe kroz podlogu,

x je u mm, a K je u $\frac{1}{\text{mm}}$, što znači da što je veća vrijednost K , veća je vjerojatnost da će foton biti apsorbiran.

→ Beer-Lambertov zakon preko baze 10:

$$\frac{I_t}{I_0} = 10^{-cL\varepsilon} \quad (8)$$

$$-cL \ln 10 = \ln \frac{I_t}{I_0} \quad (9)$$

→ Beer-Lambertov zakon preko prirodne baze e:

$$e^{-kcL} = \frac{I_t}{I_0} \quad (10)$$

$$\ln x = \frac{I_t}{I_0} = -kcL \quad (11)$$

Veza između te dvije metrike:

$$k = \varepsilon \ln 10 \quad (12)$$

→ Beer-Lambertov zakon u logaritamskom obliku:

$$10^{-\varepsilon cL} = \frac{I_t}{I_0} \quad (13)$$

$$\log \frac{I_t}{I_0} = -\varepsilon cL \quad (14)$$

$$\log T = -\varepsilon cL \quad (15)$$

$$-\log T = \varepsilon cL \quad (16)$$

Definira se gustoća transmisije preko logaritamske baze 10 i označava se sa D_T .

$$D_T = \varepsilon cL \quad (17)$$

Član $-\ln \frac{I_t}{I_0}$ je optička gustoća materijala. Međutim, češće se optička gustoća definira preko logaritamske baze 10 i označava se sa D .

Beer-Lambertov zakon se često izražava preko gustoće zacrnljenja, odnosno preko baze 10.

$$I = I_0 10^{-\varepsilon cL} \quad (18)$$

$$T = 10^{-\epsilon c L} \quad (19)$$

Ekperimentalnim mjerenjima transmisija (T) je određena jednačinom:

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (20)$$

Gdje je:

I – svjetlost nakon prolaska kroz podlogu,

I₀ – upadna svjetlost.

Relacija između transmisije i apsorpcije se može zapisati kao:

$$A = \epsilon c L \quad (21)$$

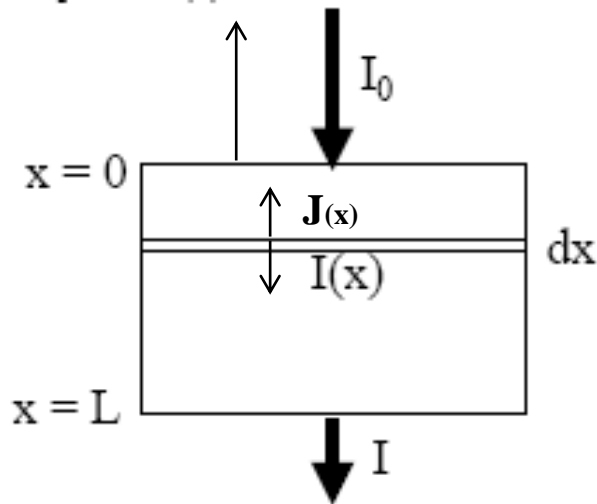
$$A = \log \frac{1}{T} = \log \frac{I_0}{I} \quad (22)$$

odnosno, apsorpcija (eng. *absorbance*) je definirana kao dekadski logaritam recipročne vrijednosti unutrašnje transmisije.

Kubelka - Munk sustav

Kubelka - Munk model se temelji na nekoliko pretpostavki:

1. Medij (uzorak) modeliran je kao ravni sloj konačne debljine, ali beskonačne širine i duljine, tako da nema graničnih efekata.
2. Na površini se događa savršeno difuzno i homogeno osvjetljenje.
3. Jedine interakcije svjetlosti s medijem su raspršenje i apsorpcija; polarizacija i spontana emisija se ignoriraju.
4. Za medij se smatra da je izotropan i homogen.
5. Ne događa se nikakva vanjska ili unutarnja refleksija.
6. Parametri S i K su konstantni bez obzira na debljinu sloja.



Slika 10. Apsorpcija i raspršenje unutar tiskovne podloge (Preuzeto s predavanja iz kolegija Fizika u grafičkoj tehnologiji: Interakcija svjetlosti i materije. Džimbeg-Malčić, V.)

U dif. jedn. kojom smo opisali samo apsorpciju (Beer - Lambertov zakon) dodajemo 2 nova člana:

$$dI = -KIdx - SIdx + SJdx \quad (23)$$

Gdje je:

I - tok svjetlosti prema dolje

J - tok svjetlosti prema gore

član +SJdx - tok svjetlosti prema gore koji je raspršen dodaje se toku svjetlosti I

$$dJ = -KJdx - SJdx + SIdx \quad (24)$$

Zanemarujemo tok svjetlosti u horizontalnom smjeru: lateralne dimenzije podloge (papira) su mnogo veće od srednjeg slobodnog puta $\frac{1}{K}$ i $\frac{1}{S}$ za apsorpciju i raspršenje fotona u danom materijalu.

Definiramo transmitanciju:

$$T = \frac{I_t}{I_0} \quad (25)$$

Definiramo reflektanciju preko toka prema gore na površini papira:

$$R = \frac{J_r}{J_0} \quad (26)$$

R i T su funkcije samo 4 parametra:

S - koeficijent raspršenja (Kubelka-Munk koeficijent)
 K - koeficijent apsorpcije (Kubelka-Munk koeficijent)
 L - debljina sloja kroz koji prolazi svjetlost
 R_g - reflektancija materijala ispod promatranog sloja

$$R = f1(S, K, L, R_g) \quad (27)$$

$$T = f2(S, K, L, R_g) \quad (28)$$

Pojedinačna rješenja ovise o graničnim uvjetima sustava.

Opći oblik rješenja:

$$R = \frac{1 - R_g [a - b \coth(bSL)]}{2aa - R_g + b \coth(bSL)} \quad (29)$$

$$T = \frac{b}{a \sinh(bSL) + b \cosh(bSL)} \quad (30)$$

$$a = \frac{S + K}{S} \quad (31)$$

$$b = \sqrt{a^2 - 1} \quad (32)$$

$$R(\lambda) = \frac{\frac{R_g - R_o}{R_o} - R_o \left(R_g - \frac{1}{R_o} \right) \exp\left[SL \left(\frac{1}{R_o} - R_o \right) \right]}{\left(R_g - R_o \right) - \left(R_g - \frac{1}{R_o} \right) \exp\left[SL \left(\frac{1}{R_o} - R_o \right) \right]} \quad (33)$$

$$S = \frac{1}{L \left(\frac{1}{R_o} - R_o \right)} \ln \left[\frac{(1 - R_o)(R_o - R_g)}{(R_o - R)(1 - R_g R_o)} \right] \quad (34)$$

$$K = \frac{S(1 - R_o)^2}{2 R_o} \quad (35)$$

$$a_i = \frac{1}{2} \frac{(R_{gwi} - R_{gbi})(1 + R_{wi} R_{bi}) - (R_{wi} - R_{bi})(1 + R_{gwi} R_{gbi})}{R_{bi} R_{gwi} - R_{wi} R_{gbi}} \quad (36)$$

$$R_{oi} = a_i - \sqrt{a_i^2 - 1} \quad (37)$$

$$S_i = \frac{1}{w \left(\frac{1}{R_{oi}} - R_{oi} \right)} \ln \frac{(1 - R_{bi} R_{oi})(R_{oi} - R_{bi})}{(1 - R_{oi} R_{gbi})(R_{oi} - R_{bi})} \quad (38)$$

$$k_i = \frac{S_i (1 - R_{oi})^2}{2 R_{oi}} \quad (39)$$

Gdje je:

R_{gwi} - reflektancija papira postavljenog na bijelu podlogu faktora refleksije R_{wi} ,

R_{gbi} - reflektancija papira postavljenog na crnu podlogu faktora refleksije R_{bi}

(uobičajeno je koristiti crnu podlogu s $R < 0,5\%$),

w - gramatura papira

[4]

3. MODELI ZA OPIS RASTERTONSKE SLIKE

Postoje mnogi modeli koji pokušavaju objasniti nastajanje rastertonske slike, odnosno zbog čega dolazi do promjene u veličini samog rasterskog elementa na otisku s obzirom na originalnu sliku. Bitno je napomenuti da pod pojmom “slika” podrazumijevamo zajedno slike i tekst, te ostale elemente koje otiskujemo. Ti modeli datiraju još od 1930-tih godina. Modeli ovdje opisani su izabrani jer su primijenjeni u mnogim kontekstima tijekom godina s najviše uspjeha. Većina njih zasnivaju se na izvornom Murray-Daviesovom modelu, opisanom u nastavku rada. Postoje modeli bazirane na metodi regresije i oni bazirani na osnovnim fizikalnim principima. Oni bazirani na osnovnim fizikalnim principima su složeni. Cilj je razumijevanje fizikalnih procesa koji se odvijaju pri kompleksnoj interakciji elektromagnetskog zračenja i tiskovne podloge. To su: *Arney, Engeldrum, Gustavson, Mourad*.

Oni bazirani na metodi regresije su relativno jednostavni, s parametrima koji se podešavaju na eksperimentalne podatke i u ovom završnom radu će biti detaljnije opisani. To su *Murray-Davies, Neugebauer i Yule-Nielsenov* model.

OPĆENITO O METODI LINEARNE REGRESIJE

Uobičajene metode kao što su linearna regresija i metoda najmanjih kvadrata su zadane parametarski, tj. regresijska funkcija je definirana preko konačnog broja nepoznatih parametara koji se procjenjuju (predviđaju) iz eksperimentalnih podataka. Linearna

regresija sadrži zavisnu varijablu Y_i koja se predviđa modelom i koja je linearna kombinacija parametra b_i , ali ne mora linearno ovisiti o nezavisnoj varijabli X_i . Na primjer, linearna regresija za modeliranje n podataka preko jedne nezavisne varijable X_i i preko dva parametra b_0 i b_1 (je greška pri mjerenju). [4]

$$Y_i = b_0 + b_1 X_i + \epsilon_i \quad (40)$$

$i=1, \dots, n$

Time dobijemo pravac, odnosno ako se doda još jedan član (višestruka linearna regresija), dobijemo parabolu:

$$Y_i = b_0 + b_1 X_i + b_2 X_i^2 + \epsilon_i \quad (41)$$

$i=1, \dots, n$

3.1. Murray - Daveisov i Neugebauerov model opisa

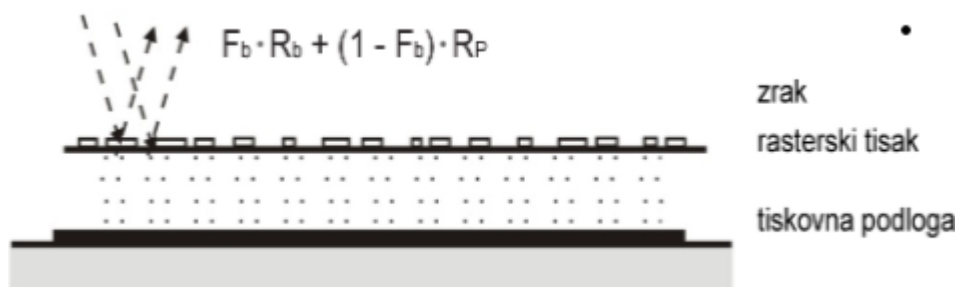
Pokušaji da se objasni reprodukcija tona u procesu rastriranja doveli su do Murray-Daviesovog i Neugebauerovog modela opisa rastertonske slike krajem 1930-tih godina. To su bili prvi modeli koji su predviđali reflektanciju s monokromatske rasterske slike.

Murray - Daviesov model

Murray je prvi objavio jednostavan model za predviđanje rastertonske slike. Ovaj model je prvotno Murrayu predložio kolega u Franklin Instituteu, E.R. Davies. Dapače, i sam Murray ga je nazivao "Davies" model.

$$R_{\lambda t} = F_b R_b + (1 - F_b) R_p \quad (42)$$

Gdje je $R_{\lambda t}$ teoretska (procijenjena) spektralna reflektancija rasterske slike, R_b je spektralna reflektancija 100% obojene podloge, R_p je spektralna reflektancija neobojenog dijela tiskovne podloge (papira), F_b je dio podloge pokriven bojilom (ili RTV, rastertonska vrijednost), te poprima vrijednost 0 za čisti papir do 1 za potpuno obojenu podlogu.



Slika 11. Reflektancija s monokromatske rasterske slike (Preuzeto s predavanja iz kolegija Fizika u grafičkoj tehnologiji: Interakcija svjetlosti i materije. Džimbeg-Malčić, V.)

R_{λ} , R_b i R_p vrijednosti su funkcije valne duljine.

Važno je napomenuti kako je malo mjerenja potrebno napraviti za ovaj model: samo spektralnu refleksiju bojila i golog papira. Poteškoća dolazi u procjeni područja pokrivenosti bojilom F_b . Bez točnog razumijevanja stvarne pokrivenosti bojilom, ovaj model odstupa neprihvatljivo od rezultata dobivenih mjerenjem.

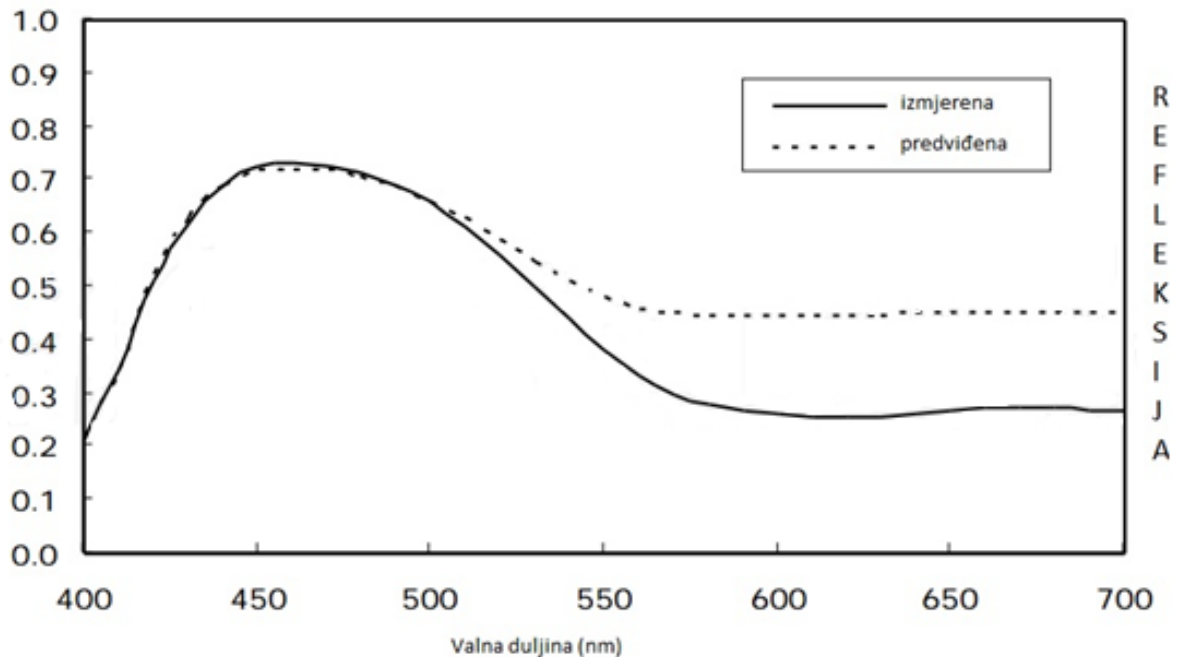
Velik dio onoga što slijedi izravno uključuje povećanje točnosti procjene područja pokrivenosti bojilom. Neke razlike ipak postoje koje ovise o različitim veličinama točaka pokrivenih bojilom. Teoretska površina točke (ili ekvivalentno teoretsko područje pokrivenosti) se izračunava iz stvarne binarne slike poslane na pisač. Pretpostavka je da je rasterski element kvadratnog oblika, te se teoretska pokrivenost površine određuje u postocima kao što je prikazano na slici 12.



Slika 12. Pojednostavljena shema rasterskog elementa (Preuzeto iz članka: A Critical Review of Spectral Models Applied to Binary Color Printing, Wyble, David R.)

Učinkovita površina točke (ili učinkovito područje pokrivenosti) uvijek je procijenjena vrijednost. Na primjer, ako je spektralna refleksija točno predviđena određenom području pokrivenosti, to se naziva učinkovitim područjem pokrivenosti, F_a . To je isto kao i procjena R_b vrijednosti koja bi bila jednaka mjerenoj spektralnoj refleksiji u punom području pokrivenosti bojilom. Uporaba Murray-Daviesova modela zahtijeva stvaranje dvije temeljne pretpostavke: podloga i tinta su ujednačene boje. Važno je imati na umu da je to rijetki slučaj. Čak ni za tipičan litografski tisak na običnom papiru, gustoće točaka nikad nisu jednake. Ipak, ove pretpostavke vrijede za predstavljene modele, odnosno za slučaj da su vrijednosti pretpostavljene u modelu jednake mjerenoj spektralnoj refleksiji na području pune pokrivenosti bojilom. Iz

gledišta očuvanja energije, ukupna refleksija bi trebala biti jednaka zbroju različitih komponenti reflektiranog svjetla s otiska. Ako se obračunava svjetlo iz svakog područja, model bi trebao biti dobar. Međutim, ako se teorijska površina točke F_b koristi kao u *jednadžbi 42*, predviđena refleksija za rastertonske slike je konstantno viša od izmjerene refleksije, kao što je prikazano na *slici 13*. Ovaj efekt se zove prirast rasterskog elementa (eng. *dot gain*), fenomen kojim su izmjereni otisci uvijek tamniji nego što se predviđalo, odnosno točkice se ponašaju kao da su veće nego što jesu.



Slika 13. Izmjerena i predviđena spektralna refleksija sa površine sa 50%-tnom pokrivenosti bojilom (Preuzeto iz članka: *A Critical Review of Spectral Models Applied to Binary Color Printing*, Wyble, David R.)

Učinkovita površina točke se dobije preraspodjelom iz jednadžbe 42 :

$$F_a = \frac{R_{\lambda mj} - R_p}{R_b - R_p} \quad (43)$$

U ovoj jednadžbi $R_{\lambda t}$ je zamijenjena sa izmjerenom refleksijom $R_{\lambda mj}$, dok je F_b zamijenjen učinkovitim područjem pokrivenosti F_a . Vrijednost F_a bi se trebala poklapati sa stvarnom mjenom pokrivenosti.

Kao što je prikazano jednadžba 43 je spektralni oblik, te se F_a dobije rješavanjem matrice koristeći metodu najmanjih kvadrata:

$$F_a = R_{\lambda mj} \cdot R_{\lambda t}^T (R_{\lambda t} R_{\lambda t}^T)^{-1} \quad (44)$$

Refleksije u jednadžbi 44 su vektori, čija je vrijednost zapravo broj valnih duljina mjerenog spektra. T i -1 označavaju koji je dio inverzan i koji će se transportirati pri rješavanju matrice.

$$R_{\lambda mj} = R_{mj} - R_p \quad (45)$$

$$R_{\lambda t} = R_b - R_p \quad (46)$$

Ovaj izračun treba ponoviti za svaki separirani dio posebno. Skalarni oblik se može koristiti tako se uzme refleksija na jednoj valnoj duljini, najbolji izbor je točka gdje je apsorpcija maksimalna zbog toga što će njezin prirast najviše varirati.

U refleksiji, točka maksimalne apsorpcije odgovara točki minimalne refleksije. Prirast rasterskog elementa može se definirati kao odstupanje učinkovite pokrivenosti od teoretske, ili kao $F_a - F_b$.

Ako je prirast poznat, a time i F_a može biti izračunat, refleksija crno-bijelog pisaa mogla bi se predvidjeti koristeći F_a kao F_b u *jednadžbi 42*.

Izračun u *jednadžbi 44* predstavlja prvu fazu svih sljedeći modela.

Optičko povećanje točke ΔF može se dobiti kao funkcija optičkih svojstava materijala i penetracije bojila γ .

$$\Delta F = \frac{\Delta R}{R_p^0(1-\gamma T^2)} = \frac{(1-T)^2 p F (1-F)}{R_p^0 (1-\gamma T^2)} \quad (47)$$

Znači, iz eksperimentalno određenog optičkog povećanja rasterskog elementa može se procijeniti $p(r1,r2)$, odnosno vjerojatnost ulaska fotona u papir kroz rasterski element na položaju $r1$ i izlazak kroz nebojeni papir na poziciji $r2$.

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

$$\frac{d(\Delta F)}{dF} = 0 \quad (48)$$

$$\frac{dp}{dF} F (1-F) + p (1 - 2F) = 0 \quad (49)$$

Za $dp/dF = 0$ optičko povećanje ima jedan maksimum za vrijednost $F = 0.5$ i simetričan profil oko maksimuma.

Većina modernih digitalnih denzitometara koristi Murray-Daveisov model za mjerenje ukupne obojene površine, odnosno očitamo ukupni prirast rasterskog elementa (uz zamjenu procijenjene vrijednosti ukupne reflektancije sa rasterske slike sa izmjerenom):

$$R_{\lambda m} = F_b R_b + (1-F_b) R_p \quad (50)$$

$$F_{bm} = \frac{R_{\lambda m} - R_{pm}}{R_{bm} - R_{pm}} \frac{\frac{1}{R_{pm}}}{\frac{1}{R_{pm}}} \quad (51)$$

$$F_{bm} = \frac{\frac{R_{\lambda m}}{R_{pm}} - 1}{\frac{R_{bm}}{R_{pm}} - 1} \quad (52)$$

Uz već definirane veličine:

$$D_b = -\log_{10} \frac{R_{bm}}{R_{pm}} \quad (53)$$

$$D_{Rm} = -\log_{10} \frac{R_{\lambda m}}{R_{pm}} \quad (54)$$

Dobijemo ukupnu obojenu površinu:

$$F_{bm} = \frac{1 - 10^{-D_{Rm}}}{1 - 10^{-D_b}} \quad (55)$$

Neugebauerov model

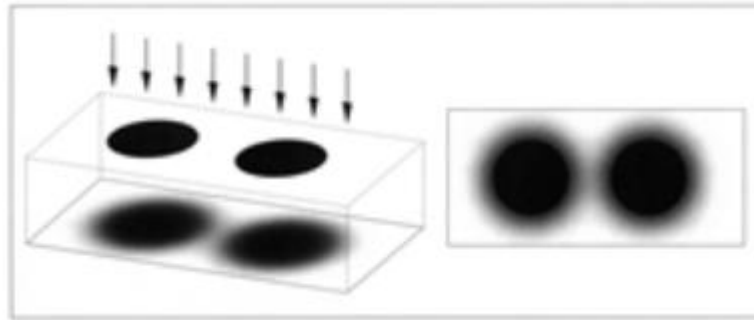
Neugebauerov model je generalizacija za tisak u boji. Pri modeliranju otisaka u boji, više bojila se mora uzeti u obzir. Neugebauer je iznosio više bojila zbrajanjem proizvoda na frakcijskom području pokrivenost svake boje po svojoj refleksiji u punom području pokrivenosti:

$$R_{\lambda} = \sum_i F_i R_{\lambda i \max} \quad (56)$$

Ova suma predstavlja голу podlogu, izdvojene separacije, preklapanja dvije i preklapanja tri boje. Za tri preklapljenе boje, to su uvijek bijela, cijan, magenta, žuta, crvena, zelena, plava i crna (i=w,c,m,y,r,g,b,k). $R_{\lambda i \max}$ su vrijednosti spektralne refleksije područja pune pokrivenosti bojiлом i F_i je frakcijska pokrivenost za svaku od boja. Uobičajena pretpostavka koja se koristi pri izračunu ovih područja pokrivenosti je da su točkice nasumično tiskane na podlogu

Iako su Murray-Daviesov i Neugebauerov model konceptualno ispravni, uskoro se pokazalo da daju neispravne rezultate. Prava, mjerena reflektancija cijele rasterske slike R_{mjereno} je manja od Murray-Davies vrijednosti $R_{\text{M-D}}$ pa je $\Delta R > 0$

$$\Delta R = R_{\text{M-D}} - R_{\text{mjereno}} > 0 \quad (57)$$



Slika 14. Optički prirast rasterskog elementa (Optical dot gain) (Preuzeto s predavanja iz kolegija Fizika u grafičkoj tehnologiji: Interakcija svjetlosti i materije. Džimbeg-Malčić, V.)

[5]

3.2. Yule-Nielsenov model opisa

1951. godine Yule i Nielsen su protumačili raskorak u Murray-Daviesovoj jednadžbi kao posljedicu upadanja svjetla i raspršenja unutar papirne podloge. Što je danas poznatije kao Yule-Nielsenov efekt.

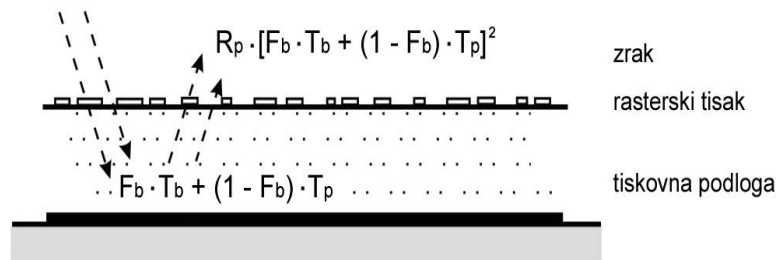
Rasterska slika ima veću pokrivenost bojilom, odnosno veću rasrtonsku vrijednost nego što se predviđa Murray-Daviesovim modelom koji zanemaruje raspršenje.

Na osnovu razlike mjerenih refleksijskih spektara i teoretskih (procijenjenih) spektara dobivenih Murray-Daviesovom metodom Yule i Nielsen su uveli empirijski parametar n u Murray-Daviesov izraz za ukupnu reflektanciju rasterske slike.

Murray-Davies metoda predstavlja zakon sačuvanja energije fotona, međutim ne uzima u obzir bočno (lateralno) raspršenje svjetlosti do kojeg dolazi na otisnutim rasterskim elementima ili u samoj kompleksnoj strukturi papira. Slika dobivena na tiskovnoj površini procesom rastriranja je naročito pod utjecajem raspršenja svjetlosti. Svjetlost koja dolazi na neotisnuto područje između otisnutih točaka raspršuje se unutar podloge i pojavljuje se ispod obojenog dijela i obratno.

Ovo je dovelo do modifikacije Murray-Daviesove formule, koja je sad zamijenjena sa:

$$R_{\lambda t} = [F_b \sqrt[n]{R_b} + (1 - F_b) \sqrt[n]{R_p}]^n \quad (58)$$



Slika 15. Yule – Nielsenov model (Preuzeto s predavanja iz kolegija Fizika u grafičkoj tehnologiji: Interakcija svjetlosti i materije. Džimbeg-Malčić, V.)

Napravili su promjene uvodeći promjenljivi parametar n umjesto faktora 2, zvan n -vrijednost, zbog boljeg slaganja teorijskih vrijednosti reflektancija s eksperimentalnim rezultatima.

- $n=1$ Murray-Davies
- $n=2$ totalno raspršenje
- $n>2$ doprinos drugih efekata

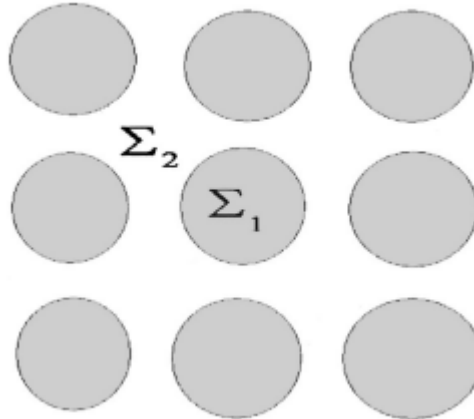
Slična promjena se dogodila i sa Neugebauerovom formulom. Eksponent n obično se dobije uvođenjem eksperimentalnih podataka (kao što je optička gustoća). To daje numeričke aproksimacije, ali nikakav fizički uvid u stvarni proces. 1978. godine Ruchdeschel i Hauser su dobili procjenu eksponenta n u smislu funkcije povećanja točkice (*PSF, point-spread function*), opisujući raspršenje svjetlosti u papiru. Istraživanje je pokazalo da $1 \leq n \leq 2$, no postoji i eksperimentalni dokaz da su mnoge iznimke za koji $n \geq 2$. R , dakle, može varirati kada F_b ima eksponent veći od 2. Osim toga, teorijska i eksperimentalna istraživanja su istaknula da eksponent n sam može ovisiti o F_b , pogotovo u slučaju kada $F_b > 50\%$.

Nedavno je Yule-Nielsenov efekt proučavan dalje pomoću numeričkih i analitičkih metoda, te pomoću vjerojatnosti. Gustavson je istraživao Yule-Nielsenov efekt izravnim numeričkim simuliranjem raspršenja koje ovisi o optičkim svojstvima materijala, o frekvenciji i geometrijskom obliku rasteronskog elementa.

Rogers je predstavio metodu, temeljenu na PSF pristupu, koja se bavi svjetlosnim procesima raspršenja u slučaju bez penetracije bojila i predložio matrični pristup u kojem su tristimulusne vrijednosti na rasterskoj slici izračunate kao trag proizvoda dvije matrice. U tim studijama učinak prodora bojila u podlogu jedva je dotaknut, a nikakav izričit izraz o tristimulusnim vrijednostima nije dan. Arney je produžio model vjerojatnosti, što je izvorno uveo Huntsman, uzevši u obzir učinke optičkog prirasta i prodora bojila. Ovaj pristup omogućuje uvid bez velikog troška. Međutim, kao što su primijetili i sami autori, jednostavan model prodora bojila precjenjuje optički učinak rasipanja, što ponekad dovodi do rezultata koji ne odgovaraju očekivanjima. Nedavno je napravljen teorijski pristup računanju učinka prodora bojila u kojem je pretpostavljeno da je papirna podloga ravnomjerno pokrivena slojem bojila.

U sljedećem poglavlju je opisano rasipanje svjetlosti (Yule-Nielsenov model) i prodor bojila.

Osnovna geometrija koja se ovdje koristi je prikazana na slici 16, gdje je površina papirne podloge podijeljena u dvije skupine: papir ispod točaka Σ_1 (ili bojilo koje je prodrlo u papir) i goli papir Σ_2 (ili papir između dvije točke). Radi jednostavnosti, analizira se samo jedan sloj točkica. Proširenje na višeslojnom slučaju je jasan, ali dug put i stoga neće biti objašnjen. Također zbog jednostavnosti, pretpostavlja se da je sloj bojila jednolike debljine.



Slika 16. Površina rasterske slike. Podijeljena je u dva dijela: površina ispod točaka bojila (Σ_1) i površina između točaka (Σ_2) (Preuzeto iz članka *Light scattering and ink penetration effects on tone reproduction*, Yang L., Lenz R., Kruse B.)

POINT SPREAD FUNCTION PRISTUP (PSF)

Prvo ćemo objasniti proces refleksije svjetla iz mikroskopske točke gledišta.

Razmatramo nekoliko odvojenih koraka. Prvo, pretpostavimo da je r_1 proizvoljan položaj na površini papira pod točkom (Σ_1) i da je R_2 proizvoljan položaj na površini papira između točaka. Sada zamislimo da svjetlost iz izvora $I_0 d\sigma_1$ upadne na točku R_1 . Tok svjetlosti otkriven na R_2 , zbog raspršenja upadne svjetlosti od R_1 , može se napisati kao:

$$d^2 J_{12} = p(R_1, R_2) T_i I_0 d\sigma_1 d\sigma_2 \quad (59)$$

Propusnost bojila je T_i i $T_i I_0 d\sigma_1$, te time i količina svjetla koje ulazi u podlogu pod točkom. PSF $p(R_1, R_2)$ je vjerojatnost fotona da upadne na položaj R_1 i izađe iz papira na položaju R_2 . Važno je napomenuti da je penetracija bojila uništava ravnomjernost podloge. Pretpostavka $p(R_1, R_2) = p(|R_1 - R_2|)$, koja je općenito primijenjivana u penetraciji bez bojila, postaje nevažeća. Nadalje, prošireni izvor svjetla koje pokriva područje tih točaka i intenzitet svjetla I_0 ostaju nepromijenjeni. Površina papira između

točaka nije osvijetljena. Tok svjetlosti na području R_2 , zbog rasipanja svjetlosti iz točaka, je integral:

$$d J_{12} = I_0 T_i \int_{\Sigma_1} p (R_1, R_2) d\sigma_1 d\sigma_2 \quad (60)$$

Stoga je $\int_{\Sigma_1} p(R_1, R_2) d\sigma_1$ vjerojatnost da će svjetlo koje upada na podlogu ispod točaka biti raspršeno na položaju R_2 . Konačno, rješavajući integral nad cijelim područjem između točaka (Σ_2), dobiva se ukupan iznos svjetlosti detektiran na papiru između točaka koja je raspršena na točke:

$$J_{12} = I_0 T_i \int_{\Sigma_1} \int_{\Sigma_2} p (R_1, R_2) d\sigma_1 d\sigma_2 \quad (61)$$

Dvostruki integral $\int_{\Sigma_1} \int_{\Sigma_2} p (R_1, R_2) d\sigma_1 d\sigma_2$ je ukupna vjerojatnost da će se fotoni raspršiti iz Σ_1 u Σ_2 , što je mjera Yule-Nielsenovog modela. U slučaju bez penetracije bojila, opći izraz integrala izveo je Rogers.

Sada smo zamjenili položaj izvora svjetla s detektorom; Na primjer, u prvom koraku stavljamo izvor svjetlosti $I_0 d\sigma_1$ na R_2 , a detektor na R_1 , te zadržavamo ostale uvjete nepromijenjenim. Zatim imamo:

$$d^2 J_{21} = p (R_1, R_2) T_i I_0 d\sigma_1 d\sigma_2 \quad (62)$$

Iz toga dobiva se sljedeći odnos:

$$p (R_1, R_2) = p (R_2, R_1). \quad (63)$$

Zatim imamo:

$$J_{12} = J_{21} \quad (64)$$

Ova jednadžba znači da je pod jedinstvenim osvjetljenjem rasterskog uzorka količina svjetlosti koja se rasprši iz Σ_1 (rasterskih točkica) u Σ_2 (goli papir) jednaka svjetlu raspršenom od Σ_2 do Σ_1 . Izračun toka J_{12} zahtjeva poznavanje PSF-a, što obično nije dostupno, pogotovo u slučaju postojećih prodora bojila. Međutim, ako je srednja vrijednost \bar{p} integriranog PSF-a definirana kao:

$$\bar{p} = \frac{1}{f(1-f)} \int_{\Sigma_1} \int_{\Sigma_2} p (R_1, R_2) d\sigma_1 d\sigma_2 \quad (65)$$

na raspolaganju, tada se raspršena svjetlost J_{12} može izračunati kao:

$$J_{21} = J_{12} = I_0 T_i \bar{p} (1 - f) \quad (66)$$

Očito \bar{p} ne ovisi samo o fizičkim svojstvima podloge papira i bojila, nego i o na geometrijskim i prostornim svojstvima točkice. Kao što je prikazano u nastavku, \bar{p} je usko povezan s optičkim prirastom i zato je eksperimentalno mjerljiv.

PRISTUP S VJEROJATNOŠĆU

Sada ćemo proučiti proces refleksije svjetla iz makroskopske perspektive. Prva pretpostavka je da nema bojila na površini papirne podloge, sustav se sastoji od papira u koji je djelomično penetriralo bojilo. Ako foton upadne u podlogu u Σ_1 , definiramo uvjetovane vjerojatnosti P_{11} i P_{12} da će foton ponovno se pojaviti iz Σ_1 i Σ_2 . Slično tome, za foton koji upada na podlogu, P_{21} i P_{22} su definirani kao vjerojatnosti da će foton napustiti površinu podloge iz Σ_1 i Σ_2 . Te vjerojatnosti ispunjavaju sljedeće uvjete:

$$P_{11} + P_{12} = \alpha, \quad (67)$$

$$P_{21} + P_{22} = \beta, \quad (68)$$

gdje su α i β konstante koje ovise o optičkim svojstvima materijala i trodimenzionalnim geometrijskim i prostornim distribucijama bojila unutar papirne podloge. Vrijednosti α i β su manje od 1 ako je svjetlost apsorbirana ili transmitirana na drugoj strani medija i odnose se na refleksiju sustava, koji opisuje vjerojatnost upada fotona na površinu podloge iz zraka, a potom njegovo vraćanje u zrak.

Ako su postoci papira u koje je penetriralo bojilo i golog papira f i $(1-f)$, odnosno, ako je intenzitet zračenja na cijeli sustav I_0 , tok upada fotona na Σ_1 i Σ_2 područja su $I_0 f$ i $I_0 (1-f)$. Tok J_{mn}^0 fotona iz Σ_m u Σ_n ($m, n = 1, 2$) se da zapisati kao:

$$J_{11}^0 = I_0 f P_{11}, \quad (69)$$

$$J_{12}^0 = I_0 f P_{12}, \quad (70)$$

$$J_{21}^0 = I_0 (1-f) P_{21}, \quad (71)$$

$$J_{22}^0 = I_0 (1-f) P_{22}. \quad (72)$$

Ukupni tok fotona koji dolaze iz golog papira J_p^0 je, dakle, zbir J_{12}^0 i J_{22}^0 :

$$J_p^0 = I_0 [P_{12} f + P_{22} (1-f)]. \quad (73)$$

Refleksija golog papira tako se može izračunati kao:

$$R_p^0 = \frac{J_p^0}{(1-f)I_0} = P_{12} = \frac{f}{(1-f)} + P_{22} \quad (74)$$

Isto tako, ukupni tok fotona izlazi iz Σ_1 (papira u koji je penetriralo bojilo), I njegova odgovarajuća refleksija iznosi:

$$J_i^0 = I_0 [P_{11} f + P_{21} (1 - f)], \quad (75)$$

$$R_i^0 = P_{11} + P_{21} [(1 - f) / f]. \quad (76)$$

Kako su J_{12}^0 i J_{21}^0 (iz *jednadžbi 69, 70, 71 i 72*) posebni slučajevi J_{12} i J_{21} s $T_i = 1$, iz *jednadžbe 66* dobiju se sljedeći izrazi:

$$P_{21} = \bar{p} f \quad (77)$$

$$P_{12} = \bar{p} (1 - f) \quad (78)$$

Ti izrazi daju simetričan izraz za P_{21} , P_{22} , točkice, te papir između točkica: Vjerojatnost da foton ide iz jednog dijela (papira ili točkice) na drugi je proporcionalna području dolaznog dijela. Očito su P_{12} i P_{21} povezane preko:

$$P_{12} f = P_{21} (1 - f) \quad (79)$$

Tako imamo (*iz jednadžbi 67, 68 i 76*) da je:

$$R_i^0 = \alpha \quad (80)$$

i

$$R_p^0 = \beta \quad (81)$$

U slučaju postojećeg sloja bojila na površini podloge, Σ_1 je područje pod točkicama, te je Σ_2 papir između točkica (goli papir). Sada tretiramo sloj bojila kao filter s transmisijom T_i , te stoga možemo koristiti definicije i rezultate dobivene do sada. Posebno vidimo da je $J_{11} = T_i^2 J_{11}^0$, $J_{12} = T_i J_{12}^0$, $J_{21} = T_i J_{21}^0$ i $J_{22} = J_{22}^0$. Za ravnomjerno osvijetljenu rastersku sliku s svjetlom intenziteta I_0 , reflektancije s točkica bojila i papira između točkica dani su:

$$R_p = (J_{12} + J_{22}) / [(1 - f) I_0] = P_{22} + P_{12} f / (1 - f) T_i \quad (82)$$

$$R_i = (J_{11} + J_{21}) / f I_0 = P_{11} T_i^2 + P_{21} [(1 - f) T_i] / f \quad (83)$$

Primjenom *jednadžbi 80 i 81* i koristeći izraze za P_{12} i P_{21} (*iz jednadžbi 77 i 78*), može se izraziti refleksija u smislu optičkih svojstava materijala koji sudjeluju kao:

$$R_p = R_p^0 - \bar{p} (1 - T_i), \quad (83)$$

$$R_i = T_i [\gamma R_p^0 T_i + \bar{p} (1 - f) (1 - T_i)], \quad (84)$$

gdje je:

$$\gamma = R_i^0 / R_p^0. \quad (85)$$

Količina γ opisuje učinak prodiranja bojila na papirnu podlogu. Zbog jake apsorpcije iz papira u koji je penetriralo bojilo, γ je općenito manje od 1. *Jednadžbe 83 i 84* opisuju ovisnost refleksije o optičkim svojstvima materijala (varijable T_i i R_p^0), prodor bojila (γ) i raspršenje svjetlosti u medijima (\bar{p}). Količina γ ovisi samo o raspodjeli bojila koje je penetriralo. Vrijednost \bar{p} ovisi o veličini i prostornom rasporedu ispisanih točkica, prodoru bojila i optičkim svojstvima materijala koji su uključeni. Tako poznavanje \bar{p} je od kritične važnosti za predviđanje i reprodukciju željene refleksije. Promjenjiva R_p ne ovisi o γ , i stoga R i R_i treba koristiti kada se parametri moraju postaviti po eksperimentalnim podacima.

Količina γ je važan parametar u modelu, koji se može mjeriti posebno. Pretpostavimo da je izmjerena refleksija otisaka (s potpunom pokrivenošću bojilom) je R_i . Debljina sloja potpune pokrivenosti bojilom može se mjeriti mikroskopom (ili više naprednih mikroskopskih instrumenata); debljina može biti pretvorena u propusnost T sloja prekrivenog bojilom po eksponencijalnom zakonu. Stoga γ se može izračunati kao $\gamma = R_i / (T^2 R_p^0)$, gdje je R_p^0 refleksija golog papira. [6]

4. REZULTATI I RASPRAVA

Jednadžbe 83 i 84 opisuju kako refleksijska svojstva ovise o svojstvima materijala i geometriji. Oni otkrivaju dvije važne činjenice:

1. R_p i R_i više nisu konstante, kao što je to bilo pretpostavljeno u Murray-Daviesovim jednadžbama, čim se raspršenje svjetlosti uzme u obzir.
2. U slučaju u kojem je \bar{p} neovisno o pokrivenosti točkama f , R_i i R_p variraju linearno s f . Drugim riječima, nelinearnost R_p i R_i s obzirom na f pruža informacije o ovisnosti f o raspršenju svjetlosti (ili \bar{p}).

4.1. Refleksija s rastertonske slike i optički prirast rasterskog elementa

Refleksija s rasterskog uzorka je dana jednadžbom:

$$R = R_i f + (1 - f) R_p \quad (86)$$

što je kvadratna funkcija f ako je $dp/df = 0$, kao što se može vidjeti u *jednadžbama 83 i 84*. Za $dp/df \neq 0$, to više nije slučaj, te odnos između R i f ovisi o \bar{p} . Zamjenimo li R_p i R_i u *jednadžbi 86*, dobijemo:

$$R = R_{MD} - \Delta R \quad (87)$$

gdje je:

$$R_{MD} = R_i^0 T_i^2 f + R_p^0 (1 - f) \quad (88)$$

refleksija sa rasterskog uzorka bez raspršenja svjetlosti. Pišemo $R_{MD}(f)$ i $R(f)$ ako samtramo R_{MD} i R kao funkcije od f . Raspršenje svjetlosti unutar papirne podloge se opisuje kao:

$$\Delta R = (1 - T_i)^2 \bar{p} f (1 - f) \quad (89)$$

Zato što je $\Delta R > 0$, prava refleksija R je manja nego njena vrijednost R_{MD} dana u Murray-Daveisovom modelu, rasterska slika ima veće pokriće točkama nego što je predviđeno kad se raspršenje ignorira. Zbog toga se ovaj efekt naziva prirast rasterske točke. Ako se raspršenje ne modelira, izmjerena refleksija R potječe iz veličine točke $f + \Delta f$, umjesto iz istinske veličine f . Iz $R(f) = R_{MD}(f + \Delta f)$ može se dobiti optički prirast Δf kao funkcija optičkih svojstava materijala i prodora bojila:

$$\Delta f = \frac{\Delta R}{R_p^0 (1 - \gamma T_i^2)} = \frac{(1 - T_i)^2 \bar{p} f (1 - f)}{R_p^0 (1 - \gamma T_i^2)} \quad (90)$$

Optički prirast je to proporcionalan s \bar{p} . Iz izmjerenog optičkog prirasta, može se procijeniti \bar{p} i dobiti vrijedne informacije o PSF-u. Najveći optički prirast može se dobiti iz jednadžbe:

$$\bar{p}' f (1 - f) + \bar{p} (1 - 2f) = 0, \quad (91)$$

gdje je:

$$\bar{p}' = d\bar{p} / df. \quad (92)$$

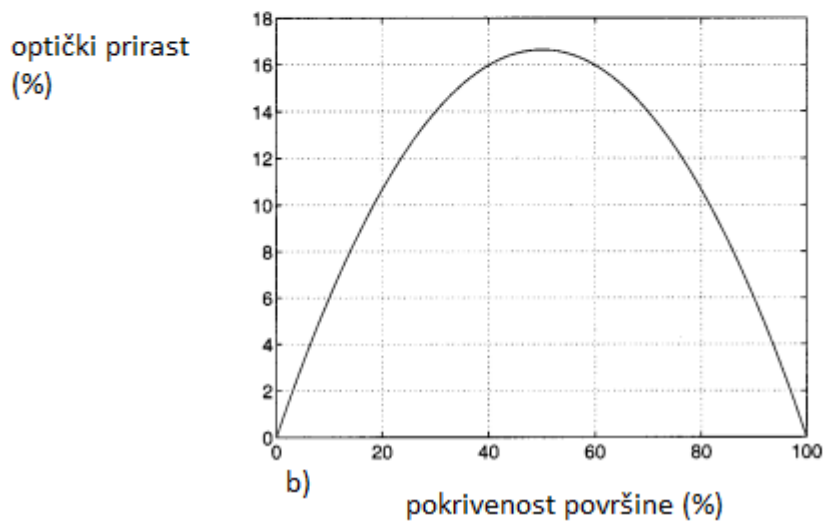
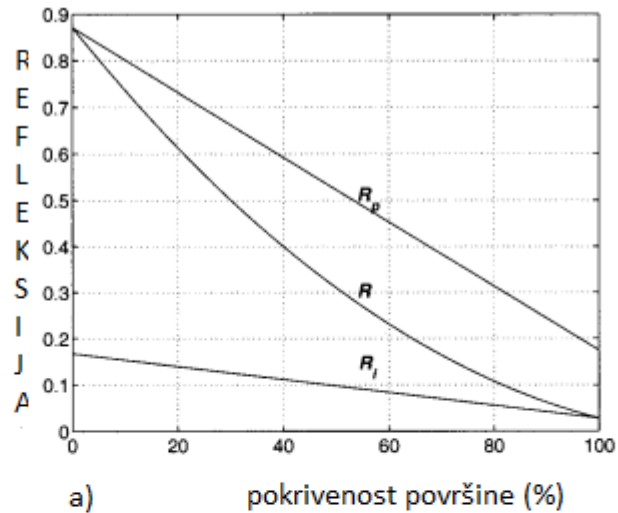
za \bar{p}' ili $\bar{p} = \text{konstanta} (\neq 0)$, optički prirast ima jedan maksimum pri $f = 50\%$ i ima simetrični oblik oko maksimuma.

Sada prikazujemo utjecaj $\bar{p} = R_p^0$ na refleksiju i optički prirast. U prvom primjeru smatramo $p = R$. U slučaju bez prodiranja bojila ($\gamma = 1$), dolazi do popudaranja sa Yule-Nielsenovim modelom sa Yule-Nielsenovim eksponentom $n = 2$, koji odgovara tzv. potpunom raspršenju. U tom slučaju (*slika 17*) remisije R_i i R_p variraju linearno s površine područja f . Srednja refleksije R cijele slike, s druge strane, varira u kvadratnom stilu. Izračunati optički prirast ima oblik parabole s jednim maksimumom na $f = 50\%$.

U drugom primjeru ćemo usvojiti:

$$\bar{p} = R_p^0 [1 - f^m (1 - f)^{1-m}], \quad (93)$$

s $m = 0.7$. Sada su sve vrijednosti remisije, osobito R_p i R_i , vrlo nelinearne funkcije pokrivenost točkama (*slika 18, a*). Njihovo ponašanje je tipično za AM rasterske slike (amplitudno modulirane), kao što se može vidjeti iz mjerenja. Oštar pad R_p dok se f povećava pokazuje da vjerojatnost (P_{22}) upada fotona i izlaska iz golog papira se smanjuje dramatično kada područje golog papira postane relativno manje nego području papira s točkicama. Drugim riječima, vjerojatnost P_{21} dramatično se povećava kako se pokrivenost bojilom povećava. Prema tome, maksimum izračunatog optičkog prirasta je pomaknut prema dolje do $f = 37\%$.



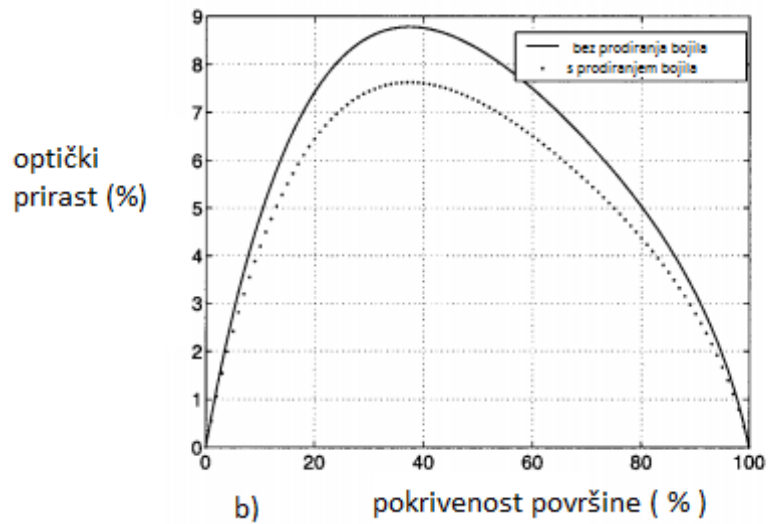
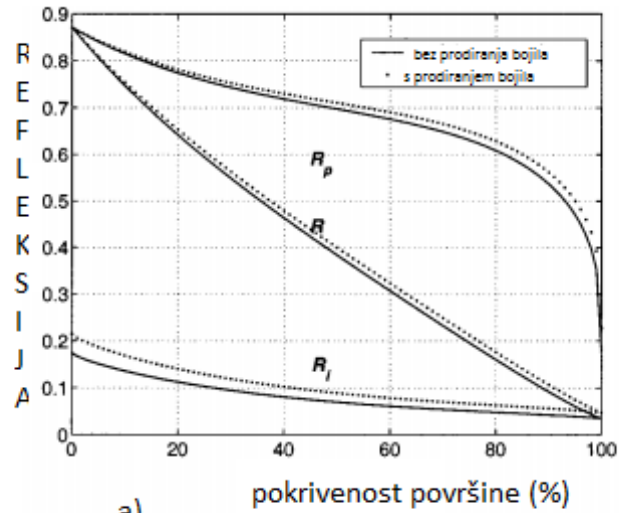
Slika 17. Izračunata refleksija (a) i optički prirast sa $\bar{p} = R_p^0 = 0.87$, $T_i = 0.2$ (b)
 (Preuzeto iz članka *Light scattering and ink penetration effects on tone reproduction*, Yang L., Lenz R., Kruse B.)

Ovisnost vrijednosti refleksije o penetraciji bojila također je pokazano na slici 18. Oni ne simuliraju nikakav stvarni ispis. U stvarnoj primjeni može se utvrditi \bar{p} ugradnjom izmjerenih podataka (poput optičkog prirasta) ili izračunati ga integrirajući PSF preko rasterskog uzorka, koristeći *jednadžbu 65*.

4.2. Optički efekti penetracije bojila

Pretpostavljamo da je debljina i propusnost tiskanog sloja bojila d i T_0 , te da je refleksija papira R_p^0 . Penetracija bojila u papir ima dva optička učinka. Poznato je da se apsorpcija dolazi uglavnom od bojila. Kad nema prodora bojila, sloj bojila je relativno deblji; bojilo postaje sve tanje, nakon što dio njega penetrira u podlogu papira. Stoga, manje je apsorbiranog svjetla kad svjetlost prolazi kroz sloj bojila, $T_i^2 > T_0^2$. Efekt poništenja potječe od slabosti refleksije papirne podloge zbog prisutnosti prodiranja bojila, $R_i^0 < R_p^0$. Međutim, zbog visoke moći raspršenja papirne podloge (vlakna papira), svjetlo vjerojatno neće proći kroz svo bojilo kada se reflektira natrag. Očekuje se da se manje svjetla apsorbira u prosjeku ili da postoji jača refleksija svjetla, $T_0^2 R_p^0 \leq T_i^2 R_i^0$. Numerička simulacija penetracije bojila, koja pokriva širok raspon bojila i papira (široki spektar svojstava apsorpcije i raspršenja bojila i papira), potvrdila je ova očekivanja.

Sljedeće simulacije prikazuju utjecaj prodora bojila na svojstvima rasterske slike. Ovdje smo izračunali R_p , R_i i R i optički prirast Δf , sa i bez uzimanja u obzir utjecaj prodora bojila. U slučaju prodora bojila, pretpostavka je da je $T_i = 1.3T_0$ i $\gamma = R_i^0 / R_p^0 = 0.8$. Kao što je prikazano na slici 18, sve refleksijske vrijednosti povećavaju se kad se penetracija bojila uzme u obzir (točkaste krivulje). Najveće relativno povećanje se dobije za refleksiju točkice bojila R_i . Zahvaljujući raspršenju svjetlosti, prodor bojila također mijenja refleksiju golog papira, R_p . Penetracija bojila također smanjuje optički prirast. Moguće je da apsorpcija bojila u papiru smanjuje vjerojatnost razmjene fotona između područja Σ_1 i Σ_2 . Ovisnost optičkog prirasta na penetraciju bojila može se koristiti za dobivanje procjene svojstava materijala kao što su \bar{p} i γ .



Slika 18. Izračunata refleksija (a) i optički prirast $s \bar{p}$ danog u jednadžbi 56, gdje je $R_p^0 = 0.87$, $m = 0.7$. Pune linije označavaju mjesta gdje bojilo nije penetriralo, a $T_i = T_0 = 0.2$, $\gamma = 1$; isprekidane linije označavaju mjesta gdje je bojilo penetriralo, a $T_i = 1.3 T_0$, $\gamma = 0.8$ (b).

(Preuzeto iz članka *Light scattering and ink penetration effects on tone reproduction*, Yang L., Lenz R., Kruse B.)

5. ZAKLJUČAK:

Kroz ovaj rad pokazano je da učinak rasipanja svjetlosti rezultira refleksijskim funkcijama koje su vrlo nelinearne funkciji područja točke. Također izveden je opis optičkog prirasta kao funkcije tih parametara i ilustrirano je kako se svojstva raspršenja funkcije \bar{p} utječu na optički prirast. Pokazano je da model predviđa da penetracija bojila dovodi do smanjenja optičkog prirasta. Odnos između prirasta Δf i funkcije raspršenja \bar{p} (jednadžbe 65 i 90) može se koristiti u oba smjera; za poznato (ili definirano) raspršenja (\bar{p}) odnos se može koristiti za predviđanje optičkog prirasta. S druge strane, za izmjereni optički prirast ti podaci mogu koristiti za dobivanje procjene svojstava raspršenja kako je opisamo s \bar{p} .

Analiza nije ograničena na neki određeni tip rasterske sheme; Stoga, svi izrazi i zaključci odnose se i na AM i na FM rasterske sheme.

LITERATURA:

1. ***http://repro.grf.unizg.hr/media/download_gallery/8.i%209.predavanje%20-%20KARAKTERISTIKE%20VISEBOJNE%20REPRODUKCIJE.pdf
Karakteristike višebojne reprodukcije, predavanje iz kolegija Reprodukcijska fotografija; Strgar Kurečić M.; 25. Srpnja 2014.
2. Gojo M., Mahović Poljaček S. (2013). Osnovne tiskovnih formi, Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet, Zagreb
3. Zjakić I. (2007). Upravljanje kvalitetom ofsetnog tiska, Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb
4. Interakcija svjetlosti i materije – modeli, predavanje iz kolegija Fizika u grafičkoj tehnologiji; Džimbeg – Malčić V. 29. Kolovoz 2014.
5. A Critical Review of Spectral Models Applied to Binary Color Printing, Wyble, David R. , 29. Kolovoza 2014.
6. Light scattering and ink penetration effects on tone reproduction, Yang L.,Lenz R.,Kruse B. (2001). 26. Srpnja 2014.

