

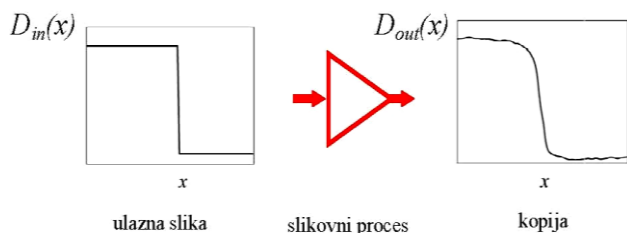


modeliranom papiru. Lorentzova raspodjela je parametarska i ima oblik:

$$PSF(r) = \frac{1}{\pi} \frac{\frac{w}{2}}{(r-r_c)^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2} \quad (1)$$

### 1.1. Funkcija razmazivanja

U grafičkoj tehnologiji analiza kvalitete tiskovnih otisaka orijentira se vrlo često na detekciju ruba rasterskih elemenata.



**Slika 1.** Kopija oštrog ruba nije oštra nakon realnog preslikavanja

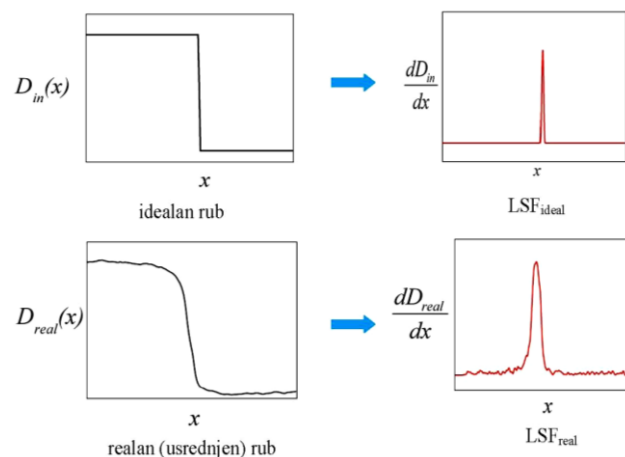
Naime, u svakom realnom procesu preslikavanja fizika samog slikovnog sustava djeluje tako da dolazi do zamučivanja (blur), tj. kopija oštrog ruba nije oštra.

Savršena reprodukcija nije moguća. Stvarni slikovni sustavi uvijek imaju neke gubitke, što znači da obično dolazi do degradacije jednog dijela ulazne informacije. Mora postojati neka vrsta procesa razmazivanja u slikovnom mehanizmu koji uzrokuje da kopija oštrog ruba bude razmazana (neoštra). Ovaj proces je najvjerojatnije uzrokovan difuzijom boje u papir u tiskanom obliku slike, ili bljeskom svjetla u optičkom sustavu. U granicama savršene optike, difrakcija svjetla na otvoru objektiva rezultat će "difrakcijski ograničenom" funkcijom razmazivanja ("diffraction limited" spread function). Neki fizikalni procesi uvijek će rezultirati nekom vrstom fenomena razmazivanja koji sprječava da slikovni sustavi imaju savršenu rezoluciju. Fenomen fizičkog razmazivanja karakteriziramo kao funkciju razmazivanja točke (the point spread function – PSF) ili funkciju razmazivanja linije (the line spread function – LSF).

### 1.2. Kako funkcija razmazivanja određuje rezoluciju

Funkcija razmazivanja može se mjeriti neovisno. Npr., može se mjeriti difrakcioni limit leće ili difuziona karakteristika tinte na papiru. Često je funkcija razmazivanja slikovnog sustava uzrokovana s više procesa koji rezultiraju razmazivanjem. U takvom slučaju lakše je mjeriti ukupnu funkciju razmazivanja slikovnog sustava, a to se radi usporedbom izlaza i ulaza. Ako je ulaz idealan rub, kao na slici 1., onda izlaz nije savršeno gladak zbog funkcija razmazivanja sustava,

te možemo izračunati funkciju razmazivanja sustava iz zamagljena ruba. LSF je derivacija funkcije ruba izlazne slike kad je ulazna slika savršen rub. Primjena prve derivacije na takvoj slici, u smjeru važne varijacije, poboljšava vidljivost malih koraka i ostalih detalja.



**Slika 2.** Ilustracija funkcije razmazivanja idealnog i realnog ruba

Naravno, kontinuirana derivacija ne može se izvršiti za slike s digitaliziranim konačnim brojem piksela. Umjesto toga, razlika između vrijednosti susjednih piksela može se izračunati kao konačna derivacija. Ova razlika ima nešto šuma, ali usrednjavanje u smjeru okomitom na derivaciju može izgladiti rezultat.

### 1.3. Modeliranje PSF uz pomoć Monte Carlo simulacije

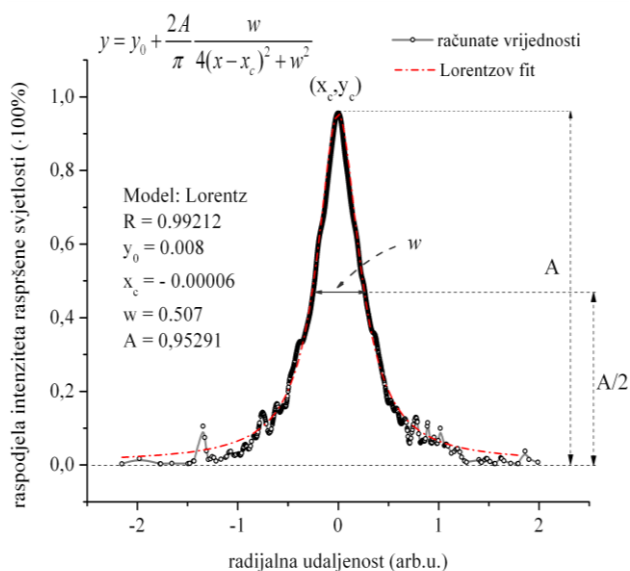
Polazeći od same definicije PSF, izračunat je njen oblik kao funkcija parametara papira. Modeliranjem linijskih profila željelo se ispitati pojedinačni utjecaj svakog parametra kao što su: koeficijenti raspršenja i apsorpcije komponenti papira, postotak zastupljenosti [1]. komponenata, parametri asimetrije koji su važni za određivanje doprinosa celuloznih vlakana na raspršenje, vrste i debljine slojeva (ako se uzme u obzir premazani papir), indeks loma ulaznog sloja premaza i njegova debljina, vrstu i oblik površine papira, i mnoge druge parametre koji manje ili više utječu na kolektivni efekt koji se naziva optički prirast rastertonske vrijednosti. Raniji pristupi nisu imali kompleksnost potrebnu za stvaran opis sustava, a njihovi autori prezentirali su aproksimacije koje nisu uvijek imale najkorektniju fizikalnu osnovu. Tako su potkraj sedamdesetih godina prošlog stoljeća, vođeni intuitivnom idejom da promatrana distribucija raspršene svjetlosti koja dolazi od točkastog izvora ima zvonolik profil centriran u ulaznoj točki, Yule i Nielsen predložili da LSF bude opisana pomoću Gaussove raspodjele.

Korišteni model [2],[3] na temelju stohastičkog pristupa pokazuje da je za određeni skup parametara kompletan opis dan Lorentzovom raspodjelom koju smo stavili, radi jednostavnosti, u ishodište koordinatnog sustava (slika 3.). Dobivena funkcija je neovisna o

položaju u upadnoj ravnini, tako da se može smatrati invarijantnom na pomak.

Da bi modelirali  $PSF(x)$ , pušten je snop fotonskih paketa okomit na površinu papira i brojao je ukupno  $20 \cdot 10^6$  fotona. Nakon njihovog prolaska kroz medij registriran je njihov intenzitet i položaj prilikom povratka na ulaznu površinu. Dobivena raspodjela nakon normiranja na jedinicu površine ispod analitičke krivulje prepoznaje se kao  $PSF(x)$ . U stvarnosti zapravo ima mnogo više fotona, međutim u ovom slučaju ovaj broj predstavlja kompromis između realnijeg opisa i konzumacije računalnog vremena. Povećanjem broja fotona smanjio bi se šum u reflektanciji s površine papira, pri čemu se profil same linije ne mijenja.

Funkcija  $PSF(x, y)$  daje gustoću toka kao funkciju pravokutnih koordinata u ravnini slike i opisuje kako se oštra točka razmazuje zbog raspršenja svjetlosti u substratima.



**Slika 3.** Izračunata radijalna raspodjela podpovršinski raspršenog svjetlosnog snopa ulaznih fotonskih paketa koji prodiru u površinu u točki (0,0) premazanog papira i modelirani profil Lorentzovom raspodjelom (koeficijent korelacije  $R = 0,99212$ ) [2]

Argument za aproksimaciju cilindrične simetrije dobivenih profila može se vidjeti na slici 4. Slika je dobivena s više od 20.000 izračunatih točaka (zbog jednostavnosti nisu sve na slici), što je relativno mali broj fotona, ali ilustrira spomenutu simetriju prilično dobro. Svaka točka na slici predstavlja izlazni položaj fotonskog paketa.

Prikazana raspodjela raspršenja svjetlosti (slika 3.), ako je površina ispod krivulje normirana, predstavlja raspodjelu vjerojatnosti. Normiranje izračunate ukupne površine ispod profila na jedinicu zahtijeva definiciju  $PSF$  kao vjerojatnosti da foton izlazi na mjestu  $(x, y)$  ako ulazi u točki  $(0,0)$  na istoj površini. Ova vjerojatnost zahtijeva da površinski integral profila bude jednak jedinici.



**Slika 4.** Površinska raspodjela izlaznih fotonskih paketa pokazuje približnu cilindričnu simetriju izračunatog podpovršinskog raspršenja svjetlosnog snopa

$$PSF(r) = \frac{1}{\mathfrak{R}} \left( \frac{1}{\pi} \frac{\frac{w}{2}}{(r-r_c)^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2} \right) \quad (2)$$

gdje je  $r_c$  položaj centra raspodjele, a  $w$  parametar koji određuje širinu profila. Konstanta  $\mathfrak{R}$  je određena definicijom  $PSF$  kao vjerojatnost, tako da je:

$$\mathfrak{R} = \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{\pi} \frac{\frac{w}{2}}{(r-r_c)^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2} \right) dr \quad (3)$$

Kao što je već spomenuto, u literaturi se susreće nekoliko pristupa koji opisuju bočno raspršenje svjetlosti u papiru pomoću funkcije  $PSF$ . Većina tih funkcija je određena empirijski ili uz pretpostavku određene vrste funkcija [4],[5]. Međutim, drugi autori su se usredotočili na numeričke simulacije [6], na mjerenja mikroskopske reflektancije [7] ili na difuziju zračenja [8]. Postoje dvije predložene formulacije: Gaussova [9] funkcija razmazivanja linije  $LSF(x)$  i eksponencijalna  $PSF$  [10],[11]. Pošto  $PSF$  funkcija također može biti prepoznata kao gustoća vjerojatnosti, neki autori pokušali su sa stohastičkim modelima kod opisivanja lateralnog raspršenja u papiru. Veza između  $PSF$  i  $LSF$ :

$$LSF(x) = \int_{-\infty}^{\infty} PSF(x, y) dy \quad (4)$$

Pokušaj opisa papira prema zakonima optike (Fresnelova refleksija na granici između dva medija) doveo je do realizacije Clapper-Yule modela [12] koji je napravljen za potrebe predviđanja refleksije fotografskih slika.

Clapper-Yule model ima prednost modeliranja zrcalne refleksije i internih refleksija (Fresnelova refleksija) na granici papir-zrak. Model predviđa kako je širenje svjetlosti u papiru veliko u odnosu na prostor između rasterskih elemenata, a time je i vjerojatnost da svjetlost napušta papir proporcionalna rastertonskoj vrijednosti izraženoj u postocima.

Kao što je spomenuto, mnogi se autori koriste Gausovim analitičkim oblikom PSF. Međutim, naša simulacija potpovršinskog profila raspršenja svjetlosti u papiru pomoću Monte Carlo metode jasno pokazuje da je bolji opis dan Lorentzovim profilom. Da bi razlučili koji je od opisa točniji, morali smo usporediti konvoluirane profile otisnutih linija (s PSF(x) i Lorentzovog i Gausovog oblika) s mjerenim.

## 2. ANALIZA PARAMETRA $w$

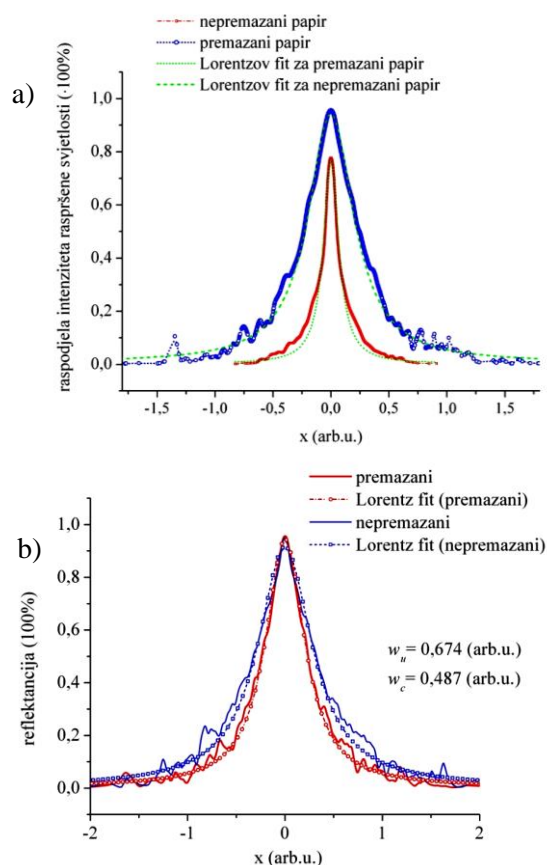
Kako je PSF u ovom slučaju opisana Lorentzovom raspodjelom, ne može se parametar  $w$  izjednačiti sa standardnom devijacijom  $\sigma$ , tj. ne možemo ga smatrati mjerom šuma koji je posljedica optičkog prirasta rastertonske vrijednosti [13]. Daljnja usporedba generiranih PSF za premazane i nepremazane papire otkriva da postoje razlike u parametru  $w$  zbog prisutnosti premaza (slika 5.).

To znači da parametar  $w$  na neki način ovisi o sastavu površine papira (indeks loma), iako ne možemo reći ništa više o prirodi tog odnosa, te o debljini premaza. Ista analiza provedena je pomoću različitih debljina papira i postotaka zastupljenosti pojedine komponente papira, ali spomenuta teorijska razmatranja i izračuni potpovršinskog raspršenja svjetlosti nisu dali rezultate koji bi pokazali utjecaj tih varijacija na parametar  $w$ .

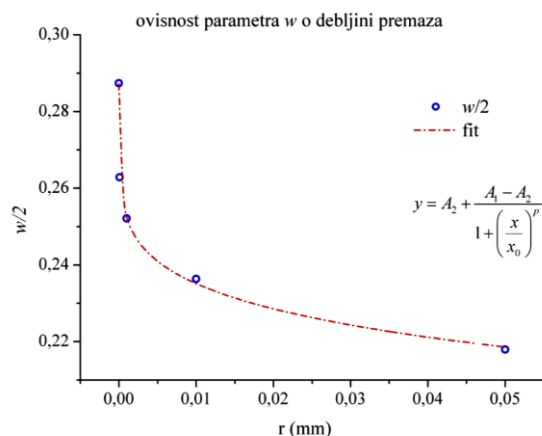
### 2.1. Ovisnost $w$ o premazu

Kako naš profil ovisi samo o jednom parametru,  $w$ , pokušalo se pronaći objašnjenje koje se može razabrati iz činjenice da je modelirana polovina širine profila  $w$  različita za premazani i nepremazani papir, kao što je prikazano na slici 5.

Slika 5. pokazuje usporedbu modeliranih profila raspodjele raspršenog zračenja premazanog i nepremazanog papira. Očito je primjetna razlika u intenzitetu distribucije u korist premazanog papira u smislu užeg parametara  $w$ . To je posljedica višestrukih internih refleksija na granici osnova papira - premaz. Kao rezultat toga smanjena je transmisija, a broj fotona koji se vraćaju na ulaznu površinu je manji jer se naknadno reflektiraju od spomenute granice kad na nju dolaze iz unutrašnjosti papira. Naravno, to nije slučaj s nepremazanim papirom i raspršenje na njemu je istaknutije.



**Slika 5.** Usporedba modeliranih radijalnih raspodjela potpovršinskog raspršenog zračenja premazanog i nepremazanog papira (izračunate raspodjele u okviru Monte Carlo pristupa): a) izračunate raspodjele i b) normirane na istu maksimalnu (vršnu) vrijednost kako bi se omogućila usporedba parametra  $w$

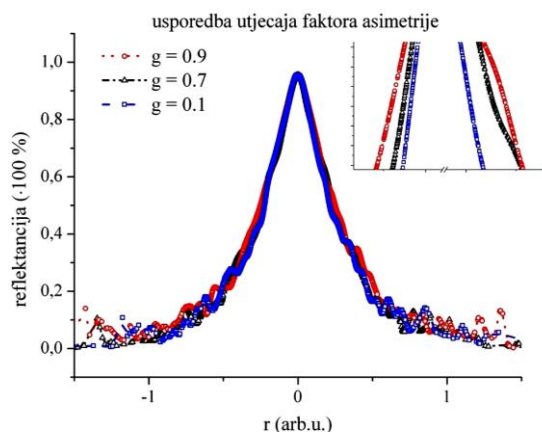


**Slika 6.** Ovisnost parametra  $w$  o debljini premaza

Na slici 6. prikazana je ovisnost parametra  $w$  o debljini premaza. Funkcionalna ovisnost dana je izrazom na slici. Izraz prikazuje tzv. logističku funkciju [13] koja daje najbolji fit (koeficijent korelacije = 0,999) koji smo dobili korištenjem programa Origin 8.5. Dobiveni podaci su isključivo teorijski. Unatoč tome što nisu mogli biti eksperimentalno provjereni, daju zanimljiv rezultat zbog čega je ovaj graf i prikazan.

## 2.2. Ovisnost $w$ o faktoru asimetrije $g$

Promatrana je i ovisnost parametra  $w$  o više različitih komponenti papira, zapravo ovisnost o postotnom udjelu svake od komponenti (celuloze, punila, keljiva, zraka, ...). Analiza nije pokazala primjetne razlike u parametru  $w$  prilikom variranja količinskih vrijednosti spomenutih komponenti.

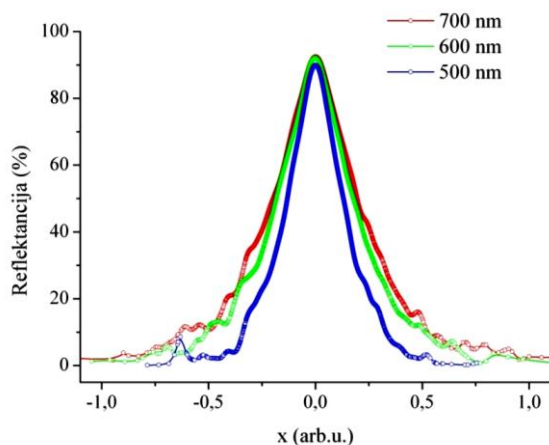


**Slika 7.** Utjecaj faktora asimetrije na parametar  $w$ . Vidi se da se parametar smanjuje kako faktor asimetrije ide prema vrijednosti nula.

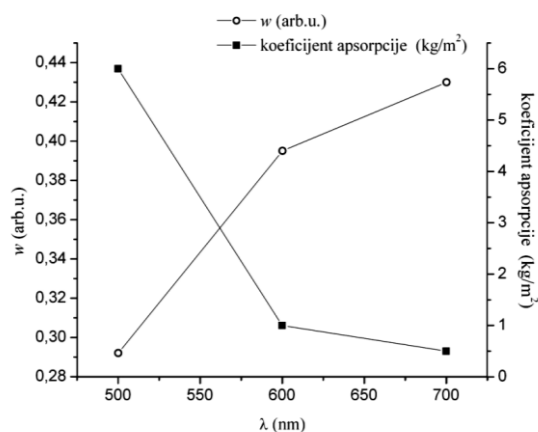
Jedina ovisnost parametra  $w$  pokazuje se prilikom variranja vrijednosti faktora asimetrije celuloze  $g$  (kao komponente koja je najzastupljenija u papiru) u prikazanom modelu, što je prikazano na slici 7. S obzirom na to da je faktor asimetrije  $g$  imanentan celuloznim vlaknima, ovaj rezultat bi eventualno mogao biti smjernica prilikom dizajniranja nekog papira bez celuloze.

## 2.3. Ovisnost $w$ o valnoj duljini svjetlosti

Sljedeća ovisnost koja je ispitivana bila je ovisnost parametra  $w$  o valnoj duljini svjetlosti (slika 8). Vidi se da padom valne duljine pada i vrijednost parametra  $w$ .



**Slika 8.** Ovisnost poluširine profila  $w$  o valnoj duljini svjetlosti



**Slika 9.** Ovisnost parametra  $w$  o promjeni koeficijenta apsorpcije s valnom duljinom

## 3. ZAKLJUČAK

Parametar  $w$ , a time i oštrina otisnutog ruba, pokazao se promjenjivim s obzirom na modeliranje površine i sastava papira, kao i s obzirom na valnu duljinu svjetlosti koja pada na otisak. Očigledno je da premazani papiri imaju manji  $w$  u odnosu na nepremazane, što još jednom dokazuje da se na takvim papirima ostvaruju otisci veće rezolucije. Sastojci papira nisu bitno utjecali na promjenu parametra  $w$ , osim onih sastojaka koji su asimetrične građe. Celulozna vlakna manjeg faktora asimetričnosti daju uži  $w$ . Isto tako, svjetlost manje valne duljine rezultira manjim parametrom  $w$ , što je posljedica ovisnosti faktora apsorpcije i raspršenja o valnoj duljini svjetlosti.

Te spoznaje omogućuju modeliranje papira s boljim svojstvima s obzirom na uklanjanje optičkog prirasta rastertonske vrijednosti.

## 4. LITERATURA

- [1] Yule, J.A.C.; Howe, D.J.; Altman, J.H.; The effect of the spread function of paper on halftone reproduction, *TAPPI Journal*, Vol. 50, No. 7, 337-344, (1967.)
- [2] Modrić, D.: Raspršenje i transport svjetlosti u tiskovnim podlogama, PhD thesis, University of Zagreb, (2007.)
- [3] Modrić, D.; Beuc, R.; Bolanča, S.; Monte Carlo Modeling of Light Scattering in Paper, *J. Imag Sci Tech*, 53(2): 020201-020201-8, (2009.)
- [4] Fischer, G.; Rodriguez-Giles, J.; Scheuter, K. R.; Ein physikalisches Modell für die Beschreibung von Lichtstreuprozessen. *Die Farbe*, 30(1/6):199-220, 1982.
- [5] Rogers, G.L.: *Optical Dot Gain: Lateral Scattering Probabilities*. Reiner Eschbach, (ed.), *Recent Progress in Digital Halftoning II*, chapter V, pages 495-500. IS&T, (1999.)
- [6] Yang, L.; Gooran, S.; Kruse, B.; *Simulation of Optical Dot Gain in Multichromatic Tone*



- Reproduction*. J Imag Sci Tech, **45**(2):198–204, (2001).
- [7] Shinichi, I.; Norimichi, T.; Yoichi, M.; *Analyzing CTF of Print by MTF of Paper*. J Imag Sci Tech **42**(6):572–576, (1998.)
- [8] Rogers G. L.; *Optical Dot Gain in a Halftone Print*. J Imag Sci Tech, **41**(6):643–656, (1997.)
- [9] Clapper, F.R.; Yule, J.A.C.; *The effect of multiple internal reflections on the densities of halftone print on paper*, J. Opt. Soc. Am. **43** (1953), 600–603.
- [10] Engeldrum, P.G.; Pridham, B.; *Application of Turbid Medium Theory to Paper Spread Function Measurements*, Proc. TAGA Proc., Vol. 47, 339–352 (1995.)
- [11] Gustavson, S.; *Color Gamut of Halftone Reproduction*, *Journal of Imaging Science and Technology*, Vol. 41, No. 3, 283–290 (1997.)
- [12] Murray, A.; *Monochrome reproduction in photoengraving*, J. Franklin Institute (Philadelphia) **221** (1936.), 721.
- [13] Maretić, K. P.: Implementacija Lorentzove funkcije u modeliranju reflektancijskoga profila slikovnoga elementa, PhD thesis, University of Zagreb

**Kontakt autora:****dr.sc. Katja Petric Maretić**

Grafički fakultet, Sveučilište u Zagrebu  
Getaldićeva 2, Zagreb  
01/2371-080, katja.petric.maretic@grf.hr

**doc.dr.sc. Damir Modrić**

Grafički fakultet, Sveučilište u Zagrebu  
Getaldićeva 2, Zagreb  
[damir.modric@grf.hr](mailto:damir.modric@grf.hr)

**prof.dr.sc. Marin Milković**

Veleučilište u Varaždinu  
J. Križanića 33, Varaždin  
dekan@velv.hr