

Analiza kvalitete videosignala različite vremenske rezolucije kodiranog primjenom H.265 koda

Kuna, Renato

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:204908>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-13**

Repository / Repozitorij:

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



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

Sveučilišni studij

**Analiza kvalitete videosignala različite vremenske
rezolucije kodiranog primjenom H.265 koda**

Diplomski rad

Renato Kuna

Osijek, 2023.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

Osijek, 20.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite**Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

Ime i prezime Pristupnika:	Renato Kuna
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Komunikacije i informatika'
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1370, 07.10.2021.
OIB studenta:	92204798316
Mentor:	prof. dr. sc. Snježana Rimac-Drlje
Sumentor:	dr. sc. Jelena Šuljug
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	prof. dr. sc. Mario Vranješ
Član Povjerenstva 1:	prof. dr. sc. Snježana Rimac-Drlje
Član Povjerenstva 2:	doc. dr. sc. Denis Vranješ
Naslov diplomskog rada:	Analiza kvalitete videesignala različite vremenske rezolucije kodiranog primjenom H.265 koda
Znanstvena grana diplomskog rada:	Telekomunikacije i informatika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	H.265 (HEVC) je koder koji efikasno komprimira videesignale visoke prostorne i vremenske rezolucije, te se koristi za različite aplikacije. Uspješnost kodiranja ovisi o parametrima koda, ali i o prostornoj i vremenskoj aktivnosti videa, te o prostornoj i vremenskoj rezoluciji videesignala. U okviru ovog diplomskog rada potrebno je opisati značajke H.265 koda i objasniti utjecaj pojedinih parametara koda na kvalitetu komprimiranog videesignala. Nadalje, potrebno je izabrane videesignale različitih prostornih i vremenskih aktivnosti kodirati na nekoliko različitih vremenskih rezolucija i na više kodnih brzina. Kodiranje videesignala treba biti izvršeno korištenjem sljedećih alata: ffmpeg, gpac, mp4box i MSU. Primjenom objektivne metrike za ocjenu kvalitete videa treba utvrditi područja optimalnih brzina za određenu rezoluciju i određeni videesignal. Sumentor s FERIT-a: Jelena Šuljug
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	20.09.2023.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

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

Osijek, 01.10.2023.

Ime i prezime studenta:	Renato Kuna
Studij:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Komunikacije i informatika'
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-1370, 07.10.2021.
Turnitin podudaranje [%]:	4

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Analiza kvalitete videosignala različite vremenske rezolucije kodiranog primjenom H.265 koderu**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Snježana Rimac-Drlje

i sumentora dr. sc. Jelena Šuljug

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

Potpis studenta:

Sadržaj

1. UVOD	1
2. OSNOVNE ZNAČAJKE H.265 STANDARDA	2
2.1. H.265 standard	2
2.1.1. Kompenzacija pokreta	3
2.1.2. Odsječci (eng. <i>Slices</i>) i pločice (eng. <i>Tiles</i>)	5
2.1.3. Preciznost u luminantnim slikama	6
2.1.4. Cjelobrojna transformacija	6
2.1.5. Kvantizacija i skaliranje	6
2.1.6. Unutarlikovno kodiranje	7
2.1.7. Diskretna sinusna transformacija	7
2.1.8. Filtriranje unutar petlje	8
2.1.9. Entropijsko kodiranje	8
2.1.10. Posebni načini kodiranja	9
2.1.11. Profili H.265 standarda	9
3. KVALITETA KODIRANOG VIDEO RAZLIČITIH PROSTORNIH I VREMENSKIH REZOLUCIJA	11
3.1. Korišteni alati i tehnologije za kodiranje videa	13
3.1.1 FFMPEG	13
3.2. Priprema baze podataka video signala	15
3.3. Postupak kodiranja video sekvenci	18
3.4. Rezultati kodiranja video sekvenci	21
3.4.1 HoneyBee video sekvenca	21
3.3.2. ReadySteadyGo video sekvenca	29
3.5. Izbor optimalne prostorne i vremenske rezolucije za danu kodnu brzinu	35
4. ZAKLJUČAK	39
5. LITERATURA	40
SAŽETAK	41

ABSTRACT.....	42
ŽIVOTOPIS.....	43
PRILOG	44
Bosphorus video sekvenca.....	44
Jockey video sekvenca.....	50
YachtRide video sekvenca.....	56

1. UVOD

Brzi razvoj video tehnike u zadnjih nekoliko godina kao posljedicu ima povećanje video datoteka, kao i zahtjeva korisnika usluga vezanih za video tehniku. Primjer toga se može vidjeti na razvoju televizijskih uređaja s 4K (3840x2160) prostornom rezolucijom. Porastom popularnosti servisa za strujanje video sadržaja (npr. Netflix, YouTube, Twitch i sl.) pojavio se problem prijenosa tako velikih video datoteke. Kako bi se smanjio trošak resursa na pretprocesiranje video sadržaja, pružatelji usluga strujanja video sadržaja bili su primorani na kompresiju video sadržaja uz zahtjev za kompresiju bez značajnog gubitka kvalitete kako bi pružali dobru uslugu svojim korisnicima. U ovom radu biti će prikazano na koji način utječu promjene vremenskih i prostornih rezolucija na video sekvence i njihovu kvalitetu, te će se na osnovu dobivenih rezultata ponuditi optimalna kombinacija parametara vremenske i prostorne rezolucije. Kodiranje video sekvenci provedeno je primjenom H.265 standarda koji je detaljno opisan u ovome radu.

Rad se sastoji od pet poglavlja. Prvo poglavlje predstavlja uvod koji opisuje ciljeve rada. Drugo poglavlje sadrži detaljan pregled H.265 standarda i njegovu usporedbu s H.264 standardom. Treće poglavlje opisuje alate koji su korišteni pri izradi ovog rada, detaljan opis video sekvenci koje su se koristile i njihovih parametara, opis provedenih koraka kodiranja, te samu prezentaciju dobivenih rezultata. Četvrto poglavlje sadržava zaključna razmatranja.

2. OSNOVNE ZNAČAJKE H.265 STANDARDA

2.1. H.265 standard

Potreba za razvojem novog H.265 standarda, također znanog i kao MPEG-H Part 2 standard i HEVC (eng. *High Efficiency Video Coding*) je proizašla iz dva faktora:

- Potreba za daljnjim poboljšanjem efikasnosti koda zbog stalnog porasta rezolucije videa
- Potreba za ubrzavanjem složenijih metoda kodiranja i dekodiranja korištenjem paralelnih procesnih uređaja i algoritama koji postaju sve rašireniji

Cilj H.265 standarda bio je dodatno smanjenje veličine komprimiranog videa (uz zadržavanje iste kvalitete) naspram H.264 standarda. Glavne značajke H.265 su:

- Kompenzacija pokreta s promjenjivom veličinom bloka, od 4x4 do 16x16. Struktura makrobloka zamjenjuje se četverostrukom strukturom kodnih blokova različitih razina i veličina.
- Primjena paralelnog procesiranja
- Cjelobrojna Transformacija s različitim veličinama transformacijskih matrica, od 4x4, 8x8, 16x16 do 32x32.
- Poboljšane metode interpolacije za točnosti od $\frac{1}{4}$ elemenata slike
- Veći broj smjerova prostorne predikcije za unutarokvirno kodiranje
- Potencijal za korištenje DST-a (eng. *Discrete Sine Transform*) za luminantne komponente kod unutarokvirnog kodiranja
- Za entropijsko kodiranje koristi CABAC (eng. *Context Adaptive Binary Arithmetic Coding*), ne koristi CAVLC (eng. *Context Adaptive Variable Length Coding*)

2.1.1. Kompenzacija pokreta

Kao i kod H.264 i prijašnjih kodera, H.265 standard koristi hibridno kodiranje, tj. kombinaciju međuslikovne predikcije i 2D transformacijsko kodiranje rezidualnih pogrešaka. Za razliku od H.264 standarda koji za estimaciju i kompenzaciju pokreta koristi makroblokove različitih dimenzija, koji su jednostavno koncipirani i fiksne su strukture, H.265 standard koristi četverostruku strukturu blokova koja je uvedena zbog povećanje efikasnosti kodiranja i smanjenja rezidualne pogreške. Ova četverostruka struktura opisana je u nastavku. [1]

CTB (eng. *Coding Tree Block*) i CTU (eng. *Coding Tree Unit*):

- CTB je najveći blok i ujedno korijen četverostruke strukture.
- Dimenzije luminantnog CTB-a može biti 16x16, 32x32 ili 64x64 elemenata slike.
- Dimenzije krominantnog CTB-a su upola manje od luminantnog CTB-a.
- CTU se sastoji od jednog luminantnog CTB-a i dva krominanta CTB-a. [1]

CB (eng. *Coding Block*) i CU (eng. *Coding Unit*):

- CB je kvadratni blok koji ima najmanje dimenzije od 8x8 za luminantne komponente i 4x4 za krominantne komponente.
- CB blokovi su organizirani u četverostruku strukturu i tvore CTB.
- CB blokovi se unutar CTB bloka kodiraju po Z redoslijedu.
 - Z redoslijed se koristi zato što ostavlja prostorno susjedne rezidualne blokove skupa, što vodi ka većoj efikasnosti kompresije zbog visoke prostorne korelacije unutar video sekvence. [2]
- CU se sastoji od jednog luminantnog CB-a i dva krominantna CB-a. [1]

PB (eng. *Prediction Block*) i PU (eng. *Prediction Unit*):

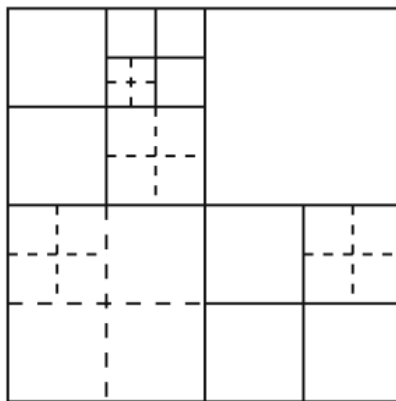
- CB blok se dalje može dijeliti u PB blokove za potrebe izrade prediktora. Način predikcije za CU blok može biti intra-slikovni (prostorni) (eng. *intra-picture*) i inter-slikovni (temporalni) (eng. *inter-picture*).
- Za intra predikciju veličine CB i PB bloka su generalno istih dimenzija, osim u slučaju kada je CB dimenzija 8x8, tada je dopušteno dijeljenje na četiri PB bloka kako bi svaki PB blok mogao imati drugačiji način predikcije.
- Kod inter predikcije, luminantni i krominantni CB blok je moguće podijeliti u jedan, dva ili četiri PB bloka.

- PU blok se sastoji od PB blokova luminantne i krominantne komponente i njihove sintaksu predikcije. [1]

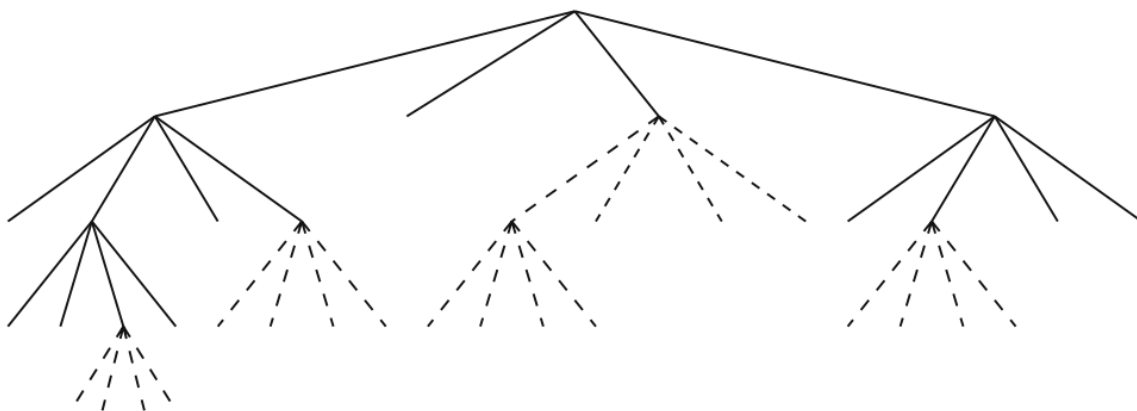
TB (eng. *Transform Block*) i TU (eng. *Transform Unit*):

- CB blok se dalje može podijeliti na TB blokove za potrebe transformacijskog kodiranja rezidualnih pogrešaka.
- TB može biti u rasponu dimenzija od 32x32 sve do 4x4 elementa.
- U H.265 standardu, TB blokovi mogu zalaziti unutar granica PB blokova kod inter predikcije kako bi se ostvarila veća efikasnost kodiranja.
- TU se sastoji od TB blokova za luminantne i krominantne komponente. [1]

Na slici 2.1. je ilustracija podjele CTB blokova, a na slici 2.2. se nalazi ilustracija četverostruke strukture.



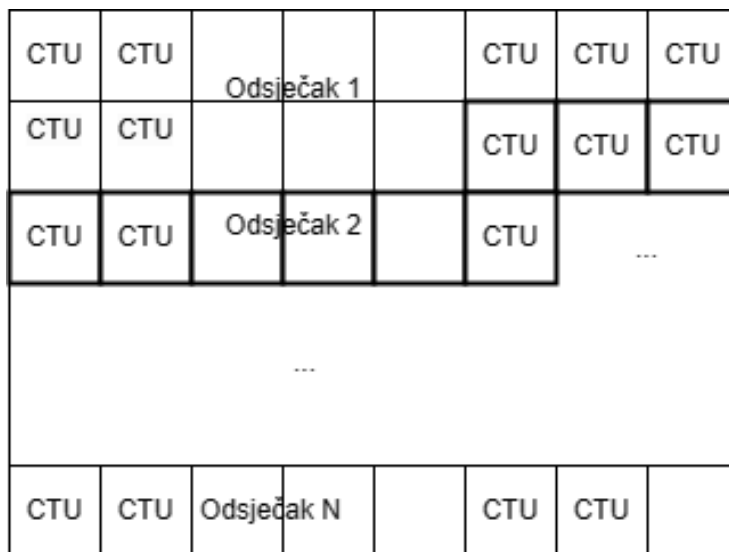
Slika 2.1. Podjela CTB blokova (pune linije označavaju granice CB blokova, isprekidane linije označavaju granice TB blokova) [1]



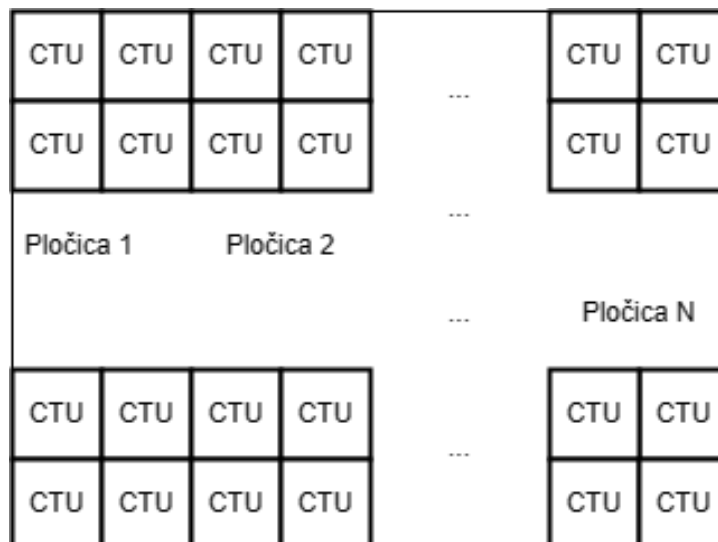
Slika 2.2. Odgovarajuća četverostruka struktura [1]

2.1.2. Odsječci (eng. *Slices*) i pločice (eng. *Tiles*)

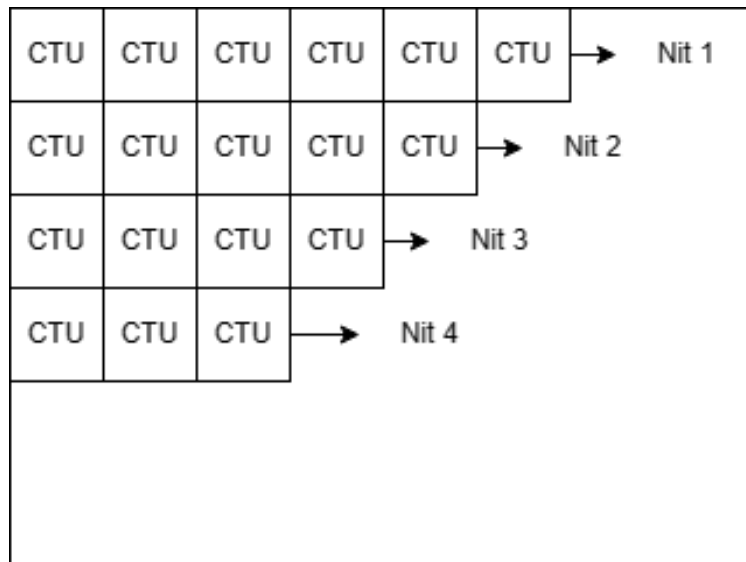
H.265 standard, kao i H.264, podržava odsječke koji se sastoje od niza CTU blokova koji mogu biti bilo koje duljine. Postoje I-odsječci, P-odsječci, B-odsječci (slika 2.3.). No, ono što H.264 nema te je uvedeno tek u H.265 standardu, su Pločice. Pločice su uvedene kako bi se omogućila paralelna obrada podataka kroz više pločica. Pločica je pravokutna struktura koja se sastoji od više CTU blokova, također mogu sadržavati i odsječke (slika 2.3.). Novi dodatak je također i paralelna obrada valne fronte (eng. *Wavefront Parallel Processing*) ili WPP (slika 2.5.). [1]



Slika 2.3. Prikaz odsječaka u H.265 standardu [1]



Slika 2.4. Prikaz pločica u H.265 standardu [1]



Slika 2.5. Prikaz WPP-a u H.265 standardu [1]

2.1.3. Preciznost u luminantnim slikama

Kao i u H.264 standardu, preciznost u H.265 standardu je četvrt-piksela (elementa slike). Vrijednosti na podpikselskim pozicijama se dobiju pomoću interpolacija. Za razliku od H.264 standarda koji koristi jedan filter sa 6 koeficijenata (eng. *six-tap filter*) za prolaz kroz horizontalne i vertikalne vrijednosti te daje srednju vrijednost kao rezultat, H.265 standard koristi hfilter koji koristi 7 koeficijenata (eng. *seven-tap filter*) i prolazi kroz horizontalne vrijednosti te qfilter koji koristi 8 koeficijenata (eng. *eight-tap filter*) i prolazi kroz vertikalne vrijednosti. [1]

2.1.4. Cjelobrojna transformacija

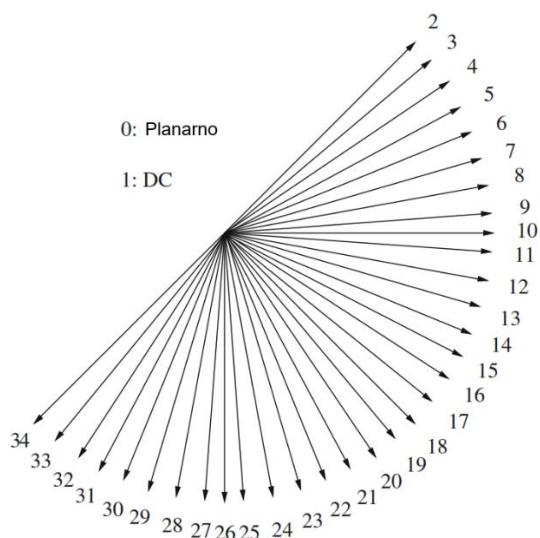
Kao i kod H.264 standarda, H.265 primjenjuje transformacijsko kodiranje na rezidualnu pogrešku predikcije. 2D transformacija se postiže primjenom 1D transformacije u vertikalnom te u horizontalnom smjeru. H.264 standard definira transformacijske matrice dimenzija 4x4, 8x8, 16x16 i 32x32 elemenata, dok H.265 definira samo transformacijsku matricu veličine 32x32 elemenata. Matrice dimenzija 4x4, 8x8, 16x16 i 32x32 elemenata se dobiju poduzorkovanjem bloka 32x32. [1]

2.1.5. Kvantizacija i skaliranje

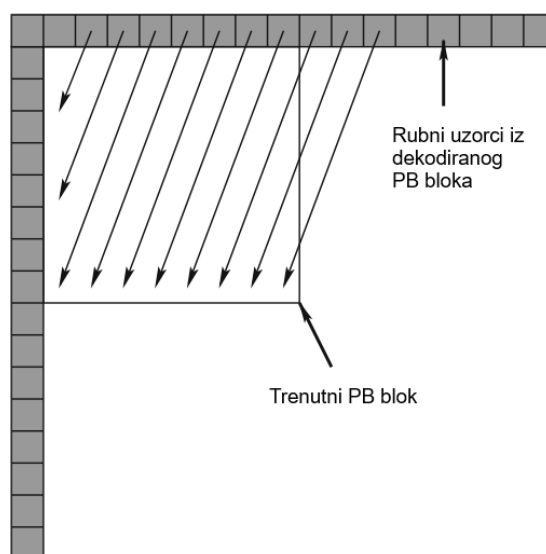
Za razliku od H matrice u H.264 standardu, vrijednosti unutar H.265 cjelobrojne transformacijske matrice su proporcionalno vrlo blizu stvarnim vrijednostima DCT funkcijama te skaliranje nije potrebno. Kvantizacijska matrica i QP parametar ostaju isti kao kod H.264 standarda. [1]

2.1.6. Unutarslikovno kodiranje

Za unutarslikovno kodiranje H.265 standard koristi kao i H.264 prostornu predikciju. Koriste se susjedni granični uzorci blokova na vrhu i/ili lijevo od bloka koji se trenutno kodira. Kod H.265 standarda, za unutarslikovno kodiranje dimenzije transformacijskih blokova (TB) su u rasponu od 4x4 do 32x32 elemenata slike. Zbog mogućnosti pojave većih TB blokova i nastojanja da se smanje pogreške predikcije, broj načina predikcije je sa 9 načina kod H.264 standarda porastao na 35 kod H.265 standarda. [1]



Slika 2.5. Načini predikcije u H.265 i njihovi smjerovi [1]



Slika 2.6. Unutarslikovna predikcija za 8x8 blok koristeći način 30 [1]

2.1.7. Diskretna sinusna transformacija

U H.265 standardu za unutarslikovno kodiranje s 4x4 veličinom bloka uvodi se transformacija izvedena iz diskretne sinusne transformacije (DST) zato što se unutarslikovna predikcija temelji na susjednim graničnim uzorcima na vrhu ili lijevo od bloka koji se kodira. Zbog toga pogreške predikcije često znaju biti veće za elemente bloka koji su dalje od vršnog ili lijevog susjednog uzorka. Otkriveno je da DST daje bolje rezultate u takvim situacijama od DCT-a kod transformacijskog kodiranja. Cjelobrojna matrica DST-a se opisuje sljedećim izrazom: [1]

$$H_{DST}[i, j] = \text{round}\left(128 \cdot \frac{2}{\sqrt{2N+1}} \sin\left(\frac{(2i-1)j\pi}{2N+1}\right)\right)$$

2.1.8. Filtriranje unutar petlje

Slično kao i kod H.264, filtriranje unutar petlje ili deblokirajuće filtriranje se primjenjuje kako bi se uklonili artefakti bloka na slikama koje se u koderu dekodiraju kako bi poslužile kao referentne slike pri estimaciji pokreta. Uz deblokirajući filter, H.265 uvodi i proces prilagođenog pomaka vrijednosti uzoraka (eng. *Sample Adaptive Offset* - SAO). [1]

Umjesto primjene deblokirajućeg filtra na 4x4 blokove kao i kod H.264 standarda, u H.265 se primjenjuje samo na rubovima blokova 8x8 dimenzija. Tako se smanjuje kompleksnost računanja i pogoduje paralelnoj obradi. Vizualna kvaliteta i dalje ostaje dobra, dijelom zbog SAO procesa. Deblokirajući filter se prvo primjenjuje na vertikalnim rubovima, te zatim na horizontalnim rubovima slike čime se omogućuje paralelna obrada. [1]

SAO proces se može opcionalno pokrenuti nakon deblokirajućeg filtriranja. U suštini, dodaje pomak vrijednosti svakom uzorku ovisno o određenim uvjetima. Postoje dva načina rada SAO procesa: način pojasnog i način rubnog pomaka. Kod pojasnog pomaka, raspon amplituda uzoraka se dijeli na 32 pojasa. Pomak vrijednosti za cijeli pojas se dodaje vrijednostima uzoraka unutar četiri uzastopna pojasa. Na taj način se smanjuju artefakti pojasa u glatkim područjima. Kod načina rubnog pomaka, analizira se gradijent informacije. Moguće ga je analizirati u četiri različita smjera (horizontalni, vertikalni i dva dijagonalna smjera) te se dodaje pomak ovisno o gradijentima. [1]

2.1.9. Entropijsko kodiranje

Za razliku od H.264 standarda koji koristi CABAC i CAVLC entropijska kodiranja, H.265 standard koristi samo CABAC. Zbog uvedenih kodnog stabla i transformacijske strukture stabla, dubina stabla postaje značajan dio kontekstnog modeliranja u H.265 kontekst prostornih susjeda kao i u H.264 standardu. Zbog toga, broj konteksta je smanjen te je tako efikasnost entropijskog kodiranja dalje poboljšana. [1]

Za razliku od prijašnjih video standarda, definirane su tri jednostavne metode skeniranja transformacijskih koeficijenata. To su: dijagonalni gore-desno, horizontalni i vertikalni. Cilj je i dalje maksimizirati duljinu niza nula. Skeniranje se uvijek provodi podblokovima dimenzija 4x4 neovisno o veličini TB bloka. Dijagonalni gore-desno način skeniranja se koristi za sve inter-predikcijske blokove, te za 16x16, 32x32 intra-predikcijske blokove. Za intra-predikcijske blokove dimenzija 4x4 i 8x8 se koristi: horizontalno skeniranje za smjer predikcije

blizu vertikalnog, vertikalno skeniranje za smjer predikcije blizu horizontalnog, dijagonalno gore-desno za sve ostale smjerove predikcije. [1]

2.1.10. Posebni načini kodiranja

Unutar H.265 standarda definirana su 3 posebna načina kodiranja:

- **I_PCM:** Kao i kod H.264, kod ovog se načina kodiranja preskaču predikcija, transformacijsko kodiranje, kvantizacija i entropijsko kodiranje. Uzorci kodirani PCM-om se šalju direktno. Upotrebljava se kada ostali načini predikcije nisu u mogućnosti proizvesti bilo kakvu uštedu podataka (kompresiju).
- **Bez gubitaka (eng. *Lossless*):** rezidualne pogreške od inter ili intra predikcija se šalju direktno na entropijski koder, time preskačući korake gdje se stvaraju gubitci, pogotovo kod kvantizacije.
- **Preskakanje transformacije:** Preskače se samo korak transformacijskog kodiranja. Ovaj način se koristi samo kod određenih vrsta podataka, na primjer kod računalno generiranih slika. Može se primijeniti samo na TB blokove dimenzija 4x4. [1]

2.1.11. Profili H.265 standarda

H.265 standard definira tri profila: Glavni profil (eng. *Main profile*), Glavni 10 profil (eng. *Main 10 profile*), Glavni profil za mirne slike (eng. *Main Still Picture profile*). Standardni model boja je YCrCb. Kod svih glavnih profila koristi se shema poduzorkovanja 4:2:0. Svaki uzorak ima 8 bitova, osim kod Glavnog 10 profila koji koristi 10 bitova. Tablica 2.1. prikazuje 13 predloženih razina H.265 standarda.[1] U ovom radu korišten je glavni profil razine 5.2.

Tablica 2.1. Razine profila H.265 standarda [1]

Razine	Maksimalne dimenzije luminantne komponente - širina x visina	Maksimalne veličine uzorka luminantne slike	Broj izmjena slika po sekundi	Maksimalna kodna brzina glavnog profila [Mbit/s]
1	176x144	36864	15	0.128
2	352x288	122880	30	1.5
2.1	640x360	245760	30	3.0
3	960x540	552960	30	6.0
3.1	1280x720	983040	30	10
4/4.1	2048x1080	2228224	30/60	12/20
5/5.1/5.2	4096x2160	8912896	30/60/120	25/40/60
6/6.1/6.2	8192x4320	35651584	30/60/120	60/120/240

3. KVALITETA KODIRANOG VIDEA RAZLIČITIH PROSTORNIH I VREMENSKIH REZOLUCIJA

Mnogi pružatelji video usluga ulažu značajnu količinu resursa u optimizaciju parametara za kompresiju videa prije njegovog prijenosa. To omogućuje povećanje zadovoljstva korisnika – postižu različite kriterije za pojedinog korisnika dok održavaju najveću moguću razinu kvalitete dostavljenog videa. Kvaliteta dostavljenog sadržaja može varirati od uređaja do uređaja te razni faktori mogu utjecati na nju, kao što su to na primjer lokacija, vrsta opreme i dostupne širine pojasa (eng. *Bandwidth*). [3]

U ranijim primjenama, koristile su se fiksne kodne brzine neovisno o sadržaju videa, npr. za 1080p rezoluciju 4300 i 5800 kbit/s. Razvojem video sustava, uvedeno je korištenje različitih parametara kodiranja u ovisnosti o vrsti sadržaja. Primjerice, veće vrijednosti kodne brzine se koriste za sportski sadržaj s brzim pokretima i brzim promjenama scene. Međutim, ova su rješenja ignorirala ovisnost video kompresije o specifičnim karakteristikama sadržaja rezultirajući pojavom vidljivih blokova i ostalih vizualnih artefakata i pri tome smanjujući iskustvo gledanja takvog sadržaja. U posljednje vrijeme, počela su se razvijati i primjenjivati rješenja koja su specifično napravljena za određeni sadržaj. Kod ovakvog pristupa bitno je uložiti u korak pretprocesiranja gdje se svaki video dijeli u kraće sekvence koje su asocirane pojedinim scenama. Svaka sekvenca se kodira koristeći optimizirane parametre kao što su na primjer rezolucija, kvantizacijska razina i slično s ciljem građenja Pareto Fronte (eng. *Pareto Front* - PF) kroz svaku krivulju ocijene-kvalitete (eng. *Rate-Quality* - RQ). [3]

Nadalje, koristi se set određenih kodnih brzina kako bi se pronašao najbolji kodirani niz bitova (eng. *bitstream*). Uzimajući u obzir veliku količinu parametara i činjenicu da se ovaj proces mora ponoviti za svaku sekvencu videa, potrebna je iznimno velika količina proračuna. Kao posljedica toga, pružatelji video usluga se značajno oslanjaju na usluge računanja putem oblaka (eng. *cloud computing services*) za pretprocesni korak. [3]

Veliki udio u mrežnom prometu imaju usluge videostrujanja (npr. Youtube, Netflix, i sl.). Novi sustavi koriste adaptivno videostrujanje zasnovano na HTTP protokolu (eng. HTTP based Adaptive video Streaming – HAS). Kod ove se usluge videosekvence kodira na više kodnih brzina (tzv. ljestvica kodnih brzina), pri čemu se za manje brzine koristi smanjenje prostorne i/ili vremenske rezolucije kako bi se dobila najbolja kvaliteta dekodiranog videa. Sve

kodirane verzije videa pohranjuju se na poslužitelj pružatelja usluge. Kod ove se usluge kodira, a poslije i prenosi segment po segment videa, pri čemu segment sadrži od jedne do nekoliko sekundi videosekvence. Klijent na računalu korisnika prema određenom algoritmu procjenjuje propusnost mreže te uz primjenu još nekih parametara odabire jednu od, za tu sekvencu, ponuđenih kodnih brzina za sljedeći segment. Pri tome je cilj postizanje najbolje kvalitete dekodiranog videa, minimiziranje početnog kašnjenja u prikazivanju te izbjegavanje zastoja tijekom reprodukcije. Za male brzine prijenosa najčešće se ostvaruje bolja kvaliteta videa ako se smanji prostorna i/ili vremenska rezolucija pri kodiranju, a na korisničkoj strani se nadskaliranjem vrati rezolucija na originalnu vrijednost. Pri tome optimalna kombinacija prostorne rezolucije, vremenske rezolucije i kodne brzine ovisi o kompleksnosti videosadržaja, a zbog složene međuzavisnosti te različitih postupaka kodiranja i nadzorkovanja, problem pronalaska ove optimalne kombinacije za kodne brzine od interesa se intenzivno istražuje.

U radu [3] autori predlažu sadržajno-ovisnu metodu za procjenu skoro optimalne ljestvice kodnih brzina za adaptivno video strujanje na zahtjev (eng. *on-demand*). Predložena metoda se bazira na izvlačenju nisko-razinskih atributa sadržaja iz nekomprimiranih videa na njihovoj izvornoj prostornoj rezoluciji te na treniranju modela strojnog učenja kako bi se predvidjeli PF parametri kroz različite rezolucije. Na osnovu procijenjenih PF parametara definira se set jednadžbi koji modeliraju kvantizacijske parametre za određenu kodnu brzinu. Sa ovim setom jednadžbi te uzimajući u obzir raspon kodne brzine, moguće je stvoriti odgovarajuću optimiranu ljestvicu kodnih brzina po video sekvenci. Očita prednost ove predložene metode je znatno smanjenje količine proračuna. [3]

U teoriji, optimiranje ljestvica kodnih brzina za svaku moguću rezoluciju rezultira najboljim korisničkim iskustvom. U praksi se često primjenjuju jednostavniji postupci. Tako se u [8] koristi samo ljestvica kodnih brzina za najveću rezoluciju te se rezolucija videa ili smanjuje ili povećava kako bi odgovarala rezoluciji ekrana korisnika.

Autori rada [4] analiziraju performanse svestranog video koda (eng. *Veristile Video Code – VVC*) u usporedbi sa starijim koderima. Računanjem konveksnih ljuski, autori pokazuju kako VVC bolje iskorištava visoke rezolucije za razliku od ostalih kodeka, koristeći širi raspon kodnih brzina s kojima je moguće ostvariti videostrujanje za danu rezoluciju. [4]

Postoje mnogi faktori koji mogu utjecati na kvalitetu prijenosa videa, kao što su kašnjenje, kolebanje kašnjenja (eng. *jitter*) i gubitak. Kod zagušenih mreža dolazi do gubitka video paketa, koji posljedično stvaraju lošu kvalitetu videa. Nadalje, postoje strogi uvjeti

kašnjenja koje postavlja strujanje multimedijskog prometa. Ako video paket ne dođe do vremena njegovog reproduciranja, paket se gubi. Gubitci paketa imaju značajan utjecaj na glatku kontinuiranu reprodukciju videa zbog međuokvirne ovisnosti. Manje je iritantno kada se reproducira video sekvenca manje kvalitete nego kada dolazi do prekida zbog gubitka paketa. Međutim, brza promjene kvalitete se također treba izbjegavati jer se ljudski vizualni sustav prilagođava specifičnoj kvaliteti par sekundi. Kontrolirana prilagodba video kvalitete je potrebna kako bi se smanjili negativni učinci zagušenja u mreži dok se pruža najveća moguća razina kvalitete i usluge. Koncept adaptivnog video strujanja se temelji na činjenici da korisnik radije prihvaća smanjenu kodnu brzinu naspram izgubljenih paketa. [5]

U [9], autori predlažu optimalan način kod kojeg bi multimedijski prijenosi trebali biti prilagođeni promjenama uvjeta u mreži kako bi se maksimizirala kvaliteta koju korisnik vidi. Rad [9] se temelji na hipotezi da se unutar seta načina dobivanja ciljanje kodne brzine nalazi postupak kodiranja koji maksimizira kvalitetu koju korisnik vidi. Opsežnim testiranjem, autori su ustvrdili da postoji optimalni adaptivni put (eng. *Optimum adaptation trajectory* - OAT) u prostoru mogućih načina kodiranja. [5]

Porast prostorne rezolucije videa naveo je pružatelje usluge video strujanja na uvođenje prilagodbe prostorne i vremenske rezolucije te kompresije. Na primjer, za prostorno poduzorkovan video može se osigurati dana kodna brzina s manjim korakom kvantizacije što može rezultirati slabije degradiranim videom, ovisno o sadržaju. Ovaj pristup je do sada bio uglavnom usmjeren na prostorno poduzorkovanje, ali vremensko poduzorkovanje također nudi potencijal za povećanje efikasnosti. [6]

3.1. Korišteni alati i tehnologije za kodiranje videa

3.1.1 FFMPEG

Ffmpeg je vodeći multimedijски okvir (eng. *framework*) koji je u mogućnosti kodirati, dekodirati, prekodirati, multipleksirati, demultipleksirati, strujati (eng. *stream*), filtrirati te reproducirati različiti vrste medijskih datoteka. Podržava sve formate multimedije, od onih najstarijih sve do najnovijih, ne ovisno o tome jesu li su stvoreni od strane odbora, zajednice ili tvrtke. ffmpeg nastoji ponuditi tehnički najbolje moguće rješenje kako za programere tako i za krajnje korisnike. Kako bi se to postiglo, ffmpeg koristi kombinaciju najboljih besplatnih alata koji su dostupni. Alati koji se nalaze u sklopu ffmpega su: ffmpeg, ffplay i ffprobe.[7] Alat ffmpeg je alat naredbenog retka (eng. *Command line tool*) koji služi za pretvorbu

multimedijskih datoteka iz jednog formata u drugi. Ffmpeg alat je vrlo brz video i audio pretvornik koji je u mogućnosti dohvaćati podatke uživo iz audio/video izvora.[7] U ovom radu korištene su samo neke od dostupnih zastavica u naredbi koje pruža alat ffmpeg. One su opisane u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Opis određenih zastavica dostupnih u alatu ffmpeg[7]

Zastavica	Opis	Primjer naredbe
-i	Ulazna datoteka (eng. <i>input</i>) – unosi se naziv i ekstenzija ulazne datoteke	ffmpeg -i in.mp4 out.mov
-c	Odabir koderera (eng. <i>codec</i>)	ffmpeg -c:v libx265 – za video koder ffmpeg -c:a ac3 – za audio koder
-b	Brzina prijenosa (eng. <i>bitrate</i>); izražava se u bit/s	ffmpeg -b 8
-r	Vremenska rezolucija (eng. <i>frame rate</i>); izražava se u broju okvira u sekundi	ffmpeg -r 120
-s	Prostorna rezolucija (eng. <i>resolution</i>)	ffmpeg -s:v 3840x2160

Ffplay je vrlo jednostavan i prenosiv alat za reprodukciju multimedijskih datoteka koji koristi ffmpeg i SDL biblioteke.[9]

Ffprobe je alat kojim je moguće prikazati meta podatke (eng. *Metadata*) multimedijskih datoteka. Ti podaci sadrže informacije o formatu datoteke, korištenom kodeku, vremenskoj rezoluciji i slično.[10] Na slici 3.1. su izlistani meta podaci koje ispisuje ffprobe alat.

```

C:\Windows\System32\cmd.e x + v
C:\Users\Renato\Documents\Diplomski rad\ffmpeg-2023-03-30-git-4d216654ca-full_build\bin>ffprobe HoneyBee_3840x2160_x265.265
ffprobe version 2023-03-30-git-4d216654ca-full_build-www.gyan.dev Copyright (c) 2007-2023 the FFmpeg developers
built with gcc 12.2.0 (Rev10, Built by MSYS2 project)
configuration: --enable-gpl --enable-version3 --enable-static --disable-w32threads --disable-autodetect --enable-fontc
onfig --enable-iconv --enable-gnutls --enable-libxml2 --enable-gmp --enable-bzlib --enable-lzma --enable-lisnappy --ena
ble-zlib --enable-librist --enable-librt --enable-libssh --enable-libzmq --enable-avisynth --enable-libbluray --enable-
libcaca --enable-sdl2 --enable-libaribb24 --enable-libdav1d --enable-libdav1s --enable-libuavs3d --enable-libzvbi --enab
le-librav1e --enable-libsvtav1 --enable-libwebp --enable-libx264 --enable-libx265 --enable-libxavs2 --enable-libxvid --e
nable-libaom --enable-libjxl --enable-libopenjpeg --enable-libvpx --enable-mediafoundation --enable-libass --enable-frei
0r --enable-libfreetype --enable-libfribidi --enable-liblensfun --enable-libvidstab --enable-libvmaf --enable-libzimg --
enable-amf --enable-cuda-llvm --enable-cuvid --enable-ffnvcodec --enable-nvdec --enable-nvenc --enable-d3d11va --enable-
dxva2 --enable-libvpl --enable-libshaderc --enable-vulkan --enable-libplacebo --enable-opencl --enable-libcdio --enable-
libgme --enable-libmodplug --enable-libopenmpt --enable-libopencore-amrwb --enable-libmp3lame --enable-libshine --enable-
libtheora --enable-libtwolame --enable-libvo-amrwbenc --enable-libcodec2 --enable-libilbc --enable-libgsm --enable-libo
pencore-amrnb --enable-libopus --enable-lspspeex --enable-libvorbis --enable-ladspa --enable-libbs2b --enable-libflite --
enable-libmysofa --enable-librubberband --enable-libsoxr --enable-chromaprint
libavutil      58. 5.100 / 58. 5.100
libavcodec     60. 7.100 / 60. 7.100
libavformat    60. 4.101 / 60. 4.101
libavdevice    60. 2.100 / 60. 2.100
libavfilter     9. 5.100 /  9. 5.100
libswscale     7. 2.100 /  7. 2.100
libswresample  4. 11.100 /  4. 11.100
libpostproc    57. 2.100 / 57. 2.100
Input #0, hevc, from 'HoneyBee_3840x2160_x265.265':
Duration: N/A, bitrate: N/A
Stream #0:0: Video: hevc (Main), yuv420p(tv), 3840x2160, 120 fps, 120 tbr, 1200k tbn
C:\Users\Renato\Documents\Diplomski rad\ffmpeg-2023-03-30-git-4d216654ca-full_build\bin>

```

Slika 3.1. Prikaz meta podataka korištenjem ffprobe alata na datoteku *HoneyBee_3840x2160_x265.265*

3.2. Priprema baze podataka video signala

Za izradu baze podataka video signala bilo je potrebno preuzeti nekomprimirane video signale sa Ultra Video Group stranice. [11] Za potrebe ovog rada korišteno je pet video sekvenci različite prostorne i vremenske kompleksnosti: *HoneyBee*, *ReadySteadyGo*, *Bosphorus*, *Jockey*, *YachtRide*. Reprezentativna slika iz svake sekvence je prikazana na slikama 3.2. do 3.5.



Slika 3.2. *HoneyBee* sekvenca



Slika 3.3. *Bosphorus* sekvenca



Slika 3.3. *Jockey* sekvenca



Slika 3.4. *ReadySteadyGo* sekvenca



Slika 3.5. *YachtRide* sekvenca

HoneyBee video sekvenca sadrži nepomični kadar skupine biljaka lavande, te jednu pčelu koja obilazi lavandu. U ovoj video sekvenci glavni pokreti su pokreti pčele koja slabije pomiče dvije biljke lavande, ostatak scene je generalno nepomičan.

Bosphorus video sekvenca sadrži pomični kadar koji prati jahtu na rijeci. Kadar se pomiče relativno sporo. Na jahti se nalaze dvije osobe i zastava na pogonskom dijelu jahte. U pozadini je moguće vidjeti most na kojemu se odvija cestovni promet, te u daljini šumsko područje. Kroz cijeli video moguće je vidjeti valove oko jahte.

ReadySteadyGo video sekvenca sadrži pomični kadar koji prati početak utrke konja. Kadar se pomiče brzo. U sekvenci se nalazi pet konja i pet njihovih jahača. Na početku utrke konji ne kreću istom brzinom stoga su konji i jahači rašireni po cijelom kadru. U pozadini kadra moguće je vidjeti dalji dio stadiona te nekolicinu visokih zgrada.

Jockey video sekvenca sadrži relativno brži pomični kadar koji prati jednog jahača i njegovog konja u punoj brzini galopiranja. U kadru se tijekom cijele sekvence većinom vide samo konj i njegov jahač. Pred kraj sekvence kamera se usmjerava prema podu. U početnom dijelu se može vidjeti par detalja u pozadini (tablica s rezultatima, hitna pomoć, par sponzorskih reklama).

YachtRide video sekvenca sadrži sporiji kadar koji se pred kraj zaustavlja na jednu poziciju dok jahta ne izađe izvan kadra. Tijekom dijela sekvence gdje kamera prati jahtu moguće je vidjeti vozača jahte i dvije osobe na stražnjem dijelu jahte kako razgovaraju. Jedan od govornika tokom razgovora maše rukom. Iza govornika, moguće je vidjeti zastavu kako vijori na vjetru. Oko same jahte je moguće vidjeti osrednje valove. Na nepomičnom dijelu sekvence, vidi se par zgrada na suprotnoj obali rijeke, te manji valovi rijeke.

Ovih pet sekvenci je izabrano tako da imaju različitu prostornu i vremensku složenost. Pri tome je za mjeru prostorne složenosti korišten parametar prostorna informacija (eng. *Spatial Information* - SI), a za mjeru vremenske složenosti parametar (eng. *Temporal Information* - TI).

Prostorna informacija, SI, pokazuje maksimalnu količinu prostornih detalja u videu. Za dani niz od N slika, SI se računa filtriranjem luminantnih uzoraka (i, j) svake slike Sobelovim filtrom, te se zatim računa standardna devijacija filtriranih elemenata slike. U nastavku je prikazana formula kojom se izračunava SI. [12]

$$SI = \max_{0 \leq n \leq N-1} \left\{ \underset{\substack{1 \leq i \leq W-2 \\ 1 \leq j \leq H-2}}{\text{std}} \left[\sqrt{[Gh_n(i, j)]^2 + [Gv_n(i, j)]^2} \right] \right\}$$

W predstavlja širinu slike, a H predstavlja visinu slike. $G_{h_n}(i, j)$ i $G_{v_n}(i, j)$ predstavljaju rezultate konvolucije horizontalnog i vertikalnog 3x3 Sobelovog filtera za detekciju rubova sa slikom.

Temporalna informacija, TI, predstavlja maksimalnu vrijednost temporalne varijacije između uspješnih slika F_{n-1} i F_n . TI se izračunava pomoću sljedeće formule, [12], :

$$TI = \max_{1 \leq n \leq N-1} \left\{ \underset{\substack{0 \leq i \leq W-1 \\ 0 \leq j \leq H-1}}{\text{std}} [F_n(i, j) - F_{n-1}(i, j)] \right\}$$

Tablica 3.2. prikazuje TI i SI vrijednosti za *HoneyBee*, *Bosphorus*, *Jockey*, *ReadySteadyGo*, *YachtRide* video sekvence. Vrijednosti su dobivene procjenom iz grafičkog prikaza rezultata iz [12].

Tablica 3.2. Temporalne i prostorne informacije video sekvenci [12]

Video sekvenca	Temporalna informacija, TI	Prostorna informacija, SI
HoneyBee	4	19.2
Bosphorus	6	31.5
YachtRide	14.3	43
Jockey	30	29.9
ReadySteadyGo	37.7	50.8

Sve video sekvence su preuzete s prostornom rezolucijom 4K (3840x2160), vremenskom rezolucijom 120 slika u sekundi (eng. *frames per second - fps*), s 8 bitova po elementu slike i komponenti te u YUV video formatu. Ove su videosekvence iskorištene za kodiranje na različitim kodnim brzinama i različitim prostornim i vremenskim rezolucijama. Nadalje, korištene su kao referentne sekvence za proračun kvalitete kodiranih sekvenci primjenom objektivne metrike PSNR (eng. *Peak Signal to Noise Ratio*).

3.3. Postupak kodiranja video sekvenci

Za potrebe ovog rada bilo je potrebno ispitati kvalitetu svake video sekvence ovisno o promjeni određenih parametara kako bi se vidio utjecaj promjene vremenske rezolucije za različite postavke video signala. Parametri koji su se mijenjali su prostorna rezolucija, vremenska rezolucija i kodna brzina, kako je dano u tablicama 3.3. do 3.5.

Tablica 3.3. Prikaz vrijednosti parametara prostorne rezolucije

Prostorna rezolucija	480x360	1280x720	1920x1080	3840x2160
----------------------	---------	----------	-----------	-----------

Tablica 3.4. Prikaz vrijednosti parametara vremenske rezolucije

Vremenska rezolucija	25fps	30fps	60fps	120fps
----------------------	-------	-------	-------	--------

Tablica 3.5. Postavljene kodne brzine ovisno o prostornoj rezoluciji

	480x360		1280x720		1920x1080		3840x2160	
Prijenosna brzina	50	250	50	250	250	700	700	2400
	500	700	700	2400	2400	6200	6200	10000

Prije promjene parametara vremenske rezolucije i kodne brzine, potrebno je od originalnog

videa skalirati ostale prostorne rezolucije koje će se koristiti u daljnjim kodiranjima. Na primjeru sekvence *HoneyBee* prikazat će se postupak. Uzima se video signal *HoneyBee_3840x2160.yuv* i pomoću *ffmpeg* naredbe za skaliranje videa kodira se video sekvence za 1920x1080, 1280x720, 480x360 prostorne rezolucije. Za skaliranje na rezoluciju 1920x1080 elemenata slike koristi se naredba:

```
ffmpeg -s:v 3840:2160 -i HoneyBee_3840x2160.yuv -vf scale=1920:1080
HoneyBee_1920x1080.yuv
```

„*ffmpeg*“ dio naredbe pokreće *ffmpeg* preko konzole operacijskog sustava. „*-s:v 3840:2160*“ postavlja rezoluciju video prozora na 3840x2160 tako da odgovara prostornoj rezoluciji ulaznog videa. „*-i HoneyBee_3840x2160.yuv*“ označava ulaznu video datoteku. „*-vf scale=1920:1080*“ obavlja skaliranje ulazne datoteke na željenu rezoluciju, u ovom primjeru je to 1920x1080. „*HoneyBee_1920x1080.yuv*“ dio koda predstavlja naziv izlazne datoteke.

Nakon skaliranja prostorne rezolucije potrebno je skalirati vremenske rezolucije video sekvenci. Svaka prostorna rezolucija se skalira sa 120 slika u sekundi na 60, 30 i 25 slika u sekundi. Skaliranje vremenske rezolucije se postiže sljedećom naredbom:

```
ffmpeg -s:v 3840x2160 -itsscale 0.5 -i Bosphorus_3840x2160.yuv
Bosphorus_3840x2160_60fps.yuv
```

„*-itsscale scale*“ dio naredbe provodi promjenu veličine vremenskih oznaka ulazne datoteke, te na taj način izlazna video sekvenca ostaje iste trajnosti kao ulazna video sekvenca sa promjenom vremenske rezolucije[2]. Koeficijentom „*scale*“ uz „*-itsscale*“ naredbu određuje se vremenska rezolucija izlazne sekvence.

$$scale = \frac{output\ file\ [fps]}{input\ file\ [fps]}$$

U tablici 3.6. dane su vrijednosti „*scale*“ koeficijenta za 60, 30 i 25 slika u sekundi.

Tablica 3.6. Prikaz *scale* koeficijenata za korištene vremenske rezolucije

Vremenska rezolucija	60	30	25
Koeficijent <i>scale</i>	0.5	0.25	0.20833333

Sljedeći korak je kodiranje sekvenci svih vremenskih i prostornih rezolucija sa različitim kodnim brzinama (prema tablici 3.5.). Kodiranje se obavljalo pomoću sljedeće naredbe:

```
ffmpeg -s:v 3840x2160 -r 120 -i Bosphorus_3840x2160.yuv -b:v 700k -c:v libx265 Bosphorus_3840_700kb_120fps.265
```

„-r 120“ govori koderu da se kodira video sekvenca koja trenutno ima vremensku rezoluciju od 120 sličica u sekundi. „-b:v 700k“ dio naredbe postavlja kodnu brzinu od 700 kb/s. „-c:v libx265“ eksplicitno nalaže korištenje H.265 kodera prilikom kodiranja video sekvence.

Nadalje, radi se promjena prostornih rezolucija svih iskodiranih video sekvenci na originalnu 3840x2160 rezoluciju. To se postiže sljedećom naredbom:

```
ffmpeg -i Bosphorus_3840_10000kb_120fps.265 -vf scale=3840:2160:flags=bilinear Bosphorus_3840_10000kb_120fps_bilin.265
```

Na dio naredbe za skaliranje prostorne rezolucije dodaje se zastavica za bilinearnu interpolaciju kod skaliranja prostorne rezolucije. Koristi se bilinearna interpolacija kako bi se odredila lokacija sljedećeg novog elementa slike u odnosu na pozicije četiri referentna elementa slike, te se tako ostvaruju promjene prostornih rezolucija. [13]

Zadnja naredba koja se provodi je naredba za promjenu vremenske rezolucije video sekvence na originalnih 120 sličica po sekundi.

```
ffmpeg.exe -i "Bosphorus_3840_10000kb_120fps_bilin.265" -filter:v "minterpolate='fps=120:mi_mode=mc:mc_mode=aobmc:me_mode=bidir:me=epzs'" "Bosphorus_3840_10000kb_120fps_bilin_mint.265"
```

Ova naredba koristi interpolaciju pokreta (eng. *Motion Interpolation*) za promjenu vremenske rezolucije. Interpolacija pokreta koristi temporalnu redundanciju između slika. Generalno se koristi FSBMA (eng. *Full Search Block Matching Algorithm*) algoritam koji odrađuje procjenu pokreta na osnovi element slike po elementu slike (eng. *pixel-by-pixel basis*). [14]

„fps=120“ postavlja željenu vremensku rezoluciju izlazne video sekvence, u ovom slučaju je to 120 sličica u sekundi. „mi_mode=mc i“ postavlja način rada interpolacije pokreta

na interpolaciju s kompenzacijom pokreta (eng. *Motion compensated interpolation*). Odabiranjem interpolacije s kompenzacijom pokreta omogućuje se „mc_mode=aobmc“ opcija naredbe koja označuje korištenje prilagodljive kompenzacije pokreta preklopnog bloka (eng. *Adaptive overlapping block motion compensation*). „me_mode:bidir“ označava korištenje obostrane procjene pokreta kao načina procjene pokreta gdje se vektori pomaka procjenjuju za svaku sliku iz smjera prema naprijed i smjera prema natrag. „me=epzs“ označava da se koristi poboljšani algoritam prediktivnog pretraživanja zona (eng. *Enhanced predictive zonal search algorithm*) kao algoritam za procjenu pokreta. Ostale vrijednosti za interpolaciju pokreta su standardnih vrijednosti. [1]

3.4. Rezultati kodiranja video sekvenci

Za procjenu kvalitete kodiranih videosekvenci koristi se vrijednost PSNR-a koja je izračunata usporedbom kodiranih sekvenci različitih prostornih i vremenskih rezolucija i originalne video sekvence (4K, 120 fps) kodirane kodnom brzinom 30000 kbit/s. PSNR se računa prema sljedećoj formuli:

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{I_{max}^2}{MSE} [dB]$$

U gore navedenoj formuli, I_{max} predstavlja maksimalnu moguću vrijednost elemenata slike. S obzirom da sve sekvence imaju 8 bitova po elementu slike, vrijednost I_{max} po formuli $I_{max} = 2^B - 1$ iznosi 255. MSE predstavlja srednju kvadratnu pogrešku.[1]

PSNR ocjene kvalitete videa prikazane su u ovom poglavlju za dvije sekvence, sekvencu *HoneyBee* koja ima najmanje vrijednosti parametara SI i TI od svih kodiranih sadržaja i sekvencu *ReadySteadyGo* koja ima najveće vrijednosti ovih parametara. Rezultati za ostale sekvence su dani u Prilogu I.

3.4.1 HoneyBee video sekvenca

U tablici 3.7. dani su rezultati izračuna PSNR-a za *HoneyBee* sekvence 3840x2160 prostorne rezolucije. Na slici 3.6. prikazani su rezultati tablice 3.7. gdje različite krivulje predstavljaju različite vrijednosti vremenske rezolucije. Iz prikazanih rezultata moguće je primijetiti da su najbolji rezultati dobiveni najvećom vrijednosti kodne brzine od 10000 kbit/s i vremenske rezolucije od 120 slika po sekundi. S obzirom da je *HoneyBee* sekvenca snimljena statičnim kadrom, dobiveni su dobri rezultati kroz sve kombinacije parametara. Jedina iznimka je sekvenca sa kodnom brzinom od 700 kbit/s i vremenskom rezolucijom od 120 slika po

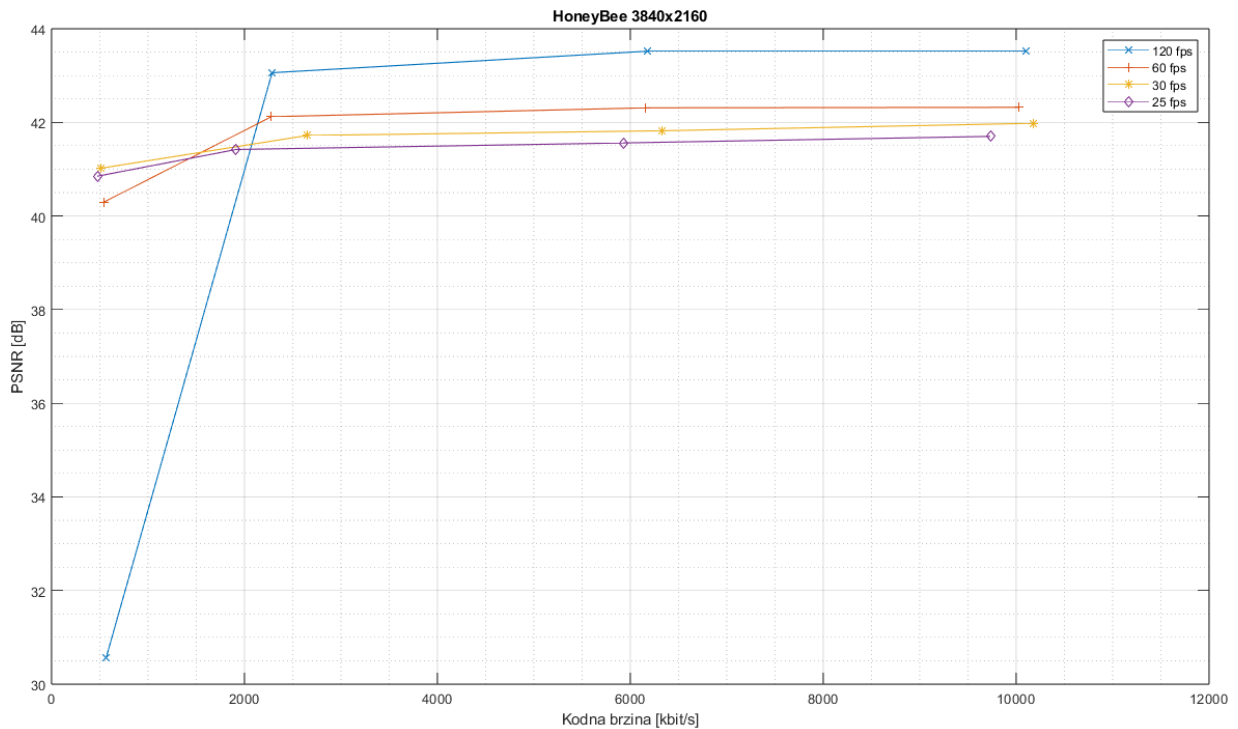
sekundi. Pretpostavka je da koder nije imao dovoljno veliku kodnu brzinu koja bi dobro pokrila brze promjene slika te su se zbog toga stvarali artefakti na video sekvenci. Prema dobivenim rezultatima, za 4K rezoluciju i brzinu 700 kbit/s optimalna vremenska rezolucija bi bila 30 slika po sekundi. Na toj vremenskoj rezoluciji za sve kodne brzine dobivene su relativno slične vrijednosti PSNR-a što bi primjerice bilo korisno kod usluge strujanja videa. Ukoliko korisnik nema dovoljno veliku širinu pojasa (eng. *bandwidth*) koja bi omogućila pravovremeni prijenos veće veličine datoteka videa koje su dobivene većim kodnim brzinama, odabirom manje datoteke dobivene manjom kodnom brzinom korisnik virtualno ne bi primijetio bitne razlike. Tablica 3.8. prikazuje kodne brzine koje je H.265 koder ostvario prilikom kodiranja video sekvenci.

Tablica 3.7. PSNR vrijednosti za 3840x2160 prostornu rezoluciju HoneyBee video sekvenci

HoneyBee, 3840x2160				
PSNR [dB]				
	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s	10000 kbit/s
120 fps	30.56	43.06	43.52	43.52
60 fps	40.30	42.12	42.31	42.32
30 fps	41.02	41.72	41.82	41.98
25 fps	40.85	41.46	41.56	41.7

Tablica 3.8. Ostvarene kodne brzine za 3840x2160 prostornu rezoluciju HoneyBee video sekvenci

HoneyBee, 3840x2160				
Ostvarena kodna brzina [kbit/s]				
	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s	10000 kbit/s
120 fps	475.2	1913.6	5928	9737.6
60 fps	510.4	2652	6332.8	10180.8
30 fps	545.6	2278.4	6155.2	10022.4
25 fps	564.8	2286.4	6182.4	10099.2



Slika 3.6. Grafički prikaz PSNR vrijednosti za 3840x2160 prostornu rezoluciju HoneyBee video sekvenci

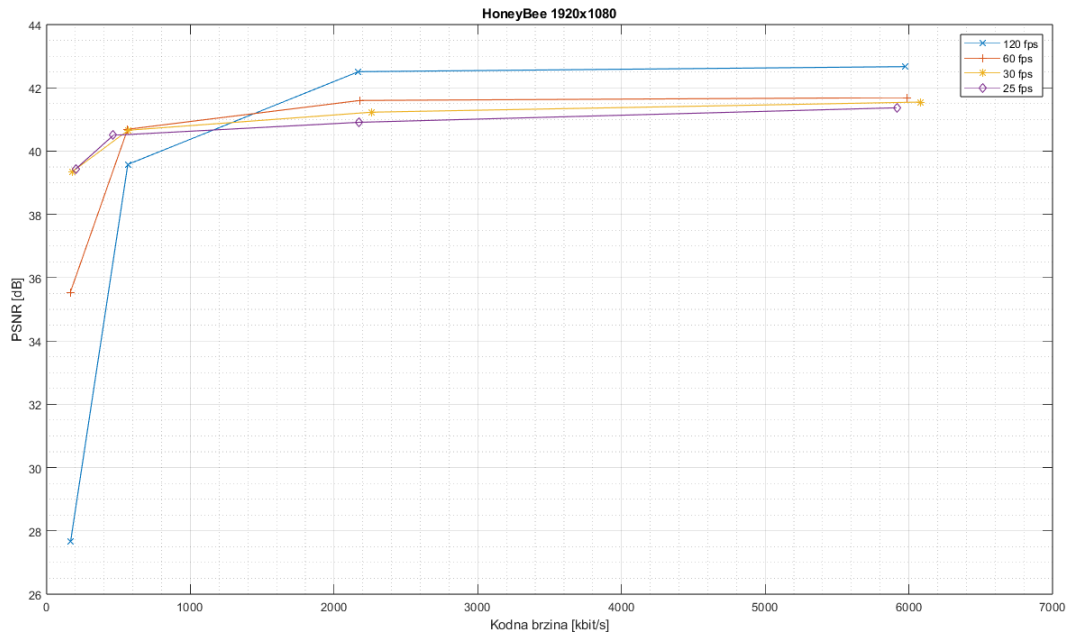
U tablici 3.9. prikazani su rezultati izračuna PSNR za *HoneyBee* sekvencu 1920x1080 prostorne rezolucije. Na slici 3.7. prikazani su rezultati iz tablice 3.9. gdje krivulje predstavljaju različite vrijednosti vremenske rezolucije. Za sekvence koje su dekodirane sa 1920x1080 natrag na 3840x2160 prostornu rezoluciju dobiveni su nešto lošiji rezultati PSNR-a od rezultata danih u tablici 3.6. Razlog tomu je promjena prostorne rezolucije što ima utjecaja na kvalitetu videa pri promjeni na izvornu rezoluciju. Sekvence dobivene višom kodnom brzinom (700 kbit/s i više) dobivene su u dobroj kvaliteti. Najgori rezultat dobiven je na sekvenci s najvišom vremenskom rezolucijom i najmanjom kodnom brzinom. U tablici 3.10 prikazane su kodne brzine koje je ostvario H.265 koder prilikom kodiranja sekvenci.

Tablica 3.9. PSNR vrijednosti za 1920x1080 prostornu rezoluciju HoneyBee video sekvenci

HoneyBee, 1920x1080				
PSNR [dB]				
	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s
120 fps	27.66	39.58	42.51	42.68
60 fps	35.52	40.69	41.6	41.69
30 fps	39.34	40.66	41.23	41.55
25 fps	39.44	40.5	40.91	41.37

Tablica 3.10. Ostvarene kodne brzine za 1920x1080 prostornu rezoluciju HoneyBee video sekvenci

HoneyBee, 1920x1080				
Ostvarena kodna brzina [kbit/s]				
	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s
120 fps	203.2	464	2172.8	5920
60 fps	176	568	2260.8	6081.6
30 fps	163.2	563.2	2179.2	5988.8
25 fps	166.4	564.8	2169.6	5974.4



Slika 3.7. Grafički prikaz PSNR vrijednosti za 1920x1080 prostornu rezoluciju HoneyBee video sekvenci

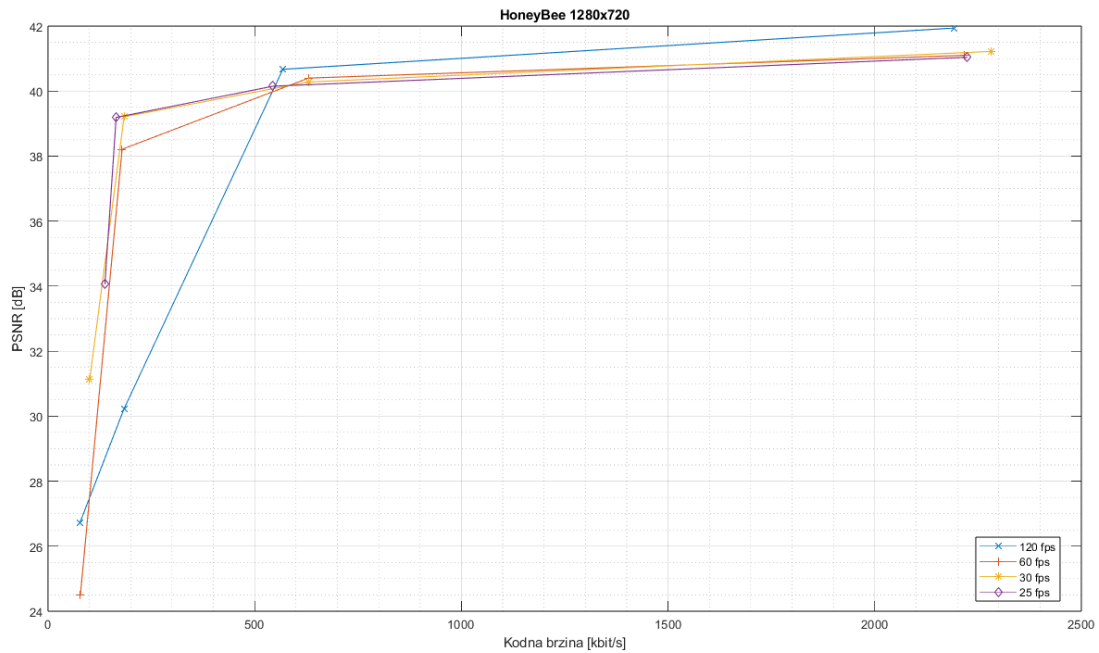
U tablici 3.11. prikazani su rezultati izračuna PSNR za *HoneyBee* sekvencu 1280x720 prostorne rezolucije, a na slici 3.8. prikazani su rezultati iz te tablice. Za sekvence koje su dekodirane sa 1280x720 natrag na 3840x2160 prostornu rezoluciju dobiveni su nešto lošiji rezultati PSNR-a od rezultata danih u tablici 3.7. Iako rezultati jesu lošiji od onih za više prostorne rezolucije, sekvence za ovu prostornu rezoluciju s višim kodnim brzinama i svim vremenskim rezolucijama su i dalje dobre kvalitete. Vidljive su manje promjene vrijednosti PSNR-a za kodne brzine 250, 700 i 2400 kbit/s promjenom vremenskih rezolucija (iznimka je samo sekvenca na 120 fps i 250 kbit/s). Najveći utjecaj promjene vremenske rezolucije za 1280x720 prostornu rezoluciju bio je na kodnoj brzini od 50 kbit/s. Najlošiji rezultat dobiven je na 50 kbit/s i 60 fps, dok je za 25 fps PSNR 34,06 dB što je još uvijek dosta visoko i ukazuje na prilično dobru kvalitetu dekodiranog videa. Tablica 3.12. prikazuje kodne brzine koje je H.265 koder ostvario prilikom kodiranja video sekvenci.

Tablica 3.11. PSNR vrijednosti za 1280x720 prostornu rezoluciju HoneyBee video sekvenci

HoneyBee, 1280x720				
PSNR [dB]				
	50 kbit/s	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s
120 fps	26.71	30.23	40.67	41.94
60 fps	24.51	38.21	40.40	41.10
30 fps	31.13	39.21	40.28	41.22
25 fps	34.06	39.19	40.15	41.04

Tablica 3.12. Ostvarene kodne brzine za 1280x720 prostornu rezoluciju HoneyBee video sekvenci

HoneyBee, 1280x720				
Ostvarena kodna brzina [kbit/s]				
	50 kbit/s	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s
120 fps	137.6	164.8	544	2224
60 fps	100.8	184	630.4	2281.6
30 fps	78.4	179.2	630.4	2217.6
25 fps	76.8	184	568	2192



Slika 3.8. Grafički prikaz PSNR vrijednosti za 1280x720 prostornu rezoluciju HoneyBee video sekvenci

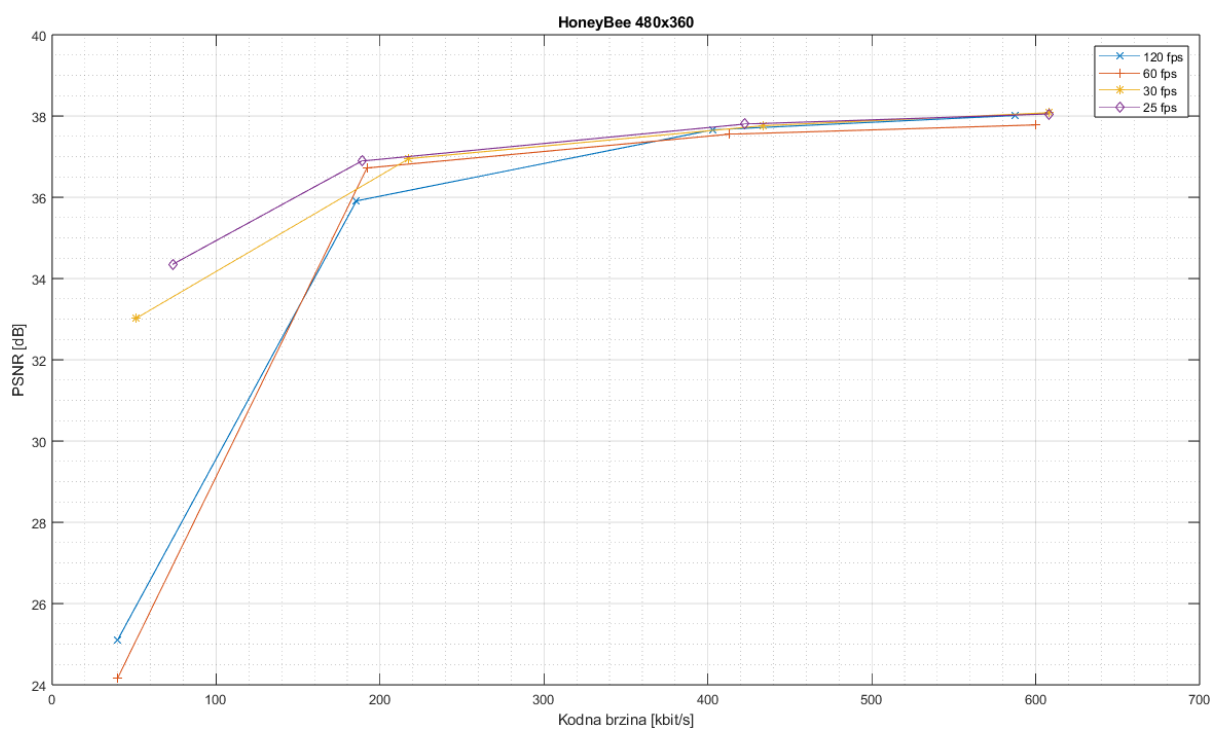
U tablici 3.13. prikazani su rezultati izračuna PSNR za *HoneyBee* sekvencu 480x360 prostorne rezolucije, kao i na slici 3.9. Za sekvence koje su dekodirane sa 480x360 natrag na 3840x2160 prostornu rezoluciju dobiveni su nešto lošiji rezultati PSNR-a od rezultata danih u tablici 3.11. Sekvence kodirane većim vrijednostima kodne brzine (od 250 kbit/s na više) i za ovu prostornu rezoluciju daju adekvatne rezultate. Za kodne brzine 500 i 700 kbit/s promjenom vremenske rezolucije dobiju se relativno slične vrijednosti PSNR-a. Kod kodne brzine 250 kbit/s smanjivanjem vremenske rezolucije vrijednosti PSNR-a blago rastu, dok kod brzine od 50 kbit/s za 60 fps PSNR opada na najnižu vrijednost, te se daljnjim smanjivanjem vremenske rezolucije naglo povećava. Tablica 3.14. prikazuje kodne brzine koje je H.265 koder koristio prilikom kodiranja video sekvenci.

Tablica 3.13. PSNR vrijednosti za 480x360 prostornu rezoluciju HoneyBee video sekvenci

HoneyBee, 480x360 PSNR [dB]				
	50 kbit/s	250 kbit/s	500 kbit/s	700 kbit/s
120 fps	25.11	35.91	37.66	38.01
60 fps	24.17	36.72	37.55	37.79
30 fps	33.02	36.95	37.76	38.08
25 fps	34.35	36.89	37.80	38.05

Tablica 3.14. Ostvarene kodne brzine za 480x360 prostornu rezoluciju HoneyBee video sekvenci

HoneyBee, 480x360 Ostvarena kodna brzina [kbit/s]				
	50 kbit/s	250 kbit/s	500 kbit/s	700 kbit/s
120 fps	73.6	188.8	422.4	608
60 fps	51.2	217.6	433.6	608
30 fps	40	192	412.8	600
25 fps	40	185.6	403.2	587.2



Slika 3.9. Grafički prikaz PSNR vrijednosti za 480x360 prostornu rezoluciju HoneyBee video sekvenci

3.3.2. ReadySteadyGo video sekvenca

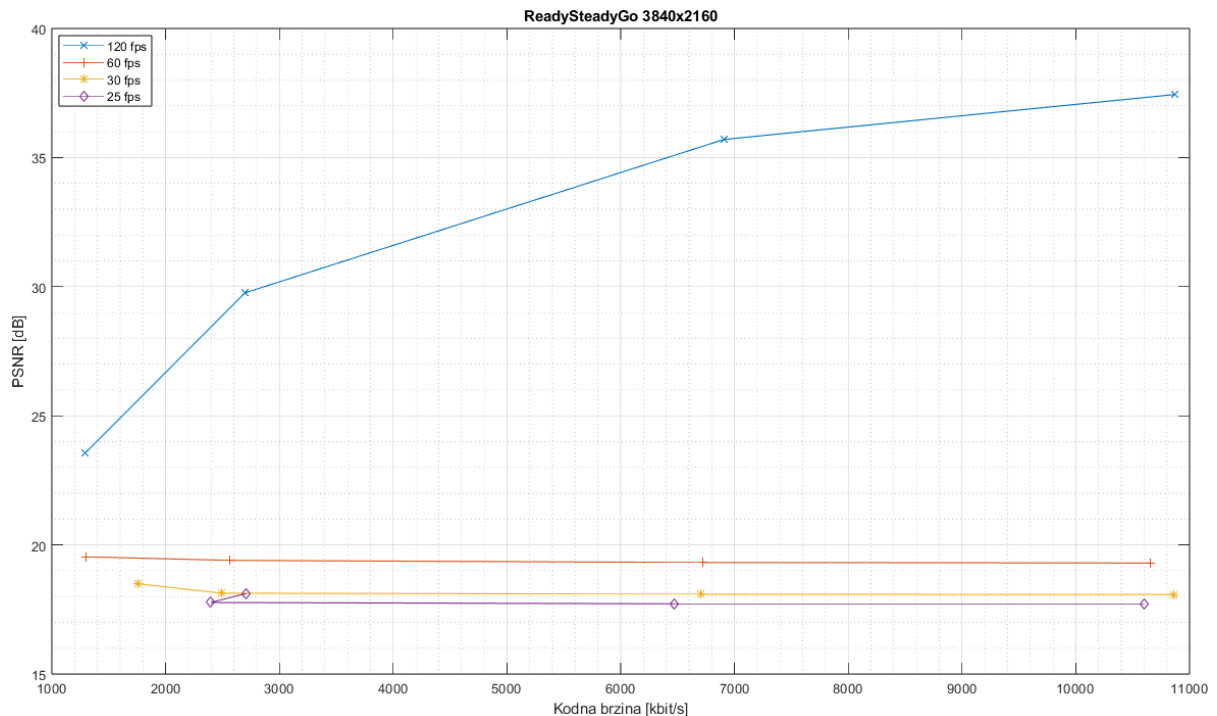
Kod sekvenci s bržim pomicanjem kadra i velikom količinom promjene detalja se vidi znatna razlika u kvaliteti kodiranja naspram sekvenci s nepomičnim kadrom i manjom promjenom detalja. Tablica 3.15. prikazuje rezultate *ReadySteadyGo* sekvence kodirane na 3840x2160 prostornoj rezoluciji. Slikom 3.10. predloženi su grafički rezultati Tablice 3.15. gdje krivulje predstavljaju različite vremenske rezolucije. Kako je sekvenca *ReadySteadyGo* izuzetno visoke vremenske pa i prostorne složenosti, rezultati su lošiji kod nižih vremenskih rezolucija jer dekodirer ne može osigurati kvalitetno naduzorkovanje na originalnu vremensku rezoluciju zbog velike razlike u susjednim slikama te dolazi do zamućivanja detalja i pojave artefakata. Tablica 3.16. prikazuje kodne brzine koje je H.265 koder ostvario prilikom kodiranja video sekvenci. Vidi se da je ostvarena kodna brzina značajno veća od postavljene brzine 700 kb/s, što ukazuje da koder zbog visoke složenosti sekvence te visoke prostorne rezolucije nije mogao provesti kodiranje s postavljenim parametrima kodiranja. Zanimljivo je primijetiti da se za vremenske rezolucije 25 fps, 30 fps i 60 fps povećanjem ostvarene kodne brzine nije postiglo i povećanje kvalitete videa jer PSNR vrijednosti padaju. To pokazuje da pogoršanje kvalitete videa zbog artefakata vremenskog naduzorkovanja nadmašuje pogoršanje kvalitete zbog artefakata kodiranja, kada se radi o sekvenci visoke vremenske složenosti.

Tablica 3.15. PSNR vrijednosti za 3840x2160 prostornu rezoluciju ReadySteadyGo video sekvenci

ReadySteadyGo, 3840x2160 PSNR [dB]				
	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s	10000 kbit/s
120 fps	23.55	29.76	35.70	37.44
60 fps	19.54	19.4	19.32	19.30
30 fps	18.49	18.13	18.09	18.08
25 fps	18.12	17.77	17.72	17.72

Tablica 3.16. Ostvarene kodne brzine za 3840x2160 prostornu rezoluciju ReadySteadyGo video sekvenci

ReadySteadyGo, 3840x2160 Ostvarena kodna brzina [kbit/s]				
	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s	10000 kbit/s
120 fps	2710.4	2395.2	6470.4	10600
60 fps	1760	2492.8	6700.8	10862.4
30 fps	1300.8	2568	6720	10654.4
25 fps	1291.2	2697.6	6907.2	10868.8



Slika 3.10. Grafički prikaz PSNR vrijednosti za 3840x2160 prostornu rezoluciju ReadySteadyGo video sekvenci

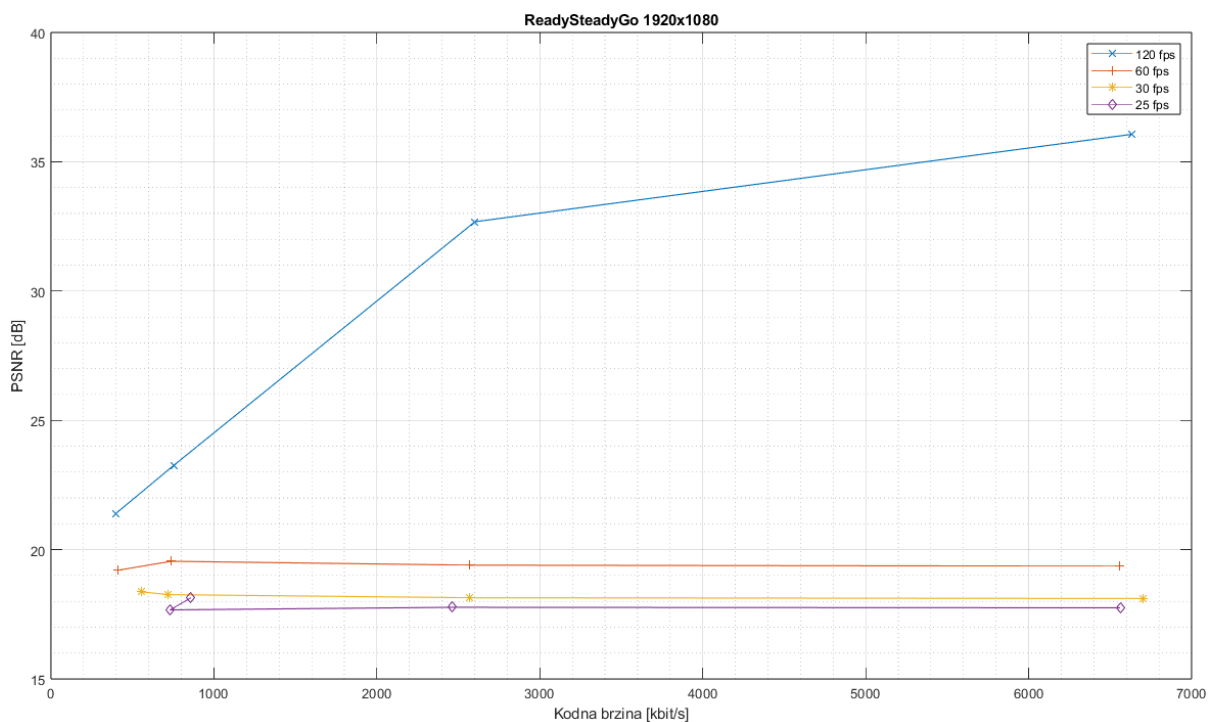
Tablica 3.17. prikazuje rezultate kodiranja sekvenci *ReadySteadyGo* 1920x1080 prostorne rezolucije, koji su prikazani i slikom 3.11. Iz rezultata se može vidjeti kako je kvaliteta najbolja za vremensku rezoluciju od 120 fps, ali kvaliteta brzo opada smanjenjem kodne brzine. Najlošiji rezultati dobiveni su za vremensku rezoluciju 25 fps pri visokim kodnim brzinama. Tablica 3.18. prikazuje kodne brzine koje je H.265 koder ostvario prilikom kodiranja video sekvenci. U ovom slučaju je koder uspio ostvariti kodne brzine blizu postavljenih 700 kb/s, ali postavljenu kodnu brzinu od 250 kb/s nije uspio ostvariti nit za jednu vremensku rezoluciju.

Tablica 3.17. PSNR vrijednosti za 1920x1080 prostornu rezoluciju ReadySteadyGo video

ReadySteadyGo, 1920x1080 PSNR [dB]				
	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s
120 fps	21.4	23.26	32.68	36.06
60 fps	19.2	19.55	19.4	19.36
30 fps	18.37	18.26	18.14	18.11
25 fps	18.14	17.87	17.77	17.75

Tablica 3.18. Ostvarene kodne brzine za 1920x1080 prostornu rezoluciju ReadySteadyGo video

ReadySteadyGo, 1920x1080 Ostvarena kodna brzina [kbit/s]				
	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s
120 fps	859.2	731.2	2464	6564.8
60 fps	552	720	2568	6702.4
30 fps	408	739.2	2566.4	6560
25 fps	398.4	753.6	2601.6	6632



Slika 3.11. Grafički prikaz PSNR vrijednosti za 1920x1080 prostornu rezoluciju ReadySteadyGo video sekvenci

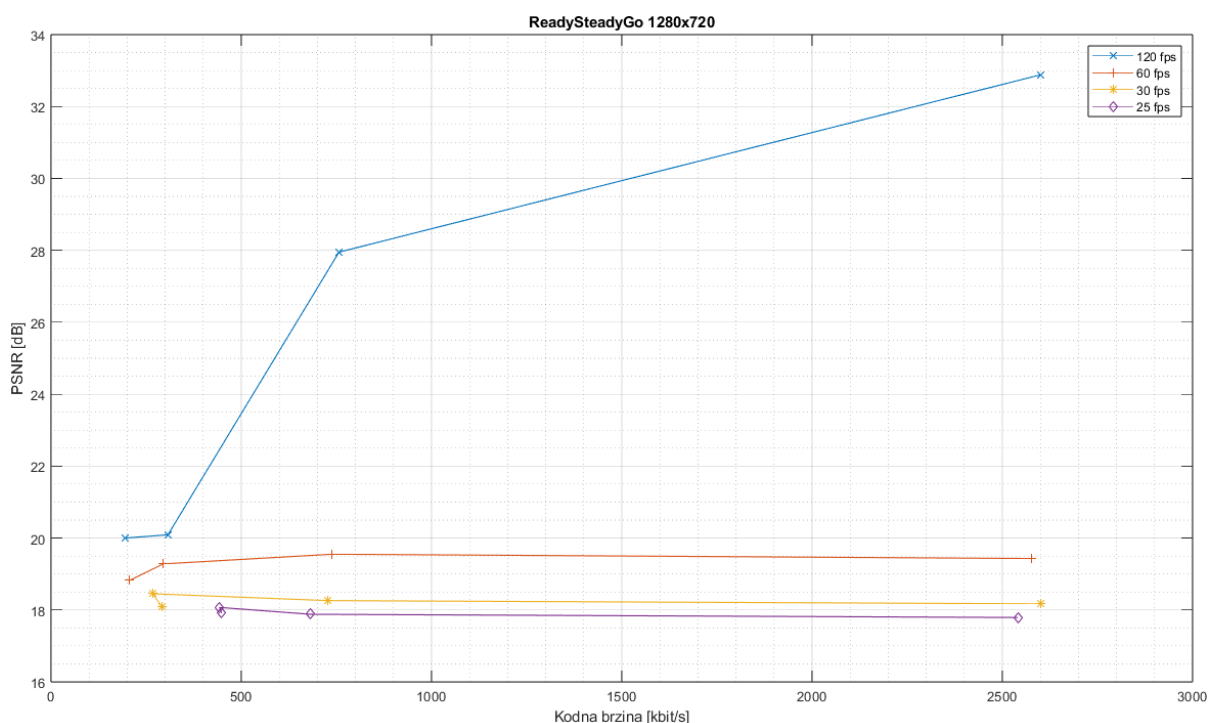
Tablica 3.19. i slika 3.12. prikazuje rezultate kodiranja sekvenci *ReadySteadyGo* 1280x720 prostorne rezolucije. Za 120 fps PSNR je niži nego za rezoluciju 1920x1080, dok su za ostale vremenske rezolucije rezultati slični rezultatima navedenima u tablici 3.12., može se vidjeti da i promjena prostorne rezolucije ima blagi utjecaj na kvalitetu video sekvenci. Kao i u prijašnjim sekvencama, najlošiji rezultat dobiven je na najnižoj vremenskoj rezoluciji pri najvećoj kodnoj brzini. Tablica 3.20. prikazuje kodne brzine koje je H.265 koder ostvario prilikom kodiranja video sekvenci.

Tablica 3.19. PSNR vrijednosti za 1280x720 prostornu rezoluciju ReadySteadyGo video

ReadySteadyGo, 1280x720				
PSNR [dB]				
	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s
120 fps	20	20.1	27.95	32.88
60 fps	18.82	19.28	19.55	19.43
30 fps	18.09	18.45	18.26	18.17
25 fps	17.91	18.08	17.88	17.79

Tablica 3.20. Ostvarene kodne brzine za 1280x720 prostornu rezoluciju ReadySteadyGo video

ReadySteadyGo, 1280x720 Ostvarena kodna brzina [kbit/s]				
	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s
120 fps	448	443.2	681.6	2540.8
60 fps	291.2	267.2	728	2601.6
30 fps	206.4	294.4	739.2	2577.6
25 fps	195.2	307.2	756.8	2600



Slika 3.12. Grafički prikaz PSNR vrijednosti za 1280x720 prostornu rezoluciju ReadySteadyGo video sekvenci

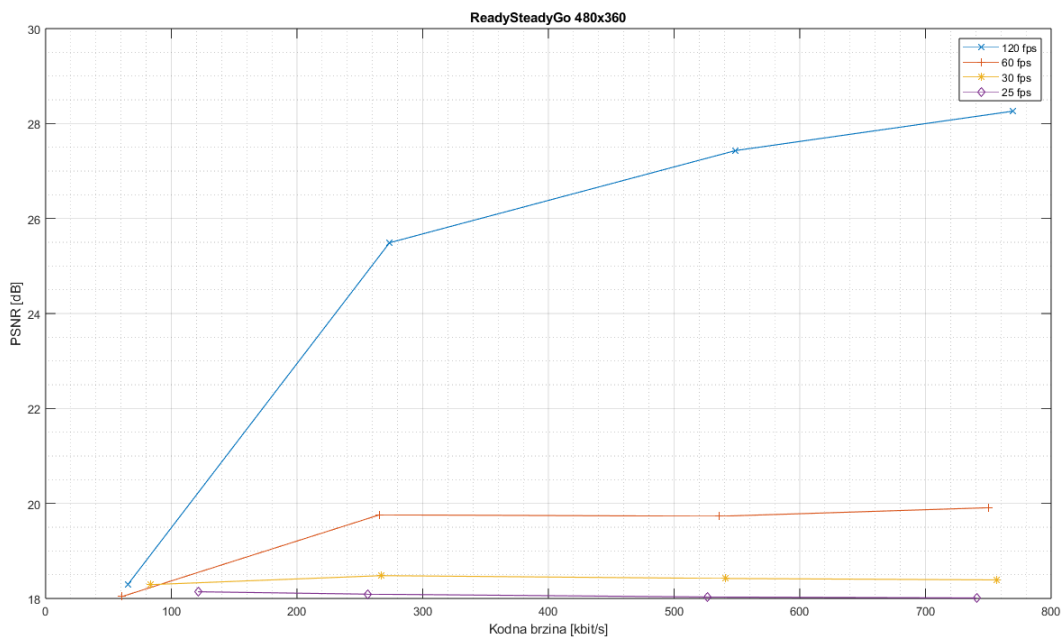
Tablica 3.21. i slika 3.13. prikazuju rezultate kodiranja sekvenci *ReadySteadyGo* 480x360 prostorne rezolucije. Iz rezultata je moguće vidjeti da se prilikom smanjenja prostorne rezolucije kvaliteta videa za više vremenske rezolucije smanjuje, dok se za niže vremenske rezolucije malo povećavaju. Time se dobivaju rezultati koji su relativno blizu jedni drugih. No, kvaliteta videa je i dalje loša da nije moguće razaznati detalje i što se točno sve odvija u video sekvenci. Također, kao i kod dosadašnjih rezultata, najlošija kvaliteta je dobivena za vremensku rezoluciju 25 fps i kodnu brzinu 6200 kbit/s. Tablica 3.22. prikazuje kodne brzine koje je H.265 koder ostvario prilikom kodiranja video sekvenci.

Tablica 3.21. PSNR vrijednosti za 480x360 prostornu rezoluciju ReadySteadyGo video

ReadySteadyGo, 480x360 PSNR [dB]				
	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s
120 fps	18.30	25.49	27.43	28.26
60 fps	18.04	19.76	19.73	19.71
30 fps	18.29	18.48	18.42	18.39
25 fps	18.14	18.09	18.03	18.01

Tablica 3.22. Ostvarene kodne brzine za 480x360 prostornu rezoluciju ReadySteadyGo video

ReadySteadyGo, 480x360 Ostvarena kodna brzina [kbit/s]				
	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s
120 fps	121.6	256	526.4	740.8
60 fps	83.2	267.2	540.8	756.8
30 fps	60.8	265.6	536	750.4
25 fps	65.6	273.6	548.8	769.6



Slika 3.13. Grafički prikaz PSNR vrijednosti za 480x360 prostornu rezoluciju ReadySteadyGo video sekvenci

3.5. Izbor optimalne prostorne i vremenske rezolucije za danu kodnu brzinu

Na temelju rezultata prikazanih u poglavlju 3.4 napravljena je analiza i procjena optimalnih prostornih i vremenskih rezolucija za određenu kodnu brzinu za svaku pojedinu sekvencu i rezultati su dani u tablicama 3.15, 3.16., 3.17, 3.18 i 3.19. Za svaku sekvencu na temelju sjecišta krivulja određene su granične kodne brzine kod kojih se promjenom vremenske ili prostorne rezolucije postiže najbolji rezultat, tj. najviši PSNR. Na temelju toga su dobiveni rasponi kodnih brzina unutar kojih određeni par vremenske i prostorne rezolucije ostvaruje najviši PSNR.

Na temelju procjena optimalnih prostornih i vremenskih rezolucija za određene raspone kodnih brzina za sekvencu *HoneyBee* (tablica 3.15) može se zaključiti da je optimalni scenarij promjena rezolucija s povećanjem kodne brzine postepeno povećanje prostorne rezolucije na najnižim vremenskim rezolucijama, a nakon prelaska na 4K rezoluciju postepeno povećanje vremenske rezolucije. S obzirom da je *HoneyBee* video sekvenca vrlo niske složenosti (TI=4, SI=19,2) može se reći da ovakav scenarij odgovara takvom tipu sekvence.

Tablica 3.23. Optimalne prostorne i vremenske rezolucije za *HoneyBee* video sekvencu

<i>HoneyBee</i>		
Raspon kodnih brzina, [kbit/s]	Optimalna prostorna rezolucija	Optimalna vremenska rezolucija, [fps]
<75	480x360	30
[75 – 145]	480x360	25
[145 – 165]	1280x720	25
[165 – 195]	1920x1080	30
[195 – 450]	1920x1080	25
[450 – 500]	3840x2160	25
[500 – 1380]	3840x2160	30
[1380 – 1610]	1280x720	120
[1610 – 2210]	1920x1080	120
>2210	3840x2160	120

Za *Bosphorus* video sekvencu procijenjene optimalne prostorne i vremenske rezolucije za određene raspone kodnih brzina dane su u tablici 3.16. Ova video sekvenca ima sličnu vrijednost parametra TI kao sekvenca *HoneyBee*, ali dosta veću vrijednost SI (TI=6, SI=31,5). U ovom se slučaju pokazalo boljim prvo podizanje vremenske rezolucije, a zatim prostorne. Vrlo sličan optimalni scenarij promjene rezolucije ima i sekvenca *YachtRide* s nešto većim vrijednostima SI i TI ((TI=14,3, SI=43), tablica 3.17).

Tablica 3.24. Optimalne prostorne i vremenske rezolucije za *Bosphorus* video sekvencu

<i>Bosphorus</i>		
Raspon kodnih brzina, [kbit/s]	Optimalna prostorna rezolucija	Optimalna vremenska rezolucija, [fps]
<160	480x360	30
[160 – 220]	480x360	60
[220 – 670]	480x360	120
[670 – 2250]	1280x720	120
[2250 – 8500]	1920x1080	120
>8500	3840x2160	120

Tablica 3.25. Optimalne prostorne i vremenske rezolucije za *YachtRide* video sekvencu

<i>YachtRide</i>		
Raspon kodnih brzina, [kbit/s]	Optimalna prostorna rezolucija	Optimalna vremenska rezolucija, [fps]
<155	480x360	30
[155 – 175]	480x360	60
[175 – 900]	480x360	120
[900 – 3000]	1280x720	120
[3000 – 7600]	1920x1080	120
>7600	3840x2160	120

Video sekvence *Jockey* (TI=30, SI=29,9) i *ReadySteadyGo* (TI=37,7, SI=52,8) koje su najstroženije od svih pet sekvenci imaju isti optimalni scenarij izbora rezolucija: i na najnižim brzinama optimalna je najviša vremenska rezolucija, a prema višim brzinama povećava se prostorna rezolucija. Zanimljivo je da je za obje sekvence na najnižim brzinama, ispod 80 kb/s odnosno 100 kb/s, optimalna rezolucija 1280x720, dok je na nešto višim kodnim brzinama bolje rezultate dala niža prostorna rezolucija 480x360. Ovi rezultati pokazuju složenu vezu između artefakata kodiranja, artefakata naduzorkovanja i sadržaja videosekvence.

Tablica 3.26. Optimalne prostorne i vremenske rezolucije za *Jockey* video sekvencu

<i>Jockey</i>		
Raspon kodnih brzina, [kbit/s]	Optimalna prostorna rezolucija	Optimalna vremenska rezolucija, [fps]
<1300	480x360	120
[1300 – 3500]	1280x720	120
[3500 – 9500]	1920x1080	120
>9500	3840x2160	120

Tablica 3.27. Optimalne prostorne i vremenske rezolucije za *ReadySteadyGo* video sekvencu

<i>ReadySteadyGo</i>		
Raspon kodnih brzina, [kbit/s]	Optimalna prostorna rezolucija	Optimalna vremenska rezolucija, [fps]
<1000	480x360	120
[1000 – 3000]	1280x720	120
[3000 – 8000]	1920x1080	120
>8000	3840x2160	120

Sveukupni zaključak je da za sekvence male prostorne i vremenske složenosti optimalni scenarij promjene rezolucije obuhvaća prvo povećanje prostorne, a zatim vremenske rezolucije. Za sekvence srednje složenosti na nižim brzinama pogodno je povećavati vremensku rezoluciju uz zadržavanje niže prostorne rezolucije, a zatim povećati prostornu rezoluciju, dok je za sekvence najveće složenosti najbolje i na najnižim brzinama početi s najvišom vremenskom rezolucijom i postepeno povećavati prostornu. Iz prikazanih rezultata nije posve jasno kako na izbor optimalnog scenarija utječu zasebno SI i TI, odnosno prostorna i vremenska složenost, pa je za odgovor na to pitanje potrebno provesti još eksperimenata s više sekvenci različite kompleksnosti.

Treba napomenuti da su konkretne vrijednosti raspona brzina određene približno prema raspoloživim rezultatima kodiranja te zbog relativno malog broja rezultata dosta su neprecizni. Zbog velikog zahtjeva na računalne resurse (vrijeme kodiranja, podskaliranja, nadskaliranja, izračuna PSNR te potreban memorijski prostor za veliki broj sekvenci), kodne brzine su morale biti pažljivo odabrane za svaku od prostornih rezolucija, kao i broj prostornih i vremenskih rezolucija, kako bi ukupan broj videosekvenci dobiven kodiranjem bio prihvatljiv. Ukupno je obrađeno 320 sekvenci, od kojih čak 64 sekvence 4K rezolucije. Međutim, unatoč nepreciznosti dobiveni rezultati su omogućili uvid u utjecaj složenosti sekvenci na optimalni izbor rezolucija i dali osnovu za daljnje istraživanje ovog problema.

4. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada odrađeno je kodiranje video sekvenci pomoći H.265 koderu primjenom različitih parametara vremenske i prostorne rezolucije, te promjena parametra kodne brzine kako bi se ustanovio njihov utjecaj na kvalitetu video sekvenci. Razmatrano je četiri prostorne rezolucije (480x360, 1280x720, 1920x1080 i 3840x2160) i četiri vremenske rezolucije (25 fps, 30 fps, 60 fps i 120 fps), a kvaliteta se mjerila nakon dekodiranja i naduzorkovanja na originalnu rezoluciju 3840x2160 i 120 fps. Iz priloženih rezultata moguće je zaključiti da promjena vremenske i prostorne rezolucije različito utječu na kvalitetu videa ovisno o brzini promjene kadra i brzini promjene detalja na videu, odnosno prostorne i vremenske složenosti videosadržaja. Pokazalo se da kod sporijih video sekvenci optimalni scenarij promjene prostorne i vremenske rezolucije podrazumijeva prvo podizanje prostorne rezolucije uz zadržavanje najnižih vremenskih rezolucija, te nakon postizanja najviše prostorne rezolucije potrebno je povećavati vremensku rezoluciju. Kod sekvenci srednje složenosti boljim se pokazalo prvo podizanje vremenske rezolucije uz zadržavanje najniže prostorne rezolucije, a zatim podizanje prostorne rezolucije s povećanjem kodne brzine. Za najkompleksnije videosekvence smanjivanje vremenske rezolucije nije dalo poboljšanje kvalitete, tako da je u cijelom rasponu kodnih brzina najbolje rezultate dala najviša vremenska rezolucija uz povećanje prostorne rezolucije kod povećanja kodne brzine. Dobiveni rezultati daju uvid i u konkretne kodne brzine kod kojih treba promijeniti rezoluciju, što se može primijeniti za kodiranje drugih 4K sekvenci H.265 koderom uz poznavanje njihove prostorne, SI, i vremenske, TI, informacije kao mjere složenosti.

5. LITERATURA

- [1] Z. Li, M. S. Drew, J. Liu, „*Fundamentals of multimedia – Second edition*“, Springer, Canada, 2014.
- [2] ITU-T Recommendation H.265. (2021). High Efficiency Video Coding. International Telecommunication Union. Retrieved from [ITU Website](#).
- [3] A.V. Katsenou, J. Sole, D.R. Bull, „*Efficient Bitrate Ladder Construction for Content-Optimized Adaptive Video Streaming*“, University of Bristol, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2021.
- [4] R. Kaafarani, M. Blestel, T. Maugey, M. Ropert, A. Roumy, „*Evaluation of Bitrate Ladders For Versatile Video Coder*“, Mediakind France, Francuska, 2021.
- [5] N. Cranley, P. Perry, L. Murphy, „*Optimum adaptation trajectories for streamed mutlimedia*“, Objavljeno online, 2005.
- [6] D. Y. Lee, S. Paul, C. G. Bampis, H. Ko, J. Kim, S. Y. Jeong, B. Homan, A. C. Bovik, „*A Subjective and Objective Study of Space-Time Subsampled Video Quality*“, IEEE, 2022.
- [7] P.B. Mahol, Z. Zhili, A. Khimov, L. Izen, A. Rheinhardt, telepoint.bg, 2023., dostupno na: [About FFmpeg](#)
- [8] P.B. Mahol, Z. Zhili, A. Khimov, L. Izen, A. Rheinhardt, telepoint.bg, 2023., dostupno na: [ffmpeg Documentation](#)
- [9] P.B. Mahol, Z. Zhili, A. Khimov, L. Izen, A. Rheinhardt, telepoint.bg, 2023., dostupno na: [ffplay Documentation \(ffmpeg.org\)](#)
- [10] P.B. Mahol, Z. Zhili, A. Khimov, L. Izen, A. Rheinhardt, telepoint.bg, 2023., dostupno na: [ffprobe Documentation \(ffmpeg.org\)](#)
- [11] J. Vanne, A. Mercat, P. Sjövall, G. Gautier, Tampere Univeristy, Finland, 2023., dostupno na: [Ultra Video Group](#)
- [12] A. Mercat, M. Viitanen, J. Vanne, „*UVG Dataset: 50/120fps 4K Sequences for Video Codec Analysis and Development*“, Tampere Univeristy, Finland, 2020.
- [13] Simplilearn, „What is Bilinear Interpolation?“, Simplilearn Solutions, 2022., dostupno na: [What is Bilinear Interpolation? | Simplilearn](#)
- [14] R. Vinolee and J. Vijayalakshmi, "Motion interpolation using interframe coding for block motion picture" International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems, Moscow, Russia, 2010.

SAŽETAK

U radu je opisan H.265 standard koji je trenutno jedna od boljih opcija za kompresiju video sadržaja, te je danas u širokoj primjeni. U novije vrijeme, sve više usluga podržava kodiranje videa na različitim prostornim i vremenskim rezolucijama kako bi se njihovom optimalnom kombinacijom dobio najbolji omjer kompresije i kvalitete. U okviru ovog rada, primjenom H.265 koda, komprimirano je pet videosekvenci različite složenosti u širokom rasponu kodnih brzina, te na više prostornih i vremenskih rezolucija. Analiziran je utjecaj promjene vremenske i prostorne rezolucije na kvalitetu videa, te je za korištene sekvence predložen optimalni izbor vremenske i prostorne rezolucije za dani raspon kodnih brzina. Opisan je načini kodiranja odabranih video sekvenci, način mjerenja kvalitete dobivenih dekodiranih sekvenci, te su dani rezultati ocjene kvalitete kodiranih videa nakon dekodiranja i vraćanja na originalnu rezoluciju 4K i 120 fps.

Ključne riječi: H.265 standard, prostorna rezolucija, vremenska rezolucija, kompresija, kvaliteta, kodna brzina, optimalni izbor, 4K, 120 fps

ABSTRACT

This paper describes H.265 standard, which is currently one of the better options for video compression and is widely used today. Recently, more and more services support video encoding at different spatial and temporal resolutions to obtain the best compression-to-quality ratio through their optimal combination. In this paper, using an H.265 encoder, five video sequences of varying complexity were compressed at a wide range of bit rates and at multiple spatial and temporal resolutions. The impact of changing temporal and spatial resolution on video quality was analyzed, and an optimal choice of temporal and spatial resolution for the given range of bit rates was proposed for the used sequences. The encoding methods of the selected video sequences were described, as well as the method for measuring the quality of the obtained decoded sequences. The results of quality assessment of encoded videos after decoding and upscaling them back to original 4K and 120 fps resolution.

Key words: H.265 standard, spatial resolution, temporal resolution, compression, quality, bit rate, optimal choice, 4K, 120 fps

ŽIVOTOPIS

Renato Kuna, rođen 29. Svibnja 1996. godine u Osijeku. Pohađao je Osnovnu školu Jagode Truhelke Osijek, nakon čega upisuje Elektrotehničku i prometnu školu Osijek, smjer Elektrotehnika. Tijekom 2014. godine sudjelovao je u „Leonardo da Vinci projekt mobilnosti“ projektu Elektrotehničke i prometne škole Osijek. 2015. godine upisuje preddiplomski studij Elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. 2021. godine završava preddiplomski studij Elektrotehnike, izborni blok Komunikacije i informatika, te upisuje diplomski studij, smjer Mrežne tehnologije na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek.

PRILOG

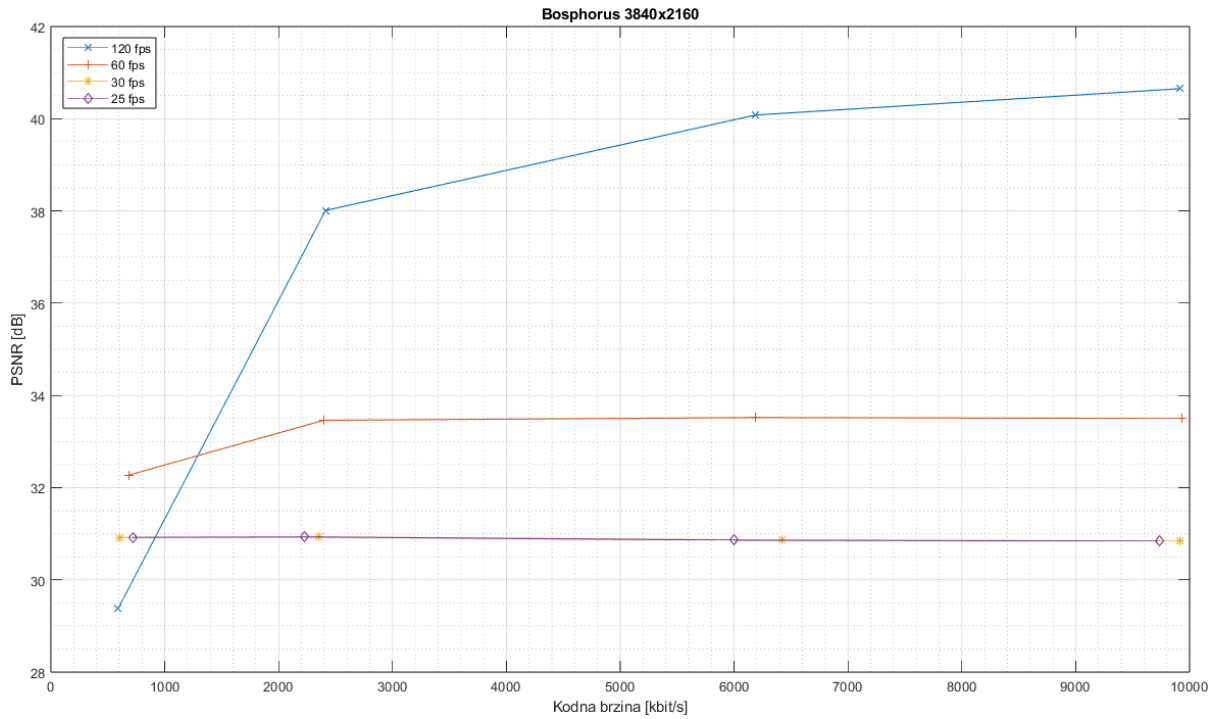
Bosphorus video sekvenca

Tablica. PSNR vrijednosti za 3840x2160 prostornu rezoluciju *Bosphorus* video sekvenci

Bosphorus, 3840x2160 PSNR [dB]				
	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s	10000 kbit/s
120 fps	29.38	38.01	40.08	40.65
60 fps	32.27	33.46	33.52	33.50
30 fps	30.92	30.93	30.86	30.84
25 fps	30.22	30.13	30.07	30.06

Tablica. Ostvarene kodne brzine za 3840x2160 prostornu rezoluciju *Bosphorus* video sekvenci

Bosphorus, 3840x2160 Ostvarena kodna brzina [kbit/s]				
	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s	10000 kbit/s
120 fps	718.4	2225.6	6001.6	9736
60 fps	604.8	2355.2	6418.8	9915.2
30 fps	681.6	2396.8	6185.6	9929.6
25 fps	591.2	2411.2	6190.4	9910.4



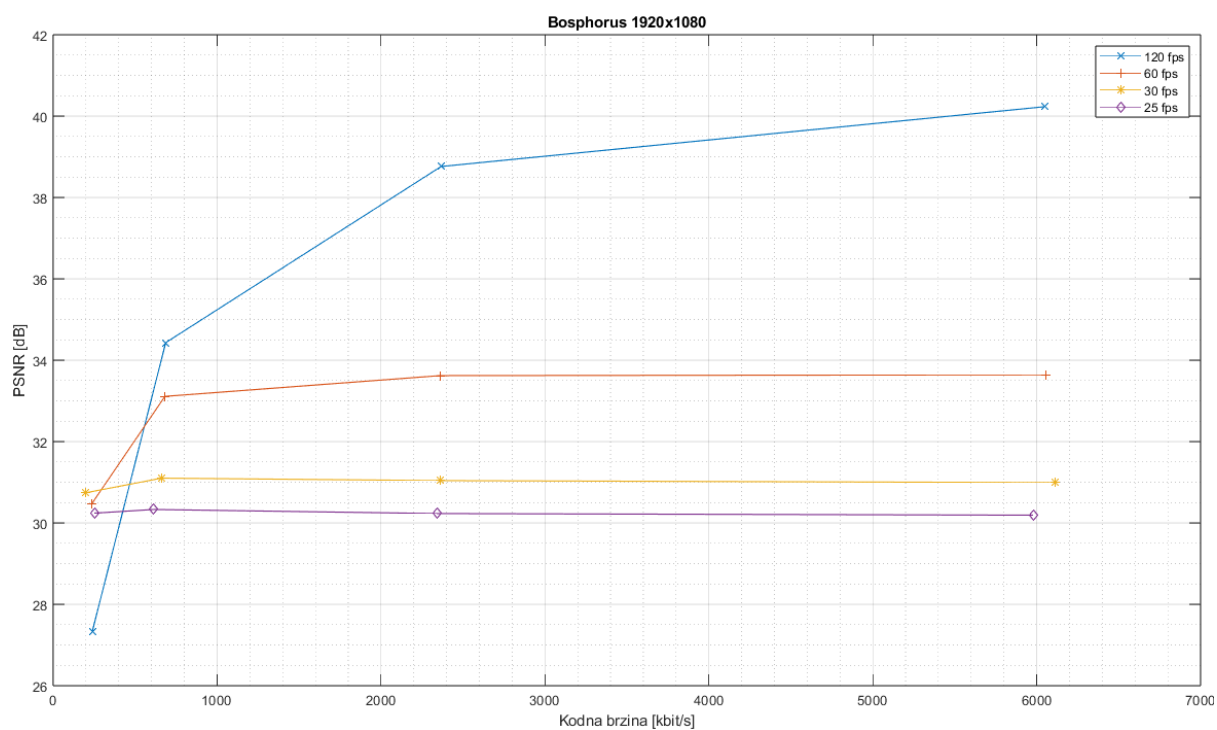
Slika. Grafički prikaz PSNR vrijednosti za 3840x2160 prostornu rezoluciju *Bosphorus* video sekvenci

Tablica. PSNR vrijednosti za 1920x1080 prostornu rezoluciju *Bosphorus* video sekvenci

Bosphorus, 1920x1080 PSNR [dB]				
	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s
120 fps	27.33	34.43	38.76	40.23
60 fps	30.46	33.11	33.62	33.64
30 fps	30.74	31.10	31.04	30.99
25 fps	30.24	30.33	30.23	30.19

Tablica. Ostvarene kodne brzine za 1920x1080 prostornu rezoluciju *Bosphorus* video sekvenci

Bosphorus, 1920x1080 Ostvarena kodna brzina [kbit/s]				
	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s
120 fps	252.8	612.8	2340	5980.8
60 fps	198.4	660.8	2361.6	6115.2
30 fps	233.6	681.6	2360	6054.4
25 fps	238.4	686.4	2366.4	6048



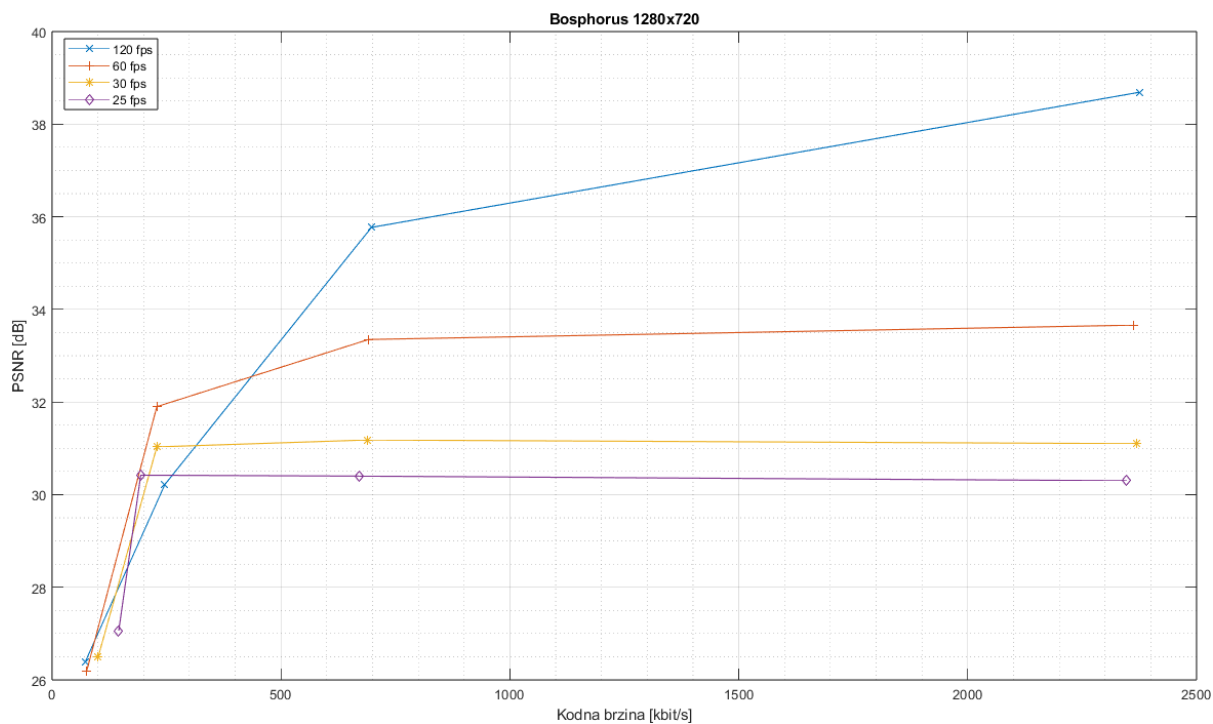
Slika. Grafički prikaz PSNR vrijednosti za 1920x1080 prostornu rezoluciju *Bosphorus* video sekvenci

Tablica. PSNR vrijednosti za 1280x720 prostornu rezoluciju *Bosphorus* video sekvenci

Bosphorus, 1280x720 PSNR [dB]				
	50 kbit/s	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s
120 fps	26.38	30.22	35.77	38.69
60 fps	26.18	31.90	33.35	33.66
30 fps	26.5	31.03	31.18	31.10
25 fps	27.06	30.42	30.4	30.30

Tablica. Ostvarene kodne brzine za 1280x720 prostornu rezoluciju *Bosphorus* video sekvenci

Bosphorus, 1280x720 Ostvarena kodna brzina [kbit/s]				
	50 kbit/s	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s
120 fps	145.6	193.6	670.4	2347.2
60 fps	100.8	228.8	688	2369.6
30 fps	75.2	228.8	691.2	2363.2
25 fps	72	246.4	697.6	2376



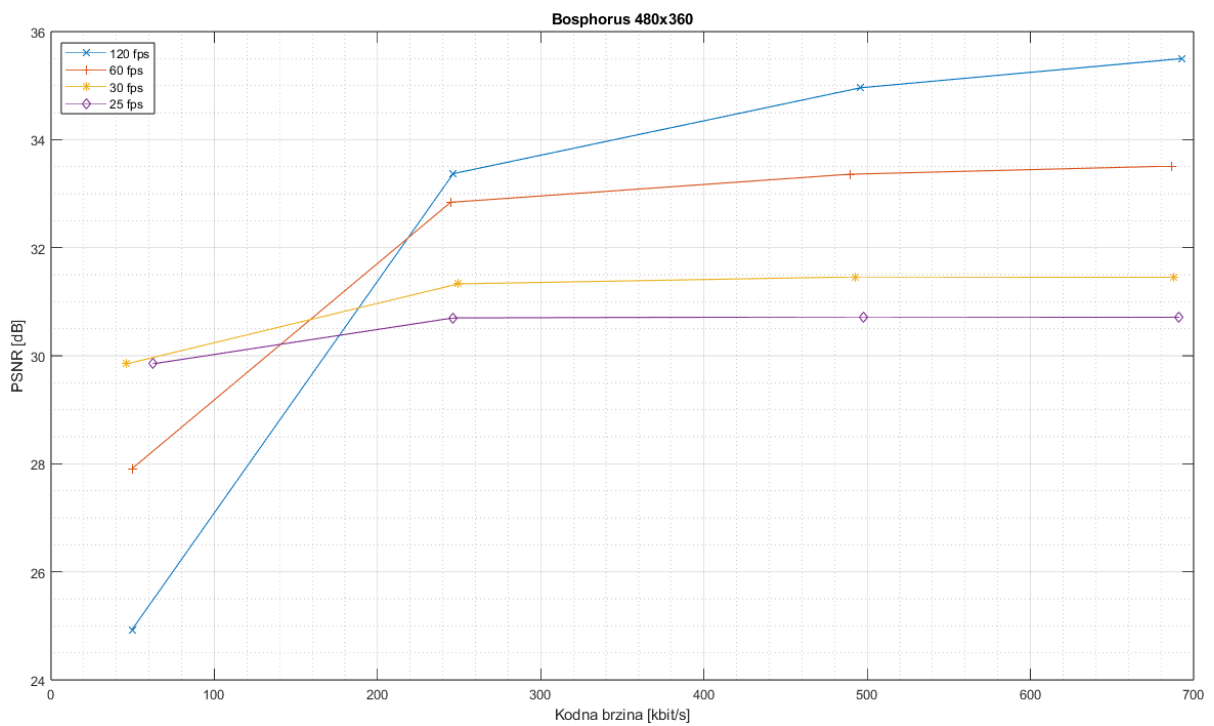
Slika. Grafički prikaz PSNR vrijednosti za 1280x720 prostornu rezoluciju *Bosphorus* video sekvenci

Tablica. PSNR vrijednosti za 480x360 prostornu rezoluciju *Bosphorus* video sekvenci

Bosphorus, 480x360 PSNR [dB]				
	50 kbit/s	250 kbit/s	500 kbit/s	700 kbit/s
120 fps	24.93	33.37	34.96	35.50
60 fps	27.91	32.84	33.36	33.51
30 fps	29.85	31.33	31.46	31.45
25 fps	29.85	30.7	30.72	30.71

Tablica. Ostvarene kodne brzine za 480x360 prostornu rezoluciju *Bosphorus* video sekvenci

Bosphorus, 480x360 Ostvarena kodna brzina [kbit/s]				
	50 kbit/s	250 kbit/s	500 kbit/s	700 kbit/s
120 fps	62.4	246.4	497.6	691.2
60 fps	46.4	249.6	492.8	688
30 fps	49.6	244.8	489.6	686.4
25 fps	49.6	246.4	496	692.8



Slika. Grafički prikaz PSNR vrijednosti za 480x360 prostornu rezoluciju *Bosphorus* video sekvenci

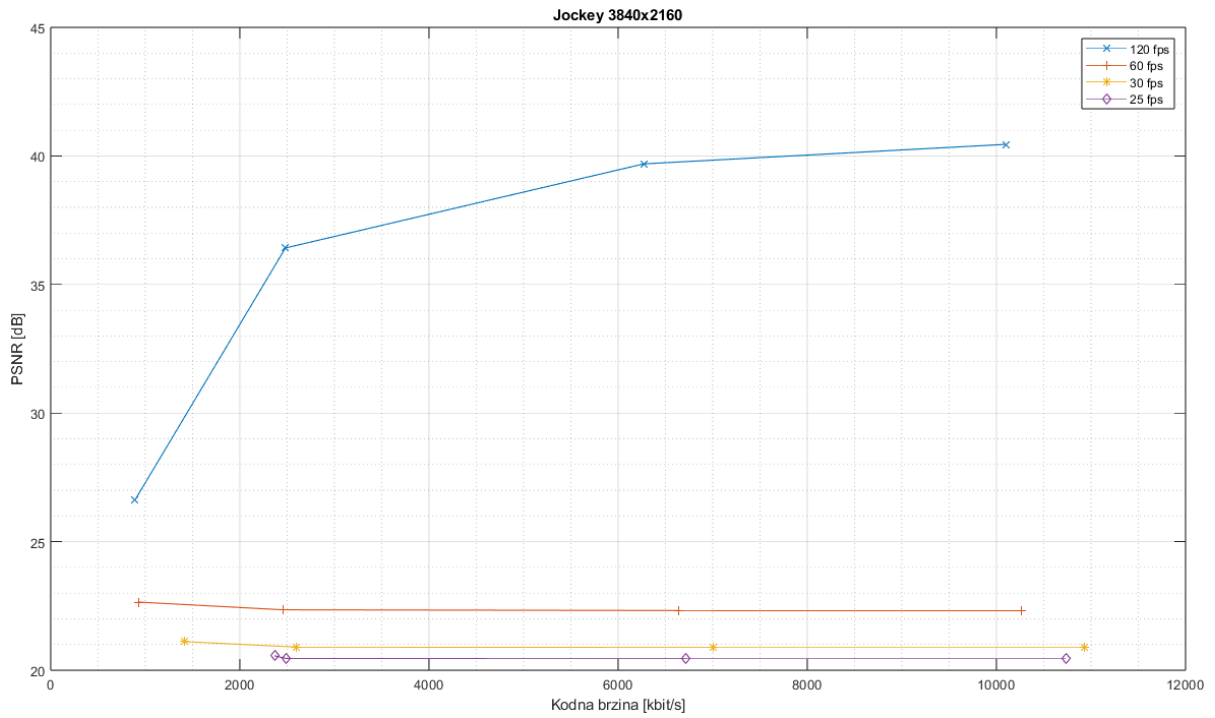
Jockey video sekvenca

Tablica. PSNR vrijednosti za 3840x2160 prostornu rezoluciju *Jockey* video sekvenci

Jockey, 3840x2160 PSNR [dB]				
	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s	10000 kbit/s
120 fps	26.61	36.42	39.69	40.45
60 fps	22.65	22.35	22.32	22.31
30 fps	21.11	20.9	20.88	20.88
25 fps	20.56	20.45	20.44	20.44

Tablica. Ostvarene kodne brzine za 3840x2160 prostornu rezoluciju *Jockey* video sekvenci

Jockey, 3840x2160 Ostvarena kodna brzina [kbit/s]				
	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s	10000 kbit/s
120 fps	2366.4	2494.4	6716.8	10732.8
60 fps	1419.2	2598.4	7000	10924.8
30 fps	926.4	2452.8	6635.2	10265.6
25 fps	889.6	2481.6	6270.4	10099.2



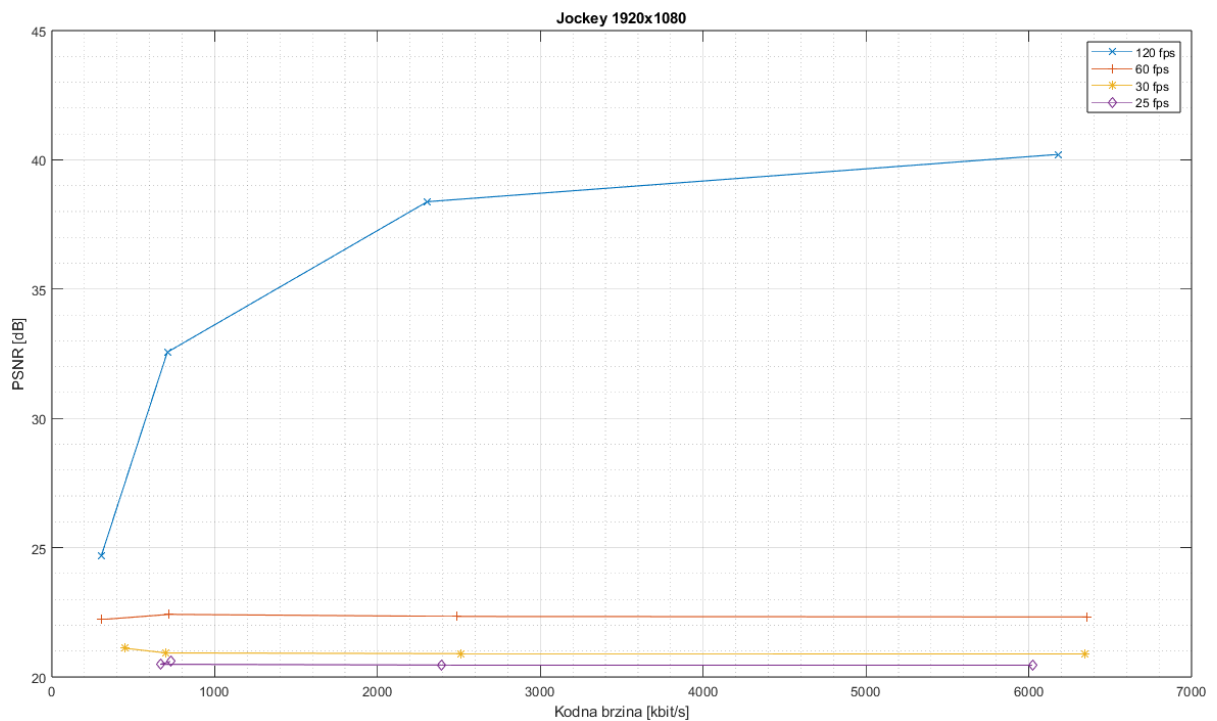
Slika Grafički prikaz PSNR vrijednosti za 3840x2160 prostornu rezoluciju *Jockey* video sekvenci

Tablica. PSNR vrijednosti za 1920x1080 prostornu rezoluciju *Jockey* video sekvenci

Jockey, 1920x1080 PSNR [dB]				
	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s
120 fps	24.7	32.56	38.389	40.21
60 fps	22.22	22.42	22.349	22.32
30 fps	21.11	20.93	20.9	20.89
25 fps	20.60	20.49	20.469	20.45

Tablica. Ostvarene kodne brzine za 1920x1080 prostornu rezoluciju *Jockey* video sekvenci

Jockey, 1920x1080 Ostvarena kodna brzina [kbit/s]				
	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s
120 fps	728	665.6	2395.2	6025.6
60 fps	449.6	697.6	2515.2	6342.4
30 fps	307.2	720	2488	6360
25 fps	304	708.8	2305.6	6184



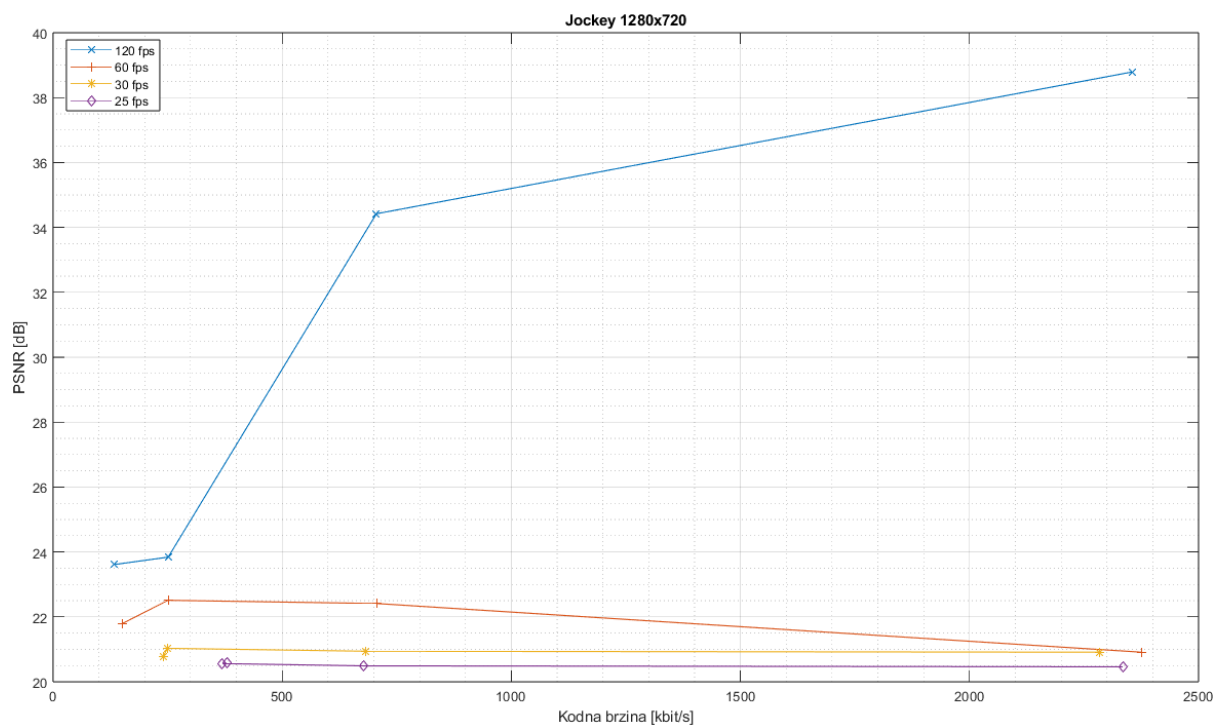
Slika. Grafički prikaz PSNR vrijednosti za 1920x1080 prostornu rezoluciju *Jockey* video sekvenci

Tablica. PSNR vrijednosti za 1280x720 prostornu rezoluciju *Jockey* video sekvenci

Jockey, 1280x720 PSNR [dB]				
	50 kbit/s	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s
120 fps	23.61	23.84	34.42	38.79
60 fps	21.79	22.51	22.41	22.35
30 fps	20.78	21.03	20.94	20.91
25 fps	20.57	20.56	20.49	20.46

Tablica. Ostvarene kodne brzine za 1280x720 prostornu rezoluciju *Jockey* video sekvenci

Jockey, 1280x720 Ostvarena kodna brzina [kbit/s]				
	50 kbit/s	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s
120 fps	379.2	369.6	676.8	2336
60 fps	240	249.6	681.6	2283.2
30 fps	150.4	251.2	707.2	2376
25 fps	132.8	251.2	705.6	2355.2



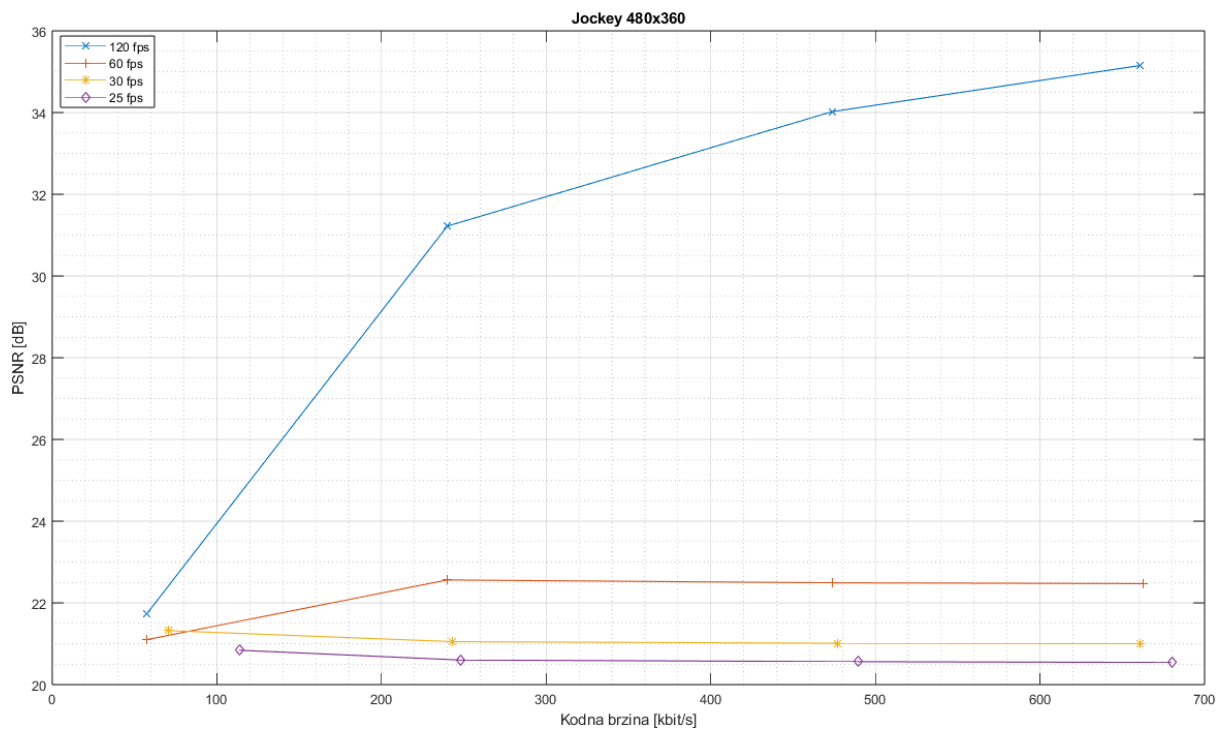
Slika. Grafički prikaz PSNR vrijednosti za 1280x720 prostornu rezoluciju *Jockey* video sekvenci

Tablica. PSNR vrijednosti za 480x360 prostornu rezoluciju *Jockey* video sekvenci

Jockey, 480x360 PSNR [dB]				
	50 kbit/s	250 kbit/s	500 kbit/s	700 kbit/s
120 fps	21.74	31.22	34.02	35.15
60 fps	21.10	22.56	22.49	22.47
30 fps	21.32	21.05	21.01	21
25 fps	20.84	20.6	20.56	20.54

Tablica. Ostvarene kodne brzine za 480x360 prostornu rezoluciju *Jockey* video sekvenci

Jockey, 480x360 Ostvarena kodna brzina [kbit/s]				
	50 kbit/s	250 kbit/s	500 kbit/s	700 kbit/s
120 fps	113.6	248	489.6	680
60 fps	70.4	243.2	476.8	660.8
30 fps	57.6	240	473.6	662.4
25 fps	57.6	240	473.6	660.8



Slika. Grafički prikaz PSNR vrijednosti za 480x360 prostornu rezoluciju *Jockey* video sekvenci

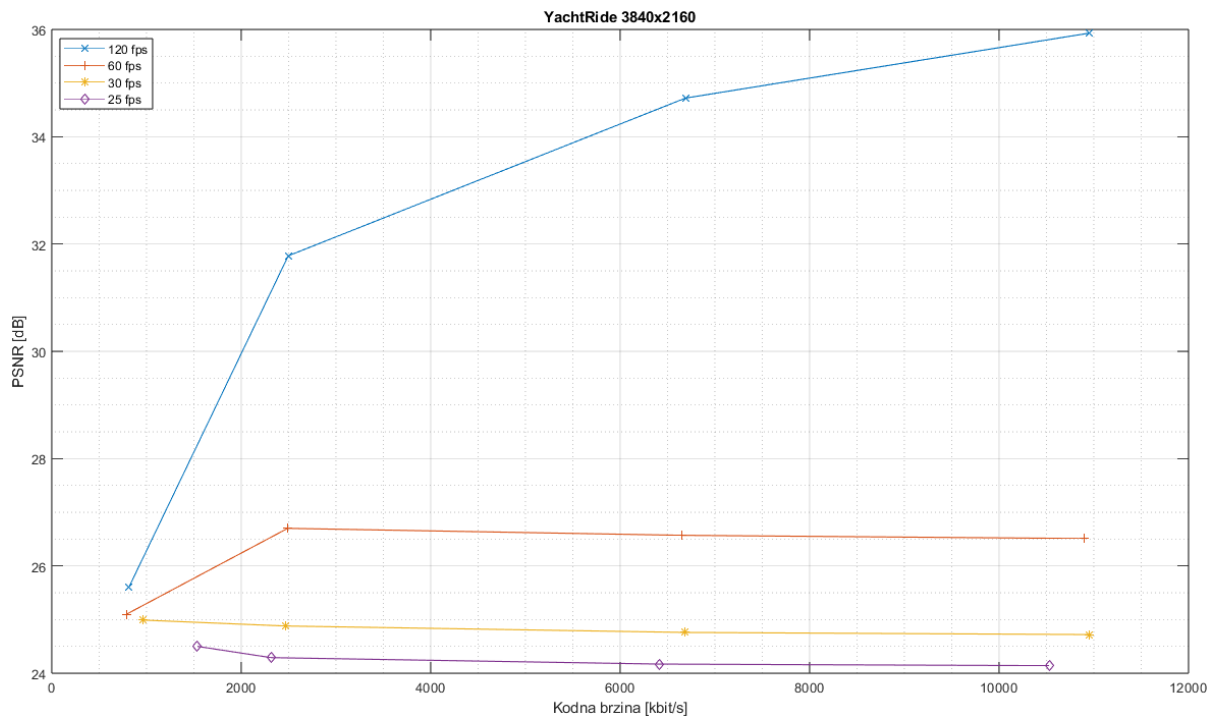
YachtRide video sekvenca

Tablica. PSNR vrijednosti za 3840x2160 prostornu rezoluciju *YachtRide* video sekvenci

YachtRide, 3840x2160 PSNR [dB]				
	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s	10000 kbit/s
120 fps	25.61	31.78	34.72	35.93
60 fps	25.10	26.7	26.57	26.51
30 fps	24.99	24.88	24.76	24.72
25 fps	24.5	24.29	24.17	24.14

Tablica. Ostvarene kodne brzine za 3840x2160 prostornu rezoluciju *YachtRide* video sekvenci

YachtRide, 3840x2160 Ostvarena kodna brzina [kbit/s]				
	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s	10000 kbit/s
120 fps	1537.6	2313.6	6411.2	10531.2
60 fps	961.6	2464	6678.4	10947.2
30 fps	788.8	2489.6	6652.8	10902.4
25 fps	816	2496	6689.6	10948.8



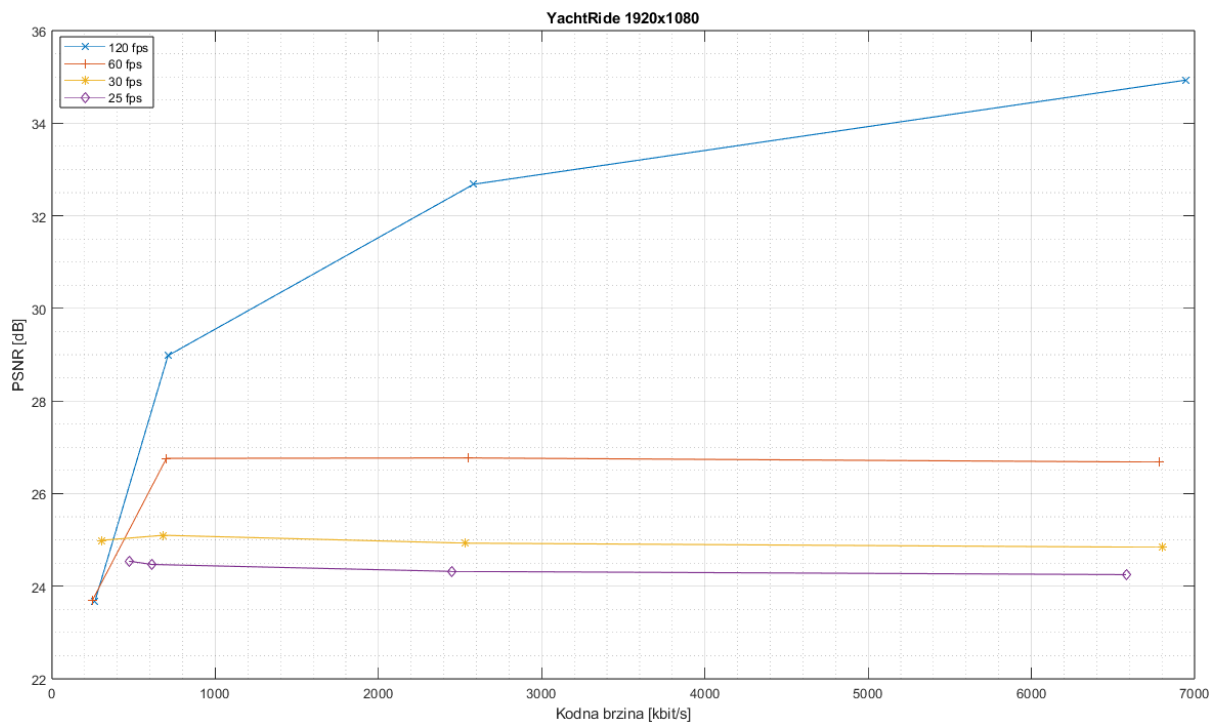
Slika. Grafički prikaz PSNR vrijednosti za 3840x2160 prostornu rezoluciju *YachtRide* video sekvenci

Tablica. PSNR vrijednosti za 1920x1080 prostornu rezoluciju *YachtRide* video sekvenci

YachtRide, 1920x1080 PSNR [dB]				
	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s
120 fps	23.67	28.98	32.68	34.93
60 fps	23.69	26.78	26.77	26.68
30 fps	24.99	25.09	24.93	24.84
25 fps	24.54	24.47	24.32	24.25

Tablica. Ostvarene kodne brzine za 1920x1080 prostornu rezoluciju *YachtRide* video sekvenci

YachtRide, 1920x1080 Ostvarena kodna brzina [kbit/s]				
	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s	6200 kbit/s
120 fps	473.6	611.2	2448	6582.4
60 fps	302.4	681.6	2528	6801.6
30 fps	246.4	700.8	2547.2	6784
25 fps	262.4	710.4	2582.4	6946.4



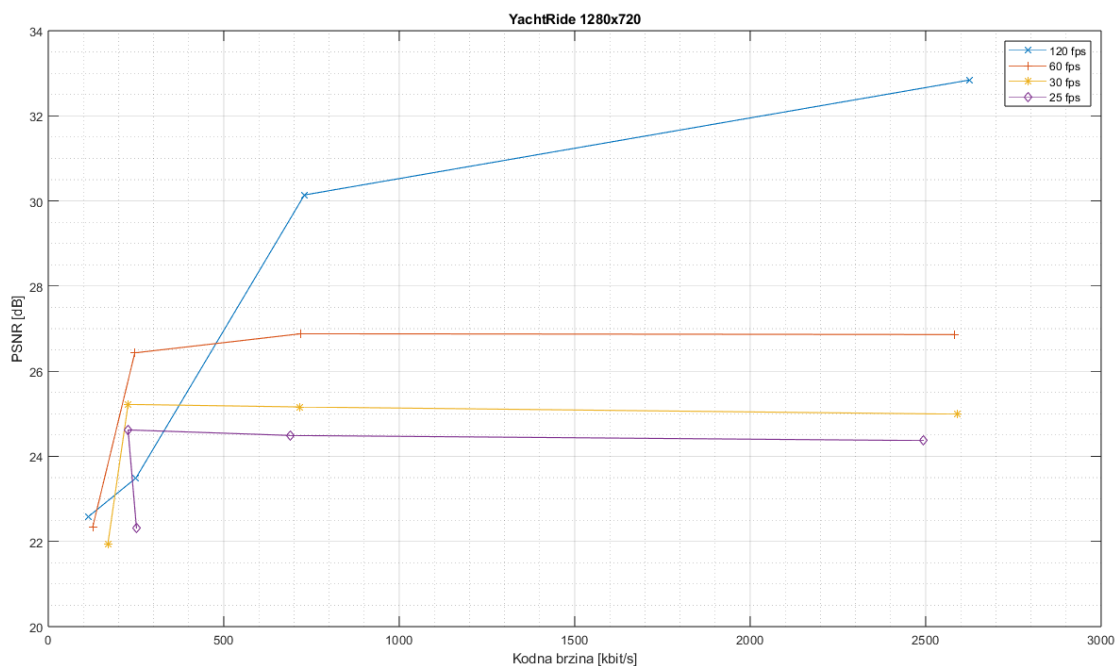
Slika. Grafički prikaz PSNR vrijednosti za 1920x1080 prostornu rezoluciju *YachtRide* video sekvenci

Tablica. PSNR vrijednosti za 1280x720 prostornu rezoluciju *YachtRide* video sekvenci

YachtRide, 1280x720 PSNR [dB]				
	50 kbit/s	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s
120 fps	22.59	23.49	30.14	32.84
60 fps	22.349	26.439	26.89	26.86
30 fps	21.94	25.22	25.16	24.99
25 fps	22.31	24.62	24.49	24.37

Tablica. Ostvarene kodne brzine za 1280x720 prostornu rezoluciju *YachtRide* video sekvenci

YachtRide, 1280x720 Ostvarena kodna brzina [kbit/s]				
	50 kbit/s	250 kbit/s	700 kbit/s	2400 kbit/s
120 fps	251.2	227.2	689.6	2494.4
60 fps	169.6	227.2	716.8	2588.8
30 fps	126.4	246.4	720	2582.4
25 fps	115.2	249.6	729.6	2624



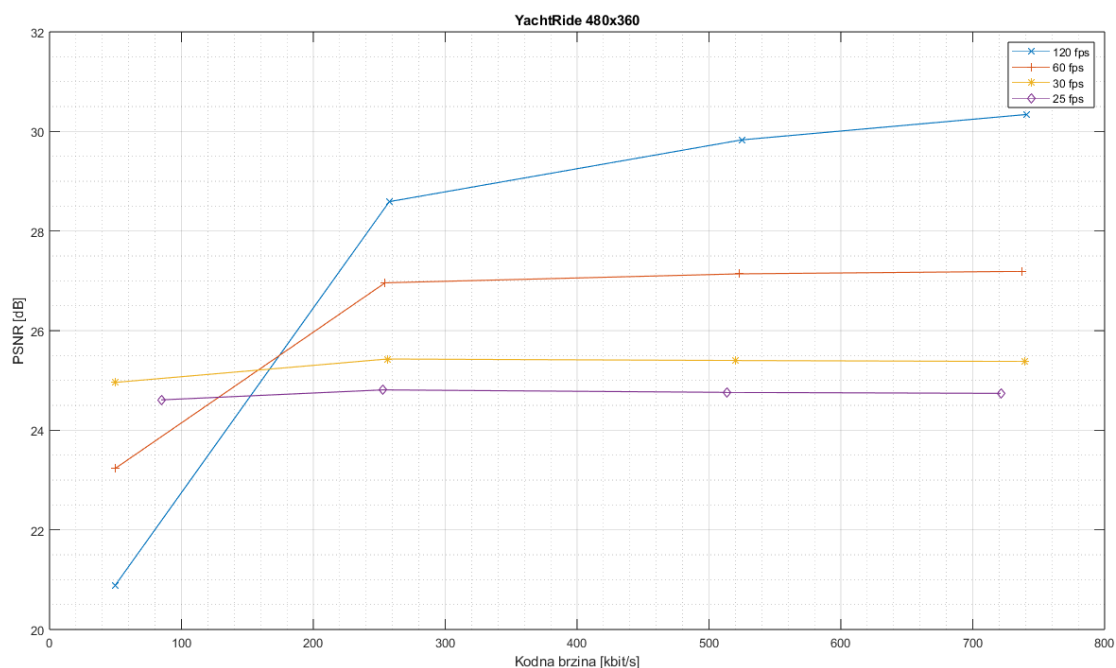
Slika. Grafički prikaz PSNR vrijednosti za 1280x720 prostornu rezoluciju *YachtRide* video sekvenci

Tablica. PSNR vrijednosti za 480x360 prostornu rezoluciju *YachtRide* video sekvenci

YachtRide, 480x360 PSNR [dB]				
	50 kbit/s	250 kbit/s	500 kbit/s	700 kbit/s
120 fps	20.88	28.59	29.83	30.34
60 fps	23.23	26.96	27.14	27.19
30 fps	24.96	25.43	25.40	25.38
25 fps	24.61	24.81	24.76	24.74

Tablica. Ostvarene kodne brzine za 480x360 prostornu rezoluciju *YachtRide* video sekvenci

YachtRide, 480x360 Ostvarena kodna brzina [kbit/s]				
	50 kbit/s	250 kbit/s	500 kbit/s	700 kbit/s
120 fps	84.8	252.8	513.6	721.6
60 fps	49.6	256	520	739.2
30 fps	49.6	254.4	523.2	737.6
25 fps	49.6	257.6	524.8	740.8



Slika. Grafički prikaz PSNR vrijednosti za 480x360 prostornu rezoluciju *YachtRide* video sekvenci