

# Objektivna mjera kvalitete videa zasnovana na detektiranim artefaktima u videu

---

**Bajčinovci, Viliams**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:156026>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-03**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**  
**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I**  
**INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**OBJEKTIVNA MJERA KVALITETE VIDEA**  
**ZASNOVANA NA DETEKTIRANIM ARTEFAKTIMA U**  
**VIDEU**

**Diplomski rad**

**Viliams Bajčinovci**

**Osijek, 2017.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek, 22.09.2017.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

|                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ime i prezime studenta:                                                                    | Viliams Bajčinovci                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Studij, smjer:                                                                             | Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Komunikacije i informatika'                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Mat. br. studenta, godina upisa:                                                           | D 990, 12.10.2015.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| OIB studenta:                                                                              | 66620907238                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Mentor:                                                                                    | Doc.dr.sc. Mario Vranješ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Sumentor:                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Sumentor iz tvrtke:                                                                        | Danijel Babić                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Predsjednik Povjerenstva:                                                                  | Prof.dr.sc. Snježana Rimac-Drlje                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Član Povjerenstva:                                                                         | Dr.sc. Denis Vranješ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Naslov diplomskog rada:                                                                    | Objektivna mjera kvalitete videa zasnovana na detektiranim artefaktima u videu                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Znanstvena grana rada:                                                                     | <b>Telekomunikacije i informatika (zn. polje elektrotehnika)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Zadatak diplomskog rada:                                                                   | Ocjenu kvalitete videa moguće je dobiti subjektivnim metodama (koristeći ljudske promatrače) i objektivnim metodama (koristeći računalne algoritme). U radu je potrebno kombiniranjem rezultata više različitih algoritama za detekciju artefakata u video sadržaju predložiti objektivnu mjeru za ocjenu kvalitete video sadržaja. Kod projektiranja mjere treba uzeti u obzir što širi opseg parametara videa, kao što su dinamika sadržaja, rezolucija videa, norma kompresije, položaj područja u kojima se artefakti pojavljuju i slično. Potrebno je ispitati korelaciju rezultata koje projektirana mjera daje s rezultatima subjektivnih testova procjene kvalitete videa na odgovarajućem uzorku ocjenjivača. (sumentor Danijel Babić, Institut RT-RK Osijek, Cara Hadriana 10b) |
| Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):                                 | Izvrstan (5)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova: | Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda<br>Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda<br>Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda<br>Razina samostalnosti: 3 razina                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Datum prijedloga ocjene mentora:                                                           | 22.09.2017.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:  | Potpis:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                                                                            | Datum:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 26.09.2017.

**Ime i prezime studenta:**

Viliams Bajčinovci

**Studij:**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Komunikacije i informatika'

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

D 990, 12.10.2015.

**Ephorus podudaranje [%]:**

1

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Objektivna mjera kvalitete videa zasnovana na detektiranim artefaktima u videu**

izrađen pod vodstvom mentora Doc.dr.sc. Mario Vranješ

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

|                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. UVOD .....                                                                                                                                                                     | 1  |
| 2. BAZE VIDEO SEKVENCI S OCJENAMA KVALITETE VIDEA.....                                                                                                                            | 2  |
| 2.1. Postojeće baze video sekvenci s ocjenama video kvalitete .....                                                                                                               | 2  |
| 2.1.1. Video Quality Experts Group video baze korištene za FRTV Phase I i FRTV Phase II .....                                                                                     | 2  |
| 2.1.2. Laboratory for Image and Video Engineering video baza .....                                                                                                                | 2  |
| 2.1.3. Laboratory for Image and Video Engineering Mobile video baza.....                                                                                                          | 3  |
| 2.1.4. ETFOS CIF Video Quality database i ETFOS VGA Video Quality database .....                                                                                                  | 3  |
| 2.1.5. Computational and Subjective Image Quality video baza .....                                                                                                                | 3  |
| 2.1.6. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne - Politecnico di Milano video baza.....                                                                                           | 4  |
| 2.2. Novo-stvorene FERIT-RTRK i FERIT-RTRK-2 video baze.....                                                                                                                      | 4  |
| 2.2.1. FERIT-RTRK video baza.....                                                                                                                                                 | 6  |
| 2.2.2. FERIT-RTRK-2 video baza .....                                                                                                                                              | 11 |
| 3. POSTOJEĆE METRIKE ZA OCJENU KVALITETE VIDEA BEZ MOGUĆNOSTI PRISTUPA INFORMACIJAMA O REFERENTNOJ SEKVENCI .....                                                                 | 15 |
| 3.1. Video BLIINDS.....                                                                                                                                                           | 15 |
| 3.2. Metrika za procjenu kvalitete videa zasnovana na mjerenju artefakata u videu i statističkoj analizi bez pristupa informacijama o referentnoj video sekvenci .....            | 15 |
| 3.3. Metrika za procjenu kvalitete videa bez pristupa informacijama o referentnoj video sekvenci pomoću 3D <i>shearlet</i> transformacije i konvolucijskih neuronskih mreža ..... | 16 |
| 3.4. Modeli uočljive nelagode pri gledanju video sekvenci s kombinacijama prostornih i vremenskih video artefakata .....                                                          | 17 |
| 3.5. Prostorno-vremenska statistika za procjenu kvalitete video sekvenci.....                                                                                                     | 17 |
| 4. RAZVIJENA OBJEKTIVNA METRIKA ZA OCJENU KVALITETE VIDEA BEZ MOGUĆNOSTI PRITUPA REFERENTNOJ SEKVENCI .....                                                                       | 19 |
| 4.1. Algoritmi za detekciju video artefakata korišteni u novo-stvorenoj metrici .....                                                                                             | 19 |
| 4.1.1. Analiza algoritama za detekciju artefakata stvaranja blokova i gubitaka paketa.....                                                                                        | 20 |
| 4.2. Nova NR objektivna metrika za ocjenu kvalitete videa .....                                                                                                                   | 23 |

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5. TRENIRANJE I TESTIRANJE RAZVIJENE METRIKE ZA OCJENU KVALITETE VIDEA BEZ MOGUĆNOSTI PRITUPA REFERENTNOJ SEKVENCI ..... | 27 |
| 6. KLASIFIKACIJA ALGORITAMA KOMPRESIJE I SMANJENJE RAČUNALNIH ZAHTEVA METRIKE.....                                       | 32 |
| 6.1. Klasifikacija algoritama kompresije na temelju detektiranih video artefakata .....                                  | 32 |
| 6.2. Smanjenje računalnih zahtjeva metrike .....                                                                         | 34 |
| 7. ZAKLJUČAK .....                                                                                                       | 36 |
| SAŽETAK.....                                                                                                             | 40 |
| ABSTRACT .....                                                                                                           | 41 |
| ŽIVOTOPIS .....                                                                                                          | 42 |

## 1. UVOD

Područje primjene videa se svakodnevno širi i zahtjevi za visokom kvalitetom videa rastu. Smanjenje kvalitete videa manifestira se video artefaktima koji su rezultat video kompresije s gubicima ili prijenosa videa mrežama s gubicima. Primjeri video artefakata su artefakti stvaranja blokova, artefakti gubitaka paketa, artefakti smrzavanja, itd. Artefakti stvaranja blokova rezultat su algoritama za kompresiju s gubicima čiji se rad temelji na podjeli okvira na blokove te njihovom daljnjom obradom. Artefakti gubitaka paketa rezultat su prijenosa videa realnim mrežama, a u slučaju prevelikog gubitka video informacija dolazi do prisutnosti artefakta smrzavanja slike.

Kvalitetu videa moguće je odrediti subjektivnim i objektivnim metodama. U subjektivnim metodama gledatelji pridružuju ocjene reproduciranim video sekvencama. Objektivne metode obuhvaćaju računalne metrike koje na temelju proračuna određuju kvalitetu video sekvenci bez potrebe za ljudima kao izvora ocjena. Subjektivne metode daju najtočnije rezultate, ali su skupe i vremenski neučinkovite. Ovo je razlog povećanja potražnje za objektivnim metrikama kvalitete videa zasnovanim na rezultatima subjektivnih metoda. U svrhu razvoja objektivnih metrika za mjerenje kvalitete videa, kreiraju se baze videa koje sadrže originalne i degradirane video sekvence te rezultate subjektivnih testova provedenih nad video sekvencama kreirane baze. Ovakve baze, koriste se za razvoj i testiranje objektivnih metrika za ocjenjivanje kvalitete videa.

U okviru ovog rada kreirana je nova video baza te su nad generiranim sekvencama provedeni subjektivni testovi. Na temelju subjektivnih rezultata i triju algoritama za detekciju video artefakata (stvaranja blokova, gubitaka paketa i smrzavanja) razvijena je objektivna metrika za ocjenu kvalitete videa koja za davanje ocjene ne traži prisustvo referentnog signala.

U drugom poglavlju dane su informacije o nekim od postojećih javno dostupnih baza video sekvenci s pripadnim ocjenama kvalitete te su opisane dvije novo-kreirane baze. U trećem poglavlju su opisane postojeće metrike za ocjenu kvalitete videa bez mogućnosti pristupa informacijama o referentnoj sekvenci. Razvoj nove objektivne metrike za ocjenu kvalitete videa bez mogućnosti pristupa referentnoj sekvenci dan je u četvrtom poglavlju, dok su informacije o treniranju i testiranju ove metrike dane u petom poglavlju. U šestom je poglavlju opisana metoda klasifikacije algoritma kompresije te su dane informacije o smanjenju računalnih zahtjeva razvijene metrike. Zaključak rada dan je u sedmom poglavlju.

## **2. BAZE VIDEO SEKVENCI S OCJENAMA KVALITETE VIDEA**

U ovom poglavlju predstavljene su neke od postojećih baza video sekvenci s ocjenama kvalitete videa te su opisani postupci kreiranja dviju novih baza napravljenih u sklopu ovog rada, nad kojima su provedeni subjektivni testovi ispitivanja kvalitete i analiza rezultata.

### **2.1. Postojeće baze video sekvenci s ocjenama video kvalitete**

#### **2.1.1. Video Quality Experts Group video baze korištene za FRTV Phase I i FRTV Phase II**

VQEG (engl. *Video Quality Experts Group*) je provela testiranja objektivnih metrika za ocjenu kvalitete video sekvenci kroz dvije faze – *FRTV Phase I* i *FRTV Phase II*. Na televiziji standardne definicije, testirani su odnosi subjektivnih ocjena i ocjena objektivnih metrika koje imaju pristup referentnoj video sekvenci (engl. *full-reference* – FR) kao i objektivnih metrika koje nemaju pristup referentnoj video sekvenci (engl. *no-reference* – NR) [1], [2]. Za potrebe navedenih testiranja kreirane su dvije baze. Baza korištena u *FRTV Phase I* sadrži 24 izvorne sekvence i njima pripadne 384 testne sekvence dobivene kompresijom algoritmom zasnovanim na MPEG-2 standardu. Baza korištena za *FRTV Phase II* sadrži 32 izvorne sekvence i njima pripadnih 128 testnih sekvenci dobivenih kompresijom algoritmom zasnovanim na H.263 standardu.

#### **2.1.2. Laboratory for Image and Video Engineering video baza**

LIVE (engl. *Laboratory for Image and Video Engineering*) baza sadrži 10 izvornih sekvenci YUV 4:2:0 video formata s rezolucijom od 768x432 elemenata slike. Jedna izvorna sekvenca ima trajanje od 8.68 sekundi, a preostalih 9 imaju trajanje od 10 sekundi. Brzina izmjene okvira je 25 okvira u sekundi za 7 izvornih sekvenci, a preostale 3 sekvence imaju brzinu izmjene okvira od 50 okvira u sekundi. Za svaku od izvornih sekvenci, generirano je 15 degradiranih testnih sekvenci. Obuhvaćene su 4 vrste degradacije sekvenci – degradacija kompresije algoritmom zasnovanim na MPEG-2 standardu, degradacija kompresije algoritmom zasnovanim na H.264 standardu, degradacija prijenosom videa simuliranom IP mrežom s gubitcima i degradacija prijenosom videa bežičnom mrežom s gubitcima. Nad generiranim testnim sekvencama, provedeni su subjektivni testovi u kojima je svaki od 38 gledatelja, kroz dvije sesije, svakoj sekvenci pridružio jednu od 5 ponuđenih ocjena. Nakon obrade rezultata subjektivnih testova, subjektivne ocjene uspoređene su s rezultatima javno dostupnih objektivnih



metrika za ocjenu kvalitete videa. Rezultati provedene analize kao i dodatne informacije o LIVE *Video Quality Database* dostupni su u [3].

### **2.1.3. Laboratory for Image and Video Engineering Mobile video baza**

LIVE *Mobile* baza sadrži 10 izvornih sekvenci YUV 4:2:0 video formata s rezolucijom od 1280x720 elemenata slike. Sve izvorne sekvence imaju trajanje od 15 sekundi i brzinu izmjene okvira od 30 okvira u sekundi. Za svaku od izvornih sekvenci generirano je 20 degradiranih testnih sekvenci. Obuhvaćeno je 5 vrsta degradacije sekvenci – degradacije kompresije algoritmom zasnovanim na H.264 standardu, degradacija prijenosom videa bežičnom mrežom s gubitcima paketa, degradacija smrzavanjem okvira, degradacija prilagodbom prijenosne brzine i degradacija dinamičnom promjenom prijenosne brzine. Nad generiranim testnim sekvencama, provedeni su subjektivni testovi u kojima su gledatelji ocjenjivali testne sekvence ocjenama od 0 do 5. Subjektivni testovi provedeni su na pametnim telefonima i *tabletima*. Informacije dobivene analizom rezultata subjektivnih testova kao i dodatne informacije o LIVE *Mobile* bazi dostupne su u [4].

### **2.1.4. ETFOS CIF Video Quality database i ETFOS VGA Video Quality database**

Izvorne sekvence obiju baza iz naslova odjeljka su formata YUV 4:2:0. Trajanje izvornih sekvenci je 12 sekundi s brzinom izmjene okvira od 25 okvira u sekundi. *ETFOS CIF Video Quality* (ECVQ) baza sadrži 8 izvornih sekvenci rezolucije 352x288 elemenata slike, dok *ETFOS VGA Video Quality* (EVVQ) baza sadrži 8 izvornih sekvenci rezolucije 640x480 elemenata slike. Obje baze sadrže po 90 degradiranih testnih sekvenci. Obuhvaćene su dvije vrste degradacija video sekvenci – degradacija kompresije videa algoritmom za kompresiju zasnovanim na MPEG-4 standardu i degradacije kompresije videa algoritmom za kompresiju zasnovanim na H.264 standardu. Nad generiranim testnim video sekvencama provedeni su subjektivni testovi u kojima su gledatelji sekvencama dodjeljivali ocjene od 0 do 100. U analizi rezultata subjektivnih testova, uspoređene su različite metode za izdvajanje subjektivnih ocjena pojedinog gledatelja koje odstupaju od prosječnih ocjena preostalih gledatelja. Rezultati analize i dodatne informacije o ECVQ i EVVQ bazama dostupne su u [5].

### **2.1.5. Computational and Subjective Image Quality video baza**

CSIQ (engl. *Computational and Subjective Image Quality*) Video Database sadrži 12 izvornih sekvenci YUV 4:2:0 video formata s rezolucijom od 832x480 elemenata slike. Sve

izvorne sekvence imaju trajanje od 10 sekundi s brzinom izmjene okvira od 24, 25, 30, 50 ili 60 okvira u sekundi ovisno o izvornoj sekvenci. Za svaku izvornu sekvencu generirano je po 18 izobličenih sekveneci. Obuhvaćeno je 6 vrsta degradacije video sekveneci – degradacija Motion JPEG (MJPEG), H.264, H.265 i wavelet kompresijom, kao i degradacija prijenosom videa simuliranom bežičnom mrežom s gubitcima te degradacija *Gaussov*im bijelim šumom. Nad generiranim testnim video sekvencama provedeni su subjektivni testovi s 35 gledatelja [6].

#### **2.1.6. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne - Politecnico di Milano video baza**

EPFL-PoliMI (*Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne - Politecnico di Milano*) baza sadrži 6 izvornih video sekveneci YUV 4:2:0 video formata s rezolucijom od 352x288 elemenata slike. Sve izvorne sekvence imaju trajanje od 10 sekundi s brzinom izmjene okvira od 30 okvira u sekundi. Baza ukupno sadrži 78 testnih video sekveneci. Testne sekvence generirane simuliranjem gubitaka paketa tokom prijenosa video sekveneci komprimiranih algoritmom zasnovanim na H.264 standardu. Nad generiranim testnim sekvencama provedeni su subjektivni testovi u kojima su gledatelji sekvencama pridruživali ocjene između 0 i 5. Informacije dobivene analizom rezultata subjektivnih testova kao i dodatne informacije o EPFL-PoliMI bazi dostupne su u [7].

### **2.2. Novo-stvorene FERIT-RTRK i FERIT-RTRK-2 video baze**

Za potrebe razvoja objektivne metrike generirane su dvije baza video sekveneci nad kojima su provedeni subjektivni testovi. Izvorne sekvenca za obje generirane baze dobavljene su od strane *Ultra Video Group* (UVG) [8]. Za obje baze korišteno je istih 6 izvornih sekveneci s rezolucijom od 1920x1080 elemenata slike i YUV 4:2:0 video formatom. Izvorne sekvence su poduzorkovane ispuštanjem svakog drugog okvira, čime je brzina izmjene okvira smanjena sa 120 okvira u sekundi na 60 okvira u sekundi. Trajanje svake izvorne sekvence je 5 sekundi, a po jedan okvir iz svake od izvornih sekveneci prikazan je na slici 2.1. Ideja je bila stvoriti nove baze video signala, u kojima će parametri videa poput rezolucije, formata, brzine izmjene okvira, tipova izobličenja, itd. biti onakvi kakvi se danas u realnom svijetu najčešće pojavljuju.

Kako bi se numerički odredile karakteristike scene izračunate su dvije mjere – prostorne uočljive informacije (engl. *spatial perceptual information*) (SI) i vremenske uočljive informacije (engl. *temporal perceptual information*) (TI). Način izračuna SI i TI definiran je u [9]. SI se računa prema formuli (2-1):

$$SI = \max_{time} \{std_{space}[Sobel(F_n)]\}, \quad (2-1)$$

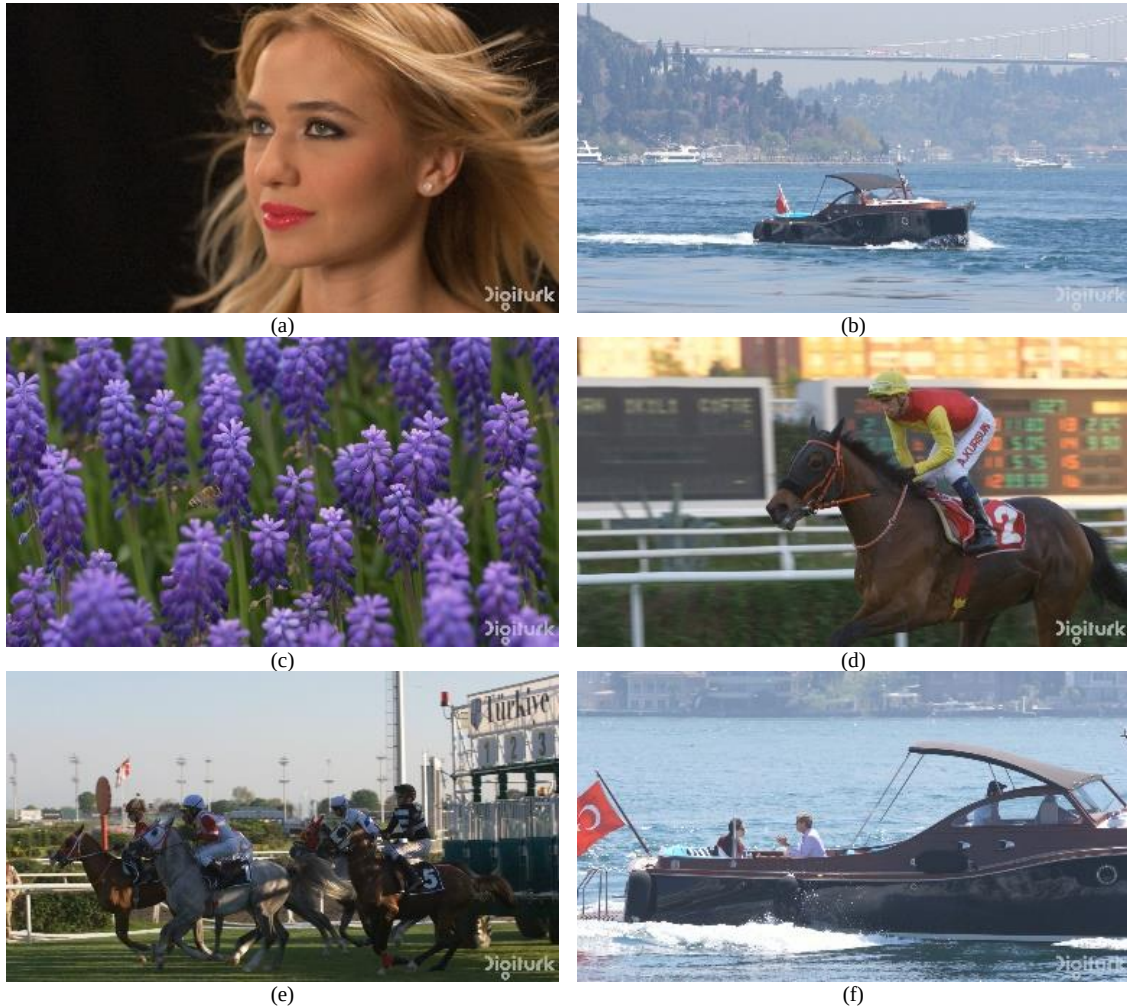
gdje je:

$F_n$  – matrica luminantne komponente  $n$ -tog okvira,

$Sobel$  – funkcija za filtriranje Sobelovim filtrom,

$std_{space}$  – funkcija za izračun prostorne standardne devijacije,

$max_{time}$  – funkcija za određivanje maksimalne vrijednosti u vremenu.



**Sl. 2.1.** *Primjeri okvira referentnih video sekvenci za generiranje novih baza videa (a) Beauty (b) Bosphorus (c) HoneyBee (d) Jockey (e) ReadySetGo (f) YachtRide [8]*

TI se računa prema formuli (2-2):

$$TI = \max_{time} \{std_{space}[F_n(i,j) - F_{n-1}(i,j)]\}, \quad (2-2)$$

gdje je:

$F_n(i,j)$  - matrica luminantne komponente  $n$ -tog okvira,

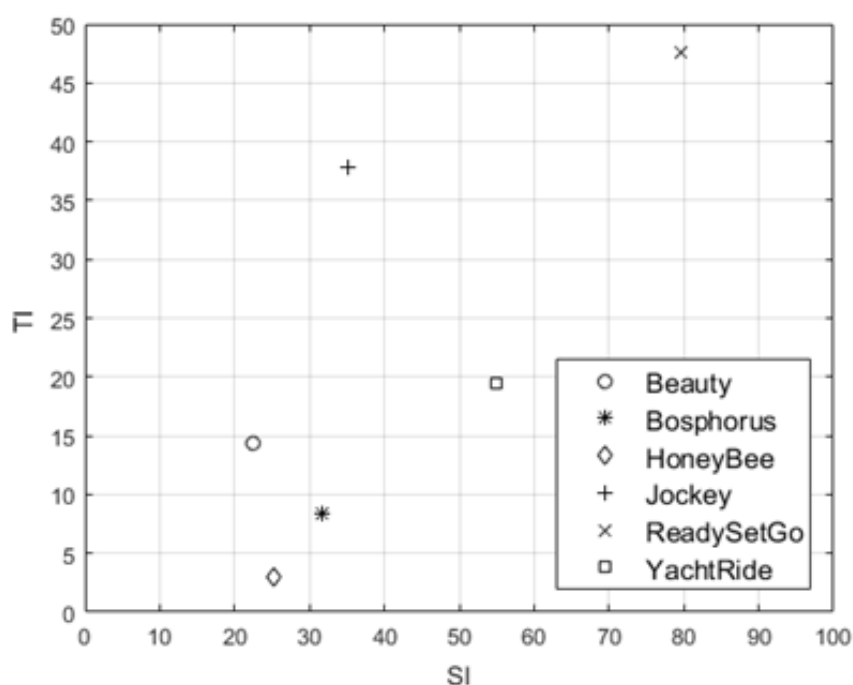
$i, j$  – indeksi retka i stupca u matrici  $F_n$

$F_{n-1}(i,j)$  - matrica luminantne komponente okvira koji prethodi  $n$ -tom okviru,

$std_{space}$  – funkcija za izračun prostorne standardne devijacije,

$max_{time}$  – funkcija za određivanje maksimalne vrijednosti u vremenu.

SI i TI vrijednosti izvornih video sekvenci prikazane su na slici 2.2.



SI. 2.2. Prikaz SI i TI vrijednosti izvornih video sekvenci

### 2.2.1. FERIT-RTRK video baza

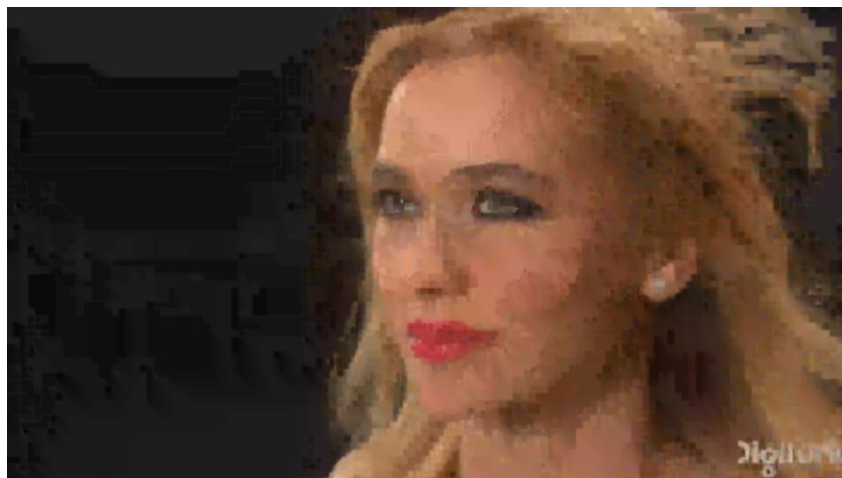
Prva od dviju generiranih baza – FERIT-RTRK baza, sadrži testne sekvence koje su generirane kompresijom referentnih sekvenci algoritmima za kompresiju zasnovanim na H.264, H.265 i MPEG-2 standardima. Korišteni algoritmi za kompresiju dostupni su unutar FFmpeg programskog alata [10]. Za svaki od primijenjenih algoritama za kompresiju, korišteno je 5 različitih fiksnih razina kvalitete – 30, 35, 40, 45, i 50 za algoritme zasnovane na H.264 i H.265 standardima; 11, 16, 21, 22 i 31 za algoritam zasnovan na MPEG-2 standardu. Za algoritam za

kompresiju videa zasnovan na MPEG-2 standardu, osim fiksne razine kvalitete korištene su i različite vrijednosti fiksne razine kvantizacije – 19, 24, 29, 39 i 59. Vrijednosti korištenih parametara odabrani su tako da za svaku referentnu video sekvencu pripadni skup degradiranih video sekvenci različitim algoritmima za kompresiju rezultira sličnim intervalom vršnih vrijednosti odnosa signala i šuma (engl. *Peak signal to noise ratio*) (PSNR). Ovom metodom, 15 različitih degradiranih video sekvenci je generirano za svaku referentnu video sekvencu, što je ukupno 90 testnih sekvenci. Na slici 2.3. prikazan je po jedan okvir sekvence *Beauty* za svaki od korištenih algoritama kompresije i najveću od korištenih pripadnih razina kompresije.

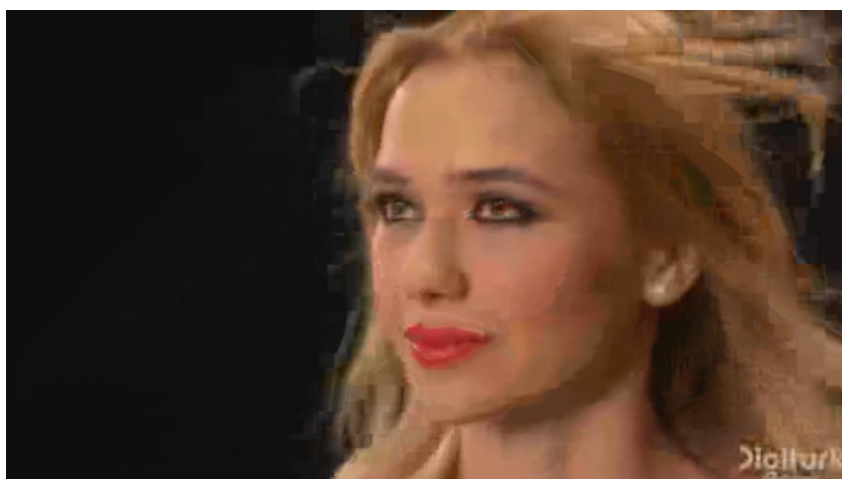
Za potrebe provedbe subjektivnih testova nad kreiranom bazom, u sklopu ovog rada kreiran je alat s korisničkim sučeljem koji korisniku omogućava odabir datoteke s popisom videa za ocjenjivanje, nakon čega započinje proces ocjenjivanja kvalitete videa. Svaka video sekvenca se može prikazati samo jednom prije nego što ju korisnik ocjeni, a korisnik nema mogućnost gledanja sljedeće video sekvence dok nije ocijenio prethodnu. Vrijeme koje korisnik ima na raspolaganju za odabir ocjene nije ograničeno. Za provedbu subjektivnih testova korištena je metoda s apsolutnim kategorijskim ocjenama i skrivenom referentnom sekvencom (engl. *Absolute Category Rating with Hidden Reference*) (ACR-HR) [9]. Ponuđene ocjene su u intervalu od 0 do 10 gdje 0 predstavlja najlošiju, a 10 najbolju kvalitetu videa (identičnu originalnom videu). Kako bi se omogućila stvarno-vremenska reprodukcija referentnih video sekvenci na računalima korištenim za provedbu subjektivnih testova, obavljena je kompresija s neznatnim gubicima neprimjetnim čak i stručnjacima iz područja ocjene kvalitete videa, što je dozvoljeno i opisano u [11].

Skupina od 30 gledatelja podijeljena je u dvije grupe s kojima su u različita vremena obavljena subjektivna testiranja. Prije ocjenjivanja video sekvenci testirana je sposobnost raspoznavanja boja (Ishihara test) i oštrina vida gledatelja. Ovim testiranjima potvrđene su dovoljne razine oštrine vida i sposobnosti raspoznavanja boja kod svih gledatelja pa nije bilo potrebe zanemariti ocjene dane od strane ijednog gledatelja. Dio testiranja u kojem su gledatelji ocjenjivali video sekvence organiziran je kroz tri cjeline od kojih je svaka imala zaseban popis pripadnih sekvenci. U prvoj cjelini gledateljima je prezentirano 5 testnih sekvenci čija je svrha upoznati korisnika s očekivanim razinama degradacije te sučeljem alata za subjektivne testove. Druga cjelina sadrži 6 izvornih video sekvenci bez degradacije, a cilj je bio da se gledatelji upoznaju sa „savršenom“ tj. referentnom kvalitetom originalnih video sekvenci. Treća cjelina sadrži ukupno 96 video sekvenci – 6 izvornih video sekvenci i ukupno 90 degradiranih video sekvenci (po 15 degradiranih sekvenci za svaku pojedinu izvornu sekvencu). Video sekvence

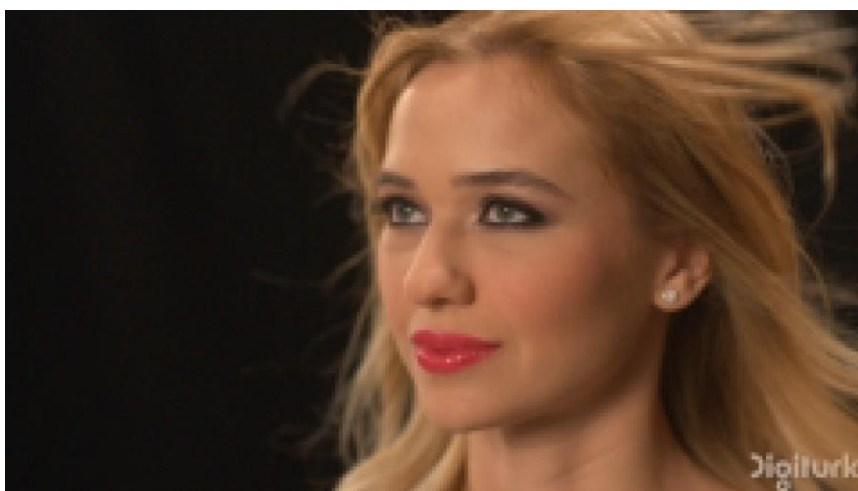
koje su dio treće cjeline za svakog su gledatelja reproducirane posebnim, pseudo-slučajno generiranim redoslijedom, dok su popisi video sekvenci prve i druge cjeline jednaki za sve gledatelje. U procesu obrade rezultata korišteni su samo ocjene iz treće cjeline.



(a)



(b)



(c)

**Sl. 2.3.** *Primjeri okvira sekvence Beauty komprimirane najvećim korištenim razinama kompresije za algoritme: (a) H.264 (b) H.265 (c) MPEG-2*

U slučaju velikog odstupanja ocjena pojedinog gledatelja u odnosu na srednju ocjenu svih gledatelja, potrebno je zanemariti ocjene promatranog gledatelja. Za određivanje skupa gledatelja čije će ocjene biti zanemarene, promatran je *Pearsonov* linearni korelacijski koeficijent (engl. *Pearson Linear Correlation Coefficient*) (PLCC) na način opisan u [11]. Za svaku testnu video sekvencu, izračunata je srednja vrijednost ocjena (engl. *Mean opinion score* - MOS) koju su joj pridružili svi gledatelji. Izračunat je PLCC između ocjena svakog pojedinog gledatelja i srednjih ocjena. Kako su u prvoj iteraciji svi PLCC bili iznad 0.75 nije bilo potrebno zanemariti ocjene ijednog od gledatelja.

Kako je za provedbu subjektivnih testova korištena ACR-HR metoda, za svaku testnu sekvencu je izračunata diferencijalna srednja ocjena (engl. *differential mean opinion score* - DMOS). Kako bi se uklonio utjecaj sadržaja video sekvenci na ocjene gledatelja, jer je cilj dobiti ocjene koje ovise samo o kvaliteti video sekvence, prije računanja DMOS vrijednosti, za svaku kombinaciju pojedinog gledatelja i pojedine testne video sekvence diferencijalna ocjena je izračunata prema formuli (2-3):

$$DV(PVS) = V(PVS) - V(REF) + 10, \quad (2-3)$$

gdje je:

*PVS* – testna degradirana sekvenca,

*REF* – pripadna referentna sekvenca,

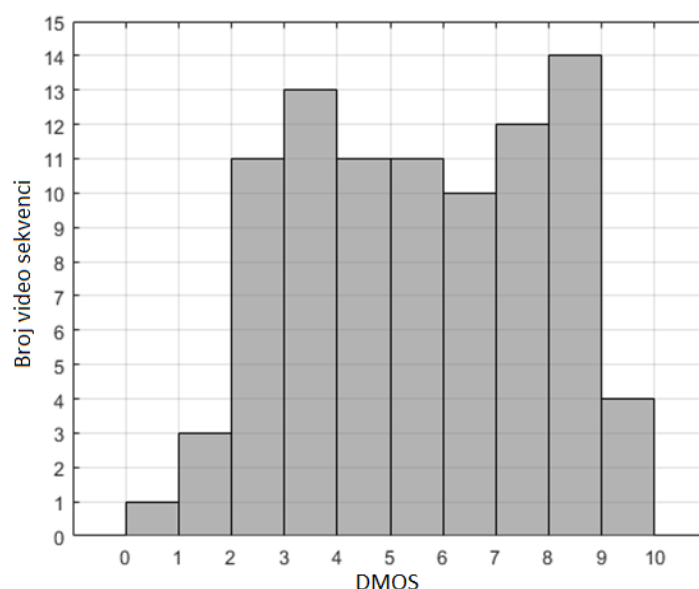
*V* – gledateljeva ocjena,

*DV* – diferencijalna ocjena.

Za pojedinu degradiranu testnu sekvencu DMOS je izračunat kao srednja vrijednost svih pripadnih *DV* vrijednosti. Histogram svih izračunatih DMOS vrijednosti prikazan je na slici 2.4. Iz histograma je vidljivo da su izobličenja ubačena u video signale generirala sekvence širokog raspona kvalitete, što je vrlo bitno kad se kreiraju baze za testiranje objektivnih metrika.

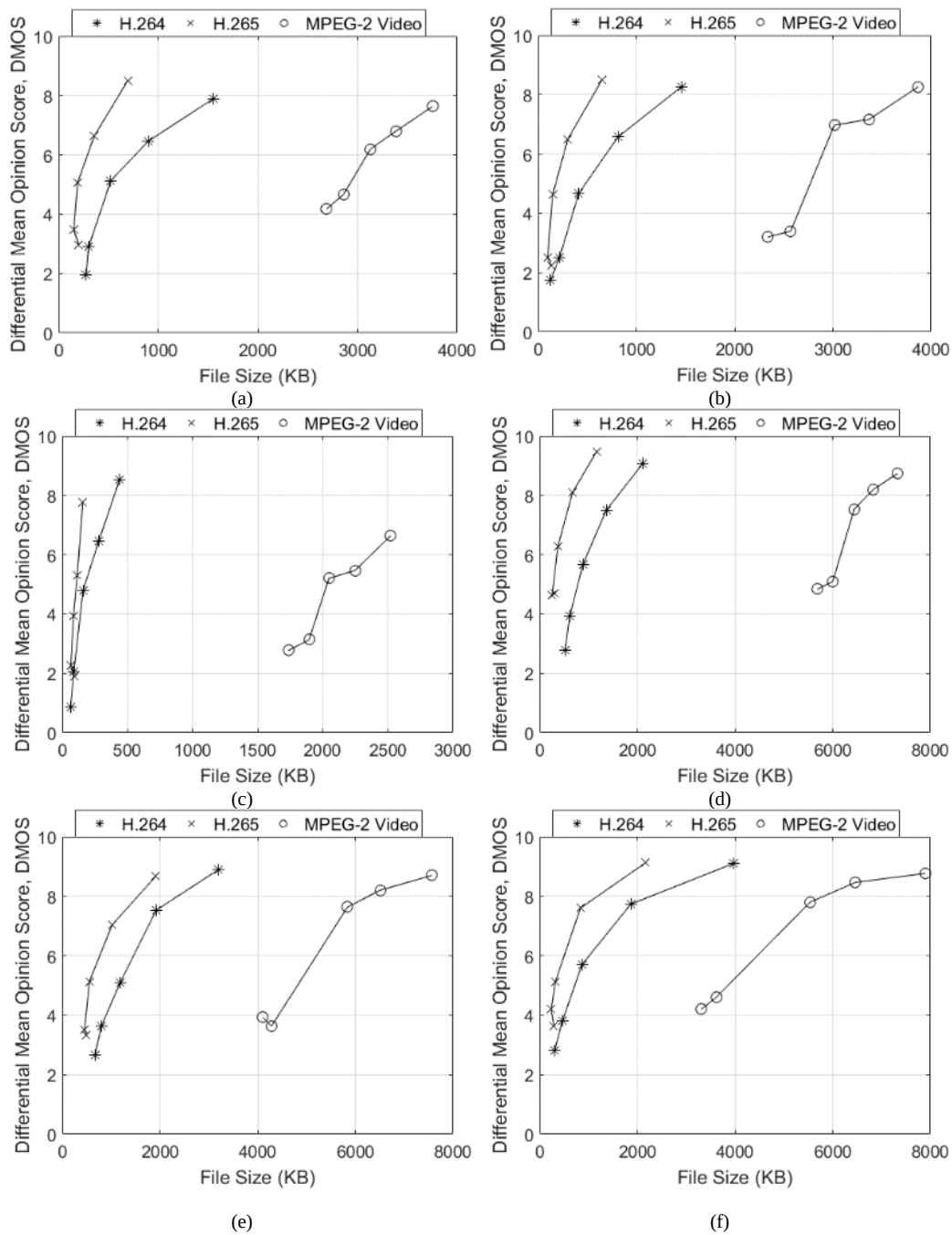
Veličine komprimiranih testnih video datoteka ovise o složenosti sadržaja video sekvence, korištenom algoritmu za kompresiju te njemu postavljenim parametrima. Veličina komprimiranih datoteka ovisi i o rezoluciji, formatu poduzorkovanja boja te ukupnom broju okvira (ove vrijednosti su jednake za sve video sekvence kreirane baze). Odnosi DMOS vrijednosti i veličina komprimiranih video datoteka prikazani su na slici 2.5. Datoteke dobivene MPEG-2 kompresiju zauzimaju znatno veću količinu memorije u odnosu na datoteke dobivene

H.264 ili H.265 kompresijama kada se promatraju video sekvence jednakog izvornog sadržaja i približno jednakih DMOS vrijednosti. Ekstremni primjer ovakvog odnosa kompresije primijećen je kod sekvenci s DMOS vrijednosti 8 i izvornim sadržajem *Jockey*. U promatranom slučaju, MPEG-2 kompresijom generirana je datoteka koja je približno 7 puta veća od datoteka generiranih algoritmima za kompresiju zasnovanim na H.264 ili H.265 standardima. Razina kompresije koja je ostvarena korištenjem algoritma za kompresiju zasnovanim na H.265 standardu je veća u odnosu na razinu kompresije koja je ostvarena algoritmom za kompresiju zasnovanim na H.264 standardu, kada se promatraju testne video sekvence s približno jednakim DMOS vrijednostima. Odnosi razina kompresija koji su ostvareni korištenjem prethodnih dvaju navedenih algoritama su manji, nego odnosi razina kompresija između pojedinog od ovih algoritama i algoritma za kompresiju zasnovanog na MPEG-2 standardu. Odnosi ostvarenih razina kompresija između korištenih algoritama za kompresiju su manji za testne video sekvence kojima su pridružene manje DMOS vrijednosti, neovisno o promatranim algoritmima kompresije. S obzirom na razinu kompleksnosti video sadržaja, razine kompresije ostvarene za sekvence manjih SI i TI vrijednosti (sekvence jednostavnijeg sadržajem) – *Beauty*, *Bsophorus*, *HoneyBee* - su veće u odnosu na razine kompresije ostvarene za sekvence s većim SI i TI vrijednostima (sekvence složenijeg sadržaja) – *Jockey*, *ReadySetGo*, *YachtRide*.



**Sl. 2.4.** Histogram DMOS vrijednosti za testne signale FERIT-RTRK baze





**Sl. 2.5.** Odnosi DMOS vrijednosti i veličina komprimiranih video datoteka za sekvence: (a) *Beauty* (b) *Bosphorus* (c) *HoneyBee* (d) *Jockey* (e) *ReadySetGo* (f) *YachtRide*

## 2.2.2. FERIT-RTRK-2 video baza

Kako bi testne sekvence, osim artefakata uzrokovanih kompresijom (najčešće artefakt stvaranja blokova), obuhvatile i artefakte gubitaka paketa te artefakte smrzavanja okvira, iz skupova parametara korištenih za kreiranje prethodno navedene baze (FERIT-RTRK) odabrana

su po 3 skupa parametara za pojedini algoritam za kompresiju. Odabrani su skupovi parametara koji su ostvarili minimalnu, srednju i maksimalnu razinu kompresije. Za svaki od primijenjenih algoritama za kompresiju, korištene su 3 različite fiksne razine kvalitete – 30, 40 i 50 za algoritme zasnovane na H.264 i H.265 standardima; 11, 21 i 31 za algoritam zasnovan na MPEG-2 standardu. Za algoritam za kompresiju videa zasnovan na MPEG-2 standardu, osim fiksne razine kvalitete korištene su i različite vrijednosti fiksne razine kvantizacije – 19, 29 i 59. Za svaku od 54 testne sekvence dobivene korištenjem odabranih skupova parametara, kreirane su po dodatne dvije testne sekvence s artefaktima gubitaka paketa, čime je broj testnih sekvenci povećan na 162. Za svaku od ovih testnih video sekvenci kreirane su po još dvije testne video sekvence s artefaktima smrzavanja slike, tako da kreirana FERIT-RTRK-2 baza sadrži ukupno 486 testnih video sekvenci.

Kako bi se generirale sekvence sa simuliranim gubitkom IP paketa, testne video sekvence konvertirane su u *Transport Stream* (TS) format čime su podaci video sekvence podijeljeni u pakete veličine 188 bajta. Za prijenos videa IP mrežom, TS paketi se pakiraju u *User datagram protocol* (UDP) pakete ili *Real-time transport protocol* (RTP) pakete (upakirane u UDP pakete), koji se nadalje pakiraju u IP pakete. Na ovakav način, jedan IP paket može sadržavati najviše 7 TS paketa. Također, uobičajeno je jednim IP paketom prenositi upravo 7 TS paketa [12]. Kada tokom ovakvog prijenosa videa IP mrežom dođe do gubitka jednog IP paketa, gube se podaci video sekvence pohranjeni u njemu pripadnih 7 TS paketa.

U procesu degradacije testnih sekvenci artefaktima gubitaka IP paketa, nasumično su odabrani IP paketi koji će biti izgubljeni, a udjeli izgubljenih IP paketa u ukupnim IP paketima fiksno su određeni. Odabrani su udjeli od 0.75% i 1.5%. Na slici 2.6., za svaki od korištenih algoritama kompresije prikazan je po jedan okvir degradiran artefaktima gubitaka paketa. Ovi okviri izdvojeni su iz sekvenci s najmanjom korištenom razinom kompresije kako bi na slici bili dominantno uočljivi artefakti gubitaka paketa bez (ili s vrlo malo) prisutnih artefakata kompresije.

Za kreiranje testnih video sekvenci s artefaktima smrzavanja slike nasumično je odabran po jedan okvir unutar druge i četvrte sekunde pojedine testne video sekvence. Za manju razinu artefakata smrzavanja slike odabrani okviri preslikani su preko sljedećih 10 okvira, dok su za veću razinu artefakata smrzavanja slike odabrani okviri preslikani preko sljedećih 30 okvira.

Subjektivni testovi nad ovim skupom generiranih testnih video sekvenci provedeni su s 15 gledatelja, a postupak je bio jednak onome korištenom za subjektivne testove FERIT-RTRK

baze. U provjeri prevelikog odstupanja ocjena pojedinog gledatelja od prosječnih ocjena preostalih na temelju *Pearsonovog* linearnog koeficijenta korelacija, ocjene četiriju gledatelja su zanemarene. Detaljnije informacije o korištenoj metodi za detekciju gledatelja čije će ocjene biti zanemarene dostupne su u [11].



(a)



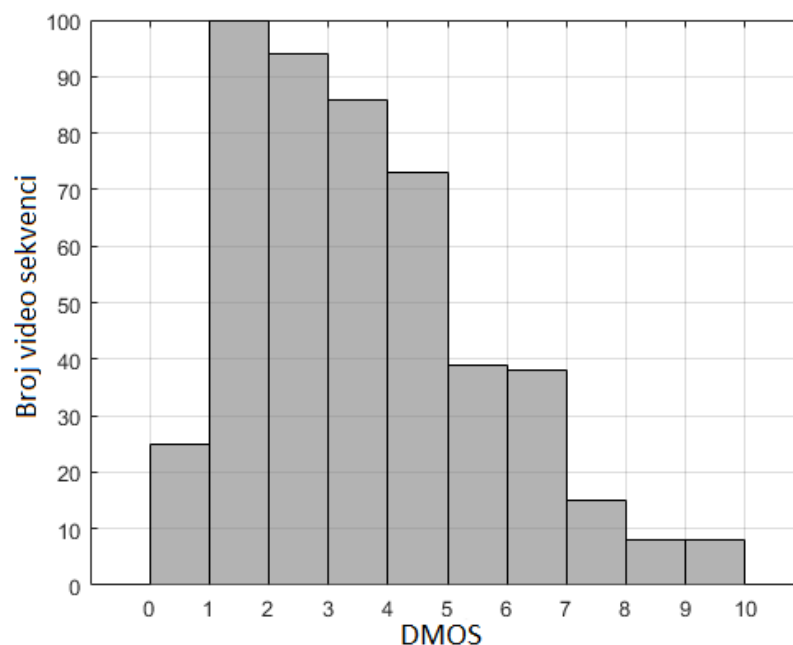
(b)



(c)

**Sl. 2.6.** *Primjeri okvira degradiranih artefaktima gubitaka paketa za sekvencu Jockey komprimiranu algoritmom: (a) H.264 (b) H.265 (c) MPEG-2*

Kako testne sekvence FERIT-RTRK-2 baze sadrže kombinacije različitih artefakata degradacije video sekvence, distribucija DMOS vrijednosti razlikuje se od one kod FERIT-RTRK baze. Udio manjih DMOS vrijednosti je veći nego kod FERIT-RTRK baze, a histogram DMOS vrijednosti prikazan je na slici 2.7.



**Sl. 2.7.** Histogram DMOS vrijednosti za testne signale FERIT\_RTRK-2 baze

### **3. POSTOJEĆE METRIKE ZA OCJENU KVALITETE VIDEO BEZ MOGUĆNOSTI PRISTUPA INFORMACIJAMA O REFERENTNOJ SEKVENCI**

U ovom su poglavlju navedene te ukratko opisane neke od postojećih objektivnih metrika za ocjenu kvalitete videa. Svaka od ovih metrika radi bez mogućnosti pristupa informacijama o referentnoj video sekvenci.

#### **3.1. Video BLIINDS**

Video BLIINDS (engl. *Blind Image Integrity Notator using Discrete Cosine Transform Statistics*) je objektivna metrika za ocjenu kvalitete videa bez pristupa informacijama izvorne video sekvence. Metrika se temelji na izdvajanju određenih svojstava video sekvenci koja se predaju *Support Vector Regression* (SVR) modelu za strojno učenje. Svojstva video sekvenci koja su korištena su: koherentnost pokreta, mjera globalnih pokreta, spektralni odnosi statistike prirodnih videa (engl. *Natural Video Statistics* - NVS), apsolutni vremenski derivat srednjih diskretnih kosinusnih koeficijenata i prostorna prirodnost okvira [13]. Osim posljednjeg navedenog svojstva, sva ostala svojstva određuju se na temelju razlike susjednih okvira video sekvence. Svako pojedino navedeno svojstvo podvrgnuto je nelinearnoj logaritamskoj funkcije prije nego što je predano SVR modelu. Autori navode kako objektivne metrike za ocjenu kvalitete videa koje nemaju pristup informacija izvorne video sekvence općenito zahtijevaju da se proces treniranja metrike provodi na dijelu video baze kojom se metrike testiraju. Video BLIINDS metrika trenirana je i testirana na sekvencama LIVE i EPFL-PoliMI video baza. Usporedba rezultata s drugim objektivnim metrikama, detaljnija objašnjena korištenih svojstava testnih video sekvenci i dodatne informacije o metrici i provedenoj analizi dostupne su u [14].

#### **3.2. Metrika za procjenu kvalitete videa zasnovana na mjerenju artefakata u videu i statističkoj analizi bez pristupa informacijama o referentnoj video sekvenci**

U [15] autori su razvili objektivnu metriku za ocjenu kvalitete videa bez pristupa informacijama izvorne video sekvence koja se temelji na svojstvima video sekvence izdvojenim iz koeficijenata dobivenih diskretnom kosinusnom transformacijom (engl. *Discrete cosine transform* - DCT). Cilj razvijene metrike je ocjenjivanje komprimiranih prirodnih video sekvenci. Metrika je organizirana u dvije cjeline – određivanje vrijednosti različitih svojstava

distorzije i nelinearna transformacija vrijednosti tih svojstava. Prvi korak metrike je DCT transformacija koja se vrši za svaki okvir ulazne video sekvence. Dobiveni DCT koeficijenti podijeljeni su u 6 skupova koeficijenata ovisno o orijentaciji i frekvencijskom području komponenti signala koje pojedini DCT koeficijenti predstavljaju. Na temelju određenih kombinacija skupova DCT koeficijenata računaju se sljedeća svojstva testne video sekvence: *Peakiness*, *Smoothness*, *Sharpness*, *Histo-noise*, srednja *Jensen-Shannonova* divergencija (engl. *mean Jensen-Shannon divergence* - MJSD) i *Blockiness*. Ovako je za svaki okvir testne video sekvence dobivena po jedna vrijednost za svako od navedenih svojstava. Kako bi se za cijelu video sekvencu izdvojila jedna vrijednost po svakom navedenom svojstvu, nad vektorom svih vrijednosti pojedinog svojstva primijenjena je *Minkowski* metoda sažimanja (engl. *Minkowski pooling*). Dobivene vrijednosti predaju se višeslojnoj neuronskoj mreži koja na izlazu daje ocjenu kvalitete testne video sekvence. Treniranje i testiranje metrike rađeno je na podskupovima video baza. Osim višeslojne neuronske mreže analiziran je i rad metrike kada bi se ona zamijenila SVR modelom ili linearnom regresijom. Rezultati metrike također su uspoređeni s rezultatima odabranih objektivnih metrika.

### **3.3. Metrika za procjenu kvalitete videa bez pristupa informacijama o referentnoj video sekvenci pomoću 3D *shearlet* transformacije i konvolucijskih neuronskih mreža**

U [16] autori su razvili objektivnu metriku koja bez dostupnih informacija o izvornoj video sekvenci, na temelju značajki izvedenih iz testnih video sekvenci, određuje ocjenu kvalitete videa. Način rada metrike zasnovan je na prostornoj korelaciji elemenata slike pojedinog okvira te vremenskoj korelaciji susjednih okvira video sekvence. Početni korak razvijene metrike je 3D *shearlet* transformacija. Iz informacija dobivenih prethodnom transformacijom izdvajaju se značajke koje se predaju na ulaz troslojne konvolucijske neuronske mreže (engl. *convolutional neural network* - CNN). Izlazne vrijednosti neurona trećeg sloja mreže iskorištene su za klasifikaciju vrste distorzije te za logističku regresiju koja daje ocjenu kvalitete testne video sekvence. Razvijena metrika trenirana je i testirana na testnim video sekvencama LIVE, IVP (engl. *Image and Video Processing*) [17] i CSIQ video baza. Metrika je, za svaku od pojedinih baza, trenirana na testnim sekvencama dobivenim iz 80% izvornih sekvenci, a testirana na testnim sekvencama dobivenim iz preostalih 20% izvornih sekvenci baze. Po 100 iteracija, s različitim skupovima izvornih sekvenci korištenih za treniranje, odnosno testiranje, odrađeno je

za svaku od korištenih baza. Rezultati razvijene metrike uspoređeni su s rezultatima odabranih objektivnih metrika.

### **3.4. Modeli uočljive nelagode pri gledanju video sekvenci s kombinacijama prostornih i vremenskih video artefakata**

U [18] autori su generirali testne video sekvence koje sadrže artefakte stvaranje blokova, artefakte zamućenja (engl. *blurring*) te artefakte gubitaka paketa. Provedeni su subjektivni testovi nad generiranim testnim sekvencama koje sadrže artefakte pojedinih navedenih tipove te njihovih kombinacija. Na temelju rezultata provedenih subjektivnih testova, razvijeno je nekoliko različitih modela za objektivnu ocjenu kvalitete videa. Kao nezavisni parametri svih izvedenih modela korištene su tri mjere, po jedna za svaki od navedenih tipova video artefakata. Uz 4 linearna modela, razvijena su 2 modela temeljena na *Minkowski* metrici te SVR model. Treniranje i testiranje modela provedeno je kroz 10 iteracija tako što je skup testnih sekvenci podijeljen u 10 podskupova, a pojedini podskup korišten kao testni u pojedinoj iteraciji, dok su ostali korišteni za treniranje modela. Najbolju korelaciju pokazala je linearna metrika koja osim linearne kombinacije triju mjera koristi i linearnu kombinaciju umnožaka pojedinih mjera.

### **3.5. Prostorno-vremenska statistika za procjenu kvalitete video sekvenci**

U [19] autori su razvili objektivnu metriku koja na temelju video značajki izvedenih iz trodimenzionalne DCT daje ocjenu kvalitete testnih video sekvenci. Razvijena metrika temelji se na NVS modelu te iskorištava prostorne i vremenske distorzije video sekvenci koje se često manifestiraju simultano, odnosno obuhvaćaju iste prostorne i vremenske dijelove video sekvence. Prvi korak razvijene metrike je prostorno i vremenski lokalna 3D DCT. Na temelju informacija dobivenih ovom transformacijom izdvajaju se prostorne značajke videa na razini okvira koje se nakon toga u vremenskoj dimenziji sažimaju kako bi se odredile značajke na razini cijele video sekvence. Korištenjem *principle component analysis* (PCA) iz skupa dobivenih značajki izdvojen je podskup ključnih značajki te su dimenzije pojedinih značajki smanjene. Odabrane značajke iskorištene su kao ulazni parametri SVR modela s linearnom jezgrom. Za treniranje i testiranje modela korištene su LIVE, CSIQ, VQEGHD5 (engl. *Video Quality Experts Group High Definition Television 5*) [20] i EPFL-PoliMI video baze. Skup testnih sekvenci pojedine baze je podijeljen u podskupove tako da pojedini podskup sadrži sve testne sekvence istog izvornog sadržaja. Treniranje i testiranje modela izvršeno je kroz sve moguće kombinacije podskupova za treniranje, odnosno testiranje, tako što su za testiranje

izdvojena 2 ili 1 podskup (ovisno o bazi) dok su ostali podskupovi korišteni za treniranje. Rezultati razvijene metrike uspoređeni su za rezultatima drugih odabranih metrika.



## **4. RAZVIJENA OBJEKTIVNA METRIKA ZA OCJENU KVALITETE VIDEA BEZ MOGUĆNOSTI PRITUPA REFERENTNOJ SEKVENCI**

U ovom poglavlju je opisan razvoj nove objektivne metrike za ocjenu kvalitete videa. Rad metrike temelji se na postojećim algoritmima za detekciju video artefakata, *Minkowski* vremenskom sažimanju, prostornom i vremenskom maskiranju te nelinearnoj transformaciji.

### **4.1. Algoritmi za detekciju video artefakata korišteni u novo-stvorenoj metrici**

Razvijena metrika temelji se ne rezultatima algoritama za detekciju artefakata stvaranja blokova, gubitaka paketa i smrzavanja slike koji na temelju testnih sekvenci bez informacija o referentnim sekvencama vraćaju vrijednosti proporcionalne s razinama prisutnih artefakata.

Algoritam za detekciju artefakata stvaranja blokova računa horizontalne i vertikalne gradijente za sve elemente slike unutar svakog video okvira testne sekvence. Ako se u jednom redu ili u jednom stupcu elemenata slike, nalaze gradijenti koji su iznad određene granice te ako se nalaze međusobno blisko unutar definiranih granica, grupa tih elemenata slike označava se kao grupa koja predstavlja horizontalni odnosno vertikalni oštri rub unutar promatranog video okvira. Vrijednost koju algoritam vraća odgovara odnosu sume duljina detektiranih oštih rubova i ukupnog broja elemenata slike promatranog video okvira za koje je moguća detekcija oštih rubova. Također je omogućen i pristup informacijama o lokaciji detektiranih artefakata.

Algoritam za detekciju artefakata gubitaka paketa također računa horizontalne i vertikalne gradijente, ali samo na elementima slike koji se nalaze na koordinatama koje su višekratnik broja 16. Za svaki blok veličine 16x16 elemenata slike koji je omeđen elementima slike koji se nalaze na prethodno definiranim koordinatama, određuje se pripada li on skupu blokova koji su degradirani artefaktima gubitaka paketa. Identifikacija degradiranih blokova izvršava se provjerom vrijednosti gradijenata rubnih elemenata slike pojedinih blokova te njihove međusobne udaljenosti. Ako je dovoljan broj vrijednosti ovih gradijenata iznad definirane granice, te ako su lokacije tih gradijenata međusobno bliske unutar definiranih granica, blok se dodaje skupu blokova koji su degradirani artefaktima gubitaka paketa. Algoritam vraća vrijednost koja odgovara odnosu broja blokova degradiranih artefaktima gubitaka paketa te ukupnog broja blokova unutar promatranog video okvira.

Rad algoritma za detekciju artefakata smrzavanja slike temelji se na usporedbi susjednih video okvira testne video sekvence. Za svaki video okvir određuje se korelacija s prethodnim

okvirom. Ako je duljina niza susjednih video okvira, za koje je određena međusobna korelacija iznad definiranih granica, veća od minimalno definirane duljine, svi sljedeći okviri koji zadovolje ovaj kriterij biti će označeni kao okviri s prisutnim artefaktom smrzavanja slike. Za svaki okvir, algoritam vraća vrijednost 1 ako okvir pripada nizu okvira degradiranih artefaktima smrzavanja slike, a u suprotnom algoritam vraća vrijednost 0.

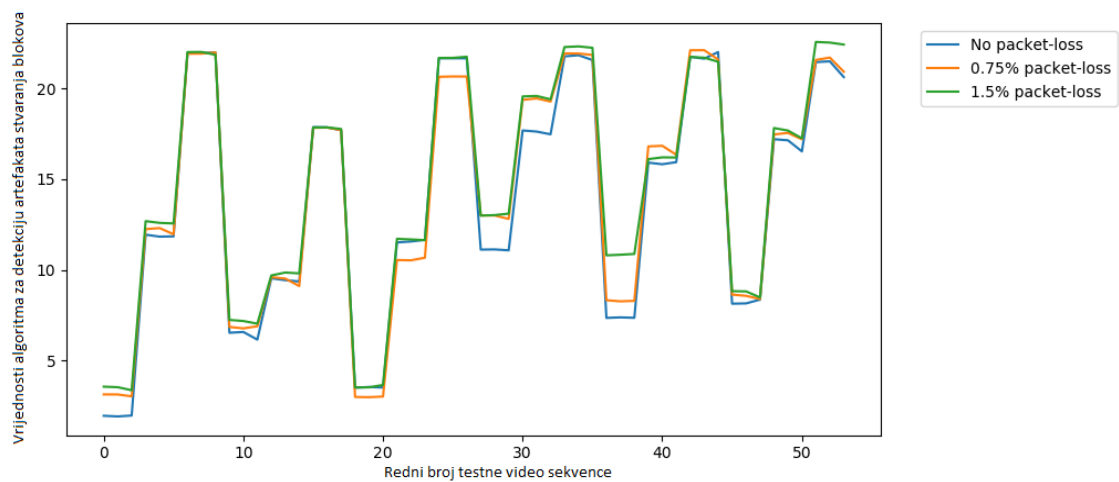
#### **4.1.1. Analiza algoritama za detekciju artefakata stvaranja blokova i gubitaka paketa**

Kako oba, algoritam za detekciju artefakata stvaranja blokova i algoritam za detekciju artefakata gubitaka paketa svoj rad temelje ne horizontalnim i vertikalnim gradijentima elemenata slike pojedinog okvira, provjereno je detektiraju li odgovarajuće artefakte te koliko povratna vrijednost jednog algoritma ovisi u artefaktima za koje je dizajniran drugi od ovih algoritama. Za ovu potrebu korištena je baza FERIT-RTRK-2 zato što sadrži testne sekvence s kombinacijama artefakata stvaranja blokova koji su rezultat video kompresije te artefakte gubitaka paketa, i upravo te sekvence korištene su za sljedeća testiranja.

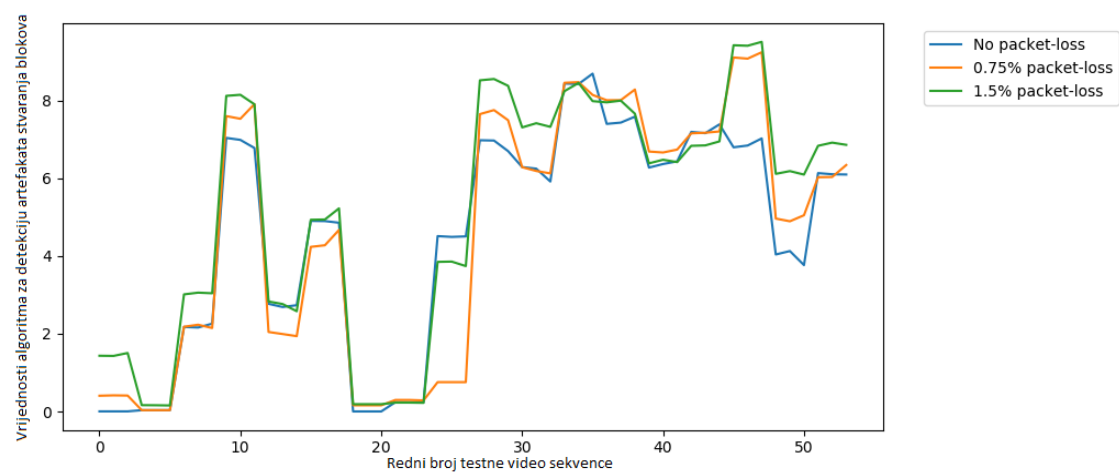
Prethodno definirani skup sekvenci podijeljen je u 3 podskupa ovisno o algoritmu kompresije kojim su generirane pripadne testne sekvence (H.264, H.265, MPEG-2), a svaki od ovih podskupova nadalje je podijeljen u 3 podskupa ovisno o postotku izgubljenih paketa korištenom za generiranje pripadnih testnih sekvenci (0%, 0.75% i 1.5%).

Za svaki od ovih podskupova, srednje vrijednosti, za sve video okvire pojedine testne video sekvence, koje vraća algoritam za detekciju artefakata stvaranja blokova prikazane su na slici 4.1. Grafovi pokazuju kako se vrijednost koju vraća algoritam za detekciju artefakata stvaranja blokova razlikuje za promatrane sekvence, ali se povratna vrijednost ne mijenja znatno između testnih video sekvenci istog sadržaja komprimiranih istim algoritmom za kompresiju uz iste pripadne parametre te različite razine gubitaka paketa. Ovime je pokazano kako povratna vrijednost algoritama za detekciju artefakata stvaranja blokova znatno ovisi o kompresiji, a neznatno o gubitku paketa.

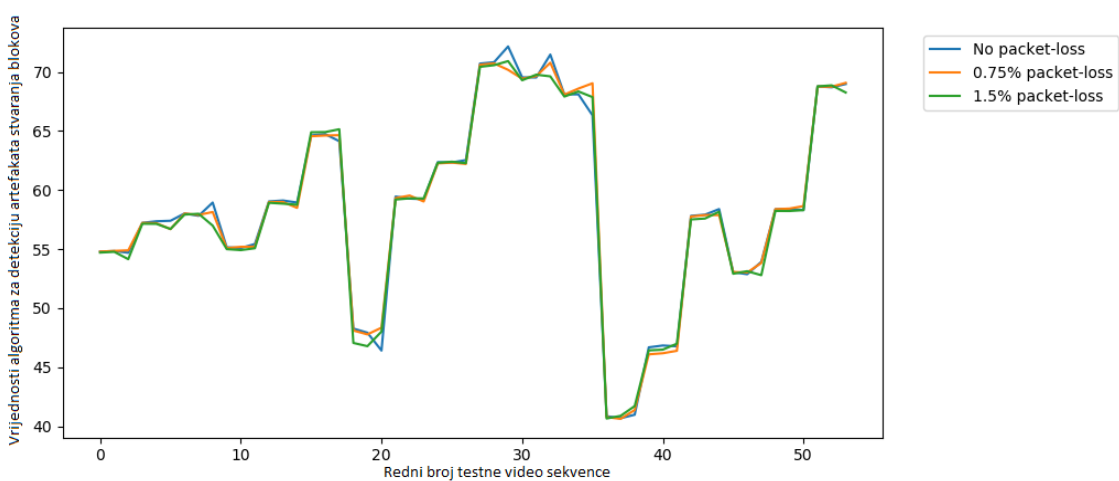
Za svaki od prethodno navedenih podskupova FERIT-RTRK-2 baze određene su i srednje vrijednosti, za sve video okvire pojedine testne video sekvence, koje vraća algoritam za detekciju artefakata gubitaka paketa, a pripadni grafovi prikazani su na slici 4.2. Pregledom ovih grafova za sekvence bez prisutnih artefakata gubitaka paketa može se utvrditi kako je algoritam za detekciju artefakata gubitaka paketa gotovo neovisan o kompresiji kada se promatraju testne sekvence generirane algoritama za kompresiju zasnovanim na H.264 i H.265 standardima. Može se primijetiti i da za sekvence komprimirane prethodno navedenim algoritmima koje su



(a)

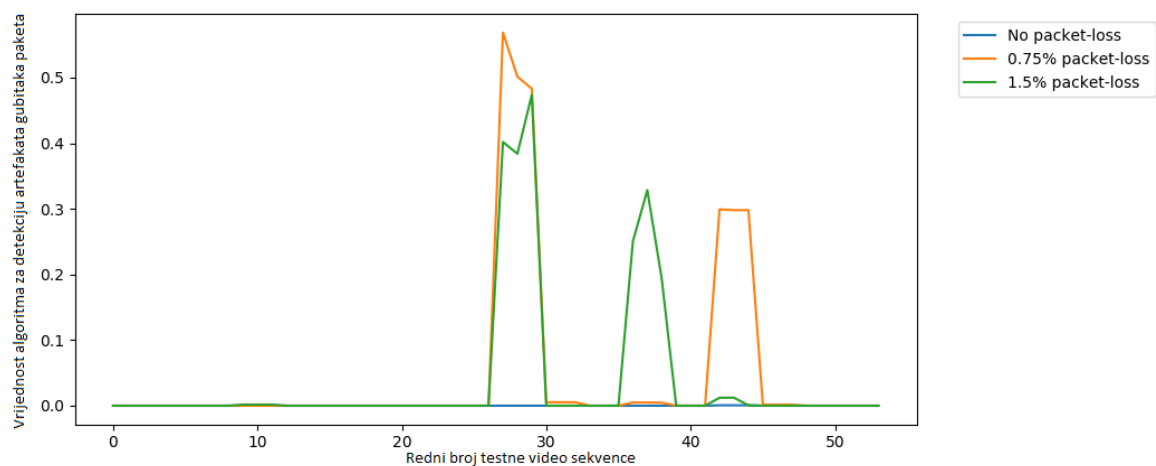


(b)

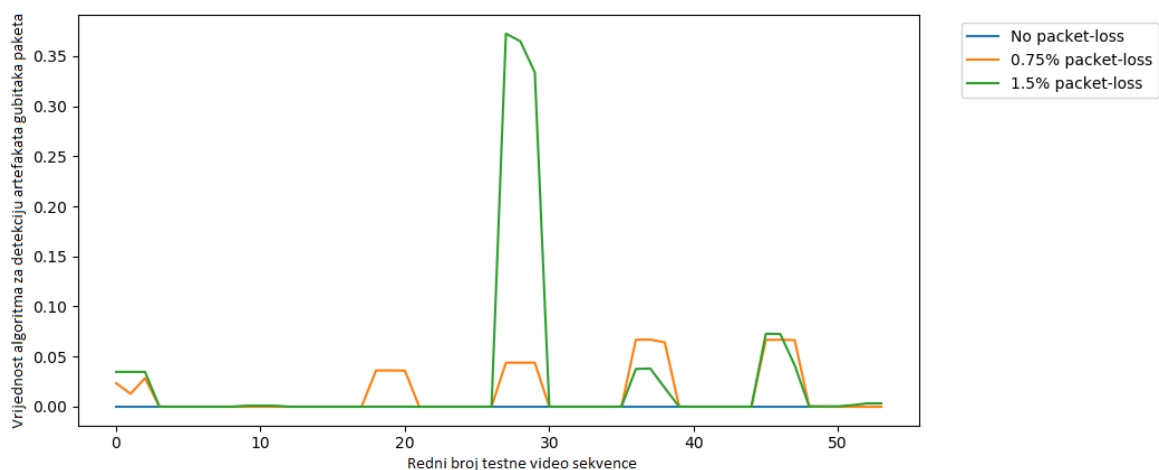


(c)

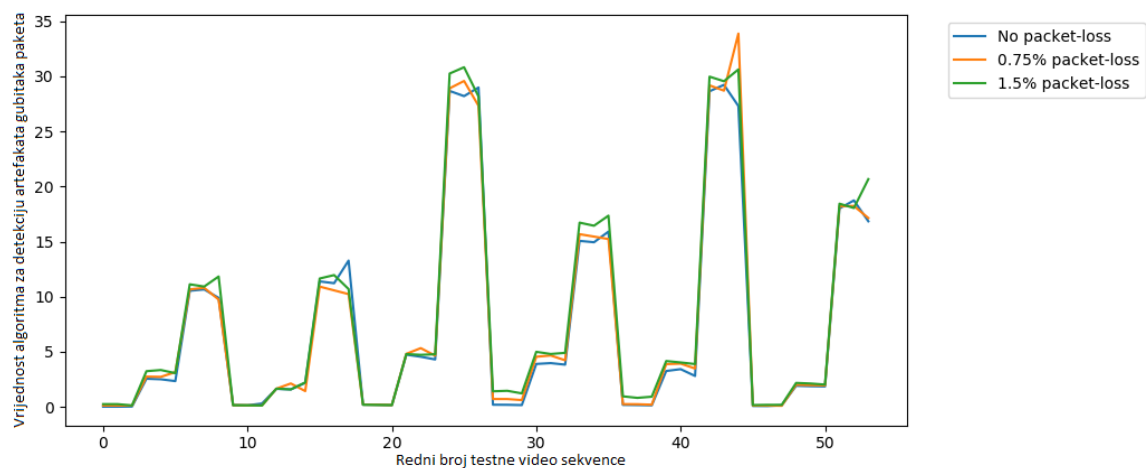
**Sl. 4.1** Vrijednosti algoritma za detekciju artefakata stvaranja blokova za sekvence generirane algoritmom za kompresiju: (a) H.264 (b) H.265 (c) MPEG-2 uz različite razine artefakta gubitka paketa



(a)



(b)



(c)

**Sl. 4.2.** Vrijednosti algoritma za detekciju artefakata gubitaka paketa za sekvence generirane algoritmom za kompresiju: (a) H.264 (b) H.265 (c) MPEG-2 uz različite razine artefakata gubitka paketa

degradirane artefaktima gubitaka paketa povratna vrijednost ne ovisi o razini gubitaka paketa te je prikazana vrijednost za većinu ovih sekvenci jednaka 0. Razlog tome je to što degradacija gubitkom paketa sekvenci komprimiranih algoritmima za kompresiju zasnovanim na H.264 i H.265 standardima ne rezultira pravilnim blokovima veličine 16x16 s oštrim rubovima. Primjeri realnih artefakata gubitaka paketa prethodno su prikazani na slici 2.6.

Za testne video sekvence FERIT-RTRK-2 baze komprimirane algoritmom za kompresiju zasnovanim na MPEG-2 standardu, na slici 4.2. vidljivo je kako povratna vrijednost algoritma ovisi o razini kompresije (kada se promatraju sekvence s 0% gubitaka paketa). Također se na temelju grafova može utvrditi kako se promatrana vrijednost ne mijenja znatno s promjenom razine gubitaka paketa. Razlog tome je to što se kod sekvenci komprimiranih MPEG-2 standardom i artefakti stvaranja blokova i artefakti gubitaka paketa manifestiraju kao oštri rubovi koji se nalaze na koordinatama koje su višekratnik broja 16. Primjer artefakata stvaranja blokova prethodno je prikazana na slici 2.3., a primjer artefakata gubitaka paketa prethodno je prikazan na slici 2.6.

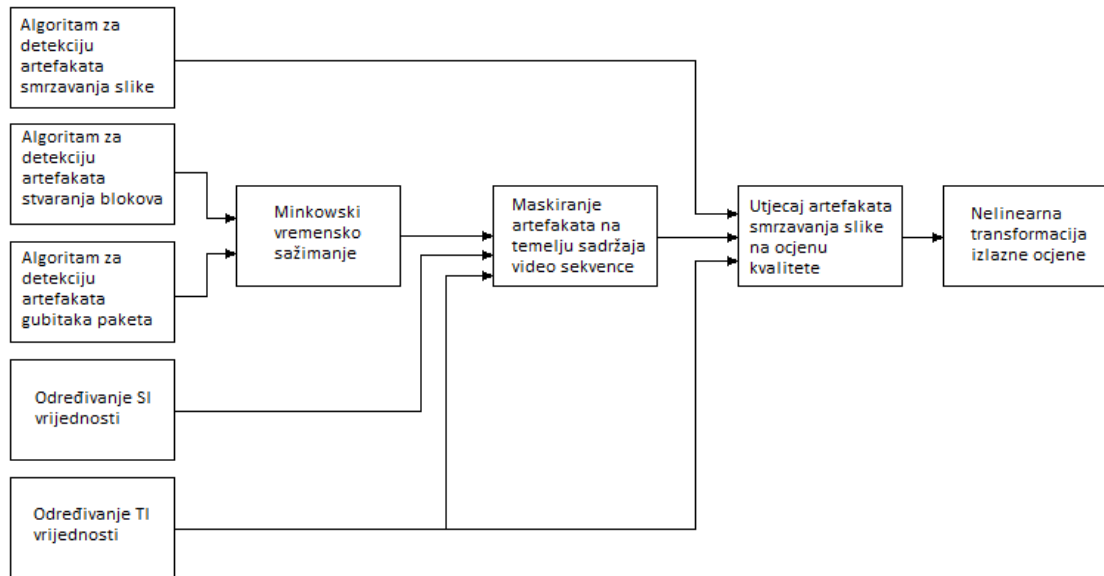
Na temelju prethodne analize može se utvrditi kako algoritam za detekciju artefakata gubitaka paketa za sekvence komprimirane algoritmom za kompresiju zasnovanim na MPEG-2 standardu ne razlikuje artefakte gubitaka paketa od artefakata kompresije, a za sekvence komprimirane algoritmima za kompresiju zasnovanim na H.264 i H.265 standardima ne može dovoljno precizno detektirati artefakte gubitaka paketa te zbog ovoga algoritam nadalje nije korišten za ocjenu kvalitete videa degradirane artefaktima gubitaka paketa. Algoritam se pokazao dobrim za određivanje ocjena kvalitete testnih video sekvenci komprimiranih algoritmom za kompresiju zasnovanim na MPEG-2 standardu.

## **4.2. Nova NR objektivna metrika za ocjenu kvalitete videa**

Razvijena je nova objektivna NR metrika koja bez mogućnosti pristupa informacijama o referentnoj video sekvenci određuje ocjenu kvalitete testne video sekvence. Svrha razvijene metrike je što bolje predvidjeti ocjenu kvalitete koju daje prosječni gledatelj tj. odrediti ocjene kvalitete čije su vrijednosti bliske onima prosječnog gledatelja. U idealnom slučaju, metrika treba odrediti ocjene jednake onima koje su dobivene subjektivnim testiranjima.

Kako je u prethodnom potpoglavlju objašnjeno zašto algoritam za detekciju artefakata gubitaka paketa nije iskorišten za pripadne artefakte, metrika je usmjerena na određivanje ocjena testnih video sekvenci na temelju mjera artefakta stvaranja blokova te artefakata smrzavanja

slike. Za određivanje ocjene na temelju artefakata stvaranja blokova koji su rezultat načina kompresije video sekvenci, korišteni su i algoritam za detekciju artefakata stvaranja blokova i algoritam za detekciju artefakata gubitaka paketa jer se ovakav pristup pokazao korisnim za klasifikaciju tipa kompresije, a više o ovome objašnjeno je u potpoglavlju 6.1. Grafički prikaz načina rada razvijene metrike prikazan je na slici 4.3.



**Sl. 4.3.** Grafički prikaz načina rada razvijene objektivne metrike

Vjerojatnost detekcije video artefakata kod subjektivnih testova, osim o razini prisutnih artefakata ovisi i o sadržaju video sekvence. Kod video sekvenci s manjom prostornom korelacijom elemenata slike, odnosno većom *SI* vrijednosti, gledatelji teže uočavaju prostorne video artefakte. Isto tako, kod video sekvenci s manjom vremenskom korelacijom elemenata slike između susjednih video okvira testne sekvence, odnosno većom *TI* vrijednosti, gledatelji teže uočavaju prostorne video artefakte, ali vremenski video artefakti, kao što je smrzavanje slike, u ovom će slučaju biti lakše uočeni te se očekuje da će imati veći utjecaj na ocjenu kvalitete video sekvence. Kako bi se ova svojstva uzela u obzir pri određivanju ocjene kvalitete razvijenom metrikom, *SI* i *TI* vrijednosti se za ulaznu testnu video sekvence računaju prema formulama (4-1), odnosno (4-2):

$$SI = avg_{time}\{std_{space}[Sobel(F_n)]\}, \quad (4-1)$$

gdje je:

$F_n$  – matrica luminantne komponente  $n$ -tog okvira,

*Sobel* – funkcija za filtriranje Sobelovim filtrom,

$std_{space}$  – funkcija za izračun prostorne standardne devijacije,

$avg_{time}$  – funkcija za određivanje srednje vrijednosti u vremenu;

$$TI = avg_{time}\{std_{space}[F_n(i,j)-F_{n-1}(i,j)]\}, \quad (4-2)$$

gdje je:

$F_n(i,j)$  – matrica luminantne komponente  $n$ -tog okvira,

$F_{n-1}(i,j)$  – matrica luminantne komponente okvira koji prethodi  $n$ -tom okviru,

$std_{space}$  – funkcija za izračun prostorne standardne devijacije,

$avg_{time}$  – funkcija za određivanje srednje vrijednosti u vremenu.

Za razliku od formula (2-1) i (2-2) koje koriste funkciju za određivanje maksimalne vrijednosti, formule (4-1) i (4-2) koriste funkciju za određivanje srednje vrijednosti kako bi se izbjegao slučaj u kojem će promjena kadra unutar video sekvence u potpunosti odrediti  $SI$  i  $TI$  vrijednosti.

Kako bi se, kod donošenja ocjene kvalitete, omogućilo dodjeljivanje većih težina okvirima sekvence s većim povratnim vrijednostima algoritama za detekciju artefakata stvaranja blokova i gubitaka paketa, povratne vrijednosti ovih algoritama podvrgnute su *Minkowski* vremenskom sažimanju prema formuli (4-3):

$$scoreA = \left( \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T x^{miP} \right)^{\frac{1}{miP}}, \quad (4-3)$$

gdje je:

$T$  – ukupan broj video okvira,

$i$  – redni broj okvira,

$x$  – povratna vrijednost algoritma za detekciju artefakata stvaranja blokova ili gubitaka paketa,

$miP$  – konstanta određena treniranjem metrike.

Nakon što su određene vrijednosti  $scoreA$ ,  $SI$  i  $TI$ , u obzir se uzima utjecaj video sadržaja na maskiranje prostornih artefakata, što je unutar razvijene metrike definirano prema formuli (4-4):

$$scoreB = \frac{scoreA}{c0 + SI \cdot siP + TI \cdot tiP + SI \cdot TI \cdot sitiP}, \quad (4-4)$$

gdje je:

$scoreB$  – povratna vrijednost nakon uzimanja maskiranja prostornih artefakata u obzir,

$scoreA$  – vrijednost dobivena prema formuli (4-3),

$SI$  - vrijednost dobivena prema formuli (4-1),

$TI$  - vrijednost dobivena prema formuli (4-2),

$c0, siP, tiP, sitiP$  – konstante određene treniranjem metrike.

Nadalje, u obzir se uzimaju i rezultati algoritma za detekciju artefakata smrzavanja slike. Kako je za očekivati da će smrzavanje slike imati veći utjecaj na ukupno ocjenu kod video sekvenci bržeg sadržaja s više pokreta, utjecaj artefakata smrzavanja slike ovisi i o  $TI$  vrijednosti te je unutar razvijene metrike definiran prema formuli (4-5):

$$scoreC = scoreB + \frac{frP \cdot frAvg}{1 + scoreB} \cdot TI^{frP2}, \quad (4-5)$$

gdje je:

$scoreC$  – povratna vrijednost nakon uzimanja artefakata smrzavanja u obzir,

$scoreB$  – vrijednost dobivena prema formuli (4-4),

$frAvg$  – udio okvira degradiranih artefaktom smrzavanja slike u ukupnim okvirima,

$TI$  – vrijednost dobivena prema formuli (4-2),

$frP, frP2$  – konstante određene treniranjem metrike.

Konačno, kako ocjene gledatelja ne moraju imati linearan odnos s izmjerenim razinama detektiranih artefakata, prije vraćanja konačne ocjene izvršava se nelinearna transformacije koja je unutar razvijene metrike definirana prema formuli (4-6):

$$score = c1 - c2 \cdot e^{-c3 \cdot scoreC}, \quad (4-6)$$

gdje je:

$score$  – povratna vrijednost nakon nelinearne transformacije,

$scoreC$  – vrijednost dobivena prema formuli (4-5),

$c1, c2, c3$  – konstante određene treniranjem metrike.



## 5. TRENIRANJE I TESTIRANJE RAZVIJENE METRIKE ZA OCJENU KVALITETE VIDEA BEZ MOGUĆNOSTI PRITUPA REFERENTNOJ SEKVENCI

Razvijena metrika trenirana je i testirana na sljedećim video bazama: FERIT-RTRK, FERIT-RTRK-2, CSIQ, LIVE. Obuhvaćeno je testiranje i treniranje na istim podskupovima pojedinih baza i kombinacijama baza kao i treniranje na jednom podskupu, a testiranje na drugom podskupu pojedine baze te kombinacije baza. Za usporedbu rezultata metrike sa subjektivnim ocjenama korišteni su PLCC i *Spearmanov* koeficijent korelacije poretka (engl. *Spearman's rank correlation coefficient* - SRCC). Prije treniranja i testiranja metrike sve subjektivne ocjene linearno su transformirane u interval od 0 do 1 gdje 0 odgovara najvišoj ocjeni kvalitete. Kao parametar  $x$  u formuli (4-3), za sekvence komprimirane H.264 i H.265 algoritmima korištene su povratne vrijednosti algoritma za detekciju artefakata stvaranje blokova, dok su za sekvence komprimirane MPEG-2 i MJPEG (engl. *Motion Joint Photographic Experts Group*) algoritmima korištene povratne vrijednosti algoritma za detekciju artefakata gubitaka paketa. Ovime je ostvarena veća korelacija rezultata objektivne metrike sa subjektivnim ocjenama za sekvence komprimirane MPEG-2 i MJPEG algoritmima, a u potpoglavlju 6.1. opisan je način klasifikacije testne sekvence čime se omogućava da metrika na temelju testne sekvence bez poznavanja algoritma za kompresiju odredi predaje li se unutar razvijene metrike formuli (4-3) kao vrijednost  $x$  rezultat algoritma za detekciju artefakata stvaranja blokova ili rezultat algoritma za detekciju artefakata gubitaka paketa.

Rezultati treniranja i testiranja razvijene metrike na istim podskupovima pojedinih baza prikazani su u tablici 5.1. gdje se može primijetiti kako za sekvence komprimirane MPEG-2, MJPEG i H.264 algoritmima metrika daje rezultate koji imaju relativno visoku korelaciju sa subjektivnim ocjenama, dok je korelacija ocjena razvijene metrike sa subjektivnim ocjenama relativno niska za sekvence komprimirane H.265 algoritmima. Razlog tome je to što se u sekvencama komprimiranim H.265 algoritmima artefakti kompresije ne manifestiraju kao vertikalni i horizontalni oštri rubovi. Za očekivati je da bi za sekvence komprimirane H.265 algoritmima bolji rezultati mogli biti ostvareni korištenjem mjere zamućivanja video okvira.

Zbog međusobno sličnog odnosa razine degradacije video artefaktima i pripadnih subjektivnih ocjena, pokazalo se kako se baze FERIT-RTRK, FERIT-RTRK-2 i CSIQ za treniranje i testiranje mogu koristiti u kombinaciji, osim sekvenci komprimiranih H.265 algoritmom jer je korelacija objektivnih i subjektivnih ocjena za ove sekvence relativno mala.

Rezultati treniranja i testiranja razvijene metrike na istim podskupovima kombinacija ovih baza prikazani su u tablici 5.2. Zbog međusobno sličnih prostornih artefakata kompresije, sekvence komprimirane MJPEG i MPEG-2 algoritmima promatrane su također i unutar iste grupe.

**Tab. 5.1.** *Rezultati testiranja novo-stvorene metrike nakon provedenog postupka treniranja na cijelim podskupove pojedinih baza video signala*

| Baza         | Podskup                        | PLCC   | SRCC   |
|--------------|--------------------------------|--------|--------|
| FERIT-RTRK   | MPEG-2                         | 0.9742 | 0.9524 |
|              | H.264                          | 0.9456 | 0.9541 |
|              | H.265                          | 0.6334 | 0.5855 |
| FERIT-RTRK-2 | MPEG-2, MPEG-2 + <i>freeze</i> | 0.9330 | 0.9559 |
|              | H.264, H.264 + <i>freeze</i>   | 0.9497 | 0.9731 |
|              | H.265, H.265 + <i>freeze</i>   | 0.6760 | 0.6662 |
| CSIQ         | MJPEG                          | 0.8993 | 0.8930 |
|              | H.264                          | 0.8237 | 0.8263 |
|              | H.265                          | 0.2149 | 0.1117 |
| LIVE         | MPEG-2                         | 0.8529 | 0.8538 |
|              | H.264                          | 0.6310 | 0.5681 |

**Tab. 5.2.** *Rezultati testiranja novo-stvorene metrike nakon provedenog postupka treniranja na cijelim podskupove pojedinih kombinacija baza video signala*

| Baze                              | Podskup                               | PLCC   | SRCC   |
|-----------------------------------|---------------------------------------|--------|--------|
| FERIT-RTRK<br>FERIT-RTRK2         | MPEG-2, MPEG-2 + <i>freeze</i>        | 0.9475 | 0.9584 |
|                                   | H.264, H.264 + <i>freeze</i>          | 0.9467 | 0.9638 |
| FERIT-RTRK<br>CSIQ                | MJPEG; MPEG-2                         | 0.8202 | 0.7534 |
|                                   | H.264                                 | 0.8682 | 0.8752 |
| FERIT-RTRK-2<br>CSIQ              | MJPEG; MPEG-2 + <i>freeze</i>         | 0.8366 | 0.8301 |
|                                   | H.264, H.264 + <i>freeze</i>          | 0.9028 | 0.9174 |
| FERIT-RTRK<br>FERIT-RTRK2<br>CSIQ | MJPEG; MPEG-2, MPEG-2 + <i>freeze</i> | 0.8614 | 0.8582 |
|                                   | H.264, H.264 + <i>freeze</i>          | 0.9050 | 0.9210 |

Kako bi se utvrdila generalizacija razvijene metrike, skupovi video sekvenci podijeljeni su na dva podskupa – po jedan podskup za treniranje, odnosno testiranje metrike. Podjela je izvršena na temelju izvornih sekvenci te su sve testne sekvence koje pripadaju dvama izvornim sekvencama određene kao podskup za testiranje, dok su sve ostale sekvence skupa određene kao podskup za treniranje. U tablici 5.3. prikazane su srednje PLCC i SRCC vrijednosti dobivene nakon treniranja i testiranja razvijene metrike svim mogućim kombinacijama podskupova grupiranih na prethodno definiran način. Dobivene korelacije se relativno malo razlikuju u

odnosu na one iz tablice 5.1., osim za sekvence komprimirane H.265 algoritmom za koje je razlika između korelacija relativno velika. U tablici 5.3., može se primijetiti kako je korelacija dobivena za sekvence komprimirane H.264 algoritmom triju baza u kombinaciji veća u odnosu na korelacije dobivene za svaku od triju baza posebno. Razlog ovoga je to što kada su sve 3 baze promatrane u kombinaciji, skup za treniranje svake iteracije sadrži testne sekvence 16 izvornih sadržaja te je time povećana vjerojatnost generalizacije za sekvence koje nisu dio skupa za treniranje u odnosu na slučaj u kojem se svaka baza promatra posebno pa skup za treniranje sadrži sekvence manjeg broja izvornog sadržaja. Isti odnos vrijednosti korelacija ne može se primijetiti za sekvence komprimirane MPEG-2 i MJPEG algoritmima. Pretpostavka je da je razlog ovoga različit način rada ovih dvaju algoritama za kompresiju.

**Tab. 5.3.** Rezultati treniranja i testiranja kroz sve moguće iteracije podskupova za treniranje i testiranje (testne sekvence dvaju izvornih sadržaja korištene za testiranje, a ostale za treniranje)

| Baza                              | Broj iteracija | Podskup                               | PLCC   | SRCC   |
|-----------------------------------|----------------|---------------------------------------|--------|--------|
| FERIT-RTRK                        | 15             | MPEG-2                                | 0.9592 | 0.9341 |
|                                   |                | H.264                                 | 0.8145 | 0.8326 |
|                                   |                | H.265                                 | 0.1972 | 0.2949 |
| FERIT-RTRK-2                      | 15             | MPEG-2, MPEG-2+ <i>freeze</i>         | 0.8999 | 0.9237 |
|                                   |                | H.264, H.264 + <i>freeze</i>          | 0.8656 | 0.8786 |
|                                   |                | H.265, H.265 + <i>freeze</i>          | 0.2176 | 0.2582 |
| CSIQ                              | 66             | MJPEG                                 | 0.7893 | 0.7997 |
|                                   |                | H.264                                 | 0.7935 | 0.7602 |
|                                   |                | H.265                                 | 0.0495 | 0.0698 |
| LIVE                              | 45             | MPEG-2                                | 0.7612 | 0.8111 |
|                                   |                | H.264                                 | 0.4779 | 0.5054 |
| FERIT-RTRK<br>FERIT-RTRK2         | 15             | MPEG-2, MPEG-2 + <i>freeze</i>        | 0.9245 | 0.9363 |
|                                   |                | H.264, H.264 + <i>freeze</i>          | 0.8611 | 0.8768 |
| FERIT-RTRK<br>CSIQ                | 153            | MJPEG; MPEG-2                         | 0.8388 | 0.8095 |
|                                   |                | H.264                                 | 0.8727 | 0.8519 |
| FERIT-RTRK-2<br>CSIQ              | 153            | MJPEG; MPEG-2                         | 0.8443 | 0.8568 |
|                                   |                | H.264, H.264 + <i>freeze</i>          | 0.8826 | 0.8699 |
| FERIT-RTRK<br>FERIT-RTRK2<br>CSIQ | 153            | MJPEG; MPEG-2, MPEG-2 + <i>freeze</i> | 0.8344 | 0.8372 |
|                                   |                | H.264, H.264 + <i>freeze</i>          | 0.8898 | 0.8755 |

Za potrebe usporedbe razvijene metrika s postojećim objektivnim metrikama za korištene baze određene su ocjene odabranih postojećih besplatno javno dostupnih objektivnih metrika.

**Tab. 5.4.** Korelacija sa subjektivnim ocjenama za metrike PSNR, SSIM, VSNR, BRISQUE i novo-razvijene metrike (NRVQ) za promatrane baze video sekvenci

| Baza         | Podskup                 | Objektivna metrika | PLCC   | SRCC   |
|--------------|-------------------------|--------------------|--------|--------|
| FERIT-RTRK   | MPEG-2                  | PSNR               | 0.6045 | 0.6139 |
|              |                         | SSIM               | 0.7104 | 0.7512 |
|              |                         | VSNR               | 0.7505 | 0.6983 |
|              |                         | BRISQUE            | 0.7392 | 0.7635 |
|              |                         | NRVQ               | 0.9592 | 0.9341 |
|              | H.264                   | PSNR               | 0.7756 | 0.7685 |
|              |                         | SSIM               | 0.6870 | 0.7236 |
|              |                         | VSNR               | 0.8163 | 0.8050 |
|              |                         | BRISQUE            | 0.7653 | 0.7574 |
|              |                         | NRVQ               | 0.8145 | 0.8326 |
|              | H.265                   | PSNR               | 0.6719 | 0.6712 |
|              |                         | SSIM               | 0.6132 | 0.6403 |
|              |                         | VSNR               | 0.7588 | 0.7362 |
|              |                         | BRISQUE            | 0.6621 | 0.6752 |
|              |                         | NRVQ               | 0.1972 | 0.2949 |
| FERIT-RTRK-2 | MPEG-2, MPEG-2 + freeze | PSNR               | 0.5394 | 0.5744 |
|              |                         | SSIM               | 0.6180 | 0.6841 |
|              |                         | VSNR               | 0.6720 | 0.6435 |
|              |                         | BRISQUE            | 0.7709 | 0.7961 |
|              |                         | NRVQ               | 0.8999 | 0.9237 |
|              | H.264, H.264 + freeze   | PSNR               | 0.7741 | 0.7586 |
|              |                         | SSIM               | 0.6617 | 0.6978 |
|              |                         | VSNR               | 0.8311 | 0.8260 |
|              |                         | BRISQUE            | 0.7895 | 0.7626 |
|              |                         | NRVQ               | 0.8656 | 0.8768 |
|              | H.265, H.265 + freeze   | PSNR               | 0.7392 | 0.6622 |
|              |                         | SSIM               | 0.6848 | 0.6539 |
|              |                         | VSNR               | 0.8022 | 0.7562 |
|              |                         | BRISQUE            | 0.6941 | 0.6860 |
|              |                         | NRVQ               | 0.2176 | 0.2582 |
| CSIQ         | MJPEG                   | PSNR               | 0.4858 | 0.5086 |
|              |                         | SSIM               | 0.8001 | 0.7969 |
|              |                         | VSNR               | 0.3903 | 0.4026 |
|              |                         | BRISQUE            | 0.5133 | 0.5115 |
|              |                         | NRVQ               | 0.7893 | 0.7997 |
|              | H.264                   | PSNR               | 0.8221 | 0.8023 |
|              |                         | SSIM               | 0.8454 | 0.8440 |
|              |                         | VSNR               | 0.9110 | 0.9163 |
|              |                         | BRISQUE            | 0.5526 | 0.5655 |
|              |                         | NRVQ               | 0.7935 | 0.7602 |
|              | H.265                   | PSNR               | 0.7969 | 0.7846 |
|              |                         | SSIM               | 0.7886 | 0.8136 |
|              |                         | VSNR               | 0.8478 | 0.8517 |
|              |                         | BRISQUE            | 0.3411 | 0.3953 |
|              |                         | NRVQ               | 0.0495 | 0.0698 |
| LIVE         | MPEG-2                  | PSNR               | 0.4010 | 0.3830 |
|              |                         | SSIM               | 0.5743 | 0.5610 |
|              |                         | VSNR               | 0.5880 | 0.5874 |
|              |                         | BRISQUE            | 0.3215 | 0.3556 |
|              |                         | NRVQ               | 0.7612 | 0.8111 |
|              | H.264                   | PSNR               | 0.5391 | 0.4730 |
|              |                         | SSIM               | 0.6080 | 0.6561 |
|              |                         | VSNR               | 0.6178 | 0.6405 |
|              |                         | BRISQUE            | 0.2154 | 0.2638 |
|              |                         | NRVQ               | 0.4779 | 0.5054 |

Korištene su sljedeće objektivne metrike: PSNR, *Structural similarity index* (SSIM) [21], *Visual signal to noise ratio* (VSNR) [22] i *Blind/referenceless Image spatial quality evaluator* (BRISQUE) [23]. Dok zadnja od navedenih metrika radi bez mogućnosti pristupa informacijama referentne video sekvence, preostale 3 metrike imaju potpuni pristup referentnoj sekvenci i dio su alata IVQUEST [23]–[25].

U tablici 5.4. prikazane su apsolutne vrijednosti korelacija ocjena navedenih objektivnih metrika i subjektivnih ocjena korištenih video baza. Za sekvence komprimirane H.265 algoritmom navedene metrike rezultiraju znatno većom korelacijom sa subjektivnim ocjenama od razvijene metrike, a razlog tome je to što artefakti H.265 kompresije nisu obuhvaćeni algoritmima korištenim unutar novo-stvorene metrike. Za sekvence komprimirane MPEG-2 i H.264 algoritmima razvijena metrika daje rezultate s većom korelacijom sa subjektivnim ocjenama u odnosu na ostale promatrane metrike ili neznatno manjom korelacijom u određenim slučajevima u odnosu na metrike koje imaju potpuni pristup informacijama referentne video sekvence.

## 6. KLASIFIKACIJA ALGORITAMA KOMPRESIJE I SMANJENJE RAČUNALNIH ZAHTJEVA METRIKE

### 6.1. Klasifikacija algoritama kompresije na temelju detektiranih video artefakata

Kako se pokazalo da razvijena metrika za sekvence komprimirane H.264 algoritmima daje bolje rezultate korištenjem vrijednosti koje vraća algoritam za detekciju artefakata stvaranja blokova, dok za sekvence komprimirane MPEG-2, odnosno MJPEG algoritmima metrika daje bolje rezultate korištenjem vrijednosti koje vraća algoritam za detekciju artefakata gubitaka paketa, poznavanje algoritma kojim je komprimirana testna sekvenca ima velik utjecaj na rezultate metrike. Često, algoritam kompresije testne sekvence nije poznat, pa je potreban drugačiji pristup. Za ove potrebe razvijena je metoda klasifikacije testnih sekvenci.

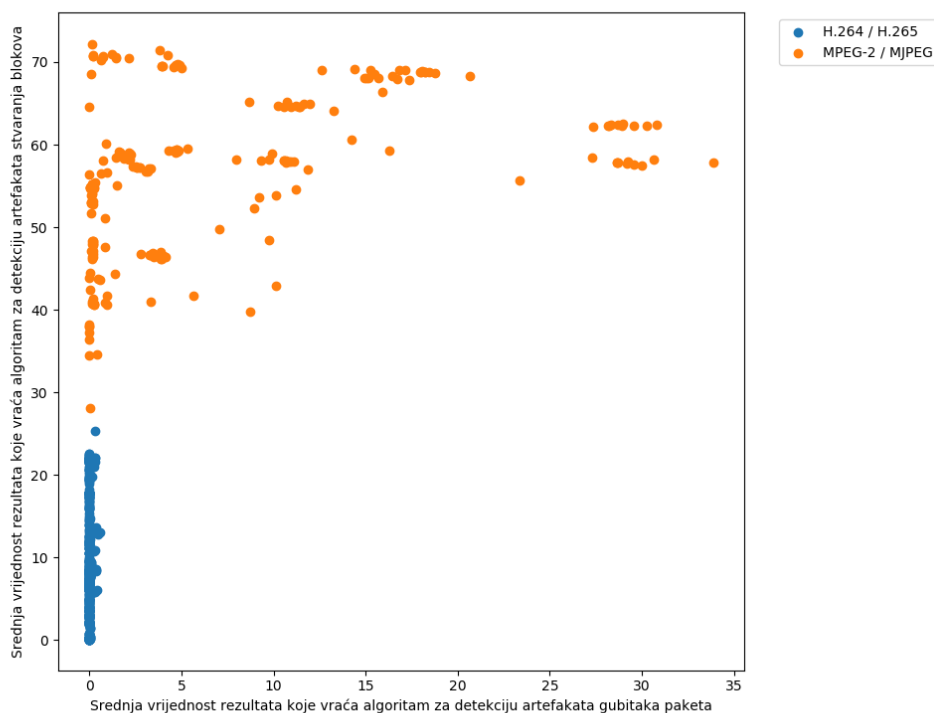
**Tab. 5.1.** Korelacija sa subjektivnim ocjenama za metrike PSNR, SSIM, VSNR, BRISQUE i novo-razvijene metrike (NRVQ) za Skup sekvenci s artefaktima kompresije MPEG-2, MJPEG i H.264 algoritama i artefaktima smrzavanja slike baza FERIT-RTRK, FERIT-RTRK-2 i CSIQ

| Objektivna metrika | PLCC   | SRCC   |
|--------------------|--------|--------|
| PSNR               | 0.6522 | 0.6684 |
| SSIM               | 0.6880 | 0.7343 |
| VSNR               | 0.6719 | 0.6931 |
| BRISQUE            | 0,3562 | 0.3824 |
| NRVQ               | 0.7825 | 0.7701 |

Za kombinaciju triju baza – FERIT-RTRK, FERIT-RTRK-2 i CSIQ – izdvojena su 2 podskupa video sekvenci – video sekvence komprimirane H.264, odnosno H.265 algoritmima i video sekvence komprimirane MPEG-2, odnosno MJPEG algoritmima (sekvence FERIT-RTRK-2 baze unutar ovih skupova uz artefakte kompresije sadrže i artefakte gubitaka paketa te artefakte smrzavanja slike). Za svaku sekvencu ovih dvaju skupova određene su srednje vrijednosti rezultata koje vraćaju algoritam za detekciju artefakata stvaranja blokova i algoritam za detekciju artefakata gubitaka paketa. Odnosi ovih rezultata prikazani su na slici 6.1. Gdje se može primijetiti kako je moguće odrediti pravac koji savršeno dijeli skup svih sekvenci na dva podskup od kojih jedan sadrži sve sekvence komprimirane H.264, odnosno H.265 algoritmima, a drugi sve sekvence komprimirane MPEG-2, odnosno MJPEG algoritmima. Maksimalna srednja

vrijednost rezultata koje vraća artefakt za detekciju artefakata stvaranja blokova za podskup H.264, odnosno H.265 sekvenci je veća od minimalne srednja vrijednost koju vraća za podskup MPEG-2, odnosno MJPEG pa se pravac za klasifikaciju može odrediti pronalaskom jedne konstante te ima oblik  $f(x) = y$ .

Kako bi se testirala generalizacija klasifikacije, skup triju navedenih baza podijeljen je u 18 podskupova prema referentnim sekvencama. Kroz 18 iteracija, po jedan od podskupova ostavljen je za testiranje, dok je preostalih 17 korišteno za određivanje konstante klasifikacije. Za svaku je iteraciju, tijekom testiranja, određen postotak točno predviđenog podskupa algoritma kompresije, a prosječna vrijednost ovih postotaka kroz 18 iteracija je 98.77% - u dvije od 18 iteracije po jedna od testnih sekvenci promatrane iteracije nije točno klasificirana.



**Sl. 6.1.** *Odnosi srednjih vrijednosti rezultata koje vraćaju algoritam za detekciju artefakata stvaranja blokova i algoritam za detekciju artefakata gubitaka paketa za sekvence komprimirane različitim algoritmima kompresije*

Skup sekvenci s artefaktima kompresije MPEG-2, MJPEG i H.264 algoritama i artefaktima smrzavanja slike izdvojen iz ovih triju baza podijeljen je u 18 podskupova prema referentnoj sekvenci. Kroz 18 iteracija po 2 podskupa su ostavljena za testiranje dok su ostali korišteni za

treniranje parametara metrike i klasifikaciju. Unutar skupa za treniranje način kompresije je poznat te su trenirana dva skupa parametara – jedan za MPEG-2 i MJPEG sekvence te drugi za H.264 sekvence. Unutar skupa za testiranje način kompresije nije poznat već se odluka o tome koji će se od dvaju naučenih skupova parametara metrike koristiti donosi na osnovi naučene konstante klasifikacije. Srednja vrijednost ovih iteracije dobivena za PLCC je 0.7825, a za SRCC 0.7701. Korelacije koje su za ovaj skup sekvenci ostvarene odabranim javno dostupnim objektivnim metrikama prikazane su u tablici 6.1.

Pretpostavka je da bi se daljnja klasifikacija između sekvenci komprimiranih H.264, odnosno H.265 algoritmima mogla ostvariti korištenjem algoritma za detekciju artefakata zamućivanja.

## 6.2. Smanjenje računalnih zahtjeva metrike

Kako je računanje SI i TI vrijednosti prema formulama (4-1) i (4-2) računalno zahtjevno, posebno kod sekvenci velike rezolucije i brzine izmjene okvira, provjereno je koliko će se, za pojedinu sekvencu, ove vrijednosti promijeniti ako se one ne računaju na temelju svih okvira sekvenc.

**Tab. 6.1.** Rezultati analize SI vrijednosti za poduzorkovanje okvira

| <i>n</i>   |         | 2                      |                         | 4                      |                         | 8                      |                         | 16                     |                         |
|------------|---------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| Baza       | Podskup | Prosječna promjena [%] | Maksimalna promjena [%] | Prosječna promjena [%] | Maksimalna promjena [%] | Prosječna promjena [%] | Maksimalna promjena [%] | Prosječna promjena [%] | Maksimalna promjena [%] |
| FERIT-RTRK | MPEG-2  | 0.43                   | 1.5                     | 1.45                   | 5.03                    | 1.57                   | 5.29                    | 1.85                   | 5.96                    |
|            | H.264   | 0.57                   | 5.68                    | 0.65                   | 5.81                    | 0.77                   | 5.48                    | 1.12                   | 6.4                     |
|            | H.265   | 0.57                   | 2.65                    | 0.76                   | 4.27                    | 0.82                   | 4.1                     | 1.17                   | 5.09                    |
| CSIQ       | MJPEG   | 0.43                   | 1.5                     | 1.45                   | 5.03                    | 1.57                   | 5.29                    | 1.85                   | 5.96                    |
|            | H.264   | 0.09                   | 0.34                    | 0.16                   | 0.74                    | 0.18                   | 0.87                    | 0.56                   | 2.19                    |
|            | H.265   | 1.13                   | 2.77                    | 1.98                   | 4.86                    | 3.07                   | 8.14                    | 3.44                   | 8.54                    |
| LIVE       | MPEG-2  | 0.05                   | 0.29                    | 0.12                   | 0.41                    | 0.38                   | 1.15                    | 1.21                   | 3.47                    |
|            | H.264   | 0.14                   | 0.48                    | 0.27                   | 0.68                    | 0.63                   | 2.6                     | 1.52                   | 7.43                    |

**Tab. 6.2.** Rezultati analize TI vrijednosti za poduzorkovanje okvira



|                | <i>n</i> | 2                            |                               | 4                            |                               | 8                            |                               | 16                           |                               |
|----------------|----------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Baza           | Podskup  | Prosječna<br>promjena<br>[%] | Maksimalna<br>promjena<br>[%] | Prosječna<br>promjena<br>[%] | Maksimalna<br>promjena<br>[%] | Prosječna<br>promjena<br>[%] | Maksimalna<br>promjena<br>[%] | Prosječna<br>promjena<br>[%] | Maksimalna<br>promjena<br>[%] |
| FERIT-<br>RTRK | MPEG-2   | 2.12                         | 9.77                          | 1.82                         | 15.05                         | 2.19                         | 16.36                         | 2.73                         | 19.97                         |
|                | H.264    | 0.79                         | 7.08                          | 1.18                         | 5.22                          | 1.2                          | 6.79                          | 1.95                         | 7.72                          |
|                | H.265    | 0.66                         | 4.46                          | 1.37                         | 6.94                          | 1.54                         | 7.6                           | 2.67                         | 6.85                          |
| CSIQ           | MJPEG    | 0.29                         | 1.73                          | 0.45                         | 2.06                          | 0.67                         | 3.45                          | 2.18                         | 14.72                         |
|                | H.264    | 0.49                         | 2.29                          | 0.82                         | 3.27                          | 0.94                         | 3.89                          | 2.53                         | 17.28                         |
|                | H.265    | 0.47                         | 2.32                          | 0.84                         | 2.55                          | 2.27                         | 7.49                          | 3.62                         | 15.28                         |
| LIVE           | MPEG-2   | 0.2                          | 0.66                          | 0.54                         | 22.95                         | 1.57                         | 7.2                           | 2.35                         | 5.99                          |
|                | H.264    | 0.69                         | 3.21                          | 0.56                         | 3.16                          | 1.99                         | 8.14                          | 3.49                         | 10.3                          |

Za pojedinu sekvencu pripadne baze određene su SI i TI vrijednosti dobivene korištenjem svakog *n*-tog okvira te su dobivene vrijednosti uspoređene s onima dobivenima korištenjem svih okvira promatrane sekvence. Za pojedinu sekvencu izračunata je relativna promjena SI, odnosno TI vrijednosti prema formuli (6-1):

$$pr = \frac{|v_a - v_b(n)|}{v_a} \cdot 100\% , \quad (6-1)$$

gdje je:

$v_a$  – SI (ili TI) vrijednost dobivena korištenjem svih okvira promatrane sekvence,

$v_b(n)$  – SI (ili TI) vrijednost dobivena korištenjem svakog *n*-tog okvira promatrane sekvence.

U tablici 6.1. prikazane su prosječne i maksimalne *pr* vrijednosti izračunatih za sekvence pojedinih podskupa pojedinih baza. Iz tablica se može vidjeti kako se poduzorkovanjem okvira, čime su smanjeni računalni zahtjevi, SI i TI vrijednosti ne mijenja znatno za razumne razine poduzorkovanja.

## 7. ZAKLJUČAK

Razvoj objektivnih metrika za ocjenu kvalitete videa potreban je kako bi se njima zamijenili subjektivni testovi kvalitete videa koji su skupi i vremenski zahtjevni. Od posebnog su značaja objektivne metrike koje rade bez mogućnosti pristupa informacijama referentnih video sekvenci.

Za potrebe razvijanja i testiranja objektivnih metrika kreiraju se video baze te nad njima provode subjektivni testovi, a cilj objektivnih metrika je dati ocjene što sličnije onima dobivenim subjektivnim testovima. Kreirane video baze sadrže sekvence degradirane kompresijom, gubitkom paketa i smrzavanjem slike te kombinacijama navedenog kako bi se utvrdio međusoban utjecaj različitih video artefakata.

Razvoj metrike predstavljene u radu rađen je u programskom jeziku *Python*, a konačna verzija metrike je napisana u jeziku C. Metrika radi bez mogućnosti pristupa informacijama referentne video sekvence te svoj rad bazira na rezultatima algoritama za detekciju artefakata stvaranja blokova, gubitaka paketa i smrzavanja slike. Dodatno, metrika u obzir uzima složenost video sadržaja testne sekvence te koristi nelinearnu transformaciju.

Pretpostavka je da bi se poboljšanje metrike moglo ostvariti korištenjem dodatnih algoritama za detekciju artefakata – npr. artefakata zamućivanja – za što se očekuje da bi rezultiralo dobrim predviđanjem ocjena sekvenci komprimiranih H.265 algoritmima. Također su moguća poboljšanja u detekciji artefakata gubitaka paketa gdje je potreban razvoj metrike koja može detektirati artefakte gubitaka paketa za sekvence komprimirane H.264 i H.265 algoritmima te uspješno razlikuje artefakte gubitaka paketa od artefakata stvaranja blokova kod sekvenci kodiranih MPEG-2 algoritmima.

## LITERATURA

- [1] Video Quality Experts Group (VQEG), FRTV Phase I, [Online] Dostupno na: <https://www.its.bldrdoc.gov/vqeg/projects/frtv-phase-i/frtv-phase-i.aspx>, 08.09.2017.
- [2] Video Quality Experts Group (VQEG), FRTV Phase II, [Online] Dostupno na: <https://www.its.bldrdoc.gov/vqeg/projects/frtv-phase-ii/frtv-phase-ii.aspx>, 08.09.2017.
- [3] K. Seshadrinathan, R. Soundararajan, A. C. Bovik, L. K. Cormack, Study of Subjective and Objective Quality Assessment of Video, *IEEE Trans. Image Process.*, sv. 19, br. 6, str. 1427–1441, Lipanj 2010.
- [4] A. K. Moorthy, L. K. Choi, A. C. Bovik, G. de Veciana, Video Quality Assessment on Mobile Devices: Subjective, Behavioral and Objective Studies, *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, sv. 6, br. 6, str. 652–671, Listopad 2012.
- [5] M. Vranješ, S. Rimac-Drlje, D. Vranješ, ECVQ and EVVQ video quality databases, in *Proceedings ELMAR-2012*, 2012, str. 1–5.
- [6] P. V. Vu, D. M. Chandler, ViS3: an algorithm for video quality assessment via analysis of spatial and spatiotemporal slices, *J. Electron. Imaging*, sv. 23, br. 1, Veljača 2014.
- [7] F. D. Simone, M. Naccari, M. Tagliasacchi, F. Dufaux, S. Tubaro, T. Ebrahimi, Subjective assessment of H.264/AVC video sequences transmitted over a noisy channel, in *2009 International Workshop on Quality of Multimedia Experience*, 2009, str. 204–209.
- [8] Ultra Video Group, Test Sequences, [Online]. Dostupno na: <http://ultravideo.cs.tut.fi/#main>, 08.09.2017.
- [9] P.910 : Subjective video quality assessment methods for multimedia applications, [Online], Dostupno na: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.910-200804-I/en>, 08.09.2017.
- [10] FFmpeg, [Online], Dostupno na: <https://www.ffmpeg.org/>, 08.09.2017.
- [11] P.913 : Methods for the subjective assessment of video quality, audio quality and audiovisual quality of Internet video and distribution quality television in any environment. [Online], Dostupno na: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.913-201603-I/en>, 08.09.2017.

- [12] R. Pauliks, I. Slaidins, K. Tretjaks, A. Krauze, Assessment of IP packet loss influence on perceptual quality of streaming video, *2015 Asia Pacific Conference on Multimedia and Broadcasting*, 2015, str. 1–6.
- [13] A. Mittal, R. Soundararajan, A. C. Bovik, Making a ‘Completely Blind’ Image Quality Analyzer, *IEEE Signal Process. Lett.*, sv. 20, br. 3, str. 209–212, Ožujak 2013.
- [14] M. A. Saad, A. C. Bovik, C. Charrier, Blind Prediction of Natural Video Quality, *IEEE Trans. Image Process.*, sv. 23, br. 3, str. 1352–1365, Ožujak 2014.
- [15] K. Zhu, C. Li, V. Asari, D. Saupe, No-Reference Video Quality Assessment Based on Artifact Measurement and Statistical Analysis, *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, sv. 25, br. 4, str. 533–546, Travanj 2015.
- [16] No-Reference Video Quality Assessment With 3D Shearlet Transform and Convolutional Neural Networks - IEEE Journals & Magazine, [Online], Dostupno na: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7103036/>, 10.09.2017.
- [17] Image and Video Processing Laboratory, [Online], Dostupno na: <http://ivp.ee.cuhk.edu.hk/research/database/subjective/index.shtml>, 20.09.2017.
- [18] A. F. Silva, M. C. Q. Farias, J. A. Redi, Perceptual Annoyance Models for Videos With Combinations of Spatial and Temporal Artifacts, *IEEE Trans. Multimed.*, sv. 18, br. 12, str. 2446–2456, Prosinac 2016.
- [19] X. Li, Q. Guo, X. Lu, Spatiotemporal Statistics for Video Quality Assessment, *IEEE Trans. Image Process.*, sv. 25, br. 7, str. 3329–3342, Srpanj 2016.
- [20] Video Quality Experts Group (VQEG), [Online], Dostupno na: <https://www.its.bldrdoc.gov/vqeg/projects/hdtv/hdtv.aspx>, 20.09.2017.
- [21] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli, Image quality assessment: from error visibility to structural similarity, *IEEE Trans. Image Process.*, sv. 13, br. 4, str. 600–612, Travanj 2004.
- [22] D. M. Chandler and S. S. Hemami, VSNR: A Wavelet-Based Visual Signal-to-Noise Ratio for Natural Images, *IEEE Trans. Image Process.*, sv. 16, br. 9, no. 2284–2298, Rujan 2007.

- [23] A. Mittal, A. K. Moorthy, A. C. Bovik, No-Reference Image Quality Assessment in the Spatial Domain, *IEEE Trans. Image Process.*, sv. 21, br. 12, no. 4695–4708, Listopad 2012.
- [24] A. V. Murthy, A MATLAB Based Framework For Image and Video Quality Evaluation, Master's thesis, Arizona State University, Svibanj 2010.
- [25] A. V. Murthy, L. J. Karam, IVQUEST- Image and Video QUality Evaluation SofTware, [Online], Dostupno na: <http://ivulab.asu.edu/Quality/IVQUEST>, 20.09.2017.
- [26] A. V. Murthy and L. J. Karam, A MATLAB Based Framework For Image and Video Quality Evaluation, International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX), pages 242-247, Lipanj 2010.

## SAŽETAK

U ovom radu razvijena je objektivna metrika koja bez mogućnosti pristupa informacijama referentne video sekvence, na temelju detektiranih artefakata, daje ocjenu kvalitete testne video sekvence. Za potrebe razvoja i testiranja metrike kreirane su dvije nove video baze te su nad pripadnim sekvencama provedeni subjektivni testovi. Uz kreirane baze, korištene su još dvije javno dostupne video baze za testiranje rada novo-stvorene metrike. Metrika uzima u obzir vremensko i prostorno maskiranje artefakata te koristi *Minkowski* vremensko sažimanje povratnih vrijednosti korištenih algoritama za detekciju artefakata i nelinearnu transformaciju. Za potrebe poboljšanja predviđanja kvalitete, razvijen je model za klasifikaciju načina kompresije izvornog sadržaja.

**Ključne riječi:** objektivna ocjena kvalitete videa, obrada bez reference, video baza, subjektivna ocjena kvalitete videa, video artefakti

# OBJECTIVE VIDEO QUALITY MEASURE BASED ON ARTIFACTS DETECTED IN VIDEO

## ABSTRACT

In this Master Thesis an objective no-reference metric for video quality assessment based on artifact detection was developed. For requirements of metric development and testing, two new video quality databases were created and subjective quality assessment experiments conducted. Two other publicly available video quality databases were also used for the newly-created video quality metric testing. The developed metric takes spatial and temporal artifact masking effects into account, uses *Minkowski* temporal pooling to pool values returned by algorithms for artifact detection and nonlinear transformation. A model for compression method classification was developed resulting in increase of video quality prediction performance.

**Key words:** objective video quality assessment, no-reference processing, video quality database, subjective video quality assessment, video artifacts

## ŽIVOTOPIS

Viliams Bajčinovci rođen je 19.08.1993. godine u Osijeku. Nakon završetka Elektrotehničke i prometne škole Osijek, 2012. godine, upisuje preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu Osijek koji 2015. godine završava s temom završnog rada – „Programsko rješenje za proračun srednje snage signala *Parsevalovim* teoremom“. Trenutno je student 2. godine diplomskog studija elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek te stipendist i praktikant Instituta RT-RK Osijek. Zainteresiran je za komunikacijske tehnologije i različite razine razvoja programskih rješenja. Poznaje sljedeće programske jezike: C, C++, C#, Python, MATLAB, Java, SQL, PHP, JavaScript, HTML i CSS. Aktivno govori, čita i piše engleski jezik.