

Usporedba H.266/VVC i AV-1 kodiranja pomoću ffmpeg programa i različitih objektivnih mjera

Boltek, Laura

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:918761>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-30**

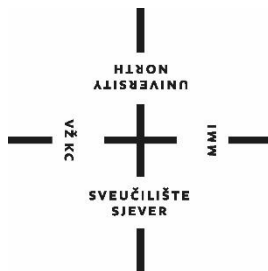


Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN



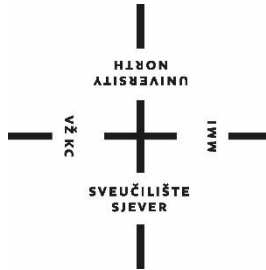
DIPLOMSKI RAD br. 138-MMD-2024

**Usporedba H.266/VVC i AV-1 kodiranja
pomoću ffmpeg programa i različitih
objektivnih mjera**

Laura Boltek

Varaždin, rujan 2024.

SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN
Studij MULTIMEDIJA



DIPLOMSKI RAD br. 138-MMD-2024

**Usporedba H.266/VVC i AV-1 kodiranja
pomoću ffmpeg programa i različitih
objektivnih mjera**

Student:

Laura Boltek, 2253/336

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Emil Dumić

Varaždin, rujan 2024.

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za multimediju		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Multimedija		
PRISTUPNIK	Boltek Laura	JMBAG	0016103063
DATUM	26.08.2024.	KOLEGIJ	Multimedijska videotehnologija
NASLOV RADA	Usporedba H.266/VVC i AV-1 kodiranja pomoću ffmpeg programa i različitih objektivnih mjera		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Comparison of H.266/VVC and AV-1 coders using ffmpeg program and different objective measures		
MENTOR	Emil Dumić	ZVANJE	izv.prof.dr.sc.
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. doc. art. dr. sc. Mario Periša - predsjednik 2. izv. prof. art. dr. sc. Robert Geček - član 3. izv. prof. dr. sc. Emil Dumić - mentor 4. doc. dr. sc. Andrija Bernik - zamjenski član 5.		

Zadatak diplomskog rada

BROJ	138-MMD-2024		
OPIS	<p>U ovom radu će biti uspoređeni H.266/VVC i AV-1 kodiranja videozapisa rezolucije 3840x2160 piksela, dubine 10 bita, koristeći praktične implementacije unutar ffmpeg programa i različite objektivne mjere kvalitete.</p> <p>Standard Versatile Video Coding (H.266/VVC) dovršen 2020. godine omogućava smanjenje brzine prijenosa videozapisa za 50% u usporedbi sa svojim prethodnikom, High Efficiency Video Coding (H.265/HEVC), uz zadržavanje subjektivne kvalitete. Međutim, povećana učinkovitost dolazi s cijenom povećanja računskog opterećenja. Zbog toga je Fraunhofer napravio videokoder VVenC, koji predstavlja prvu otvoreno dostupnu optimiziranu implementaciju koja omogućuje pristup VVC-ovoj učinkovitosti uz kraće vrijeme kompresije u odnosu na VVC testni model VTM (i bez paralelizacije procesa). S druge strane, videokompresija AV1 je razvijena od konzorcija saveza za otvorene medije (Alliance for Open Media). AV1 postiže više od 30% smanjenja brzine prijenosa u usporedbi s prethodnikom VP9 za istu kvalitetu videozapisa. Opisat će se glavne karakteristike H.266/VVC i AV-1 videokodiranja. Opisat će se različite objektivne mjere za usporedbu originalnih i izobličениh slika ili videozapisa: PSNR, SSIM, MS-SSIM, PSNR-HVS, CAMBI i VMAF. Zaključno, opisat će se ffmpeg program pomoću kojeg će se komprimirati i potom usporediti komprimirani videozapisi te UVG baza videozapisa korištena za usporedbu.</p> <p>U praktičnom dijelu će se biti uspoređeni H.266/VVC (VVenC implementiran pomoću libvenc, verzija 1.9.1) i AV-1 (aomenc implementiran pomoću libaom-av1, verzija 3.8.2) kodiranja četiri videozapisa ("CityAlley", "FlowerKids", "RaceNight" i "RiverBank") s različitim vrijednostima vremenskih i prostornih informacija (TI i SI), rezolucije 3840x2160 piksela, dubine 10 bita, koristeći ffmpeg program i različite objektivne mjere: PSNR, SSIM, MS-SSIM, PSNR-HVS, CAMBI i VMAF (unutar libvmaf). Pomoću objektivnih mjera će se zaključiti koji od praktično implementiranih kodiranja u ffmpeg programu daje bolje rezultate.</p>		
ZADATAK URUČEN	02.09.2024.	POTPIS MENTORA	Emil Dumić

Predgovor

Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na njihovoj podršci tijekom izrade ovog rada. Njihovo razumijevanje i ohrabrenje bili su mi od neizmjerne važnosti. Posebnu zahvalnost dugujem svom mentoru, izv. prof. dr. sc. Emilu Dumiću, čija je stručnost, strpljenje i savjeti usmjerili moj rad i omogućili mi da uspješno dovršim ovo istraživanje. Njegovo vodstvo i podrška bili su ključni u razvoju i završetku ovog rada.

Nadam se da će ovaj rad pridonijeti daljnjem istraživanju i razvoju tehnologije video kompresije te poslužiti kao korisna referenca za sve koji se bave ovim područjem.

Sažetak

Ovaj diplomski rad bavi se usporedbom performansi dvaju modernih video kodeka, AOM-AV1 i VVenC H.266/VVC, s ciljem ocjenjivanja njihove učinkovitosti u očuvanju kvalitete slike pri različitim razinama kompresije. S obzirom na rastuće zahtjeve za visokokvalitetnim videosadržajem uz ograničene resurse za pohranu i prijenos podataka, pravilna kompresija postaje ključna za medijsku industriju i krajnje korisnike.

U radu su analizirani rezultati kompresije za četiri različita videozapisa: "River Bank," "Race Night," "Flower Kids," i "City Alley," koji su odabrani zbog svojih specifičnih karakteristika i izazova za kompresiju. Kvaliteta slike ocjenjivana je pomoću nekoliko ključnih mjera, uključujući PSNR_Y za svjetlinu, SSIM i MS-SSIM za strukturnu sličnost, PSNR-HVS za svjetlinu, prilagođen ljudskoj percepciji, CAMBI mjeru za izobličenja kontura, te VMAF kao sveobuhvatnu ocjenu percipirane kvalitete.

Rezultati pokazuju da AOM-AV1 kodek općenito postiže bolje rezultate u očuvanju kvalitete slike, osobito pri nižim brzinama prijenosa, dok VVenC također pokazuje solidne performanse, osobito u specifičnim scenarijima s visokim kontrastima. Kroz detaljnu analizu prikazanih rezultata, ovaj rad nudi smjernice za odabir najprikladnijeg kodeka ovisno o specifičnim potrebama i uvjetima primjene.

Ovi nalazi pridonose razumijevanju prednosti i ograničenja oba kodeka te imaju potencijalnu primjenu u različitim područjima kao što su Internetski prijenos, arhiviranje i profesionalna videoprodukcija.

Ključne riječi: Video kompresija, AOM-AV1, VVenC, PSNR, SSIM, VMAF, očuvanje kvalitete slike, brzina prijenosa, videokodeci

Summary

This thesis focuses on the comparison of the performance of two modern video codecs, AOM-AV1 and VVenC H.266/VVC, with the aim of evaluating their efficiency in preserving image quality at various compression levels. Given the increasing demand for high-quality video content alongside limited resources for storage and data transmission, proper compression becomes crucial for the media industry and end users.

The study analyzes compression results for four different video sequences: "River Bank," "Race Night," "Flower Kids," and "City Alley," which were selected due to their specific characteristics and compression challenges. Image quality was evaluated using several key metrics, including PSNR_Y for luminance, SSIM and MS-SSIM for structural similarity, PSNR_HVS_Y for luminance adapted to human perception, CAMBI for contour distortion, and VMAF as a comprehensive assessment of perceived quality.

The results indicate that the AOM-AV1 codec generally achieves better results in preserving image quality, especially at lower bitrates, while VVenC also demonstrates solid performance, particularly in specific scenarios with high contrast. Through detailed analysis of the presented results, this thesis provides guidelines for selecting the most appropriate codec based on specific needs and application conditions.

These findings contribute to the understanding of the advantages and limitations of both codecs and have potential applications in various fields such as streaming, archiving, and professional video production.

Keywords: *Video compression, AOM-AV1, VVencC, PSNR, SSIM, VMAF, image quality preservation, bitrate, video codecs*

Popis korištenih kratica

AOM-AV1	Alliance for Open Media - AV1 Kodek za videokompresiju
VVC	Versatile Video Coding Kodek za videokompresiju
PSNR	Peak Signal-to-Noise Ratio Vršni omjer signala i šuma
SSIM	Structural Similarity Index Indeks strukturne sličnosti
MS SSIM	Multi-Scale Structural Similarity Index Višeskalna strukturna sličnost
PSNR HVS	Peak Signal-to-Noise Ratio adjusted for Human Visual System PSNR prilagođen ljudskom vizualnom sustavu
CAMBI	Contrast-aware Multiscale Banding Index Višeskalni indeks izobličenja kontura pomoću kontrasta
VMAF	Video Multi-Method Assessment Fusion Mjera za procjenu percipirane kvalitete videozapisa
Kbps	Kilobits per second Kilobiti po sekundi
YUV	Luminance (Y) and Chrominance (U and V) Format za prikaz slike
FFmpeg	Fast Forward Moving Picture Experts Group Softverski alat za obradu multimedijalnih datoteka

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Povijest i razvoj H.266/VVC i AV-1 kodeka.....	3
3.	H.266/VVC	4
4.	AV1	5
5.	Osnovni principi kompresije videosadržaja	6
5.1.	Predikcija.....	6
5.2.	Transformacija.....	7
5.3.	Kvantizacija.....	7
6.	Ključne karakteristike kodeka.....	9
6.1.	Brzina kompresije.....	9
6.2.	Kvaliteta slike.....	10
6.3.	Efikasnost kompresije	10
7.	Objektivne mjere kvalitete	12
8.	Komparativna analiza H.266/VVC i AV1	13
9.	Metodologija	14
9.1.	Uvod u praktični dio	14
9.2.	Odabir testnih videozapisa	14
9.3.	Proces kompresije.....	15
9.3.1.	VVC kompresija (2-pass)	15
9.3.2.	AOM-AV1 Kompresija (2-pass)	17
9.4.	Mjere za procjenu kvalitete	19
9.5.	Analitički postupak.....	19
10.	Rezultati analize i usporedbe kodeka.....	23
10.1.	Rezultati za „River Bank“	23
10.1.1.	Zaključak za kompresiju „River Bank“	29
10.2.	Rezultati za „Race Night“	30
10.2.1.	Zaključak za kompresiju „Race Night“	35
10.3.	Rezultati za „Flower Kids“	36
10.3.1.	Zaključak za kompresiju „Flower Kids“	41
10.4.	Rezultati za „City Alley“	42
10.4.1.	Zaključak za kompresiju „City Alley“	47
10.5.	Zaključak svih analiza videozapisa	48
11.	Zaključak.....	50
	Literatura	51
	Popis slika	54
	Popis tablica	55

1. Uvod

Kompresija videa igra ključnu ulogu u omogućavanju učinkovitog prijenosa i pohrane digitalnih medija, nudeći brojne prednosti koje poboljšavaju ukupno iskustvo gledanja. Kompresija videozapisa značajno smanjuje veličinu multimedijalnih datoteka, omogućujući učinkovitiji prijenos preko mreža s ograničenom propusnošću ili kapacitetom za pohranu. Ova tehnologija kompresije također omogućuje stvarno vrijeme Internet prijenosa visokokvalitetnih videozapisa, omogućujući uživanje u besprijekornom reprodukciji bez kašnjenja pri isporuci [1].

Važnost videokompresije nije ograničena samo na svakodnevne korisnike već se proteže na različite industrije poput zabave, obrazovanja i sigurnosti. Na primjer, u zabavnoj industriji, video kompresija omogućuje distribuciju visokokvalitetnih filmova i usluga Internet prijenosa, poboljšavajući ukupno korisničko iskustvo. U obrazovanju, video kompresija omogućuje dostavu online tečajeva i predavanja, dosežući širu publiku. Dodatno, u sigurnosnim i nadzornim sustavima, videokompresija omogućuje pohranu i prijenos velikih količina videozapisa, omogućujući učinkovito praćenje i analizu.

Jedna od ključnih komponenti kompresije videa je smanjenje prostorne redundancije, koja iskorištava činjenicu da su susjedni pikseli u videokadru često slični. Ova redundancija eliminira se korištenjem algoritama koji analiziraju razlike između susjednih piksela i kodiranje samo promjena, što rezultira značajno smanjenim veličinama datoteka. Još jedan ključan aspekt je smanjenje vremenske redundancije, koja koristi činjenicu da su uzastopni videokadrovi često slični. Kodiranjem samo razlika između kadrova, umjesto svakog pojedinačnog kadra, algoritmi za kompresiju videozapisa postižu dodatnu kompresiju bez smanjenja vizualne vjernosti [2].

Osim toga, tehnike kompresije videa često koriste transformacijsko kodiranje, poput diskretne kosinusne transformacije (engl. discrete cosine transform, DCT), koja pretvara videosignale iz prostornog u frekvencijsku domenu. Ova transformacija omogućuje uklanjanje visokofrekventnih komponenti koje su manje perceptivne ljudskom oku, rezultirajući još učinkovitijom kompresijom [2].

AV-1 i H.266/VVC su dva ključna kodeka koji predstavljaju napredne tehnologije kompresije videa. AV-1 je kodek otvorenog koda koji se ističe izvrsnom učinkovitošću kompresije, omogućujući smanjenje veličine datoteka bez gubitka kvalitete sadržaja. Ovaj kodek podržava različite rezolucije i dubine bitova, pružajući fleksibilnost za različite vrste medija i aplikacija.

S druge strane, H.266/VVC dizajniran je s ciljem pružanja veće učinkovitosti kompresije u usporedbi s njegovim prethodnicima, poput H.264/AVC i H.265/HEVC. On donosi napredne tehnike kompresije koje omogućuju veću učinkovitost u komprimiranju videodatoteka u usporedbi

s prethodnim standardima. Koristi napredne algoritme za kompenzaciju pokreta i predikciju kako bi smanjio veličinu datoteka bez smanjenja kvalitete [3].

Oba kodeka predstavljaju važan korak naprijed u tehnologiji kompresije videozapisa, nudeći poboljšanu kvalitetu videozapisa uz smanjenje potrebne propusnosti i prostora za pohranu.

2. Povijest i razvoj H.266/VVC i AV-1 kodeka

Povijest i razvoj videokodeka prošli su značajne transformacije potaknute tehnološkim napretkom i stalnim stremljenjem ka većoj kvaliteti i učinkovitosti. Razvoj tehnika kodiranja videozapisa započeo je analognim metodama kompresije koje su uključivale smanjenje količine podataka u videosignalima iskorištavanjem ograničenja ljudske vizualne percepcije. Međutim, te analogne tehnike kompresije imale su ograničenja u pogledu kvalitete i učinkovitosti kompresije videozapisa.

Uvođenje MPEG-1 početkom 1990-ih bilo je značajan događaj u kodiranju videozapisa, jer je pružilo standardiziranu i učinkovitu metodu za komprimiranje digitalnog videozapisa. MPEG-1 koristio je tehnike kompenzacije pokreta i diskretne kosinusne transformacije (DCT) kako bi postigao visoke omjere kompresije uz održavanje prihvatljive kvalitete videozapisa. Ovaj proboj u kodiranju videozapisa postavio je temelje za kasnije naprete u kompresiji videozapisa, što je dovelo do razvoja složenijih standarda kodiranja poput MPEG-2, MPEG-4 i H.264/AVC.

MPEG-2, uveden od strane Moving Picture Experts Group (MPEG) krajem 1990-ih, pokazao se kao proboj u kompresiji videozapisa pružajući visokokvalitetni videozapis pri relativno niskim brzinama prijenosa. Ovaj standard široko je prihvaćen u industriji emitiranja i postavio je temelje za kasnije napretke u kompresiji videozapisa. Na temelju uspjeha MPEG-2, H.264/AVC je postao visoko učinkoviti standard kompresije koji je ponudio značajna poboljšanja u učinkovitosti kompresije i skalabilnosti. Koristio je napredne tehnike kodiranja, poput kompenzacije pokreta i kodiranja entropije, kako bi postigao superiornu kvalitetu videozapisa uz smanjene zahtjeve za propusnost [4].

Međutim, eksponencijalni rast multimedijskog sadržaja i pojava visoke razlučivosti zahtijevali su razvoj još naprednijih tehnika kompresije. Kao odgovor na ovu potražnju, HEVC/H.265 je uveden kao nasljednik H.264/AVC, s ciljem pružanja veće učinkovitosti kompresije i bolje kvalitete videozapisa. HEVC/H.265 koristi složene algoritme, uključujući poboljšanu estimaciju pokreta i napredno kodiranje entropije, kako bi postigao do 50% veću učinkovitost kompresije u usporedbi s prethodnikom. Ovaj napredak bio je presudan za različite primjene, poput Internet prijenosa videosadržaja, videokonferencija i digitalne televizije, jer omogućuje prijenos sadržaja visoke razlučivosti uz minimalne zahtjeve za propusnost [4].

Kodeci sljedeće generacije, poput H.266/VVC i AV1, pojavili su se kao obećavajuća rješenja za rješavanje sve veće potražnje za visokokvalitetnom kompresijom videozapisa. H.266/VVC i AV1 donose vrijedna poboljšanja u kompresiji videozapisa, rješavajući izazove ograničenja propusnosti i pružajući visokokvalitetni videosadržaj za različite primjene.

3. H.266/VVC

Arhitektura i dizajn H.266/VVenC kodeka bili su predmet temeljite analize u posljednjih nekoliko godina. Tehnički aspekti i struktura ovog kodeka temeljito su proučeni kako bi se razumjele njegove mogućnosti i potencijalne primjene. H.266/VVenC, poznat i kao višenamjensko videokodiranje (eng. Versatile Video Coding, VVC), je standard kompresije videozapisa sljedeće generacije koji ima za cilj pružiti učinkovitu kompresiju videopodataka uz održavanje visoke vizualne kvalitete. Važnost H.266/VVC-a leži u njegovoj sposobnosti značajnog smanjenja brzine prijenosa potrebne za prijenos i pohranu videozapisa bez ugrožavanja perceptivne kvalitete sadržaja.

H.266/VVC kodek koristi hijerarhijski pristup koji obuhvaća različite alate i tehnike kodiranja kako bi postigao visoku učinkovitost kompresije. Jedna ključna značajka ovog kodeka je upotreba bloka za kompenzaciju pokreta, što omogućuje predviđanje budućih blokova na temelju vektora pokreta prethodno kodiranih blokova. Ova tehnika pomaže u smanjenju redundancije i poboljšanju omjera kompresije. Ovaj kodek uključuje sofisticiranu shemu entropijskog kodiranja, poput Kontekstualnog Adaptivnog Binarnog Aritmetičkog Kodiranja (engl. Context-adaptive binary arithmetic coding, CABAC), što dodatno poboljšava učinkovitost kompresije iskorištavanjem statističkih ovisnosti unutar videopodataka. VVC koristi napredne načine predikcija unutar slike, poput kopiranja unutar bloka i adaptivnog filtriranja unutar slike, kako bi poboljšao kodiranje prostornih detalja [5].

H.266/VVC kodek postiže smanjenje brzine prijenosa od 50% u usporedbi s prethodnikom, H.265/HEVC, uz istu razinu vizualne kvalitete. Ovo poboljšanje u učinkovitosti kompresije posebno je važno s obzirom na rastuću potražnju za videosadržajem visoke razlučivosti u različitim aplikacijama, poput Internet prijenosa videosadržaja, videokonferencija i virtualne stvarnosti. Smanjenjem brzine prijenosa, H.266/VVC omogućuje brži prijenos videozapisa, smanjuje zahtjeve za pohranom i poboljšava opće korisničko iskustvo [6].

H.266/VVC kodek nudi nekoliko prednosti, uključujući smanjenje zahtjeva za propusnost, poboljšanu kvalitetu Internet prijenosa i poboljšanu fleksibilnost za isporuku sadržaja. Smanjenjem veličine videodatoteka, H.266/VVC kodek omogućuje brži prijenos i bolje iskorištavanje mrežnih resursa. Osim toga, sposobnost kodeka da se prilagodi različitim mrežnim uvjetima osigurava besprijekorno iskustvo Internet prijenosa za korisnike. Nadalje, H.266/VVC kodek pruža poboljšanu fleksibilnost za isporuku sadržaja podržavajući širok raspon razlučivosti, brzina sličica i prostornih formata. To omogućuje veću kompatibilnost s različitim uređajima i platformama [5].

4. AV1

AV1 kodek, poznat i kao AOMedia Video 1, je format kompresije videozapisa koji je u posljednjih nekoliko godina privukao značajnu pažnju zbog svoje svrhe i važnosti u području kompresije videozapisa. Arhitektura AV1 kodeka obuhvaća različite tehničke komponente i dizajnerske koncepcije koje doprinose njegovoj učinkovitosti i učinkovitosti u kompresiji videozapisa. Ovaj kodek igra ključnu ulogu u poboljšanju kvalitete videozapisa dok istovremeno smanjuje veličine datoteka, čime predstavlja značajan proboj u području videokodiranja.

AV1 kodek koristi napredne tehnike kompresije poput promjenjive veličine bloka i poboljšane kompenzacije pokreta kako bi postigao bolju učinkovitost kompresije u usporedbi s prethodnicima. Važnost AV1 kodeka leži u njegovoj sposobnosti smanjenja veličine videodatoteka bez ugrožavanja vizualne kvalitete, omogućavajući brži prijenos videosadržaja, niže zahtjeve za propusnost i poboljšano korisničko iskustvo. AV1 kodek je otvorenog koda i ne zahtijeva plaćanje naknade za korištenje, što ga čini pristupačnim i prilagodljivim za različite primjene na različitim platformama. Svrha i važnost ovog kodeka u kompresiji videozapisa očituje se u njegovom potencijalu da revolucionira način na koji se isporučuje i konzumira videosadržaj, otvarajući put za učinkovitija i visokokvalitetna iskustva prijenosa videosadržaja [7].

AV1 koristi hibridni pristup kombinirajući elemente iz prethodnih standarda videokodiranja poput VP9 i VP10. Ovaj hibridni pristup omogućuje AV1 da postigne poboljšanu učinkovitost kompresije koristeći napredne tehnike poput podjele blokova, predikcije unutar slike (engl. intra-frame) i između slika (engl. inter-frame) Podjela blokova dijeli videookvire na manje blokove, omogućavajući kodeku analizu i kompresiju svakog bloka pojedinačno, čime se smanjuje redundancija. Predikcija unutar slike predviđa vrijednosti piksela unutar bloka na temelju susjednih blokova, dok predikcija između slika predviđa vrijednosti referirajući se na prethodno kodirane slike. Ove tehnike predikcije, zajedno s korištenjem promjenjive veličine blokova i adaptivne kompenzacije pokreta, doprinose sposobnosti AV1 kodeka da postigne veće omjere kompresije i bolju vizualnu kvalitetu. AV1 uključuje napredne metode entropijskog kodiranja poput kontekstualnog adaptivnog binarnog aritmetičkog kodiranja (CABAC) i kodiranja koeficijenata, što dodatno poboljšava njegovu učinkovitost kompresije [8].

AV1 također podržava širok raspon videorazlučivosti, uključujući 4K i 8K, što ga čini pogodnim za videosadržaj visoke razlučivosti.

5. Osnovni principi kompresije videosadržaja

Kompresija videozapisa je ključna tehnologija koja igra važnu ulogu u različitim aspektima multimedijских aplikacija. Princip iza kompresije videozapisa je smanjenje redundancije u videopodacima eliminirajući nepotrebne informacije, što rezultira učinkovitijim prikazom videosadržaja.

Jedan od glavnih razloga važnosti kompresije videozapisa je enormna količina podataka koju videodatoteke zauzimaju. Neomprimirani videopodaci mogu biti iznimno veliki, što ih čini nepraktičnima za pohranu ili prijenos bez kompresije. Algoritmi za kompresiju videozapisa, poput onih baziranih na estimaciji i kompenzaciji pokreta, koriste vremenske i prostorne redundancije u videosekvencama kako bi smanjili veličinu datoteke održavajući prihvatljivu percepcijsku kvalitetu [9].

Kompresijom videopodataka postaje moguće pohraniti više videozapisa na određenoj pohranjivačkoj sredini, prenositi videozapise preko mreža s ograničenom propusnošću te prijenosa videosadržaja u stvarnom vremenu putem Interneta. Stoga je kompresija videozapisa temeljna tehnologija koja omogućuje široku uporabu digitalnih videozapisa u različitim aplikacijama, od zabave i emitiranja do videokonferencija i nadzornih sustava.

U kontekstu kompresije videozapisa, koriste se tri osnovne tehnike: predikcija, transformacija i kvantizacija.

5.1. Predikcija

Tehnike kompresije temeljene na predikciji široko su korištene u algoritmima videokompresije radi smanjenja redundancije i poboljšanja ukupne učinkovitosti kompresije. Ove tehnike ciljaju na iskorištavanje prostorne i vremenske redundancije prisutne u videosekvencama.

Jedna od ključnih tehnika kompresije temeljenih na predikciji koja se koristi u algoritmima videokompresije je kompenzacija pokreta. Kompenzacija pokreta predviđa pokret objekata u videosekvenci i nadoknađuje ovaj pokret prenoseći samo razlike između uzastopnih okvira, zajedno s vektorima pokreta. Ova tehnika učinkovito smanjuje količinu podataka koja se mora prenositi ili pohraniti, jer se kodiraju samo vektori pokreta i rezidualne informacije [10].

Druga često korištena tehnika kompresije temeljena na predikciji je transformacijska kompresija, koja iskorištava prostornu redundanciju unutar okvira pretvarajući vrijednosti piksela u reprezentaciju u frekvencijskoj domeni koristeći tehnike poput diskretne kosinusne transformacije (DCT). Ova transformacija omogućuje učinkovitu kompresiju predstavljanjem slike u smislu njezinih frekvencijskih komponenti i odbacivanjem visokofrekvencijskih komponenti koje manje doprinose ukupnoj vizualnoj kvaliteti [10].

Ove tehnike kompresije temeljene na predikciji igraju ključnu ulogu u algoritmima videokompresije i značajno doprinose postizanju visokih kompresijskih omjera uz održavanje prihvatljive vizualne kvalitete za komprimirane videozapise.

5.2. Transformacija

Jedna od temeljnih tehnika koja se koristi u videokompresiji je transformacijska kompresija. U ovoj tehnici, podaci videozapisa se transformiraju radi smanjenja redundancije, što rezultira kompaktnijom reprezentacijom.

Transformacijsko kodiranje koristi matematičku transformaciju kako bi pretvorilo vrijednosti piksela videookvira iz prostorne domene u frekvencijsku domenu. Ova transformacija obično se postiže korištenjem diskretne kosinusne transformacije (DCT), koja pretvara videosignal u skup frekvencijskih komponenti.

Predstavljajući videookvire u smislu ovih frekvencijskih komponenti, transformacijsko kodiranje eliminira prostornu redundanciju u vrijednostima piksela i omogućuje učinkovitiju kompresiju. To je zato što DCT ima tendenciju koncentriranja većine energije videosignala u nekoliko niskofrekventnih koeficijenata, dok visokofrekventni koeficijenti sadrže manje važnih vizualnih informacija. Kao rezultat toga, transformacijsko kodiranje može odbaciti ili kvantizirati visokofrekventne koeficijente s minimalnim utjecajem na vizualnu kvalitetu rekonstruiranog videozapisa, što dovodi do značajnih dobitaka u kompresiji [11].

Ovaj proces uključuje nekoliko faza, uključujući predobradu, transformaciju, kvantizaciju, kodiranje i dekodiranje. U fazi predobrade, videookviri se pripremaju uklanjanjem svih nepotrebnih informacija i primjenom filtera radi poboljšanja ukupne kvalitete. Faza transformacije koristi matematičke tehnike poput diskretne kosinusne transformacije (DCT) ili valne transformacije kako bi pretvorila videookvire u frekvencijsku domenu. Sljedeći korak je kvantizacija, gdje se transformirani koeficijenti aproksimiraju na ograničeni broj bitova. Ovaj proces uvodi gubitak informacija, ali je potreban za postizanje kompresije. Faza kodiranja uključuje kodiranje entropije, gdje se kvantizirani koeficijenti dodatno komprimiraju korištenjem tehnika poput Huffmanova kodiranja ili aritmetičkog kodiranja. U fazi dekodiranja, komprimirani videozapis je rekonstruiran obrnutim procesima, uključujući dekodiranje, inverznu kvantizaciju, inverznu transformaciju i naknadnu obradu [2].

5.3. Kvantizacija

Kvantizacijska tehnika kompresije široko je istražena i primijenjena u kompresiji videosadržaja, igrajući ključnu ulogu u smanjenju veličine podataka održavajući prihvatljivu

razinu kvalitete videozapisa. Smanjenjem preciznosti boje i prostornih informacija videozapisa, kvantizacija učinkovito smanjuje veličinu datoteke bez značajnog gubitka percepcije kvalitete. Kvantizacija prilikom kompresije se može odnositi na pohranu npr. transformiranih koeficijenata u DCT domeni s različitim brojem potrebnih bitova: niskofrekvencijski koeficijenti s više, a visokofrekvencijski koeficijenti s manje. Tablica kvantizacije određuje preciznost po bloku.

Kvantiziranje videosignala rezultira odbacivanjem nepotrebnih detalja, što dovodi do smanjenja brzine bitova. Međutim, utjecaj na ukupnu kvalitetu videozapisa može se minimizirati korištenjem odgovarajućih parametara kvantizacije i optimizacijskih algoritama [10].

Kompresija videozapisa korištenjem kvantizacije također omogućuje brži Internet prijenos i reprodukciju videozapisa, budući da manje veličine datoteka zahtijevaju manje propusnosti i kapaciteta za pohranu.

Međutim, postoje i ograničenja. Jedno ograničenje je ravnoteža između učinkovitosti kompresije i kvalitete videozapisa. Veće razine kvantizacije mogu rezultirati primjetnim artefaktima i smanjenjem kvalitete videozapisa, što možda nije prihvatljivo za određene primjene. Drugo ograničenje je složenost algoritama kvantizacije, koja može biti računalno intenzivna i zahtijevati značajne procesorske resurse. To može predstavljati izazove u scenarijima kompresije videozapisa u stvarnom vremenu, posebno za uređaje s ograničenim računalnim resursima [12].

6. Ključne karakteristike kodeka

Videokodeci imaju ključnu ulogu u određivanju performansi i učinkovitosti kompresije videozapisa. Ključne karakteristike poput brzine kompresije, kvalitete slike i učinkovitosti kompresije su bitne u procjeni općih sposobnosti videokodeka. Ove ključne karakteristike bitne su pri odabiru videokodeka koji zadovoljava zahtjeve različitih aplikacija i korisničkih preferencija.

6.1. Brzina kompresije

Jedan ključni faktor u videokompresiji je brzina kojom kodek obavlja postupak kompresije. Analizirajući utjecaj performansi videokodeka na brzinu kompresije, utvrđeno je da brzina kompresije videokodeka značajno utječe na ukupnu učinkovitost procesa kompresije.

Što brže kodek može komprimirati podatke, to se smatra učinkovitijim. Brzina kompresije odnosi se na vrijeme koje kodek treba za komprimiranje podataka i igra ključnu ulogu u različitim aplikacijama, poput komunikacije u stvarnom vremenu i multimedijskog prijenosa podataka. U takvim scenarijima, brzina kompresije izravno utječe na korisničko iskustvo, jer sporiji algoritmi kompresije mogu uvesti primjetna kašnjenja ili latencije [13].

Učinkovita obrada podataka zahtijeva kodeke koji mogu brzo komprimirati podatke bez smanjenja kvalitete izlaza. Kodek s visokom brzinom kompresije značajno može poboljšati ukupnu učinkovitost aplikacija s velikim količinama podataka, omogućujući brži prijenos i obradu podataka. Stoga je pri ocjeni karakteristika kodeka ključno razmotriti brzinu kompresije kao ključni faktor u postizanju učinkovite obrade podataka [14].

Kad je riječ o brzini kompresije, u igru ulazi nekoliko čimbenika, uključujući hardver, algoritme i utjecaj veličine datoteka. Hardver igra ključnu ulogu u određivanju brzine kojom se odvija kompresija. Brži procesori i veći kapaciteti memorije omogućuju bržu izvedbu algoritama kompresije.

Dostupnost višejezgrenih procesora omogućuje paralelno procesiranje, što značajno može poboljšati brzinu kompresije. Vrsta i učinkovitost korištenih algoritama kompresije također značajno utječu na brzinu kompresije. Napredni algoritmi, poput Lempel-Ziv-Welch (LZW) algoritma, poznati su po visokim omjerima kompresije, ali mogu zahtijevati više vremena za obradu. S druge strane, jednostavniji algoritmi poput Run-Length Encoding (RLE) mogu biti brži, ali nude niže omjere kompresije. Sama veličina datoteke utječe na brzinu kompresije. Veće datoteke obično zahtijevaju više vremena za kompresiju zbog povećane količine podataka koji trebaju biti obrađeni. Nasuprot tome, manje datoteke mogu se brže komprimirati [15].

6.2. Kvaliteta slike

Kvaliteta slike odnosi se na percipiranu vjernost i vizualnu privlačnost slike. Kvaliteta slike procjenjuje se na temelju različitih čimbenika, poput rezolucije, točnosti boja, oštine i razina šuma. U kontekstu videokodeka, kvaliteta slike igra važnu ulogu u određivanju ukupne performanse i učinkovitosti kodeka. Sposobnost kodeka da točno predstavi originalnu sliku s minimalnim gubitkom kvalitete od izuzetne je važnosti.

Jedan od ključnih aspekata kvalitete slike je rezolucija, koja se odnosi na broj piksela u slici. Više rezolucije obično rezultira oštrijim i detaljnijim slikama. Kodeci moraju biti sposobni učinkovito kodirati i dekodirati slike visoke rezolucije bez značajnog gubitka kvalitete. Drugi faktor je točnost boja, koja uključuje reprodukciju boja što je točnije moguće. Kodeci bi trebali sačuvati vjernost boja originalne slike tijekom procesa kompresije i dekompresije [16].

Oštrina je još jedan važan aspekt kvalitete slike. Odnosi se na razinu detalja i jasnoće u slici. Kodeci moraju biti sposobni sačuvati oštrinu originalne slike, osiguravajući da sitni detalji ne budu izgubljeni tijekom kompresije. Uz to, razine šuma igraju ulogu u kvaliteti slike. Šum se odnosi na slučajne varijacije u svjetlini ili boji koje mogu narušiti ukupno vizualno iskustvo. Kodeci bi trebali minimizirati razine šuma radi poboljšanja kvalitete slike [16].

Prilikom procjene kvalitete slike u kodecima, potrebno je razmotriti i subjektivne i objektivne mjere i standarde. Subjektivne mjere uključuju percepciju kvalitete od strane ljudskih promatrača, dok se objektivne mjere oslanjaju na računalne algoritme za procjenu kvalitete slike.

Subjektivne mjere pružaju vrijedne uvide u to kako ljudi percipiraju kvalitetu slike, uzimajući u obzir faktore poput vizualne percepcije i kognitivnih procesa. Ove mjere često uključuju provođenje eksperimenata u kojima ljudski promatrači ocjenjuju kvalitetu slika kodiranih različitim kodecima. S druge strane, objektivne mjere nude kvantitativnu i automatiziranu procjenu kvalitete slike. Ove mjere temelje se na različitim algoritmima koji analiziraju različite aspekte slike, poput reprodukcije boja, oštine i šuma. One su posebno korisne kada su potrebne evaluacije u velikom obimu ili kada je potrebna procjena u stvarnom vremenu [17].

Važno je napomenuti da objektivne mjere ne odgovaraju uvijek ljudskoj percepciji, jer mogu propustiti određene subjektivne aspekte kvalitete slike. Stoga je kombinacija subjektivnih i objektivnih mjera nužna kako bi se dobila sveobuhvatna evaluacija kvalitete slike u kodecima.

6.3. Efikasnost kompresije

Efikasnost kompresije odnosi se na sposobnost kodeka da smanji veličinu podataka bez značajnog gubitka kvalitete. Postizanje visoke efikasnosti kompresije ključno je za različite

multimedijske aplikacije poput prijenosa videosadržaja, videokonferencija i digitalne pohrane. Kodeci su dizajnirani kako bi iskoristili redundancije u podacima, uklanjajući nepotrebne informacije i predstavljajući preostale podatke u kompaktnijem obliku. Na taj način, kodeci mogu značajno smanjiti količinu podataka koja se mora pohraniti ili prenijeti, rezultirajući manjim potrebnim brzinama prijenosa i smanjenim zahtjevima za pohranu.

Važno je postići ravnotežu između efikasnosti kompresije i očuvanja perceptivne kvalitete. Previsoki kompresijski omjeri mogu rezultirati vidljivim artefaktima i degradacijom kvalitete, što može negativno utjecati na korisničko iskustvo. Stoga bi dizajn i odabir kodeka trebali uzeti u obzir specifične zahtjeve aplikacije u smislu efikasnosti kompresije i očuvanja kvalitete.

Efikasnost kompresije u kodecima utječe na različite faktore. Jedan značajan faktor je odabir kompresijskog algoritma. Različiti algoritmi koriste različite pristupe kompresiji podataka, poput algoritama bez gubitaka ili s gubicima. Algoritmi bez gubitaka, poput Huffmanova kodiranja, osiguravaju da nijedna informacija nije izgubljena tijekom procesa kompresije. S druge strane, algoritmi s gubicima, poput JPEG-a, uklanjaju neke podatke kako bi postigli veće kompresijske omjere [13].

Različiti kodeci koriste različite algoritme i tehnike za postizanje kompresije, poput transformacijske kompresije, prediktivne kompresije i entropijskog kodiranja. Te tehnike imaju za cilj iskorištavanje redundancije u podacima, uklanjanje manje važnih informacija i učinkovito predstavljanje preostalog sadržaja [18].

Stoga se izvedba kodeka može evaluirati pregledom njegovog kompresijskog omjera, koji predstavlja smanjenje veličine datoteke, i njegovog maksimalnog omjera signal-šum (engl. peak signal to noise ratio, PSNR). Često se koriste BD-PSNR i BD-Rate mjere koje govore koliko je jedan algoritam bolji u postotku od drugog, za više referentnih vrijednosti od PSNR (BD-rate) ili brzine prijenosa (BD-PSNR). Točnije, BD-PSNR govori o poboljšanju kvalitete koje je ostvario drugi algoritam u odnosu na prvi pri jednakoj brzini prijenosa. Odnosno, ako se koristi jednaka brzina prijenosa za videosekvence kodirane kodecima 1 i 2, koja od njih ima bolju kvalitetu (prema PSNR) i za koliko. BD-Rate govori o uštedi brzine prijenosa pri ekvivalentnoj kvaliteti (prema PSNR). Drugim riječima, ako je kvaliteta videosekvenci kodiranim s kodecima 1 i 2 jednaka prema PSNR, koja od njih koristi više bitova i koliko. [19].

Drugi faktor koji utječe na efikasnost kompresije je vrsta podataka koji se komprimiraju. Različite vrste podataka imaju različite karakteristike i razine redundancije, što može utjecati na učinkovitost algoritama kompresije. Brzina prijenosa komprimiranih podataka također može utjecati na efikasnost kompresije. Veće brzine prijenosa omogućuju detaljnije i točnije prikazivanje izvornih podataka, rezultirajući kompresijom bolje kvalitete.

7. Objektivne mjere kvalitete

Objektivne mjere kvalitete igraju ključnu ulogu u procjeni videosadržaja, pružajući standardiziran i mjerljiv način procjene kvalitete videozapisa. One su od izuzetne važnosti u različitim primjenama, poput prijenosa videosadržaja, videonadzora i videokodiranja. Objektivne mjere se koriste zbog lakšeg korištenja, bržeg zaključivanja o kvaliteti ili pak nemogućnosti provođenja subjektivnih ispitivanja.

Objektivne mjere kvalitete su bitne jer nude pouzdan i dosljedan način procjene kvalitete videozapisa. Međutim, objektivne mjere kvalitete pružaju objektivan i znanstveni pristup procjeni kvalitete videozapisa, temeljen na matematičkim modelima i algoritmima [20][21].

Jedna od često korištenih mjera u tu svrhu je maksimalni omjer signala i šuma (PSNR). PSNR mjeri razliku između originalnog nekomprimiranog videozapisa i komprimiranog videozapisa računajući srednju kvadratnu grešku (MSE) između njih. Što je veća vrijednost PSNR-a, manja je percepcijska distorzija u komprimiranom videozapisu. Druga često korištena mjera je strukturalni indeks sličnosti (SSIM), koji procjenjuje sličnost između originalnog i komprimiranog videozapisa na temelju luminancije, kontrasta i strukturnih informacija. SSIM pruža perceptualno relevantniju mjeru kvalitete videozapisa u usporedbi s PSNR-om. Mjera kvalitete (engl. Video Multi-Method Assessment Fusion, VMAF) kombinira nekoliko objektivnih mjera kvalitete kako bi pružila sveobuhvatniju evaluaciju. VMAF uzima u obzir prostorne i vremenske faktore, kao i ljudsku vizualnu percepciju, kako bi generirala ocjenu koja odražava ukupnu kvalitetu videozapisa [22].

Razmatrajući različite čimbenike poput razlika na razini piksela, izobličenja zbog kompresije, vremenskih i prostornih izobličenja, te modela vizualne percepcije, objektivne mjere kvalitete pružaju sveobuhvatnu analizu videosadržaja. Korištenjem objektivnih mjera, istraživači i inženjeri mogu objektivno usporediti različite videokodeke i odrediti njihovu prikladnost za određene primjene. To je posebno važno u području videokompresije, gdje je cilj postići visokokvalitetni videosadržaj uz minimalne zahtjeve za prijenos podataka. U tom kontekstu, važno je istaknuti PSNR-HVS, koji uzima u obzir ljudski vizualni sustav prilikom ocjenjivanja kvalitete slike, te CAMBI, koji mjeri izobličenja kontura nastalih zbog kvantizacije od kompresije na gladijim regijama slike [23].

Objektivne mjere kvalitete koje ćemo analizirati kroz praktični dio su: PSNR, PSNR-HVS [24], SSIM [25], MS-SSIM [26], CAMBI [27] i VMAF [28].

8. Komparativna analiza H.266/VVC i AV1

U području kompresije videozapisa, komparativna analiza između različitih kodeka igra ključnu ulogu u određivanju njihove izvedbe, učinkovitosti kompresije i kvalitete. Istraživanje ulazi u detalje tih kodeka, pružajući uvid u njihove respektivne prednosti i nedostatke. Istraživanje analizira različite mjere, poput brzine prijenosa, PSNR-a i vizualne kvalitete, kako bi procijenilo izvedbu tih kodeka.

Prema istraživanju od strane Topiwala, Krishnan i Dai [22], H.266/VVC postiže otprilike 50% veću učinkovitost kompresije u odnosu na H.265/HEVC, čineći ga obećavajućim konkurentom u krajoliku kodiranja videozapisa. S druge strane, AV1, besplatni videokodek razvijen od strane AOM saveza (engl. Alliance for Open Media), izazvao je značajno zanimanje zbog visoke učinkovitosti kompresije i otvorenog koda. Međutim, kada uspoređujemo izvedbu H.266/VVC i AV1, važno je napomenuti da oba kodeka imaju svoje prednosti i nedostatke. Dok H.266/VVC nudi poboljšanu učinkovitost kompresije, AV1 se ističe u smislu složenosti kodiranja, jer omogućuje paralelnu obradu i nudi brže vrijeme kodiranja. Stoga, izbor između H.266/VVC i AV1 u konačnici ovisi o specifičnim zahtjevima aplikacije i kompromisima između učinkovitosti kompresije i složenosti kodiranja.

Usporedba između H.266/VVC i AV1 kodeka otkrila je neka ključna saznanja. Obje su tehnologije pokazale značajna poboljšanja u učinkovitosti kompresije u usporedbi s njihovim prethodnicima, pri čemu je H.266/VVC pokazao veći potencijal za smanjenje brzine prijenosa i veličine datoteka. Međutim, AV1 se pokazao pristupačnijim i široko podržanim na različitim platformama i uređajima. Dok H.266/VVC nudi impresivna poboljšanja u kvaliteti, njegov model licenciranja može predstavljati izazove za široko usvajanje. Oba kodeka imaju potencijalnu primjenu u različitim domenama, uključujući prijenos videozapisa, videokonferencije i virtualnu stvarnost. Izbor između ovih kodeka će ovisiti o specifičnim zahtjevima i prioritetima, ali je jasno da su i H.266/VVC i AV1 obećavajuće opcije za poboljšanje kompresije i dostave videozapisa u digitalnom dobu.

9. Metodologija

U svrhu razumijevanja i procjene učinkovitosti različitih videokodeka, važno je definirati jasno strukturiran pristup koji će obuhvatiti sve aspekte analize i testiranja. Ovaj dio rada detaljno opisuje metodološki okvir korišten za evaluaciju kodeka, uključujući odabir testnih videozapisa, proces kompresije, odabrane mjere za procjenu kvalitete, te analitičke postupke korištene za interpretaciju rezultata.

Pristup metodologiji temelji se na stvaranju realističnih uvjeta koji repliciraju stvarne izazove s kojima se suočava industrija digitalnih medija, posebno u kontekstu sve veće potražnje za visokokvalitetnim videosadržajem. Proučavani kodeci, AOM-AV1 i VVenC, odabrani su zbog svojih naprednih mogućnosti kompresije, koji obećavaju smanjenje potrebnog prostora za pohranu i širine pojasa prijenosa, uz očuvanje visoke kvalitete videozapisa.

9.1. Uvod u praktični dio

U današnje vrijeme, s povećanom potražnjom za visokokvalitetnim videosadržajem, odabir prikladnog videokodeka postaje ključan za osiguravanje optimalne kvalitete uz minimalne zahtjeve za pohranom i prijenosom podataka. Ovaj praktični dio rada fokusiran je na detaljnu evaluaciju dvaju vodećih videokodeka, AOM-AV1 i VVenC, kako bi se utvrdilo koji od njih pruža bolje performanse u različitim scenarijima kompresije. Kroz niz pažljivo odabranih testnih videozapisa, istražuje se kako svaki kodek balansira između očuvanja kvalitete slike i efikasnosti kompresije pri različitim Internetskim prijenosima.

9.2. Odabir testnih videozapisa

Kako bi se osigurala sveobuhvatna analiza, odabrani su videozapisi koji predstavljaju širok raspon scenarija i vizualnih elemenata:

- **"River Bank"**: Ovaj videozapis prikazuje prirodni okoliš s puno detalja u vegetaciji, vodi i nebu. Ovaj videozapis je odabran kako bi se testirala sposobnost kodeka da očuva fine teksture i boje u prirodnim scenama.
- **"Race Night"**: Snimka s dinamičnim osvjetljenjem, brzim pokretima i kontrastima, namijenjena testiranju kako kodeci rukuju scenama s visokim dinamičkim rasponom i brzim promjenama u svjetlini.
- **"Flower Kids"**: Ovaj videozapis sadrži kombinaciju krupnih planova i detaljnih prikaza cvijeća i lica djece, te je odabran kako bi se procijenila sposobnost kodeka da očuva detalje u boji i teksturi u scenama s malim pokretima i visokim razinama detalja.

- **"City Alley"**: Prikaz urbanog okoliša s puno sjena, visokim kontrastima i složenom arhitekturom, odabran za testiranje kako kodeci analiziraju scenama s velikim rasponom svjetline i složenim geometrijskim oblicima.

Odabir ovih videozapisa omogućava analizu performansi kodeka u različitim uvjetima, što uključuje mirne i dinamične scene, svijetle i tamne kadrove, te raznolike teksture i boje.

9.3. Proces kompresije

Za svaki od odabranih videozapisa, primijenjena je kompresija korištenjem oba kodeka, AOM-AV1 i VVenC, pri pet različitih brzina prijenosa oko: 1000k, 2000k, 3000k, 4000k i 5000k za prve tri videosekvence, te oko: 150k, 250k, 350k, 460k i 590k za zadnju, "City Alley" videosekvencu. Razlog je takva krajnja brzina prijenosa kod AOM-AV1, zbog manje zahtjevne scene (pa je i VVenC postavljen na te iste brzine prijenosa zbog kasnije usporedbe). Ove brzine prijenosa odabrane su kako bi se ispitala sposobnost kodeka da održava kvalitetu slike pri različitim razinama kompresije, od niske do visoke kvalitete.

U ovom dijelu, detaljno su opisani korišteni postupci, uključujući specifične naredbe i parametre koji su upotrijebljeni za svaku kompresiju. Postupak kompresije je nadgledan kako bi se osiguralo da svi videozapisi budu podloženi istim uvjetima obrade, čime se osigurava pravedna usporedba između kodeka.

9.3.1. VVC kompresija (2-pass)

Za kompresiju pomoću VVenC kodeka korišten je dvoprolazni postupak, što znači da se videozapis najprije analizira u prvom prolazu, a zatim se kompresija optimizira u drugom prolazu. Ovaj pristup omogućuje bolju kontrolu nad kvalitetom slike i brzinom prijenosa. Naredbe korištene za ovaj postupak su:

Kodiranje za mjerenje PSNR (-subjopt 0):

Prvi prolaz (kod):

```
ffmpeg_vvceasy -f rawvideo -vcodec rawvideo -s 3840x2160 -r 50 -pix_fmt yuv420p10le -color_range tv -i RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv -c:v libvenc -preset slower -b:v 1000k -subjopt 0 -vvenc-params "passes=2:pass=1" -an -f null NUL
```

```
D:\Diplomski\3840x2160_10bit>ffmpeg_vvceasy -f rawvideo -vcodec rawvideo -s 3840x2160 -r 50 -pix_fmt yuv420p10le -color_range tv -i RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv -c:v libvenc -preset slower -b:v 1000k -subjopt 0 -vvenc-params "passes=2:pass=1" -an -f null NUL
```

Objašnjenje:

- **ffmpeg_vvceasy**: Korištenje posebne verzije FFmpeg alata optimizirane za VVC.

- **-f rawvideo -vcodec rawvideo:** Ulazni format je nekomprimirani videozapis, bez dodatne kompresije.
- **-s 3840x2160 -r 50:** Veličina slike je 3840x2160 (4K), a broj sličica u sekundi je 50.
- **-pix_fmt yuv420p10le:** Korištena je 10-bitna YUV420 struktura piksela s 4:2:0 poduzorkovanjem krominantnih komponenti
- **-color_range tv:** Korišten je zadani raspon boja u YCbCr ulaznoj videosekvenci.
- **libvenc:** Odabir VVC kodeka.
- **-preset slower:** Koristi sporiju, ali kvalitetniju metodu kompresije.
- **1000k:** Postavka brzine prijenosa na 1000 kbps.
- **-subjopt 0:** Isključuje subjektivne optimizacije kako bi se fokusirao na objektivne metrike.
- **-vvenc-params "passes=2**
- **=1":** Prvi prolaz dvoprolazne kompresije.
- **-an -f null NUL:** Ne koristi audio, a izlaz se ne zapisuje u datoteku, već se koristi za analizu.

Dobiveni izlazni rezultati:

```
D:\Diplomski\3840x2160_10bit>ffmpeg_vvceasy -f rawvideo -vcodec rawvideo -s 3840x2160 -r 50 -pix_fmt yuv420p10le -color_range tv -i RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv -c:v libvenc -preset slower -b:v 1000k -subjopt 0 -vvenc-params "passes=2:pass=1" -an -f null NUL
ffmpeg version git-2023-08-06-0a5b8c4-VVCEasy Copyright (c) 2000-2023 the FFmpeg developers
  built with gcc 12.2.0 (Rev11, Built by MSYS2 project)
  configuration: --enable-libfdk-aac --enable-static --enable-libvenc --enable-libvdec --enable-ia_mpeghe --enable-pic --enable-zlib --enable-libxml2 --enable-libdav1d --enable-libopus --enable-libcodecs2 --enable-libjxl --enable-libzimg --enable-libvmaf --enable-libsoxr --extra-ldexeflags=-static --pkg-config-flags=-static --disable-w32threads --enable-sdl2 --extra-version=VVCEasy
  libavutil      58. 13.101 / 58. 13.101
  libavcodec     60. 21.100 / 60. 21.100
  libavformat    60.  9.100 / 60.  9.100
  libavdevice    60.  2.100 / 60.  2.100
  libavfilter     9.  8.102 /  9.  8.102
  libswscale     7.  3.100 /  7.  3.100
  libswresample  4. 11.100 /  4. 11.100
[rawvideo @ 000002493341e9786] Estimating duration from bitrate, this may be inaccurate
Input #0: rawvideo, from 'RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv':
  Duration: 00:00:12.00, start: 0.000000, bitrate: 9953280 kb/s
  Stream #0:0: Video: rawvideo (Y3[11][10] / 0xA083359), yuv420p10le(tv), 3840x2160, 9953280 kb/s, 50 tbr, 50 tbn
Stream mapping:
  Stream #0:0 -> #0:0 (rawvideo (native) -> vvc (libvenc))
Press [q] to stop, [?] for help
Output #0, null, to 'NUL':
  Metadata:
    encoder      : Lavf60.9.100
  Stream #0:0: Video: vvc, yuv420p10le(tv, progressive), 3840x2160, q=2-31, 1000 kb/s, 50 fps, 50 tbn
  Metadata:
    encoder      : Lavc60.21.100 libvenc
[out#0/null @ 00000249359b34c8] video:0kB audio:0kB subtitle:0kB other streams:0kB global headers:0kB muxing overhead: unknown
[out#0/null @ 00000249359b34c8] Output file is empty, nothing was encoded(check -ss / -t / -frames parameters if used)
frame=  0 fps=0.0 q=0.0 Lsize=N/A time=-577014:32:22.77 bitrate=N/A speed=N/A
```

Drugi prolaz (kod):

```
ffmpeg_vvceasy -f rawvideo -vcodec rawvideo -s 3840x2160 -r 50 -pix_fmt yuv420p10le -color_range tv -i RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv -c:v libvenc -preset slower -b:v 1000k -subjopt 0 -vvenc-params "passes=2:pass=2" -an racenight_10bit_vvc_1000k_psnr.mp4
```

```
D:\Diplomski\3840x2160_10bit>ffmpeg_vvceasy -f rawvideo -vcodec rawvideo -s 3840x2160 -r 50 -pix_fmt yuv420p10le -color_range tv -i RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv -c:v libvenc -preset slower -b:v 1000k -subjopt 0 -vvenc-params "passes=2:pass=2" -an racenight_10bit_vvc_1000k_psnr.mp4
```

Objašnjenje:

- **-vvenc-params "passes=2**
- **=2":** Drugi prolaz dvoprolazne kompresije, koji koristi podatke iz prvog prolaza za optimizaciju kompresije.

- **-an racenight_10bit_vvc_1000k_psnr.mp4**: Rezultat drugog prolaza pohranjuje se kao .mp4 datoteka s brzinom prijenosa od 1000 kbps.

Dobiveni izlazni rezultati:

```
D:\Diplomski\3840x2160_10bit>ffmpeg -f rawvideo -vcodec rawvideo -s 3840x2160 -r 50 -pix_fmt yuv420p10le -color_range tv -i RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv -c:v libvenc -preset slower -b:v 1000k -subject 0 -venc-params "passes=2:pass=2" -an racenight_10bit_vvc_1000k_psnr.mp4
ffmpeg version git-2023-08-06-0a5b8e4-WCEasy Copyright (c) 2000-2023 the FFmpeg developers
built with gcc 12.2.0 (Rev11, Built by MSYS2 project)
configuration: --enable-libfdk-aac --enable-static --enable-libvenc --enable-libvdec --enable-ia_mpeghe --enable-pic --enable-zlib --enable-libxml2 --enable-libdav1d --enable-libopus --enable-libcodecs --enable-libjxl --enable-libzimg --enable-libvmaf --enable-libsoxr --extra-ldflags=-static --pkg-config-flags=-static --disable-w32threads --enable-sdl2 --extra-version=WCEasy
libavutil      58. 13.101 / 58. 13.101
libavcodec     60. 21.100 / 60. 21.100
libavformat    60.  9.100 / 60.  9.100
libavdevice    60.  2.100 / 60.  2.100
libavfilter     9.  8.102 /  9.  8.102
libswscale     7.  3.100 /  7.  3.100
libswresample  4. 11.100 /  4. 11.100
[rawvideo @ 000001f2196c9e40] Estimating duration from bitrate, this may be inaccurate
Input #0, rawvideo, from 'RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv':
  Duration: 00:00:12.00, start: 0.000000, bitrate: 9953280 kb/s
  Stream #0:0: Video: rawvideo (Y3[11][10] / 0xA0B3359), yuv420p10le(tv), 3840x2160, 9953280 kb/s, 50 tbr, 50 tbn
File 'racenight_10bit_vvc_1000k_psnr.mp4' already exists. Overwrite? [y/N] y
Stream mapping:
  Stream #0:0 -> #0:0 (rawvideo (native) -> vvc (libvenc))
Press [q] to stop, [?] for help
Output #0, mp4, to 'racenight_10bit_vvc_1000k_psnr.mp4':
  Metadata:
    encoder      : Lavf60.9.100
  Stream #0:0: Video: vvc (vvc1 / 0x31637676), yuv420p10le(tv, progressive), 3840x2160, q=2-31, 1000 kb/s, 50 fps, 12800 tbn
  Metadata:
    encoder      : Lavc60.21.100 libvenc
[out#0/mp4 @ 000001f21ae3f368] video:1473kB audio:0kB subtitle:0kB other streams:0kB global headers:0kB muxing overhead: 0.596264%
frame= 600 fps=0.1 q=0.0 Lsize=   1481kB time=00:00:11.88 bitrate=1021.6kbits/s speed=0.00197x
```

9.3.2. AOM-AV1 Kompresija (2-pass)

Slično kao i kod VVC kodeka, AOM-AV1 također koristi dvoprolazni postupak za optimizaciju kompresije, uz fokus na mjerenje PSNR vrijednosti.

Kodiranje za mjerenje PSNR (-tune psnr):

Prvi prolaz (kod):

```
ffmpeg -f rawvideo -vcodec rawvideo -s 3840x2160 -r 50 -pix_fmt yuv420p10le -color_range tv -i RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv -c:v libaom-av1 -tune psnr -b:v 1000k -pass 1 -an -f null NUL
```

```
D:\Diplomski\3840x2160_10bit>ffmpeg -f rawvideo -vcodec rawvideo -s 3840x2160 -r 50 -pix_fmt yuv420p10le -color_range tv -i RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv -c:v libaom-av1 -tune psnr -b:v 1000k -pass 1 -an -f null NUL
```

Objašnjenje:

- **ffmpeg**: Korištenje standardnog FFmpeg alata.
- **libaom-av1**: Odabir AOM-AV1 kodeka.
- **-tune psnr**: Optimizacija kompresije za maksimalni PSNR, mjeru koja ocjenjuje koliko je sačuvana kvaliteta slike.
- **1000k -pass 1**: Prvi prolaz dvoprolazne kompresije s brzinom prijenosa postavljenom na 1000 kbps.

Dobiveni izlazni rezultati:

```
D:\Diplomski\3840x2160_10bit>ffmpeg -f rawvideo -vcodec rawvideo -s 3840x2160 -r 50 -pix_fmt yuv420p10le -color_range tv -i RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv -c:v libaom-av1 -tune psnr -b:v 1000k -pass 1 -an -f null NUL
ffmpeg version 2024-04-25-g872bc55-full_build-www.gyan.dev Copyright (c) 2000-2024 the FFmpeg developers
built with gcc 13.2.0 (Rev5, Built by MSYS2 project)
configuration: --enable-gpl --enable-version3 --enable-static --disable-w32threads --disable-autodetect --enable-fontconfig --enable-iconv --enable-gnutls
--enable-lzma --enable-gmp --enable-bzlib --enable-lzma --enable-libsnpappy --enable-zlib --enable-librist --enable-lisrt --enable-libssh --enable-libzmq
--enable-avisynth --enable-libluray --enable-libcaca --enable-sdl2 --enable-libaribb24 --enable-libaribcaption --enable-libdav1d --enable-libdav2 --enab
le-libuavs3d --enable-libxvid --enable-libzvi --enable-librav1e --enable-libsvtav1 --enable-libwebp --enable-libx264 --enable-libx265 --enable-libxavs2 --e
nable-libxve --enable-libxvid --enable-libaom --enable-libjxl --enable-libopenjpeg --enable-libvpx --enable-mediafoundation --enable-libass --enable-frei0r
--enable-libfreetype --enable-libfridibi --enable-libharfbuzz --enable-liblensfun --enable-libvidstab --enable-libvmaf --enable-libzimg --enable-amf --enab
le-cuda-llvm --enable-cuvid --enable-dxva2 --enable-d3d11va --enable-d3d12va --enable-ffnvcodec --enable-libvpl --enable-nvdec --enable-nvenc --enable-vaapi
--enable-libshaderc --enable-vulkan --enable-libplacebo --enable-openc1 --enable-libcdio --enable-libgme --enable-libmodplug --enable-libopenmpt --enable-l
ibopencore-amrwb --enable-libmp3lame --enable-libshine --enable-libtheora --enable-libtwolame --enable-libvo-amrwbenc --enable-libcodec2 --enable-libilbc --
enable-libsmb --enable-libopencore-amrnb --enable-libopus --enable-libspeex --enable-libvorbis --enable-ladspa --enable-libs2b --enable-libflite --enable-l
ibmysofa --enable-librubberband --enable-libsoxr --enable-chromaprint
libavutil 59. 16.100 / 59. 16.100
libavcodec 61. 5.103 / 61. 5.103
libavformat 61. 3.100 / 61. 3.100
libavdevice 61. 2.100 / 61. 2.100
libavfilter 10. 2.101 / 10. 2.101
libswscale 8. 2.100 / 8. 2.100
libswresample 5. 2.100 / 5. 2.100
libpostproc 58. 2.100 / 58. 2.100
[rawvideo @ 0000029a0681d880] Estimating duration from bitrate, this may be inaccurate
Input #0, rawvideo, from 'RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv':
Duration: 00:00:12.00, start: 0.000000, bitrate: 9953280 kb/s
Stream #0:0: Video: rawvideo (Y3[11][10] / 0xA0B3359), yuv420p10le(tv), 3840x2160, 9953280 kb/s, 50 tbr, 50 tbn
Stream mapping:
Stream #0:0 -> #0:0 (rawvideo (native) -> av1 (libaom-av1))
Press [q] to stop, [?] for help
[libaom-av1 @ 0000029a0681d880] 3.8.2-413-gd6d79d5bcd
Output #0, null, to 'NUL':
Metadata:
encoder : Lavf61.3.100
Stream #0:0: Video: av1, yuv420p10le(tv, progressive), 3840x2160, q=2-31, 1000 kb/s, 50 fps, 50 tbn
Metadata:
encoder : Lavc61.5.103 libaom-av1
Side data:
cpb: bitrate max/min/avg: 0/0/1000000 buffer size: 0 vbv_delay: N/A
[out#0/null @ 0000029a0681d880] video:0KiB audio:0KiB subtitle:0KiB other streams:0KiB global headers:0KiB muxing overhead: unknown
[out#0/null @ 0000029a0681d880] Output file is empty, nothing was encoded
frame= 0 fps=0.0 q=0.0 Lsize=N/A time=N/A bitrate=N/A speed=N/A
```

Drugi prolaz:

```
ffmpeg -f rawvideo -vcodec rawvideo -s 3840x2160 -r 50 -pix_fmt yuv420p10le -color_range tv -i RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv -c:v libaom-av1 -tune psnr -b:v 1000k -pass 2 -an racenight_10bit_aom-av1_1000k_psnr.mp4
```

```
D:\Diplomski\3840x2160_10bit>ffmpeg -f rawvideo -vcodec rawvideo -s 3840x2160 -r 50 -pix_fmt yuv420p10le -color_range tv -i RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv -c:v libaom-av1 -tune psnr -b:v 1000k -pass 2 -an racenight_10bit_aom-av1_1000k_psnr.mp4
```

Objašnjenje:

- **-pass 2:** Drugi prolaz koji optimizira kompresiju temeljem prvog prolaza.
- **racenight_10bit_aom-av1_1000k_psnr.mp4:** Rezultat se pohranjuje u .mp4 datoteku s brzinom prijenosa od 1000 kbps.

Dobiveni izlazni rezultati:

```
D:\Diplomski\3840x2160_10bit>ffmpeg -f rawvideo -vcodec rawvideo -s 3840x2160 -r 50 -pix_fmt yuv420p10le -color_range tv -i RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv -c:v libaom-av1 -tune psnr -b:v 1000k -pass 2 -an racenight_10bit_aom-av1_1000k_psnr.mp4
ffmpeg version 2024-04-25-g872bc55-full_build-www.gyan.dev Copyright (c) 2000-2024 the FFmpeg developers
built with gcc 13.2.0 (Rev5, Built by MSYS2 project)
configuration: --enable-gpl --enable-version3 --enable-static --disable-w32threads --disable-autodetect --enable-fontconfig --enable-iconv --enable-gnutls
--enable-lzma --enable-gmp --enable-bzlib --enable-lzma --enable-libsnpappy --enable-zlib --enable-librist --enable-lisrt --enable-libssh --enable-libzmq
--enable-avisynth --enable-libluray --enable-libcaca --enable-sdl2 --enable-libaribb24 --enable-libaribcaption --enable-libdav1d --enable-libdav2 --enab
le-libuavs3d --enable-libxvid --enable-libzvi --enable-librav1e --enable-libsvtav1 --enable-libwebp --enable-libx264 --enable-libx265 --enable-libxavs2 --e
nable-libxve --enable-libxvid --enable-libaom --enable-libjxl --enable-libopenjpeg --enable-libvpx --enable-mediafoundation --enable-libass --enable-frei0r
--enable-libfreetype --enable-libfridibi --enable-libharfbuzz --enable-liblensfun --enable-libvidstab --enable-libvmaf --enable-libzimg --enable-amf --enab
le-cuda-llvm --enable-cuvid --enable-dxva2 --enable-d3d11va --enable-d3d12va --enable-ffnvcodec --enable-libvpl --enable-nvdec --enable-nvenc --enable-vaapi
--enable-libshaderc --enable-vulkan --enable-libplacebo --enable-openc1 --enable-libcdio --enable-libgme --enable-libmodplug --enable-libopenmpt --enable-l
ibopencore-amrwb --enable-libmp3lame --enable-libshine --enable-libtheora --enable-libtwolame --enable-libvo-amrwbenc --enable-libcodec2 --enable-libilbc --
enable-libsmb --enable-libopencore-amrnb --enable-libopus --enable-libspeex --enable-libvorbis --enable-ladspa --enable-libs2b --enable-libflite --enable-l
ibmysofa --enable-librubberband --enable-libsoxr --enable-chromaprint
libavutil 59. 16.100 / 59. 16.100
libavcodec 61. 5.103 / 61. 5.103
libavformat 61. 3.100 / 61. 3.100
libavdevice 61. 2.100 / 61. 2.100
libavfilter 10. 2.101 / 10. 2.101
libswscale 8. 2.100 / 8. 2.100
libswresample 5. 2.100 / 5. 2.100
libpostproc 58. 2.100 / 58. 2.100
[rawvideo @ 00000224537f1a00] Estimating duration from bitrate, this may be inaccurate
Input #0, rawvideo, from 'RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv':
Duration: 00:00:12.00, start: 0.000000, bitrate: 9953280 kb/s
Stream #0:0: Video: rawvideo (Y3[11][10] / 0xA0B3359), yuv420p10le(tv), 3840x2160, 9953280 kb/s, 50 tbr, 50 tbn
File 'racenight_10bit_aom-av1_1000k_psnr.mp4' already exists. Overwrite? [y/N] y
Stream mapping:
Stream #0:0 -> #0:0 (rawvideo (native) -> av1 (libaom-av1))
Press [q] to stop, [?] for help
[libaom-av1 @ 00000224537f1a00] 3.8.2-413-gd6d79d5bcd
Output #0, mp4, to 'racenight_10bit_aom-av1_1000k_psnr.mp4':
Metadata:
encoder : Lavf61.3.100
Stream #0:0: Video: av1 (av01 / 0x31307661), yuv420p10le(tv, progressive), 3840x2160, q=2-31, 1000 kb/s, 50 fps, 12800 tbn
Metadata:
encoder : Lavc61.5.103 libaom-av1
Side data:
cpb: bitrate max/min/avg: 0/0/1000000 buffer size: 0 vbv_delay: N/A
[out#0/mp4 @ 00000224537f1a00] video:0KiB audio:0KiB subtitle:0KiB other streams:0KiB global headers:0KiB muxing overhead: 0.137226%
frame= 600 fps=0.1 q=0.0 Lsize= 1454KiB time=00:00:12.00 bitrate= 992.4kbits/s speed=0.00192x
```

9.4. Mjere za procjenu kvalitete

Kako bi se osigurala temeljita evaluacija performansi kodeka, korišten je niz ključnih mjera implementiranih u FFmpeg:

- **PSNR-Y (Vršni omjer signala i šuma za luminantnu komponentu):** Mjeri koliko dobro kodek očuva svjetlosne informacije u slici. Veća vrijednost PSNR-Y ukazuje na manje gubitke kvalitete u svjetlini.
- **Float SSIM (Strukturna sličnost) i Float MS SSIM (Višeskalna strukturna sličnost):** Ove mjere računaju mjere sličnost između izvorne i komprimirane slike u smislu strukture, svjetline i kontrasta. Više vrijednosti ukazuju na bolju očuvanost vizualnih elemenata slike.
- **PSNR_HVS_Y (PSNR prilagođen ljudskom vizualnom sustavu - Luminancija):** Ova mjera uzima u obzir način na koji ljudsko oko percipira kvalitetu slike, pružajući subjektivniju procjenu kvalitete.
- **CAMBI (Indeks svjetline i kontrasta):** Mjera računa izobličenja kontura nastalih zbog kvantizacije od kompresije na glađim regijama slike. Niže vrijednosti ukazuju na bolje očuvanje ovih elemenata.
- **VMAF (Video Multi-Method Assessment Fusion):** Razvijena od strane Netflix-a, VMAF pruža sveobuhvatnu ocjenu percipirane kvalitete slike, kombinirajući različite aspekte vizualne kvalitete u jedinstvenu metodu ocjenjivanja.

Ove mjere pružaju sveobuhvatan pregled kvalitete kompresije, omogućujući detaljnu analizu performansi kodeka iz više perspektiva.

9.5. Analitički postupak

Nakon kompresije, uspoređene su izobličene datoteke s izvornim videozapisima kako bi se izračunale objektivne mjere kvalitete pomoću VMAF modela. Ovaj korak osigurava da se kvantificira koliko je kompresija utjecala na kvalitetu slike.

Kod za izračun objektivnih mjera:

Za VVenC:

```
ffmpeg_vvceasy -i racenight_10bit_vvc_1000k_psnr.mp4 -f rawvideo -vcodec rawvideo -s 3840x2160 -r 50 -pix_fmt yuv420p10le -color_range tv -i RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv -lavfi "libvmaf=model='version=vmaf_v0.6.1':feature='name=psnr|name=float_ssim|name=float_ms_ssim|name=psnr_hvs|name=cambi':log_fmt=csv:log_path='logs/log_racenight_10bit_vvc_1000k_psnr.csv'" -f null NUL
```

```
D:\Diplomski\3840x2160_10bit>ffmpeg_vvceasy -i racenight_10bit_vvc_1000k_psnr.mp4 -f rawvideo -vcodec rawvideo -s 3840x2160 -r 50 -pix_fmt yuv420p10le -color_range tv -i RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv -lavfi "libvmaf=model='version=vmaf_v0.6.1':feature='name=psnr|name=float_ssim|name=float_ms_ssim|name=psnr_hvs|name=cambi':log_fmt=csv:log_path='logs/log_racenight_10bit_vvc_1000k_psnr.csv'" -f null NUL
```

Objašnjenje:


```
ffmpeg -i racenight_10bit_aom-av1_1000k_psnr.mp4 -f rawvideo -vcodec rawvideo -s
3840x2160 -r 50 -pix_fmt yuv420p10le -color_range tv -i
RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv -lavfi
"libvmaf=model='version=vmaf_v0.6.1':feature='name=psnr|name=float_ssim|name=float_ms_
ssim|name=psnr_hvs|name=cambi':log_fmt=csv:log_path='logs/log_racenight_10bit_aom-
av1_1000k_psnr.csv'" -f null NUL
```

```
D:\Diplomski\3840x2160_10bit>ffmpeg -i racenight_10bit_aom-av1_1000k_psnr.mp4 -f rawvideo -vcodec rawvideo -s 3840x2160 -r 50 -pix_fmt yuv420p10le -color_ra
nge tv -i RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv -lavfi "libvmaf=model='version=vmaf_v0.6.1':feature='name=psnr|name=float_ssim|name=float_ms_ssim|name=psnr_hv
s|name=cambi':log_fmt=csv:log_path='logs/log_racenight_10bit_aom-av1_1000k_psnr.csv'" -f null NUL
```

Objašnjenje:

- Ovdje se koristi isti pristup kao i kod VVC kodeka, s tom razlikom što se rezultati pohranjuju u CSV datoteku za AOM-AV1 kodek.

Dobiveni izlazni rezultati:

```
D:\Diplomski\3840x2160_10bit>ffmpeg -i racenight_10bit_aom-av1_1000k_psnr.mp4 -f rawvideo -vcodec rawvideo -s 3840x2160 -r 50 -pix_fmt yuv420p10le -color_ra
nge tv -i RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv -lavfi "libvmaf=model='version=vmaf_v0.6.1':feature='name=psnr|name=float_ssim|name=float_ms_ssim|name=psnr_hv
s|name=cambi':log_fmt=csv:log_path='logs/log_racenight_10bit_aom-av1_1000k_psnr.csv'" -f null NUL
ffmpeg version 2024-04-25-git-caef2bc55-full_build-www.gyan.dev Copyright (c) 2000-2024 the FFmpeg developers
built with gcc 13.2.0 (Rev5, Built by MSYS2 project)
configuration: --enable-gpl --enable-version3 --enable-static --disable-w32threads --disable-autodetect --enable-fontconfig --enable-iconv --enable-gnutls
--enable-libxml2 --enable-gmp --enable-bzlib --enable-lzma --enable-libsnpappy --enable-zlib --enable-librist --enable-libsrt --enable-libssh --enable-libzmq
--enable-avisynth --enable-libbrotli --enable-libcaca --enable-sdl2 --enable-libaribb24 --enable-libaribcaption --enable-libdav1d --enable-libdav1d --enable-libdav1d --enab
libvmaf:default -> Stream #0:0 (wrapped_avframe)
libvmaf:default -> Stream #0:0 (wrapped_avframe)
Press [q] to stop, [?] for help
Output #0, null, to 'NUL':
Metadata:
  major_brand      : isom
  minor_version   : 512
  compatible_brands: isomav01iso2mp41
  encoder         : Lavf61.3.100
Stream #0:0: Video: wrapped_avframe, yuv420p10le(tv, progressive), 3840x2160 [SAR 1:1 DAR 16:9], q=2-31, 200 kb/s, 50 fps, 50 tbn
Metadata:
  encoder         : Lavc61.5.103 wrapped_avframe
[Parsed_Libvmaf_0 @ 000001db47b06a00] VMAF score: 58.458274e=N/A speed=0.00764x
[Out#0/null @ 000001db492f4b40] video:258KiB audio:0KiB subtitle:0KiB other streams:0KiB global headers:0KiB muxing overhead: unknown
frame= 600 fps=0.4 q=-0.0 Lsize=N/A time=00:00:12.00 bitrate=N/A speed=0.00765x
  major_brand      : isom
  minor_version   : 512
  compatible_brands: isomav01iso2mp41
  encoder         : Lavf61.3.100
Duration: 00:00:12.00, start: 0.000000, bitrate: 992 kb/s
Stream #0:0[0x1](und): Video: av1 (libdav1d) (Main) (av01 / 0x31307661), yuv420p10le(tv, progressive), 3840x2160, 990 kb/s, 50 fps, 50 tbr, 12800 tbn (def
ault)
Metadata:
  handler_name    : VideoHandler
  vendor_id       : [0][0][0][0]
  encoder         : Lavc61.5.103 libaom-av1
[rawvideo @ 000001db492f4b40] Estimating duration from bitrate, this may be inaccurate
Input #1, rawvideo, from 'RaceNight_3840x2160_50fps_10bit.yuv':
Duration: 00:00:12.00, start: 0.000000, bitrate: 9953280 kb/s
Stream #1:0: Video: rawvideo (Y3[11][10] / 0xA0B3359), yuv420p10le(tv), 3840x2160, 9953280 kb/s, 50 tbr, 50 tbn
Stream mapping:
  Stream #0:0 (libdav1d) -> libvmaf
  Stream #1:0 (rawvideo) -> libvmaf
libvmaf:default -> Stream #0:0 (wrapped_avframe)
Press [q] to stop, [?] for help
Output #0, null, to 'NUL':
Metadata:
  major_brand      : isom
  minor_version   : 512
  compatible_brands: isomav01iso2mp41
  encoder         : Lavf61.3.100
Stream #0:0: Video: wrapped_avframe, yuv420p10le(tv, progressive), 3840x2160 [SAR 1:1 DAR 16:9], q=2-31, 200 kb/s, 50 fps, 50 tbn
Metadata:
  encoder         : Lavc61.5.103 wrapped_avframe
[Parsed_Libvmaf_0 @ 000001db47b06a00] VMAF score: 58.458274e=N/A speed=0.00764x
[Out#0/null @ 000001db492f4b40] video:258KiB audio:0KiB subtitle:0KiB other streams:0KiB global headers:0KiB muxing overhead: unknown
frame= 600 fps=0.4 q=-0.0 Lsize=N/A time=00:00:12.00 bitrate=N/A speed=0.00765x
```

Kao krajnji rezultat smo isto dobili excel tablicu koja izgleda isto kao i ono prethodno prikazana samo sa drugim rezultatima.

Ove naredbe omogućile su detaljan i precizan proces kompresije te objektivno mjerenje kvalitete videozapisa kodiranih s VVenC i AOM-AV1 kodecima. Korištenjem dvoprolazne kompresije, postignuta je optimalna ravnoteža između kvalitete slike i efikasnosti kompresije. U prvom prolazu, videozapis se analizira kako bi se prikupile informacije o tome gdje su gubici podnošljiviji, a gdje je potrebno očuvati više detalja. Ove informacije se zatim koriste u drugom prolazu kako bi se maksimizirala kvaliteta pri zadanoj brzini prijenosa.

Pomoću VMAF modela, koji je široko prihvaćen kao standard za procjenu percipirane kvalitete videozapisa, dobili smo objektivne mjere koje omogućuju usporedbu performansi oba kodeka. Izračunati parametri kao što su PSNR, SSIM, MS-SSIM, PSNR-HVS i CAMBI omogućuju temeljitu analizu kako svaki kodek utječe na različitim aspektima kvalitete slike. Ovi rezultati su pohranjeni u CSV datotekama, što omogućuje jednostavnu analizu i usporedbu.

Sve ove mjere zajedno pružaju sveobuhvatan uvid u učinkovitost kodeka, omogućujući nam da donesemo zaključke o tome koji kodek bolje očuva kvalitetu slike u različitim uvjetima kompresije, kao i da preporučimo najprikladniji kodek za specifične primjene.

10. Rezultati analize i usporedbe kodeka

U ovom dijelu rada predstavljeni su rezultati detaljne analize i usporedbe performansi dva napredna videokodeka, AOM-AV1 i VVenC. Cilj analize bio je identificirati koji kodek nudi bolju kvalitetu slike pri različitim razinama kompresije, te kako se ta kvaliteta očituje kroz različite metrike. Korišteni su pažljivo odabrani videozapisi kako bi se osiguralo da analiza obuhvati širok spektar vizualnih karakteristika i scenarija, od prirodnih pejzaža do dinamičnih urbanih scena.

Svaka analiza se temelji na mjerenju i usporedbi ključnih metrika koje su bitne za procjenu kvalitete kompresije, kao što su PSNR-Y, SSIM, MS-SSIM, PSNR-HVS-Y, CAMBI, i VMAF. Ove metrike omogućuju detaljan uvid u to koliko su kodeci uspješni u očuvanju kvalitete slike i kako se percipirana kvaliteta mijenja ovisno o korištenoj brzini prijenosa.

10.1. Rezultati za „River Bank“

Videozapis "River Bank" odabran je kao prvi testni slučaj zbog svoje specifične kombinacije prirodnih elemenata i raznolikih tekstura, što predstavlja izazov za kompresiju. Kroz ovaj primjer, analiza fokusira na to kako se oba kodeka nose s očuvanjem kvalitete u scenama koje uključuju složene vizualne elemente. U tablici 10.1 su prikazane vrijednosti za ključne mjere pri različitim brzinama prijenosa, kao i grafički prikazi u nastavku koji ilustriraju trendove i razlike između kodeka.

kbit/s		psnr_y	float_ssim	float_ms_ssim	psnr_hvs	cambi	vmaf
1003	RiverBank_3840x2160_50fps_10bit_aom-av1_1000k_psnr	31.96519	0.9788326	0.945818162	29.87988	0.054673	51.57206
1975	RiverBank_3840x2160_50fps_10bit_aom-av1_2000k_psnr	33.38029	0.987156	0.963968887	31.93775	0.025117	62.61134
2993	RiverBank_3840x2160_50fps_10bit_aom-av1_3000k_psnr	34.31604	0.9908471	0.972480372	33.35576	0.016285	68.93686
3995	RiverBank_3840x2160_50fps_10bit_aom-av1_4000k_psnr	34.96632	0.9927533	0.97705633	34.37309	0.011488	72.86427
4989	RiverBank_3840x2160_50fps_10bit_aom-av1_5000k_psnr	35.51727	0.9941125	0.980266802	35.2789	0.009267	76.08148
1006	RiverBank_3840x2160_50fps_10bit_vvc_1000k_psnr	31.62479	0.9733579	0.932578822	29.34109	0.069953	49.80648
2009	RiverBank_3840x2160_50fps_10bit_vvc_2000k_psnr	33.12154	0.9853149	0.95682584	31.54045	0.040803	61.84695
3013	RiverBank_3840x2160_50fps_10bit_vvc_3000k_psnr	34.03642	0.9896672	0.96730678	32.92992	0.02742	68.0968
4013	RiverBank_3840x2160_50fps_10bit_vvc_4000k_psnr	34.74746	0.9921592	0.973387987	34.05959	0.021743	72.53334
5020	RiverBank_3840x2160_50fps_10bit_vvc_5000k_psnr	35.28753	0.9936037	0.9772207	34.93228	0.016754	75.58927

Tablica 10.1: Dobiveni rezultati kompresije videozapisa "River Bank" za kodeke AOM-AV1 i VVC

1. PSNR-Y (Vršni omjer signala i šuma za luminantnu komponentu)

- **AOM-AV1:** PSNR-Y raste od 31,96519 pri 1003 kbit/s do 35,51727 pri 4989 kbit/s, što pokazuje kontinuirano poboljšanje kvalitete slike s povećanjem brzina prijenosa. PSNR-Y je ključna mjera koja ocjenjuje očuvanje svjetline (luminantni detalji) slike nakon kompresije. Veće PSNR-Y vrijednosti sugeriraju bolju očuvanost detalja i smanjene gubitke informacija.

- **VVenC:** PSNR-Y za VVC kreće od 31,62479 pri 1006 kbit/s do 35,2875 pri 5020 kbit/s. Iako se kvaliteta slike poboljšava s rastom brzine prijenosa, VVC ne doseže razinu očuvanja detalja kao AOM-AV1.
- **Zaključak:** AOM-AV1 pokazuje bolje PSNR-Y vrijednosti na svim brzinama prijenosa, što sugerira bolju očuvanost luminantnih detalja u videozapisu, što rezultira vizualno kvalitetnijom slikom.

2. Float SSIM

- **AOM-AV1:** Vrijednosti SSIM-a kreću se od 0,9788326 pri 1003 kbit/s do 0,9941125 pri 4989 kbit/s, što pokazuje visoku strukturalnu sličnost između izvorne i komprimirane slike. Visoke vrijednosti SSIM-a ukazuju na minimalne promjene u strukturi slike, što je ključno za očuvanje vizualnog integriteta nakon kompresije.
- **VVenC:** SSIM vrijednosti za VVC kreću od 0,9733579 pri 1006 kbit/s do 0,9936037 pri 5020 kbit/s. Iako su vrijednosti visoke, AOM-AV1 još uvijek zadržava blagu prednost.
- **Zaključak:** AOM-AV1 kodek ima bolje SSIM vrijednosti, što ukazuje na bolju strukturalnu sličnost između izvorne i komprimirane slike.

3. Float MS SSIM

- **AOM-AV1:** MS SSIM raste od 0,945818162 pri 1003 kbit/s do 0,98026802 pri 4989 kbit/s. MS SSIM je proširenje SSIM-a koje uzima u obzir višeslojne detalje slike na različitim razinama rezolucije. Ova mjera omogućuje detaljniju analizu očuvanja strukture slike, što je posebno važno za prikazivanje na različitim veličinama ekrana i rezolucijama.
- **VVenC:** Vrijednosti za VVC kreću se od 0,932578822 pri 1006 kbit/s do 0,9772207 pri 5020 kbit/s. Iako VVC pokazuje poboljšanje s većom brzinom prijenosa, razlika u odnosu na AOM-AV1 sugerira da AOM-AV1 bolje očuva višeslojne detalje slike.
- **Zaključak:** AOM-AV1 pruža bolje rezultate u očuvanju višeskalnih detalja slike.

4. PSNR_HVS_Y

- **AOM-AV1:** PSNR-HVS prilagođen ljudskom vizualnom sustavu raste od 29,87988 pri 1003 kbit/s do 35,2789 pri 4989 kbit/s, što ukazuje na visok subjektivni dojam kvalitete slike, što je ključno za krajnje korisnike.
- **VVenC:** Vrijednosti za VVC kreću se od 29,34109 pri 1006 kbit/s do 34,93228 pri 5020 kbit/s, što je niže u odnosu na AOM-AV1. Njegove vrijednosti ostaju ispod onih koje postiže AOM-AV1.

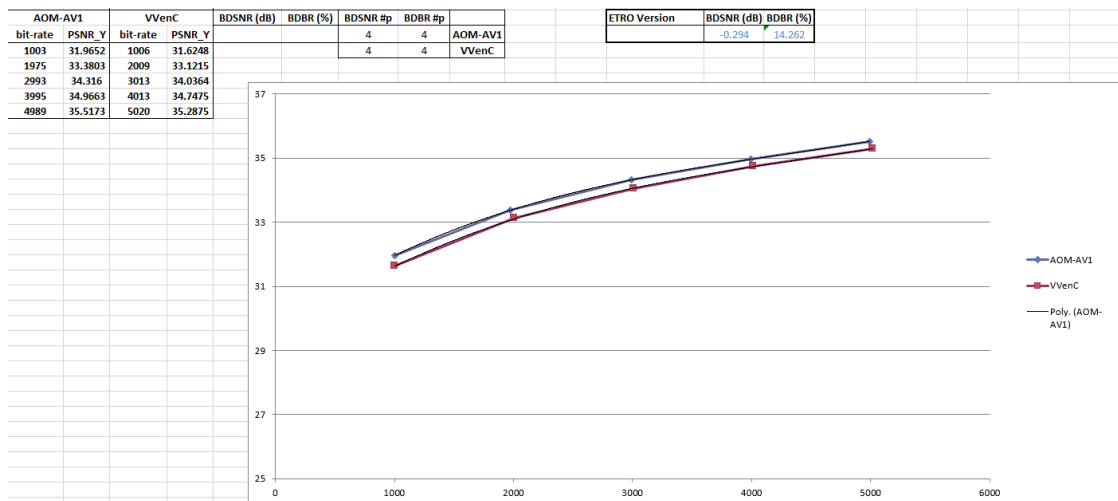
- **Zaključak:** AOM-AV1 pruža bolji subjektivni dojam kvalitete slike prema ovoj mjeri. Ovo je posebno važno u kontekstu masovne potrošnje multimedijских sadržaja gdje je korisničko iskustvo ključno.

5. CAMBI mjera

- **AOM-AV1:** Vrijednosti CAMBI kreću se od 0,054675 pri 1003 kbit/s do 0,009267 pri 4989 kbit/s, što ukazuje na vrlo dobro očuvanje kontrasta. Niže vrijednosti CAMBI ukazuju na bolje očuvanje kontrasta, što je ključno za vizualnu jasnoću i dinamičnost slike.
- **VVenC:** CAMBI za VVC također pokazuje smanjenje, ali ostaje na višim vrijednostima, od 0,054675 pri 1003 kbit/s do 0,009267 pri 4989 kbit/s. To sugerira da VVC kodek nešto lošije očuva kontrast u usporedbi s AOM-AV1.
- **Zaključak:** AOM-AV1 ima niže CAMBI vrijednosti na svim brzinama prijenosa, što ukazuje na bolje očuvanje kontrasta u videozapisu. Očuvanje kontrasta je ključno za aplikacije gdje je prikazivanje preciznih i jasnih slika od velikog značaja, kao što su sportski prijenosi i akcijski filmovi.

6. VMAF mjera

- **AOM-AV1:** Vrijednosti VMAF-a kreću se od 51,57206 pri 1003 kbit/s do 76,08148 pri 4989 kbit/s, što ukazuje na visoku percipiranu kvalitetu videozapisa. VMAF je kompozitna mjera razvijena od strane Netflix-a koja uzima u obzir različite aspekte kvalitete slike i pruža sveobuhvatnu ocjenu percipirane kvalitete videozapisa. Više VMAF vrijednosti ukazuju na bolju ukupnu kvalitetu koja je bliža izvorniku.
- **VVenC:** VMAF vrijednosti za VVC kreću se od 49,80648 pri 1006 kbit/s do 75,58927 pri 5020 kbit/s, što je nešto niže od AOM-AV1. To sugerira da korisnici percipiraju videozapis kodiran VVC kodekom kao manje kvalitetan u usporedbi s AOM-AV1.
- **Zaključak:** AOM-AV1 postiže bolje VMAF rezultate, što sugerira da će korisnici percipirati videozapis kodiran ovim kodekom kao kvalitetniji.

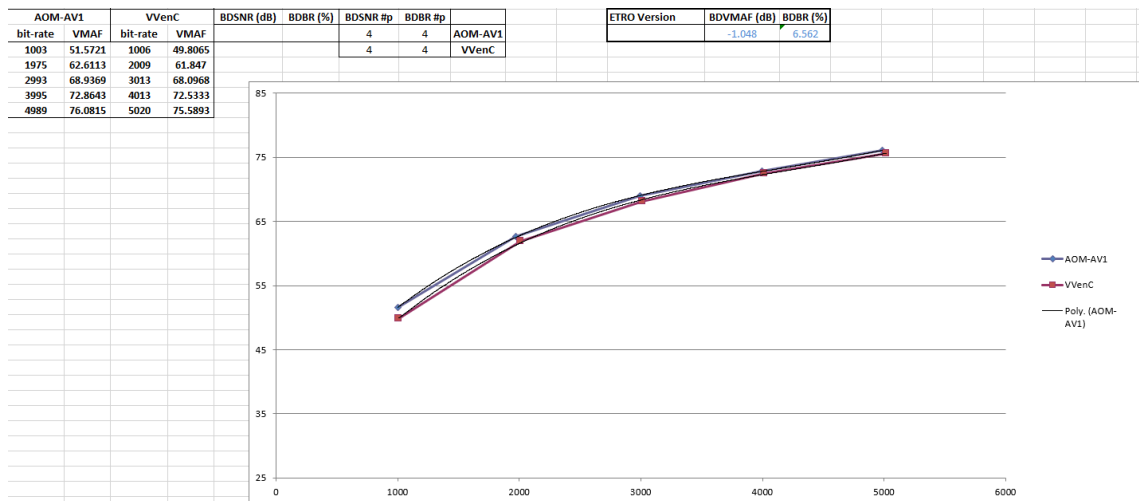


Slika 10.1: Grafički prikaz PSNR za „River Bank“

Na slici Slika 10.1 je grafički prikaz PSNR-a za "River Bank" te prikazuje usporedbu performansi dva video kodeka, AOM-AV1 i VVenC, na temelju PSNR_Y mjera pri različitim brzinama prijenosa. Grafički prikaz jasno pokazuje da AOM-AV1 kodek ima prednost nad VVenC kodekom u smislu očuvanja kvalitete slike pri različitim razinama brzine prijenosa. AOM-AV1 postiže bolje rezultate u svim mjerenjima PSNR-Y, dok također pokazuje veću učinkovitost kada se uspoređuju omjeri između kvalitete slike i brzine prijenosa podataka.

Gore desno na slici 10.1 u tablici prikazani su rezultati BDSNR (razlika u PSNR) i BD-BR (razlika u brzini prijenosa) između dva kodeka, gdje:

- BDSNR pokazuje razliku od -0,294 dB, što znači da AOM-AV1 pruža nešto bolju kvalitetu slike u usporedbi s VVenC pri istoj brzini prijenosa.
- BD-BR od 14,262% sugerira da VVenC zahtijeva veću brzinu prijenosa da bi postigao kvalitetu sličnu onoj koju postiže AOM-AV1.



Slika 10.2: Grafički prikaz VMAF za „River Bank“

Na slici 10.2 je grafički prikaz VMAF za „River Bank“ koji prikazuje usporedbu performansi dva video kodeka. Prema prikazanom VMAF grafičkom prikazu, može se zaključiti da AOM-AV1 kodek pruža nešto bolju percipiranu kvalitetu slike u usporedbi s VVenC kodekom na svim brzinama prijenosa. AOM-AV1 postiže bolje rezultate uz manji prijenos podataka, dok VVenC zahtijeva veće brzine prijenosa za postizanje slične razine kvalitete slike.

Vrijednost BDVMAF iznosi -1,048 dB, što znači da AOM-AV1 pruža nešto bolju percipiranu kvalitetu slike po jedinici brzine prijenosa u usporedbi s VVenC. Vrijednost BDBR iznosi 6,562%, što sugerira da VVenC zahtijeva približno 6,56% više brzine prijenosa da bi dostigao kvalitetu slike koju postiže AOM-AV1. Ova vrijednost pokazuje da je AOM-AV1 učinkovitiji u postizanju bolje kvalitete slike uz manju količinu podataka.

U nastavku će na slikama 10.3 i 10.4 biti prikazane VVenC razlike u istim kadrovima, te na slikama 10.5 i 10.6 AV1 razlike također u istim kadrovima.



Slika 10.3: „River Bank“; VVenC; 1000k



Slika 10.4: „River Bank“; VVenC; 5000k



Slika 10.5: „River Bank“; AV1; 1000k



Slika 10.6 „River Bank“; AV1; 5000k

10.1.1. Zaključak za kompresiju “River Bank”

Rezultati ove analize jasno pokazuju da AOM-AV1 kodek nadmašuje VVenC kodek u svim ključnim mjerama na svim brzinama prijenosa testiranim u ovoj studiji. PSNR-Y pokazuje da AOM-AV1 bolje očuva luminantne detalje, dok float_ssim i float_ms_ssim potvrđuju

superiornost AOM-AV1 u očuvanju strukturalnih elemenata slike i detalja. PSNR-HVS-Y dodatno naglašava da AOM-AV1 pruža bolju subjektivnu kvalitetu slike prema ljudskoj percepciji, dok niže CAMBI vrijednosti pokazuju da AOM-AV1 bolje očuva kontrast, što je ključno za vizualnu jasnoću slike. Konačno, VMAF vrijednosti, koje integriraju različite aspekte percipirane kvalitete, potvrđuju da je AOM-AV1 općenito bolji izbor za zadržavanje visoke kvalitete slike, što je posebno važno za aplikacije kao što su Internet prijenos, profesionalna videoprodukcija i emitiranje.

10.2. Rezultati za „Race Night“

Videozapis "Race Night" odabran je kao testni slučaj zbog svoje dinamične prirode i izazovnih uvjeta osvjjetljenja. Ovaj videozapis sadrži brze promjene svjetline, visok kontrast te brze pokrete, što predstavlja izazov za bilo koji kodek, posebno kada se radi o očuvanju kvalitete slike pri različitim brzinama prijenosa. U tablici 10.2 su prikazane vrijednosti za ključne mjere pri različitim brzinama prijenosa, kao i grafički prikazi u nastavku koji ilustriraju trendove i razlike između kodeka.

kbit/s		psnr_y	float_ssim	float_ms_ssim	psnr_hvs	cambi	vmaf
990	RaceNight_3840x2160_50fps_10bit_aom-av1_1000k_psnr	32.90246	0.9721404	0.9432004	30.48244	2.647991	58.45827
1796	RaceNight_3840x2160_50fps_10bit_aom-av1_2000k_psnr	34.42777	0.9841251	0.958208808	33.14079	2.639705	71.17769
2656	RaceNight_3840x2160_50fps_10bit_aom-av1_3000k_psnr	35.31385	0.9899713	0.965762743	34.87181	2.638241	78.97203
3509	RaceNight_3840x2160_50fps_10bit_aom-av1_4000k_psnr	35.83544	0.9927905	0.969899025	36.06447	2.547783	84.24813
4350	RaceNight_3840x2160_50fps_10bit_aom-av1_5000k_psnr	36.16534	0.9943887	0.972419672	36.92558	2.479151	87.98232
1005	RaceNight_3840x2160_50fps_10bit_vvc_1000k_psnr	33.41832	0.9744827	0.944548035	31.16009	2.014919	60.10328
2004	RaceNight_3840x2160_50fps_10bit_vvc_2000k_psnr	35.10089	0.9887733	0.96257818	34.24511	2.25909	76.61528
3000	RaceNight_3840x2160_50fps_10bit_vvc_3000k_psnr	35.81768	0.9928983	0.969080798	35.93781	2.160015	84.67468
4000	RaceNight_3840x2160_50fps_10bit_vvc_4000k_psnr	36.21795	0.9946857	0.97231997	37.04963	2.131455	89.35817
4998	RaceNight_3840x2160_50fps_10bit_vvc_5000k_psnr	36.46308	0.9956362	0.974216053	37.81822	2.107549	92.39609

Tablica 10.2: Dobiveni rezultati kompresije videozapisa "Race Night" za kodeke AOM-AV1 i VVC

1. PSNR-Y (Vršni omjer signala i šuma za luminantnu komponentu)

- **AOM-AV1:** Vrijednosti PSNR-Y kreću se od 32,90246 pri 990 kbit/s do 36,16534 pri 4350 kbit/s, što pokazuje kontinuirano poboljšanje kvalitete slike s povećanjem brzina prijenosa.
- **VVenC:** Vrijednosti PSNR-Y za VVC kreću se od 33,41832 pri 1005 kbit/s do 36,46308 pri 4998 kbit/s. Iako su vrijednosti visoke, AOM-AV1 pokazuje blagu prednost pri nižim brzinama prijenosa.
- **Zaključak:** VVC postiže više PSNR-Y vrijednosti na većim brzinama prijenosa, dok AOM-AV1 zadržava prednost pri nižim brzinama prijenosa.

2. Float SSIM

- **AOM-AV1:** Vrijednosti Float SSIM kreću se od 0,9721404 pri 990 kbit/s do 0,9943887 pri 4350 kbit/s, što pokazuje visoku strukturnu sličnost između izvorne i komprimirane slike.
- **VVenC:** Vrijednosti Float SSIM za VVC kreću se od 0,9744827 pri 1005 kbit/s do 0,9956362 pri 4998 kbit/s. VVC postiže nešto bolje rezultate u očuvanju strukturnih elemenata slike pri većim brzinama prijenosa.
- **Zaključak:** VVC pokazuje blagu prednost u Float SSIM pri višim brzinama prijenosa, dok je AOM-AV1 nešto bolji pri nižim brzinama prijenosa.

3. Float MS SSIM

- **AOM-AV1:** Vrijednosti Float MS SSIM kreću se od 0,9432004 pri 990 kbit/s do 0,972419672 pri 4350 kbit/s.
- **VVenC:** Vrijednosti za VVC kreću se od 0,94458035 pri 1005 kbit/s do 0,974216503 pri 4998 kbit/s. VVenC pokazuje bolje očuvanje višeslojne strukture slike na višim brzinama prijenosa.
- **Zaključak:** VVC pruža nešto bolje rezultate u očuvanju višeslojne strukture slike, posebno pri višim brzinama prijenosa.

4. PSNR_HVS_Y

- **AOM-AV1:** Vrijednosti PSNR-HVS_Y, prilagođene ljudskom vizualnom sustavu, kreću se od 30,48244 pri 990 kbit/s do 36,92558 pri 4350 kbit/s, što ukazuje na visok subjektivni dojam kvalitete slike.
- **VVenC:** Vrijednosti za VVC kreću se od 31,16009 pri 1005 kbit/s do 37,81822 pri 4998 kbit/s, što ukazuje na bolji subjektivni dojam pri višim brzinama prijenosa.
- **Zaključak:** VVC pokazuje nešto bolje rezultate u PSNR-HVS_Y na višim brzinama prijenosa, dok AOM-AV1 pruža konkurentne rezultate pri nižim brzinama prijenosa.

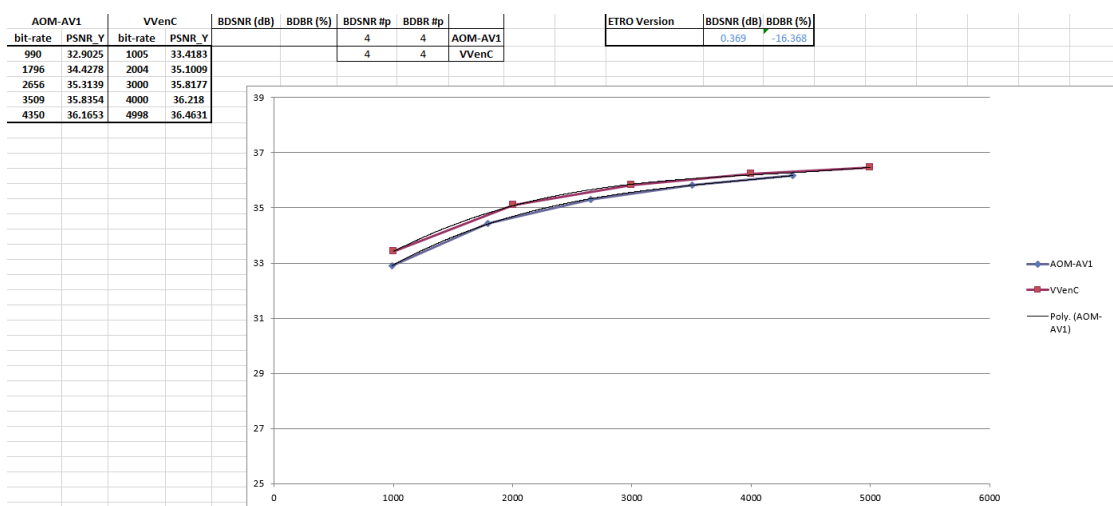
5. CAMBI mjera

- **AOM-AV1:** Vrijednosti CAMBI kreću se od 2,647991 pri 990 kbit/s do 2,479151 pri 4350 kbit/s, što ukazuje na stabilno očuvanje kontrasta slike, posebno pri višim brzinama prijenosa.
- **VVenC:** Vrijednosti CAMBI za VVC kreću se od 2,014919 pri 1005 kbit/s do 2,107549 pri 4998 kbit/s, što pokazuje nešto bolje očuvanje kontrasta na nižim brzinama prijenosa.

- **Zaključak:** VVC pokazuje nešto bolje očuvanje kontrasta na nižim brzinama prijenosa, dok AOM-AV1 osigurava stabilne rezultate na višim brzinama.

6. VMAF mjera

- **AOM-AV1:** Vrijednosti VMAF kreću se od 58,45827 pri 990 kbit/s do 87,98232 pri 4350 kbit/s, što ukazuje na visoku percipiranu kvalitetu videozapisa.
- **VVenC:** Vrijednosti VMAF za VVC kreću se od 60,10328 pri 1005 kbit/s do 92,39609 pri 4998 kbit/s, što ukazuje na poboljšanje percipirane kvalitete videozapisa, posebno pri višim brzinama prijenosa.
- **Zaključak:** VVenC pokazuje bolji rezultat u VMAF na višim brzinama prijenosa, dok AOM-AV1 osigurava visoku kvalitetu pri nižim brzinama.

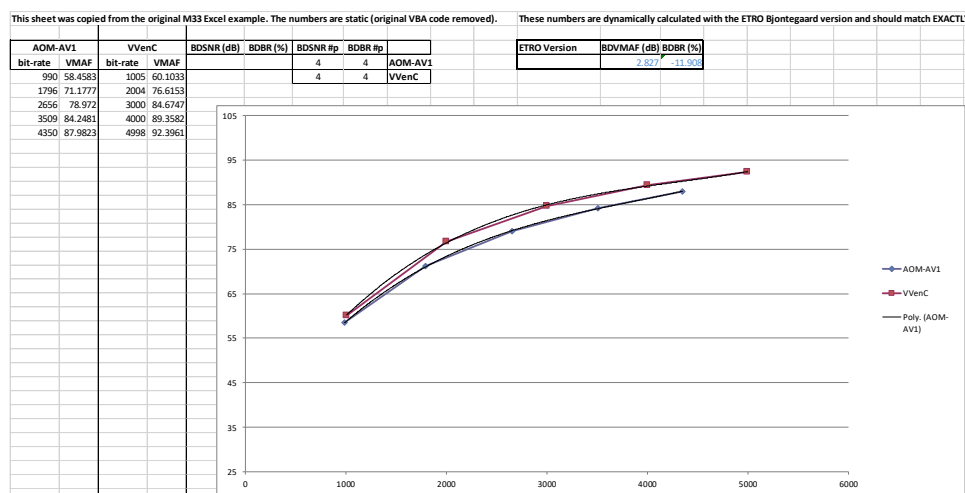


Slika 10.7: Grafički prikaz PSNR za „Race Night“

Na slici 10.7 prikazan je grafički prikaz PSNR-a za "Race Night", koji prikazuje usporedbu performansi dva videokodeka, AOM-AV1 i VVenC, na temelju PSNR_Y mjera pri različitim brzinama prijenosa. Graf jasno pokazuje da oba kodeka postižu vrlo slične rezultate, no VVenC pokazuje blagu prednost u očuvanju kvalitete slike pri višim brzinama prijenosa. Iako su AOM-AV1 i VVenC usporedivi u većini brzina prijenosa, na višim brzinama VVenC pokazuje blago poboljšanje u odnosu na AOM-AV1.

- BDSNR pokazuje razliku od 0,359 dB, što znači da VVenC pruža nešto bolju kvalitetu slike u usporedbi s AOM-AV1 pri istoj brzini prijenosa.

- BD-BR od -16,368% sugerira da AOM-AV1 zahtijeva manju brzinu prijenosa kako bi postigao sličnu kvalitetu slike kao VVenC, što ukazuje na veću efikasnost AOM-AV1 kodeka u kompresiji podataka pri nižim brzinama prijenosa.



Slika 10.8: Grafički prikaz VMAF za „Race Night“

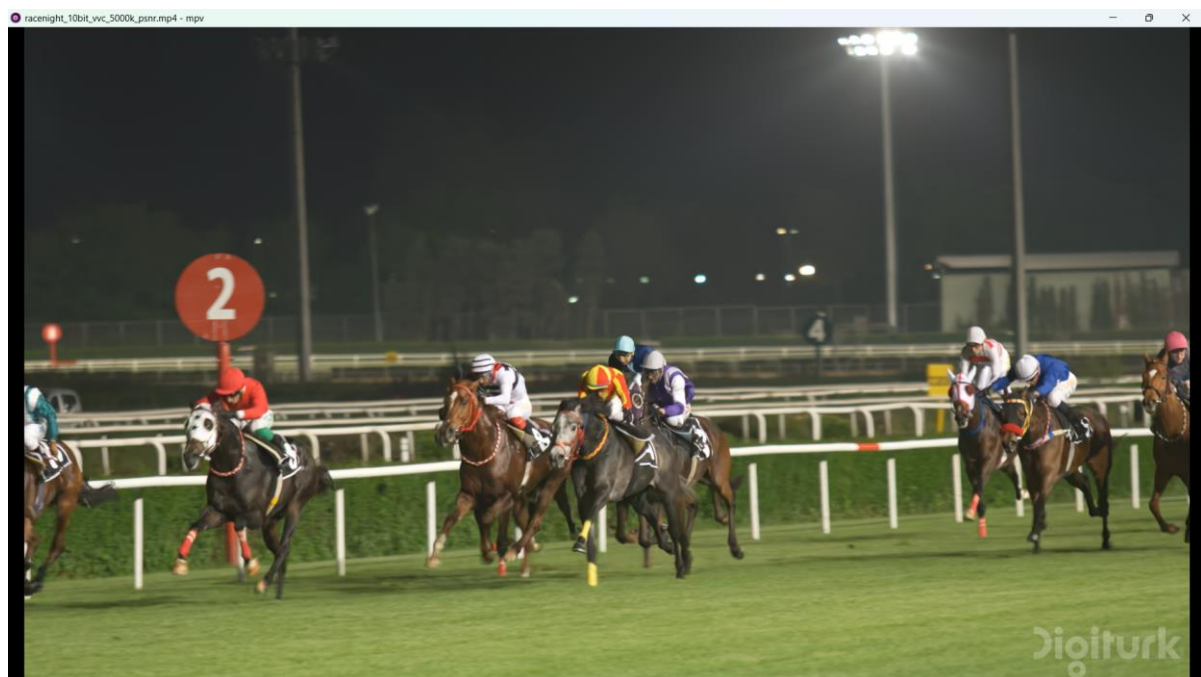
Prema prikazanom na slici 10.8 VMAF grafičkom prikazu, može se zaključiti da VVenC kodek pruža nešto bolju percipiranu kvalitetu slike u usporedbi s AOM-AV1 kodekom na većim brzinama prijenosa. VVenC postiže bolje rezultate uz veće brzine prijenosa, dok AOM-AV1 pokazuje konkurentne rezultate pri nižim brzinama prijenosa.

Vrijednost BDVMAF iznosi 2,827 dB, što znači da VVenC pruža nešto bolju percipiranu kvalitetu slike po jedinici brzine prijenosa u usporedbi s AOM-AV1. Vrijednost BDBR iznosi -11,908%, što sugerira da AOM-AV1 zahtijeva približno 11,91% manje brzine prijenosa da bi dostigao sličnu kvalitetu slike koju postiže VVenC. Ova vrijednost pokazuje da je AOM-AV1 učinkovitiji u postizanju percipirane kvalitete slike uz manju količinu podataka, osobito pri nižim brzinama prijenosa.

U nastavku će na slikama 10.9 i 10.10 biti prikazane VVenC razlike u istim kadrovima, te na slikama 10.11 i 10.12 AV1 razlike također u istim kadrovima.



Slika 10.9: „Race Night“; VVenC; 1000k



Slika 10.10: „Race Night“; VVenC; 5000k



Slika 10.11: „Race Night“; AV1; 1000k



Slika 10.12: „Race Night“; AV1; 5000k

10.2.1. Zaključak za kompresiju „Race Night“

Kompresija videozapisa "Race Night" pokazala je da VVenC kodek ima blagu prednost u percipiranoj kvaliteti slike, osobito na višim brzinama prijenosa, dok AOM-AV1 pokazuje veću učinkovitost pri nižim brzinama prijenosa, pružajući solidnu kvalitetu slike uz manju količinu

podataka. VVenC postiže bolje rezultate u očuvanju kontrasta, dok AOM-AV1 bolje očuva višeslojne detalje i strukturnu sličnost slike.

10.3. Rezultati za „Flower Kids“

Videozapis "Flower Kids" odabran je zbog svoje specifične kombinacije boja, tekstura i emocionalno nabijenih scena koje uključuju krupne planove lica i detaljne prikaze cvijeća. Ovaj videozapis predstavlja izazov za kompresiju zbog visoke razine detalja i bogatih boja koje je potrebno očuvati kako bi se zadržala vizualna kvaliteta. U tablici 10.3 su prikazane vrijednosti za ključne mjere pri različitim brzinama prijenosa, kao i grafički prikazi u nastavku koji ilustriraju trendove i razlike između kodeka.

kbit/s		psnr_y	float_ssim	float_ms_ssim	psnr_hvs	cambi	vmaf
991	FlowerKids_3840x2160_50fps_10bit_aom-av1_1000k_psnr	36.13209	0.9833041	0.968278945	32.91647	0.406627	66.50921
1983	FlowerKids_3840x2160_50fps_10bit_aom-av1_2000k_psnr	38.37667	0.991891	0.98125924	36.2302	0.323092	80.74616
2966	FlowerKids_3840x2160_50fps_10bit_aom-av1_3000k_psnr	39.50464	0.9946924	0.985876205	38.19983	0.287215	86.75601
3948	FlowerKids_3840x2160_50fps_10bit_aom-av1_4000k_psnr	40.2055	0.996071	0.98824918	39.58272	0.264906	90.19282
4937	FlowerKids_3840x2160_50fps_10bit_aom-av1_5000k_psnr	40.71541	0.996938	0.989765708	40.68646	0.249118	92.64187
1003	FlowerKids_3840x2160_50fps_10bit_vvc_1000k_psnr	35.87713	0.9823087	0.965606188	32.60946	0.242679	64.21279
1998	FlowerKids_3840x2160_50fps_10bit_vvc_2000k_psnr	38.36921	0.9923336	0.980968047	36.17071	0.300344	80.61266
2986	FlowerKids_3840x2160_50fps_10bit_vvc_3000k_psnr	39.59745	0.9953123	0.986126515	38.29764	0.299032	87.39211
3975	FlowerKids_3840x2160_50fps_10bit_vvc_4000k_psnr	40.36122	0.9967061	0.98874113	39.81072	0.282912	91.24842
4960	FlowerKids_3840x2160_50fps_10bit_vvc_5000k_psnr	40.87392	0.9974617	0.990256103	40.95422	0.264528	93.56526

Tablica 10.3: Dobiveni rezultati kompresije videozapisa "Flower Kids" za kodeke AOM-AV1 i VVC

1. PSNR-Y (Vršni omjer signala i šuma za luminantnu komponentu)

- **AOM-AV1:** Vrijednosti PSNR-Y kreću se od 36,13209 pri 991 kbit/s do 40,71541 pri 4937 kbit/s, što pokazuje kontinuirano poboljšanje kvalitete slike s povećanjem brzina prijenosa.
- **VVenC:** Vrijednosti PSNR-Y za VVC kreću se od 35,87713 pri 1003 kbit/s do 40,87392 pri 4960 kbit/s. Iako su vrijednosti visoke, **AOM-AV1** pokazuje blagu prednost pri nižim brzinama prijenosa.
- **Zaključak:** VVC postiže više PSNR-Y vrijednosti na većim brzinama prijenosa, dok AOM-AV1 zadržava prednost pri nižim brzinama prijenosa.

2. Float SSIM

- **AOM-AV1:** Vrijednosti Float SSIM kreću se od 0,9833041 pri 991 kbit/s do 0,996938 pri 4937 kbit/s, što pokazuje visoku strukturnu sličnost između izvorne i komprimirane slike.

- **VVenC:** Vrijednosti Float SSIM za VVC kreću se od 0,9823087 pri 1003 kbit/s do 0,9974617 pri 4960 kbit/s. VVC postiže nešto bolje rezultate u očuvanju strukturnih elemenata slike pri većim brzinama prijenosa.
- **Zaključak:** VVC pokazuje blagu prednost u Float SSIM pri višim brzinama prijenosa, dok je AOM-AV1 nešto bolji pri nižim brzinama.

3. Float MS SSIM

- **AOM-AV1:** Vrijednosti Float MS SSIM kreću se od 0,968278945 pri 991 kbit/s do 0,9897508 pri 4937 kbit/s.
- **VVenC:** Vrijednosti za VVC kreću se od 0,965606188 pri 1003 kbit/s do 0,9902563 pri 4960 kbit/s. VVenC pokazuje bolje očuvanje višeslojne strukture slike na višim brzinama prijenosa.
- **Zaključak:** VVC pruža nešto bolje rezultate u očuvanju višeslojne strukture slike, posebno pri višim brzinama prijenosa.

4. PSNR_HVS_Y

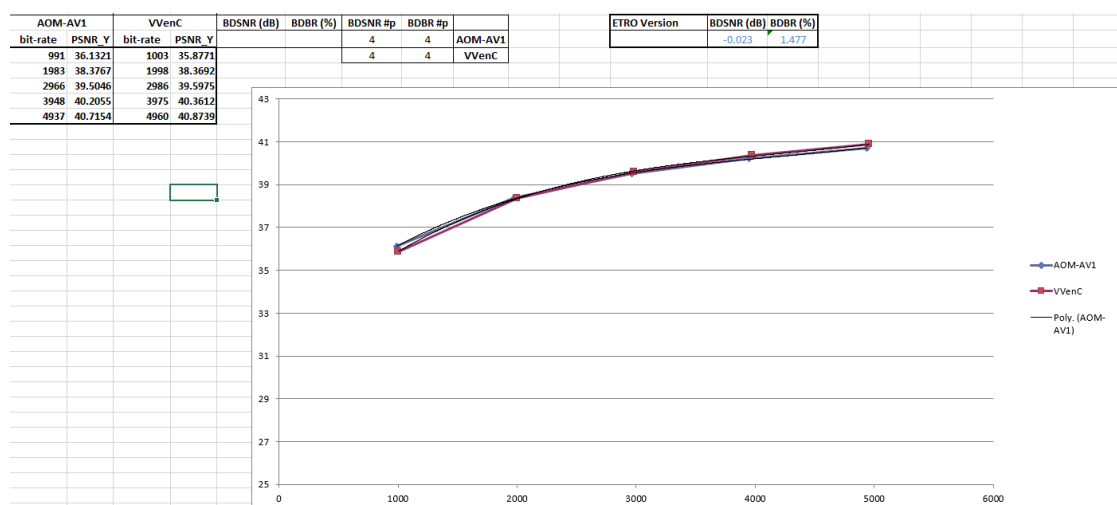
- **AOM-AV1:** Vrijednosti PSNR-HVS_Y, prilagođene ljudskom vizualnom sustavu, kreću se od 32,91647 pri 991 kbit/s do 40,68646 pri 4937 kbit/s, što ukazuje na visok subjektivni dojam kvalitete slike.
- **VVenC:** Vrijednosti za VVC kreću se od 32,60946 pri 1003 kbit/s do 40,95422 pri 4960 kbit/s, što ukazuje na bolji subjektivni dojam pri višim brzinama prijenosa.
- **Zaključak:** VVC pokazuje nešto bolje rezultate u PSNR-HVS_Y na višim brzinama prijenosa, dok AOM-AV1 pruža konkurentne rezultate pri nižim brzinama.

5. CAMBI mjera

- **AOM-AV1:** Vrijednosti CAMBI kreću se od 0,406627 pri 991 kbit/s do 0,249118 pri 4937 kbit/s, što ukazuje na stabilno očuvanje kontrasta slike, posebno pri višim brzinama prijenosa.
- **VVenC:** Vrijednosti CAMBI za VVC kreću se od 0,242679 pri 1003 kbit/s do 0,264528 pri 4960 kbit/s, što pokazuje nešto bolje očuvanje kontrasta na nižim brzinama prijenosa.
- **Zaključak:** VVC pokazuje nešto bolje očuvanje kontrasta na nižim brzinama prijenosa, dok AOM-AV1 osigurava stabilne rezultate na višim brzinama.

6. VMAF mjera

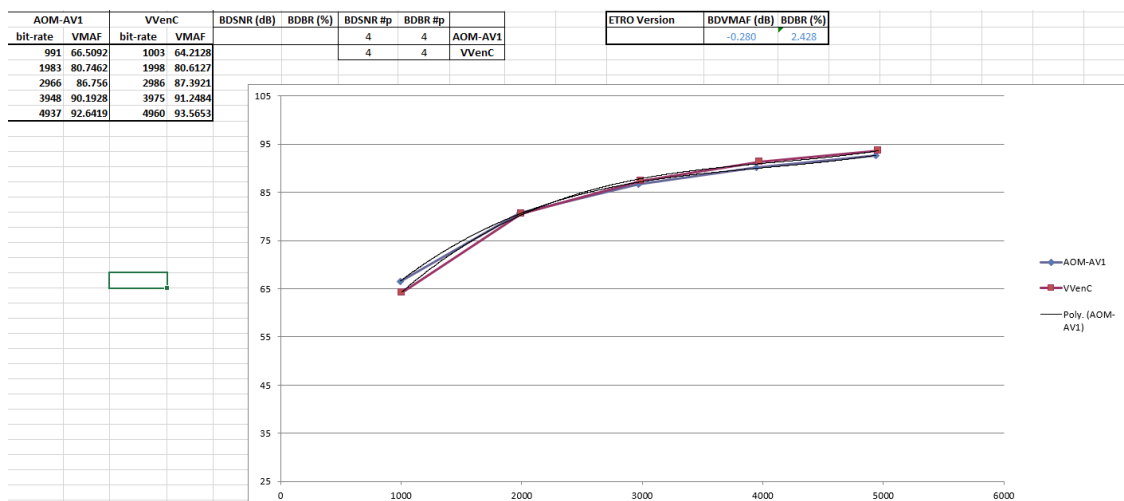
- **AOM-AV1:** Vrijednosti VMAF kreću se od 66,50921 pri 991 kbit/s do 92,64187 pri 4937 kbit/s, što ukazuje na visoku percipiranu kvalitetu videozapisa.
- **VVenC:** Vrijednosti VMAF za VVC kreću se od 64,21279 pri 1003 kbit/s do 93,56526 pri 4960 kbit/s, što ukazuje na poboljšanje percipirane kvalitete videozapisa, posebno pri višim brzinama prijenosa.
- **Zaključak:** VVenC pokazuje bolji rezultat u VMAF na višim brzinama prijenosa, dok AOM-AV1 osigurava visoku kvalitetu pri nižim brzinama.



Slika 10.13: Grafički prikaz PSNR za „Flower Kids“

Na slici 10.13 prikazan je grafički prikaz PSNR-a za "Flower Kids", koji prikazuje usporedbu performansi dva videokodeka, AOM-AV1 i VVenC, na temelju PSNR_Y mjera pri različitim brzinama prijenosa. Graf pokazuje da oba kodeka postižu vrlo slične rezultate u većini brzina prijenosa, no VVenC pokazuje blagu prednost u očuvanju kvalitete slike pri većim brzinama prijenosa.

- BDSNR pokazuje razliku od -0,023 dB, što znači da AOM-AV1 pruža nešto bolju kvalitetu slike u usporedbi s VVenC pri istoj brzini prijenosa.
- BD-BR od 1,477% sugerira da VVenC zahtijeva nešto veću brzinu prijenosa kako bi postigao sličnu kvalitetu slike kao AOM-AV1, što ukazuje na veću efikasnost AOM-AV1 kodeka u kompresiji podataka pri nižim brzinama prijenosa.



Slika 10.14: Grafički prikaz VMAF za „Flower Kids“

Prema prikazanom na slici 10.14, može se zaključiti da VVenC kodek pruža nešto bolju percipiranu kvalitetu slike u usporedbi s AOM-AV1 kodekom na većim brzinama prijenosa. VVenC postiže bolje rezultate uz veće brzine prijenosa, dok AOM-AV1 pokazuje konkurentne rezultate pri nižim brzinama prijenosa.

Vrijednost BDVMAF iznosi -0,280 dB, što znači da AOM-AV1 pruža nešto bolju percipiranu kvalitetu slike po jedinici brzine prijenosa u usporedbi s VVenC. Vrijednost BDBR iznosi 2,428%, što sugerira da VVenC zahtijeva približno 2,43% više razine prijenosa da bi dostigao sličnu kvalitetu slike koju postiže AOM-AV1. Ova vrijednost pokazuje da je AOM-AV1 učinkovitiji u postizanju percipirane kvalitete slike uz manju količinu podataka, osobito pri nižim brzinama prijenosa.

U nastavku će na slikama 10.15 i 10.16 biti prikazane VVenC razlike u istim kadrovima, te na slikama 10.17 i 10.18 AV1 razlike također u istim kadrovima.



Slika 10.15: „Flower Kids“; VVenC; 1000k



Slika 10.16: „Flower Kids“; VVenC; 5000k



Slika 10.17: „Flower Kids“; AV1; 1000k



Slika 10.18: „Flower Kids“; AV1; 5000k

10.3.1. Zaključak za kompresiju „Flower Kids“

Kompresija videozapisa "Flower Kids" pokazuje da su oba kodeka, AOM-AV1 i VVenC, vrlo bliska po performansama, s blagom prednošću VVenC pri većim brzinama prijenosa. VVenC postiže bolje rezultate u očuvanju strukture i kontrasta slike na višim brzinama, dok AOM-AV1 pruža konkurentne rezultate uz manju količinu podataka.

10.4. Rezultati za „City Alley“

Videozapis "City Alley" predstavlja jedinstvenu vrstu izazova za videokodeke zbog svoje urbane tematike koja uključuje složene geometrijske oblike, intenzivne kontraste i igre svjetla i sjene. Scena obiluje detaljima poput zgrada, ulica i sjena koje stvaraju dinamične promjene u svjetlini, čineći kompresiju zahtjevnijom, posebno pri nižim brzinama prijenosa. U tablici 10.4 su prikazane vrijednosti za ključne mjere pri različitim brzinama prijenosa, kao i grafički prikazi u nastavku koji ilustriraju trendove i razlike između kodeka.

kbit/s		psnr_y	float_ssim	float_ms_ssim	psnr_hvs_y	cambi	vmaf
151	CityAlley_3840x2160_50fps_10bit_aom-av1_1000k	39.92314	0.995964842	0.984970825	39.9313062	0.922478	90.43113
247	CityAlley_3840x2160_50fps_10bit_aom-av1_2000k	40.80647	0.997736607	0.988721237	41.9952321	0.913861	94.06702
347	CityAlley_3840x2160_50fps_10bit_aom-av1_3000k	41.19472	0.998371518	0.990200087	43.0341398	0.8398	95.32635
459	CityAlley_3840x2160_50fps_10bit_aom-av1_4000k	41.42024	0.998673197	0.990965322	43.6433988	0.78948	95.98204
587	CityAlley_3840x2160_50fps_10bit_aom-av1_5000k	41.57058	0.998846287	0.991441832	44.0527843	0.741263	96.33295
157	CityAlley_3840x2160_50fps_10bit_vvc_151k_psnr	35.99647	0.976405293	0.956073033	32.8169604	0.908147	64.67123
250	CityAlley_3840x2160_50fps_10bit_vvc_247k_psnr	37.55342	0.986783122	0.969919578	35.2732225	1.011602	75.74462
348	CityAlley_3840x2160_50fps_10bit_vvc_347k_psnr	38.53552	0.991372103	0.976916325	37.0446949	0.967341	82.08347
455	CityAlley_3840x2160_50fps_10bit_vvc_459k_psnr	39.36564	0.994618277	0.982148692	38.6219494	0.980007	87.09381
579	CityAlley_3840x2160_50fps_10bit_vvc_587k_psnr	39.9144	0.996080487	0.984937987	39.8356785	0.922686	89.79873

Tablica 10.4: Dobiveni rezultati kompresije videozapisa "City Alleyt" za kodeke AOM-AV1 i VVC

1. PSNR-Y (Vršni omjer signala i šuma za luminantnu komponentu)

- **AOM-AV1:** Vrijednosti PSNR-Y kreću se od 39,92314 pri 151 kbit/s do 41,57058 pri 587 kbit/s, što pokazuje kontinuirano poboljšanje kvalitete slike s povećanjem brzina prijenosa.
- **VVenC:** Vrijednosti PSNR-Y za VVC kreću se od 35,99647 pri 157 kbit/s do 39,9144 pri 579 kbit/s.
- **Zaključak:** AOM-AV1 postiže bolje PSNR-Y vrijednosti u svim usporedivim brzinama, što znači da zadržava bolju kvalitetu slike, čak i pri nižim brzinama prijenosa u usporedbi s VVenC.

2. Float SSIM

- **AOM-AV1:** Vrijednosti Float SSIM kreću se od 0,9959468 pri 151 kbit/s do 0,9988463 pri 587 kbit/s, što pokazuje visoku strukturnu sličnost između izvorne i komprimirane slike.
- **VVenC:** Vrijednosti Float SSIM za VVC kreću se od 0,9764053 pri 157 kbit/s do 0,9960805 pri 579 kbit/s.
- **Zaključak:** VVenC pokazuje blagu prednost u Float SSIM pri višim brzinama prijenosa, dok je AOM-AV1 nešto bolji pri nižim brzinama.

3. Float MS SSIM

- **AOM-AV1:** Vrijednosti Float MS SSIM kreću se od 0,98497825 pri 151 kbit/s do 0,991441832 pri 587 kbit/s.
- **VVenC:** Vrijednosti Float MS SSIM za VVC kreću se od 0,956073033 pri 157 kbit/s do 0,984937987 pri 579 kbit/s.
- **Zaključak:** AOM-AV1 bolje očuva višeslojnu strukturu slike na svim brzinama prijenosa, dok VVenC pokazuje poboljšanja, ali zaostaje u odnosu na AOM-AV1.

4. PSNR_HVS_Y

- **AOM-AV1:** Vrijednosti PSNR-HVS-Y, prilagođene ljudskom vizualnom sustavu, kreću se od 39,9313062 pri 151 kbit/s do 44,0527843 pri 587 kbit/s, što ukazuje na visok subjektivni dojam kvalitete slike.
- **VVenC:** Vrijednosti PSNR-HVS-Y za VVC kreću se od 32,8169604 pri 157 kbit/s do 39,8356785 pri 579 kbit/s.
- **Zaključak:** AOM-AV1 jasno nadmašuje VVenC u PSNR-HVS_Y, posebno pri višim brzinama prijenosa, pružajući bolji subjektivni dojam kvalitete slike.

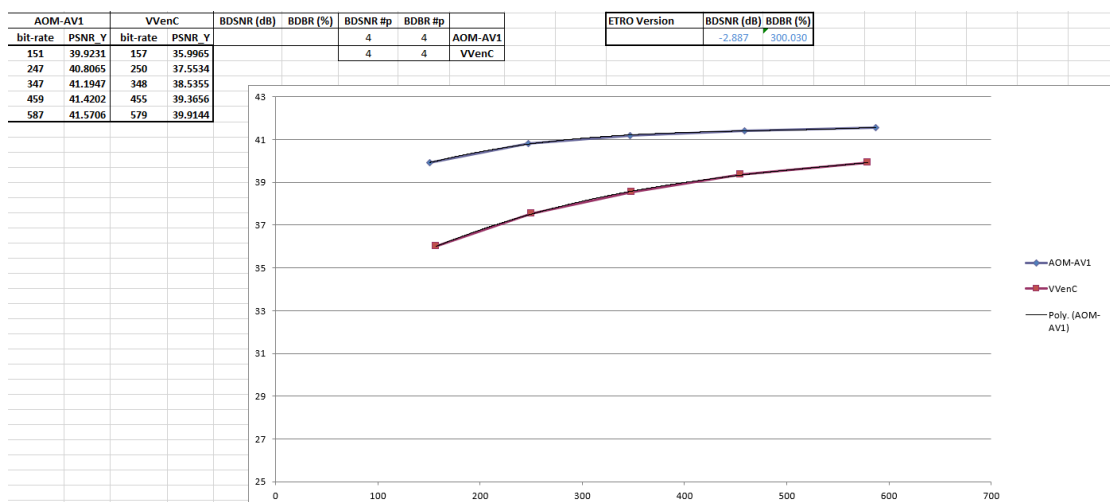
5. CAMBI mjera

- **AOM-AV1:** Vrijednosti CAMBI kreću se od 0,922478 pri 151 kbit/s do 0,741263 pri 587 kbit/s, što ukazuje na stabilno očuvanje kontrasta slike, posebno pri višim brzinama prijenosa.
- **VVenC:** Vrijednosti CAMBI za VVC rastu s 0,908147 pri 157 kbit/s do 0,922686 pri 579 kbit/s, što znači da se očuvanje kontrasta pogoršava s povećanjem brzine prijenosa, za razliku od AOM-AV1.
- **Zaključak:** AOM-AV1 osigurava značajno bolje očuvanje kontrasta pri svim brzinama prijenosa, dok VVenC pokazuje pogoršanje očuvanja kontrasta pri većim brzinama.

6. VMAF mjera

- **AOM-AV1:** Vrijednosti VMAF kreću se od 90,43113 pri 151 kbit/s do 96,33295 pri 587 kbit/s, što ukazuje na visoku percipiranu kvalitetu videozapisa.
- **VVenC:** Vrijednosti VMAF za VVC kreću se od 64,67123 pri 157 kbit/s do 89,79873 pri 579 kbit/s, što pokazuje značajan rast percipirane kvalitete, ali ne doseže razinu AOM-AV1 na svim brzinama prijenosa.

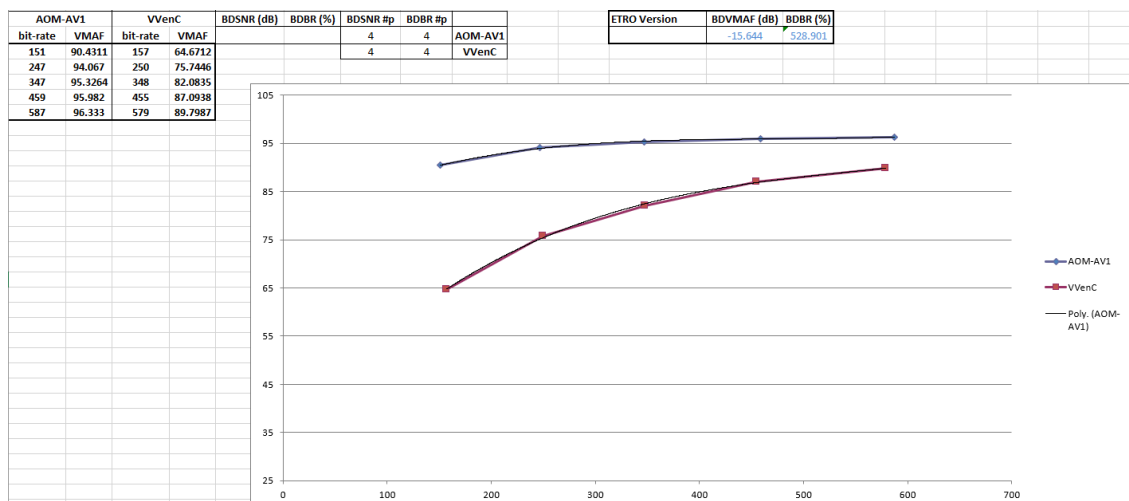
- **Zaključak:** AOM-AV1 postiže bolju percipiranu kvalitetu slike u svim usporedivim brzinama prijenosa prema VMAF mjeri.



Slika 10.19: Grafički prikaz PSNR za „City Alley“

Na slici 10.19 prikazan je grafički prikaz PSNR-a za "City Alley", koji uspoređuje performanse dva videokodeka, AOM-AV1 i VVenC, na temelju PSNR_Y mjera pri različitim brzinama prijenosa. Graf jasno pokazuje da oba kodeka postižu vrlo slične rezultate, no AOM-AV1 ima prednost u očuvanju kvalitete slike pri svim brzinama prijenosa. VVenC pokazuje konkurentne performanse, ali na nižim razinama kvalitete u odnosu na AOM-AV1.

- BDSNR pokazuje razliku od -2,887 dB, što znači da AOM-AV1 pruža bolju kvalitetu slike u usporedbi s VVenC pri istoj brzini prijenosa.
- BD-BR od 300,030% sugerira da VVenC zahtijeva znatno veću brzinu prijenosa kako bi postigao sličnu kvalitetu slike kao AOM-AV1, što ukazuje na veću efikasnost AOM-AV1 kodeka u kompresiji podataka pri nižim brzinama prijenosa.

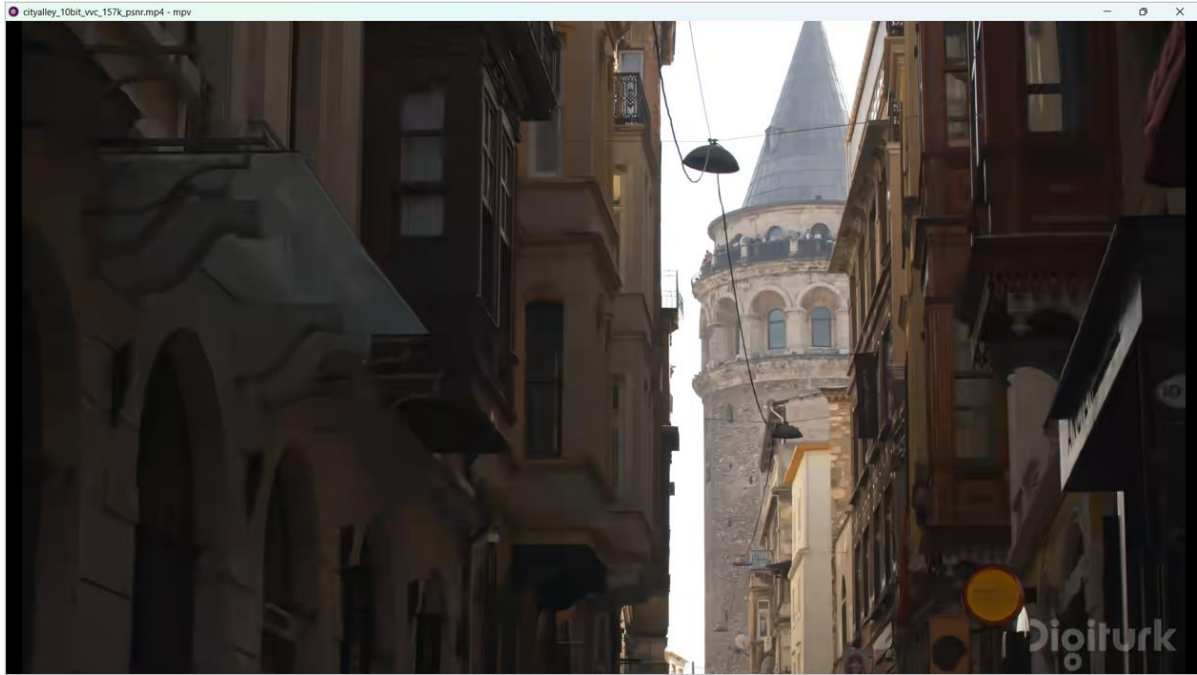


Slika 10.20: Grafički prikaz VMAF za „City Alley“

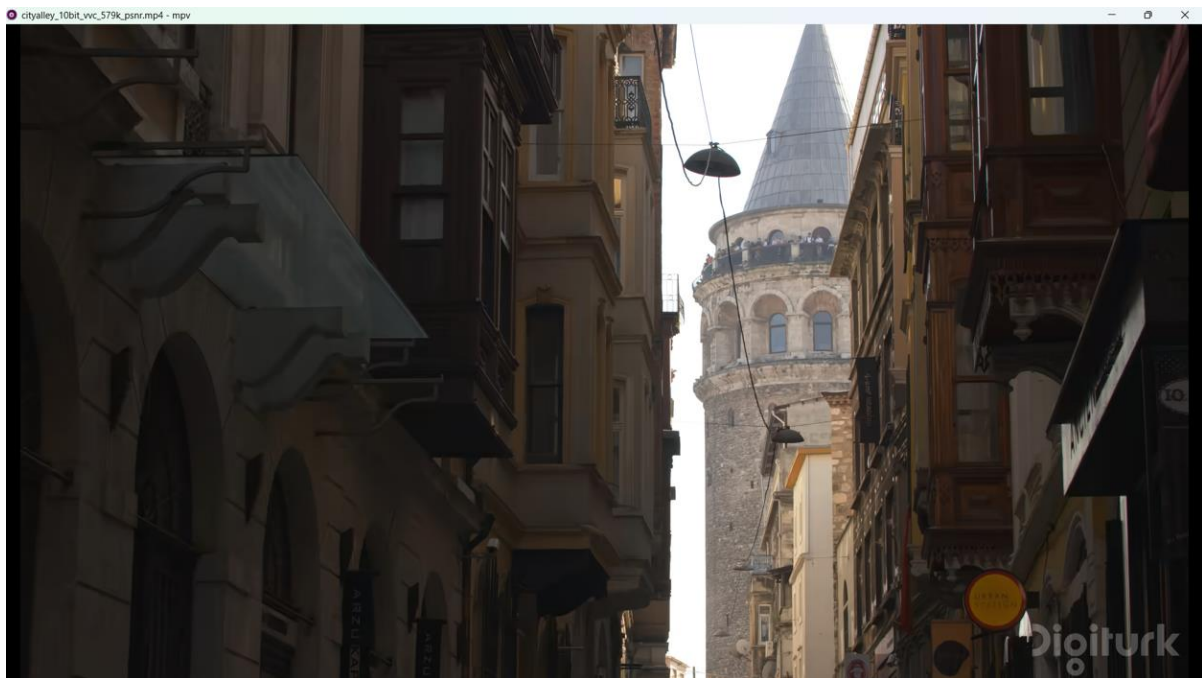
Prema prikazanom na slici 10.20 VMAF grafičkom prikazu, može se zaključiti da AOM-AV1 kodek pruža bolju percipiranu kvalitetu slike u usporedbi s VVenC kodekom na svim brzinama prijenosa. AOM-AV1 postiže značajno bolje rezultate uz manje brzine prijenosa, dok VVenC zahtijeva znatno veću brzinu prijenosa kako bi se približio kvaliteti slike koju postiže AOM-AV1.

Vrijednost BDVMAF iznosi -15,644 dB, što znači da AOM-AV1 pruža bolju percipiranu kvalitetu slike po jedinici brzine prijenosa u usporedbi s VVenC. Vrijednost BDBR iznosi 528,901%, što sugerira da VVenC zahtijeva znatno veću brzinu prijenosa (preko 5 puta više) da bi dostigao sličnu kvalitetu slike koju postiže AOM-AV1. Ova vrijednost pokazuje da je AOM-AV1 izuzetno učinkovitiji u postizanju percipirane kvalitete slike uz manju količinu podataka, osobito pri nižim brzinama prijenosa.

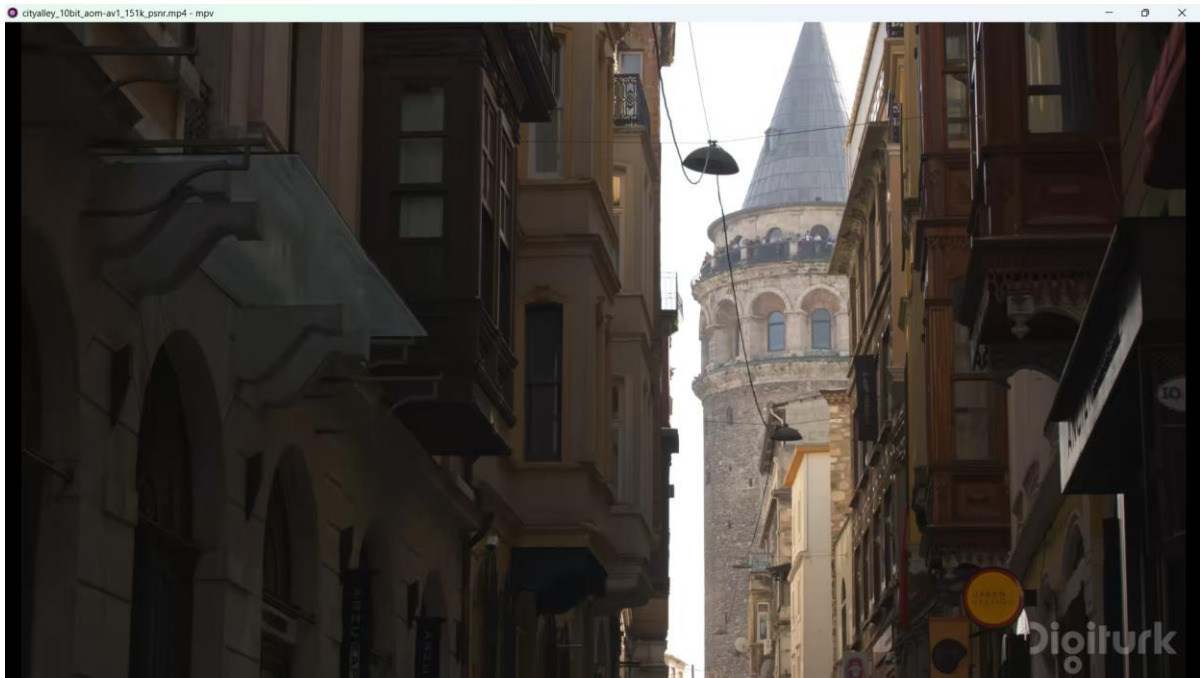
U nastavku će na slikama 10.21 i 10.22 biti prikazane VVenC razlike u istim kadrovima, te na slikama 10.23 i 10.24 AV1 razlike također u istim kadrovima.



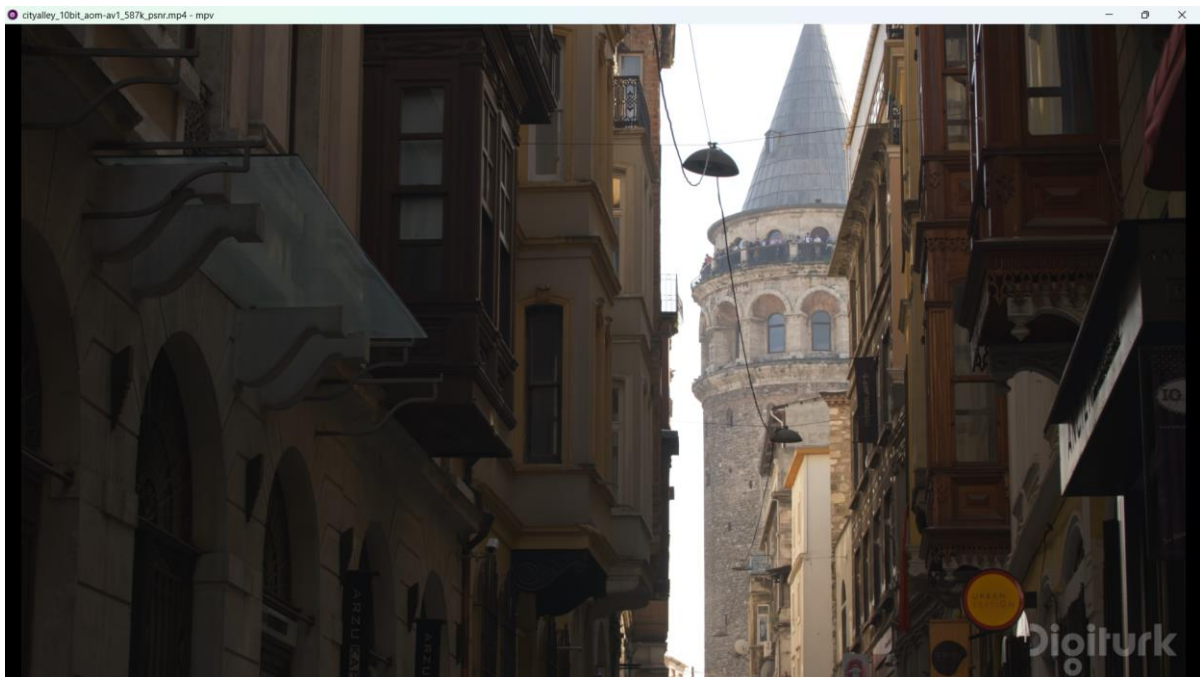
Slika 10.21: „City Alleyt“; VVenC; 157k



Slika 10.22: „City Alleyt“; VVenC; 579k



Slika 10.23: „City Alleyt“; AV1; 151k



Slika 10.24: „City Alleyt“; AV1; 587k

10.4.1. Zaključak za kompresiju „City Alley“

Analiza kompresije videozapisa "City Alley" pokazuje da AOM-AV1 kodek postiže bolje rezultate u očuvanju kvalitete slike pri nižim brzinama prijenosa u usporedbi s VVenC kodekom.

Na primjer, VVenC na 579 kbit/s postiže slične ili bolje rezultate od AOM-AV1 na 151 kbit/s, što ukazuje na njegovu sposobnost očuvanja kvalitete slike pri manjim brzinama prijenosa. VVenC je također pokazao poboljšanja u očuvanju kontrasta (CAMBI) i subjektivno percipirane kvalitete (VMAF) pri višim brzinama prijenosa.

Vrijednosti BDVMAF i BDBR potvrđuju da VVenC zahtijeva veću brzinu prijenosa kako bi postigao sličnu kvalitetu slike kao AOM-AV1, što znači da je AOM-AV1 u ovom slučaju učinkovitiji u balansiranju kvalitete slike i prijenosnih resursa.

10.5. Zaključak svih analiza videozapisa

U ovom radu analizirane su performanse dvaju modernih video kodeka, AOM-AV1 i VVenC (H.266/VVC), na četiri različita videozapisa: "River Bank," "Race Night," "Flower Kids," i "City Alley." Cilj analize bio je usporediti očuvanje kvalitete slike i efikasnost kompresije pri različitim brzinama prijenosa, koristeći ključne mjere kao što su PSNR-Y, Float SSIM, PSNR-HVS, CAMBI, i VMAF.

Rezultati pokazuju da je AOM-AV1 u mnogim slučajevima postizao bolje rezultate u očuvanju kvalitete slike, osobito pri nižim brzinama prijenosa. Mjere kao što su PSNR-Y i VMAF ukazivale su na to da AOM-AV1 bolje očuva vizualnu kvalitetu uz manju količinu podataka, čineći ga idealnim izborom u okruženjima gdje su resursi za prijenos ograničeni. AOM-AV1 pokazao se kao učinkovitiji kodek u postizanju balansa između kompresije i kvalitete slike, osobito kod videozapisa poput "River Bank", "Flower Kids i „City Alley“

Vrijednosti BDVMAF i BDBR pokazuju da je VVenC u nekim slučajevima zahtijevao veću količinu podataka kako bi postigao sličnu kvalitetu slike kao AOM-AV1, osobito u videozapisima s dinamičnijim scenama, no VVenC se pokazao konkurentnim u specifičnim uvjetima s većim brzinama prijenosa. U tom kontekstu, oba kodeka imaju svoje prednosti, ovisno o specifičnim zahtjevima okruženja.

Važno je napomenuti da su obje metode kompresije, korištene za AOM-AV1 i VVenC, prilično spore s obzirom na postavke korištene u ovim testovima. Kompresija videozapisa trajala je između 1 i 2 sata za VVenC, s time da je potrebno više vremena za veće brzine prijenosa. S druge strane, kompresija putem AOM-AV1 trajala je između 3 i 4 sata, također ovisno o brzini prijenosa. Ovi podaci odnose se na video sekvence duljine 12 sekundi.

Zaključno, oba kodeka imaju svoje specifične prednosti. AOM-AV1 se pokazao kao bolji izbor u većini scenarija s ograničenim prijenosnim resursima zbog svoje učinkovitosti u kompresiji i visoke kvalitete slike uz manje podatkovne zahtjeve. VVenC, s druge strane, nudi bolje performanse pri višim brzinama prijenosa, osobito u zahtjevnim videozapisima, ali zahtijeva veću

brzinu prijenosa kako bi dostigao slične rezultate kao AOM-AV1. Ovisno o specifičnim uvjetima primjene i zahtjevima, svaki od ovih kodeka može biti optimalan izbor u različitim okruženjima.

11. Zaključak

Kompresija videozapisa igra ključnu ulogu u omogućavanju učinkovitog prijenosa i pohrane digitalnih medija. Smanjenjem veličine videodatoteka dok se održava njihova kvaliteta, kompresija omogućuje brži prijenos preko mreža, olakšavajući internet prijenos i preuzimanje videozapisa. Kompresija omogućuje i pohranu velikih količina videosadržaja na uređajima s ograničenom pohranom. Bez kompresije, digitalni medijski krajolik bio bi značajno ograničen, sa sporijim internetskim brzinama, većim zahtjevima za pohranom i manjom dostupnošću sadržaja. Stoga, razumijevanje i primjena tehnika kompresije videozapisa ključna je za optimizaciju dostave i konzumacije digitalnih videozapisa u današnjem svijetu.

Analiza dvaju vodećih kodeka, AOM-AV1 i VVenC (H.266/VVC), pokazuje kako se oba kodeka dobro nose s izazovima kompresije, no značajne razlike dolaze do izražaja pri različitim brzinama prijenosa. AOM-AV1 dosljedno je pokazao bolju učinkovitost u uvjetima nižih brzina prijenosa, postižući visoku kvalitetu slike uz manji prijenos podataka, što ga čini idealnim izborom u scenarijima gdje su prijenosni resursi ograničeni.

S druge strane, VVenC je pokazao konkurentne rezultate pri višim brzinama prijenosa, osobito u očuvanju strukturalnih elemenata slike i višeslojnih detalja. Iako VVenC zahtijeva veću brzinu prijenosa za postizanje slične kvalitete slike kao AOM-AV1, njegova prednost dolazi do izražaja u specifičnim slučajevima gdje su potrebne visoke brzine prijenosa i minimalni gubitci.

Dok AOM-AV1 pruža superiorne performanse u svim ključnim mjerama pri nižim brzinama prijenosa, VVenC može biti prikladniji u određenim scenarijima visokih brzina prijenosa. Ključne mjere poput PSNR-Y, VMAF, i Float SSIM potvrđuju da je AOM-AV1 učinkovitiji u širokom rasponu uvjeta, osiguravajući optimalnu ravnotežu između kvalitete slike i količine podataka.

Zaključno, AOM-AV1 se pokazao kao preferirani izbor za aplikacije koje zahtijevaju visokokvalitetnu sliku uz minimalne podatkovne zahtjeve, dok VVenC ostaje prikladan za specifične aplikacije s višim zahtjevima prijenosa. Ova usporedba pruža smjernice za buduće optimizacije kodeka u stvarnim scenarijima, pomažući pružateljima usluga i industriji da odaberu najprikladniji kodek ovisno o specifičnim potrebama korisnika i platformi.

Literatura

- [1] J. -R. Ohm i G. J. Sullivan, "High efficiency video coding: the next frontier in video compression [Standards in a Nutshell]", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 30, no. 1, str. 152-158, 2013., doi: 10.1109/MSP.2012.2219672.
- [2] M. A. Joshi, M. S. Raval, Y. H. Dandawate, K. R. Joshi i S. P. Metkar, "Image and Video Compression: Fundamentals, Techniques, and Applications", Chapman & Hall/CRC, 2014.
- [3] Z.-N. Li, M. S. Drew i J. Liu, "Modern Video Coding Standards: H.264, H.265, and H.266", *Fundamentals of Multimedia. Texts in Computer Science*. Springer, Cham, str. 423-478, 2021., doi: 10.1007/978-3-030-62124-7_12.
- [4] D. Karwowski, T. Grajek, K. Klimaszewski, O. Stankiewicz, J. Stankowski i K. Wegner, "20 Years of Progress in Video Compression – from MPEG-1 to MPEG-H HEVC. General View on the Path of Video Coding Development", *Image Processing and Communications Challenges 8, IP&C 2016.*, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 525, str. 3-15, 2016., doi: 10.1007/978-3-319-47274-4_1.
- [5] B. Bross, Y.-K. Wang, Y. Ye, S. Liu, J. Chen, G. J. Sullivan i J.-R. Ohm, "Overview of the Versatile Video Coding (VVC) Standard and its Applications", *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 31, no. 10, str. 3736-3764, 2021., doi: 10.1109/TCSVT.2021.3101953
- [6] M. Saldanha, M. Corrêa, G. Corrêa, D. Palomino, M. Porto, B. Zatt i L. Agostini, "An Overview of Dedicated Hardware Designs for State-of-the-Art AV1 and H.266/VVC Video Codecs", *2020 27th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, Glasgow, UK, str. 1-4, 2020., doi: 10.1109/ICECS49266.2020.9294862
- [7] I. Bender, A. Borges, L. Agostini, B. Zatt, G. Correa i M. Porto, "Complexity and compression efficiency analysis of libaom AV1 video codec", *Journal of Real-Time Image Processing*, vol. 20, no. 50, str. 1-14, 2023., doi: 10.1007/s11554-023-01308-5
- [8] J. Goebel, B. Zatt, L. Agostini i M. Porto, "Hardware design of DC/CFL intra-prediction decoder for the AV1 codec", *Proceedings of the 32nd Symposium on Integrated Circuits and Systems Design (SBCCI '19)*, New York, NY, SAD, Article 16, str. 1-6, 2019., doi: 10.1145/3338852.3339873
- [9] V. Bhaskaran i K. Konstantinides, "Image and Video Compression Standards: Algorithms and Architectures", Springer New York, NY, 1995.
- [10] S. Ma, X. Zhang, C. Jia, Z. Zhao, S. Wang i S. Wang, "Image and Video Compression With Neural Networks: A Review", *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 30, no. 6, str. 1683-1698, 2020., doi: 10.1109/TCSVT.2019.2910119

- [11] K. R. Rao i P. Yip, "The Transform and Data Compression Handbook", CRC Press, Inc., SAD, 2000.
- [12] A.V. Zvezdakova, D.L. Kulikov, S.V. Zvezdakov i D. S. Vatolin, "BSQ-rate: a New Approach for Video-codec Performance Comparison and Drawbacks of Current Solutions", *Programming and Computer Software*, vol. 46, str. 183–194, 2020., doi: 10.1134/S0361768820030111
- [13] M. Ghanbari, "Standard Codecs: Image Compression to Advanced Video Coding", IEEE, London, UK, 2003.
- [14] N.A. Azeez i A.A. Lasisi, " Empirical and Statistical Evaluation of the Effectiveness of Four Lossless Data Compression Algorithms", *Nigerian Journal of Technological Development*, vol. 13, no. 2, str. 64-73, 2016., doi: 10.4314/njtd.v13i2.4
- [15] M. Rapczynski, P. Werner i A. Al-Hamadi, "Effects of Video Encoding on Camera-Based Heart Rate Estimation", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 66, no. 12, str. 3360-3370, 2019., doi: 10.1109/TBME.2019.2904326
- [16] I. E. Richardson, "Video Codec Design: Developing Image and Video Compression Systems", John Wiley & Sons, Inc., SAD, 2002.
- [17] S Y. Li, S. Wang, X. Zhang, S. Wang, S. Ma i Y. Wang, "Quality Assessment of End-to-End Learned Image Compression: The Benchmark and Objective Measure", *Proceedings of the 29th ACM International Conference on Multimedia (MM '21)*, New York, NY, SAD, str. 4297-4305, 2021., doi: 10.1145/3474085.3475569
- [18] J.-Y. Aubié, F. Chi, P. Dumenil i T. Fautier. "Understanding the Video Codec Jungle: A Comparison of TCO and Compression Efficiency", *SMPTE Motion Imaging Journal*, str. 31-34, 2019.
- [19] G. Bjontegaard, "Calculation of average PSNR differences between RD-curves", *VCEG-M33*, 2001.
- [20] M. Vranješ, S. Rimac-Drlje i K. Grgić, "Review of objective video quality metrics and performance comparison using different databases", *Signal Processing: Image Communication*, vol. 28, no. 1, str. 1-19, 2013., doi: 10.1016/j.image.2012.10.003
- [21] E. Dumić, S. Grgić i M. Grgić, "Comparison of HDTV formats using objective video quality measures", *Multimedia Tools and Applications*, vol. 49, str. 409–424, 2010., doi: 10.1007/s11042-009-0441-2
- [22] P. Topiwala, M. Krishnan i W. Dai, "Performance comparison of VVC, AV1 and EVC", *Proc. SPIE 11137, Applications of Digital Image Processing XLII*, 1113715, 2019., doi: 10.1117/12.2530559

- [23] S. Mahmoudpour i P. Schelkens, "On the performance of objective quality metrics for lightfields", *Signal Processing: Image Communication*, vol. 93, 116179, 2021., doi: 10.1016/j.image.2021.116179
- [24] K. Egiazarian, J. Astola, N. Ponomarenko, V. Lukin, F. Battisti, M. Carli, "New full-reference quality metrics based on HVS", *Proceedings of the Second International Workshop on Video Processing and Quality Metrics*, Scottsdale, SAD, str. 1-4, 2006.
- [25] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh i E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: from error visibility to structural similarity", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13, no. 4, str. 600-612, 2004., doi: 10.1109/TIP.2003.819861
- [26] Z. Wang, E.P. Simoncelli i A.C. Bovik, "Multiscale Structural Similarity for Image Quality Assessment", *The Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers*, Pacific Grove, CA, SAD, str. 1398–1402., 2003., doi: 10.1109/ACSSC.2003.1292216
- [27] P. Tandon, M. Afonso, J. Sole i L. Krasula, "CAMBI: Contrast-aware Multiscale Banding Index", *2021 Picture Coding Symposium (PCS)*, Bristol, UK, str. 1-5, 2021., doi: 10.1109/PCS50896.2021.9477464.
- [28] Netflix Technology, <https://netflixtechblog.com/toward-a-practical-perceptual-video-uality-metric-653f208b9652>, Netflix TechBlog, dostupno 03.09.2024.

Popis slika

Slika 10.1: Grafički prikaz PSNR za „River Bank“	26
Slika 10.2: Grafički prikaz VMAF za „River Bank“	27
Slika 10.3: „River Bank“; VVenC; 1000k.....	28
Slika 10.4: „River Bank“; VVenC; 5000k.....	28
Slika 10.5: „River Bank“; AV1; 1000k	29
Slika 10.6 „River Bank“; AV1; 5000k	29
Slika 10.7: Grafički prikaz PSNR za „Race Night“	32
Slika 10.8: Grafički prikaz VMAF za „Race Night“	33
Slika 10.9: „Race Night“; VVenC; 1000k.....	34
Slika 10.10: „Race Night“; VVenC; 5000k.....	34
Slika 10.11: „Race Night“; AV1; 1000k	35
Slika 10.12: „Race Night“; AV1; 5000k	35
Slika 10.13: Grafički prikaz PSNR za „Flower Kids“	38
Slika 10.14: Grafički prikaz VMAF za „Flower Kids“	39
Slika 10.15: „Flower Kids“; VVenC; 1000k	40
Slika 10.16: „Flower Kids“; VVenC; 5000k	40
Slika 10.17: „Flower Kids“; AV1; 1000k	41
Slika 10.18: „Flower Kids“; AV1; 5000k	41
Slika 10.19: Grafički prikaz PSNR za „City Alley“	44
Slika 10.20: Grafički prikaz VMAF za „City Alley“	45
Slika 10.21: „City Alleyt“; VVenC; 1000k	46
Slika 10.22: „City Alleyt“; VVenC; 5000k	46
Slika 10.23: „City Alleyt“; AV1; 1000k	47
Slika 10.24: „City Alleyt“; AV1; 5000k	47

Popis tablica

Tablica 10.1: Dobiveni rezultati kompresije videozapisa "River Bank" za kodeke AOM-AV1 i VVC.....	23
Tablica 10.2: Dobiveni rezultati kompresije videozapisa "Race Night" za kodeke AOM-AV1 i VVC.....	30
Tablica 10.3: Dobiveni rezultati kompresije videozapisa "Flower Kids" za kodeke AOM-AV1 i VVC.....	36
Tablica 10.4: Dobiveni rezultati kompresije videozapisa "City Alleyt" za kodeke AOM-AV1 i VVC.....	42

IZJAVA O AUTORSTVU

I

SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, LAURA BOLTEK (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom USPOREDBA H. ZGG/UC I ANI PODIJEVA POMOĆU FANDES PROGRAMA I ZAVRŠNIH OBJEKTIVNIH MJERA (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Boltek Laura
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, LAURA BOLTEK (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom USPOREDBA H. ZGG/UC I ANI PODIJEVA POMOĆU FANDES PROGRAMA I ZAVRŠNIH OBJEKTIVNIH MJERA (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Boltek
(vlastoručni potpis)