

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ORGANIZACIJE I INFORMATIKE
VARAŽDIN

Filip Milohanović

IZRADA KOMPONENTE ZA DETEKCIJU
OZNAČENIH ODGOVORA NA PISMENIM
ISPITIMA

DIPLOMSKI RAD

Varaždin, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET ORGANIZACIJE I INFORMATIKE

V A R A Ž D I N

Filip Milohanović

JMBAG: 0016148270

Studij: Informacijsko i programsко inženjerstvo

**IZRADA KOMPONENTE ZA DETEKCIJU OZNAČENIH ODGOVORA
NA PISMENIM ISPITIMA**

DIPLOMSKI RAD

Mentor :

Doc. dr. sc. Marko Mijač

Varaždin, lipanj 2025.

Filip Milohanović

Izjava o izvornosti

Izjavljujem da je moj diplomski rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onima koji su u njemu navedeni. Za izradu rada su korištene etički prikladne i prihvatljive metode i tehnike rada.

Autor potvrdio prihvaćanjem odredbi u sustavu FOI-radovi

Sažetak

Tema ovog rada je izrada komponente otvorenog koda za detekciju odgovora na pismenim ispitima. Rad je temeljen na design science metodologiji i prototipiranju vodenom kontinuiranim testiranjem izrađenog artefakta. Ključni pojam ovog rada je digitalna slika, budući da se cijeli sustav bazira na obradi slike s ciljem detekcije odgovora. U radu su prikazane različite tehnike i postojeći pristupi rješavanju ovog problema. Glavni cilj rada bio je izrada komponente, odnosno biblioteke, za detekciju i ocjenjivanje ispita u obliku matrice odgovora. Cilj je da ta biblioteka postiže visoku razinu preciznosti čak i kada slike ispita nisu snimljene u idealnim uvjetima. Izrađena biblioteka suočava se s tradicionalnim problemima sustava za automatizirano testiranje te ih pokušava riješiti kombinacijom tradicionalnih i novih, kreativnih pristupa. Rezultat rada je komponenta koja u idealnim uvjetima radi izrazito pouzdano, dok u ekstremnim uvjetima postoje područja koja nude prostor za poboljšanje.

Ključne riječi: Automatiziranje ocjenjivanje pismenih ispita; OMR; Obrada slike; Preprocesiranje; Postprocesiranje; Detekcija; EmguCV; C#;

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Metode i tehnike rada	2
3. Razjašnjavanje problema	3
3.1. Kontekst i definicija problema	3
3.2. Tehnička podloga i pristupi rješavanju problema	4
3.3. Digitalna slika	6
3.3.1. Slike u boji	7
3.3.2. Sive slike	8
3.3.3. Binarne slike	9
3.3.4. Važnost različitih tipova digitalnih slika	11
3.4. Digitalna obrada slike	12
3.4.1. Preprocesiranje slike	13
3.4.1.1. Pribavljanje slike	13
3.4.1.2. Poboljšanje slike	13
3.4.2. Procesiranje slike	17
3.4.2.1. Segmentacija slike	17
3.4.2.2. Morfološka obrada	18
3.4.2.3. Reprezentacija i opis	19
3.4.2.4. Detekcija i prepoznavanje objekata	20
3.4.3. Postprocesiranje slike	21
3.4.3.1. Obrada izvučenih podataka	22
3.4.3.2. Vizualizacija rezultata	22
3.4.3.3. Kompresija slike	22
3.5. Analiza postojećih rješenja i pristupa problemu	23
4. Definiranje zahtjeva	27
4.1. Opis rješenja	27
4.2. Funkcionalni zahtjevi	28
4.3. Nefunkcionalni zahtjevi	29
4.4. Slučajevi korištenja	30
4.4.1. Slučaj korištenja: Ocjenjivanje ispita	31
4.4.1.1. Korisnici	31
4.4.1.2. Glavni scenarij	31
4.4.1.3. Uključeni slučaj uporabe: Generiranje PDF matrice odgovora	32

4.4.1.4. Uključeni slučaj uporabe: Unos slike matrice točnih odgovora	32
4.4.1.5. Uključeni slučaj uporabe: Unos slika matrica odgovora za ocjenjivanje	32
4.4.1.6. Uključeni slučaj uporabe: Detekcija odgovora	32
4.4.1.7. Uključeni slučaj uporabe: Usporedba odgovora	32
4.4.1.8. Ostali prošireni i uključeni slučajevi uporabe	32
4.4.1.9. Tijek aktivnosti	33
5. Dizajn i izrada artefakta	34
5.1. Odabrane tehnologije	34
5.2. Strukturni model sustava	35
5.2.1. Klase ImageData i EmguCvImage	37
5.2.2. Klase DetectedCircleBase i EmguCvCircle	37
5.2.3. Klasa EmguCvImageProcessor	37
5.2.4. Klase GradeCalculator i GradeScale	38
5.2.5. Ostale klase	38
5.3. Modeliranje ponašanja sustava	39
5.3.1. Ponašanje sustava tijekom detekcije odgovora s kontrolnog ispita	39
5.3.2. Ponašanje sustava tijekom ocjenjivanja	41
5.3.3. Dijagram slijeda - Generiranje matrice odgovora	42
5.4. GradeVision aplikacija	43
5.4.1. Način rada	43
5.5. Značajni dijelovi koda GradeVison biblioteke	45
6. Evaluacija	61
6.1. Skup testnih podataka	61
6.1.1. Prikaz koraka obrada slike nad testnim podatcima	64
6.2. Manualno testiranje rješenja	68
7. Diskusija	69
7.1. Analiza rezultata	69
7.2. Limitacije rješenja	69
7.3. Poboljšanja rješenja	70
8. Zaključak	71
Popis literature	75
Popis slika	77
Popis popis tablica	78
1. Prilozi	79

1. Uvod

U današnjem obrazovnom sustavu nastavnici provode mnogo vremena na radnim zadatacima koji ne doprinose izravno kvaliteti obrazovanja, već su administrativne i često repetitivne prirode. Jedna od nužnih dužnosti nastavnika je evaluacija znanja učenika. Ta se evaluacija može provoditi na različite načine, poput usmenih i pismenih ispita.

Kod velikog broja učenika, usmeni ispitni nisu praktični zbog velike vremenske zahtjevnosti. U takvim situacijama pismeni ispitni pokazuju svoju vrijednost. Za razliku od usmenih, pismeni ispitni uvijek traju jednako, neovisno o broju pristupnika, što ih čini efikasnijim alatom u masovnim ispitivanjima.

Međutim, jedna od ključnih razlika između usmenih i pismenih ispitni je mogućnost komunikacije. Usmeni ispitni omogućuju raspravu između nastavnika i učenika, što nastavniku pruža uvid u način razmišljanja i kreativnost učenika. Taj je uvid teško replicirati na pismenom ispitnu, ali se pokušava nadoknaditi korištenjem otvorenih pitanja ili eseja.

Takav pristup omogućuje određeni stupanj uvida u razmišljanje učenika, ali ocjenjivanje tih ispitni postaje vremenski zahtjevno, osobito kod velikog broja pristupnika. S druge strane, kada nije nužno evaluirati kreativnost učenika, koristi se format ispitni s ponuđenim odgovorima. Takvi ispitni značajno ubrzavaju ocjenjivanje jer nastavnik uspoređuje označene odgovore s listom točnih odgovora. Time se uklanja subjektivnost, proces postaje objektivan, ali i izrazito repetitivan.

Pošto je riječ o objektivnom procesu, on se može automatizirati, čime bi se nastavnicima oslobođio značajan dio vremena koji bi mogli iskoristiti na kvalitetnije zadatke. Kroz ovaj će rad biti prikazana softverska komponenta otvorenog koda koja rješava taj problem automatizacijom procesa ocjenjivanja korištenjem tehnika obrade slike. Cilj je izraditi komponentu koja ostvaruje visoku razinu preciznosti, čak i u neidealnim uvjetima.

2. Metode i tehnike rada

S obzirom na to da se radi o temi koja uključuje obradu slike, što zahtijeva opsežno istraživanje, manipulaciju parametrima i testiranje pristupa odlučeno je koristiti inkrementalan pristup razvoju. Prije same izrade rješenja, provedena je minimalna potrebna količina istraživanja, a zatim se ostatak istraživanja odvijao paralelno s razvojem.

Iterativni razvoj ovog rješenja može se podijeliti u 3 faze: preprocesiranje, procesiranje i postprocesiranje slike. Jedna od najvažnijih tehnika tijekom razvoja bila je vizualizacija svakog koraka obrade slike. To je omogućilo izravan uvid u status i smjer razvoja. Time je od samog početka omogućen uvid u mane i prednosti korištenih metoda. Ovo je značajno doprinijelo definiranju budućih razvojnih koraka, poput dodatnog istraživanja, promjene pristupa i slično.

Da bi sama vizualizacija bila što učinkovitija korišteno je više različitih fotografija, slikanih u različitim uvjetima. To je omogućilo verifikaciju funkcionalnosti dijelova rješenja na različitim ulaznim podacima od samog početka razvoja, što je značilo da na kraju projekta nije bilo potrebno pokrivati rubne slučajeve jer je rješenje bilo dizajnirano da ih pokriva od samog početka.

Važno je napomenuti da je ovaj rad izrađen koristeći pristup znanstvenog oblikovanja (*eng. design science*). Znanstveno oblikovanje temelji se na razvoju i evaluaciji praktičnih rješenja, to jest artefakata. Razvijeni artefakt u ovom radu je softverska biblioteka otvorenog koda za detekciju odgovora na pismenim ispitima. Cilj tog artefakta je omogućiti fleksibilno ocjenjivanje pismenih ispita u različitim uvjetima. Sam razvoj pratio je iterativni proces uz stalnu evaluaciju pomoću vizualizacije rezultata i testiranja na raznolikim ulaznim podacima. To je ujedno bila metodologija znanstvenog oblikovanja ovog rada, koja je bila prisutna u svim fazama razvoja: dizajnu, implementaciji, testiranju i prilagodbi rješenja.

Rješenje je izrađeno pomoću .NET tehnologije i C# programskog jezika u obliku biblioteke, što omogućuje drugim rješenjima jednostavnu integraciju koristeći .dll.

Kroz ovaj rad nije bio cilj razviti vlastitu biblioteku za računalni vid, već je korištena jedna od postojećih biblioteka otvorenog koda. Osim toga, rješenje omogućuje korisnicima da koriste alternativnu biblioteku s uvjetom da izrade svoju implementaciju odgovarajućih metoda. Detaljniji razlozi odabira biblioteke prikazani su u nastavku rada.

3. Razjašnjavanje problema

Kroz teoretski dio rada predočit će se problem, tehnologije i alati za njegovo potencijalno rješavanje, kao i cijeli proces detekcije odgovora na pismenim ispitima korištenjem odabralih tehniku. Također će se analizirati postojeća rješenja ovog problema.

Važno je napomenuti da postoje različiti pristupi rješavanju ovog problema, no svi ti pristupi imaju isti cilj. Taj cilj je izvlačenje relevantnih podataka iz slike te naknadna obrada tih podataka. U kontekstu ovog rada to znači da se iz slike moraju izvući podaci o označenim odgovorima za određeno pitanje te se ti podaci uspoređuju s listom točnih odgovora.

3.1. Kontekst i definicija problema

Ocenjivanje ispita na papiru jedan je od procesa koji učiteljima, nastavnicima i profesorima oduzima značajan dio vremena, koje bi inače mogli posvetiti drugim aktivnostima, poput izrade kvalitetnijih nastavnih materijala i sličnog. Taj problem postaje još izraženiji kada se radi o velikom broju ispita koje treba ocijeniti. Upravo zbog tih izazova, ispiti namijenjeni većem broju pristupnika često se standardiziraju tako da se pitanja prilagode [1].

Najčešće ta prilagodba podrazumijeva uklanjanje pitanja koja zahtijevaju tekstualni upis, povezivanje pojmove, crtanje i slično. Takva se pitanja uglavnom izostavljaju iz ispita za masovno ocjenjivanje jer predstavljaju podatke koje je teže obraditi ili zahtijevaju razumijevanje. Zbog toga se koriste isključivo tipovi pitanja koji imaju unaprijed definiranu strukturu i jednoznačno definiran odgovor ili odgovore. Time se problem ocjenjivanja ispita svodi na detekciju označenih odgovora i njihovu usporedbu s točnim odgovorima. Taj tip ispita značajno ubrzava sam proces ocjenjivanja kada ga provode ljudi, no može se još značajnije ubrzati koristeći sustave za automatizirano ocjenjivanje [2].

Sustavi za automatizirano ocjenjivanje koriste različite tehnologije kako bi omogućili učinkovito ocjenjivanje ispita polaznika. Neke od najčešće korištenih tehnologija uključuju obradu slike, strojno učenje te, u posljednje vrijeme, umjetnu inteligenciju. Među glavnim prednostima ovih sustava ističu se brzina ocjenjivanja, konzistentnost i objektivnost, što je teško postići kada više ocjenjivača ocjenjuje stotine ili tisuće ispita [3].

Ovi sustavi mogu ocjenjivati različite vrste ispita, ovisno o tipu pitanja. Najčešće se primjenjuju za ocjenjivanje pitanja tipa točno/netočno, jednostrukog i višestrukog odabira. U posljednje vrijeme sve se češće koriste i za ocjenjivanje esejskih pitanja, što je omogućeno brzim razvojem umjetne inteligencije [3].

Unatoč navedenim prednostima, postoje i određene prepreke. Jedna od najvećih je ocjenjivanje odgovora u kojima je važna inovativnost, kreativnost i kvaliteta odgovora. To se uglavnom odnosi na esejska pitanja i problemske zadatke. Danas se čak i takvi odgovori mogu ocjenjivati pomoću umjetne inteligencije, no to područje je i dalje u fazi razvoja i suočeno je s brojnim otvorenim pitanjima. Jedan od ključnih izazova je sposobnost razumijevanja složenih zadataka i konteksta, kao i problemi poput halucinacija modela [3].

Osim tehničkih izazova, postoji i potreba za edukacijom ocjenjivača za pravilno korištenje ovakvih sustava, kao i za provedbu mjera za prevenciju plagijata [3].

Ipak, kada se radi o ocjenjivanju ispita u kojima je kriterij isključivo točnost odgovora, bez potrebe za analizom kreativnosti, može se reći da su takvi sustavi već dovoljno zreli za pouzdanu primjenu. Takvi sustavi moraju detektirati odgovore s ispita i usporediti ih s točnim odgovorima.

Prvi takav uređaj bio je Type 805, kojeg je razvio IBM 1937. godine. Taj uređaj funkcionirao je tako da je provjeravao provodljivost napona na papiru. Točnije ako je vodljivost bila veća, smatralo se da je taj dio papira označen olovkom, budući da grafit provodi struju [4].

Zatim je 1950-ih razvijena i optička varijanta sustava koja je provjeravala količinu reflektiranog svjetla. Ta tehnologija kasnije je nazvana OMR (eng. Optical Mark Recognition). S razvojem računala postupno se smanjila potreba za posebnim uređajima s OMR tehnologijom, jer se ista tehnologija mogla koristiti pomoću standardnog računala i uređaja za dohvata sliku, poput skenera [4].

Iako ljudima proces detekcije odgovora i njihove usporedbe s točnim odgovorima uglavnom ne predstavlja poteškoće, kod računala je situacija znatno složenija. Ljudski mozak sposoban je prepoznati složene uzorke gotovo podsvjesno i u vrlo različitim uvjetima, dok je računalu takav zadatak izrazito zahtjevan. Zbog toga sama detekcija odgovora predstavlja jedan od najvećih izazova u razvoju sustava za automatizirano ocjenjivanje.

Jedan od glavnih problema su razlike u načinu na koji je ispit fotografiran ili skeniran. Tu se ubrajaju faktori poput udaljenosti uređaja od papira, kuta snimanja, neujednačenog osvjetljenja, sjena, mrlja, kao i kvalitete senzora koji je pribavio sliku. Sve te razlike mogu značajno utjecati na točnost prepoznavanja označenih odgovora [4].

Osim tehničkih izazova, dodatnu složenost unosi i činjenica da korisnici često ne slijede upute o označavanju odgovora, što može dodatno otežati interpretaciju. Zbog kombinacije tih problema važno je razvijati sustave koji su dovoljno robustni da prepoznaju odgovore i u ne-povoljnim uvjetima, ali i dovoljno fleksibilni da podnose razlike u načinu ispunjavanja obrazaca [4].

3.2. Tehnička podloga i pristupi rješavanju problema

Do sada su spomeuti početci OMR tehnologije, no za ovaj rad su relevantne nove tehnike i tehnologije vezane za detekciju odgovora na pismenim ispitima. Činjenica je da je OMR tehnologija započela kao obrada slike no danas je nadograđena raznim drugim tehnikama poput računalnog vida, strojnog učenja i umjetnom inteligencijom. Svaka od navedenih tehnika pomaže riješiti određene izazove s kojima se tradicionalno OMR suočavao.

Važno je napomenuti da se ove tehnike u različitoj literaturi često tretiraju kao jedinstvena tehnika, odnosno da se nerijetko koristi jedan podpojam, iako se zapravo misli na širi skup povezanih metoda. Primjerice, obrada slike tehnički spada pod računalni vid, no u mnogim radovima koristi se izraz "obrada slike" i kada se misli na šire postupke karakteristične za

računalni vid. Slična je situacija i sa strojnim učenjem i umjetnom inteligencijom, gdje se strojno učenje često koristi kao sinonim za umjetnu inteligenciju, iako je ono zapravo njezin podskup. Kroz ovaj rad će se također koristiti termin "obrada slike" u širem smislu, pri čemu će se pod time podrazumijevati i tehnike računalnog vida.

Tradicionalno je OMR tehnologija zahtijevala specijalizirano i skupo sklopovlje, no danas se uz pomoć računalnog vida i obrade digitalne slike cijeli proces može pojednostaviti. Slika se ne pribavlja skupim uređajima već mobitelom ili skenerom, što čini cijeli proces pribavljanja slike puno jeftinijim, no ne uklanja probleme vezane za kvalitetu slike koje smo spominjali u prijašnjem poglavlju. Da bi se ti problemi riješili, koristi se računalni vid i obrada slike koji nude mogućnosti smanjivanja šuma, ispravka perspektive i slično. Ovim tehnikama se može softverski implementirati efikasniji i jeftiniji OMR sustav. No takvi sustavi imaju ograničenje da ne mogu obrađivati tekstualna pitanja, već samo detektiraju oznake [5].

Da bi se podržala i takva pitanja, može se koristiti umjetna inteligencija, to jest strojno učenje, većinom sustavi za obradu prirodnog jezika NLP (eng. natural language processing). No, kao što je spomenuto u prijašnjem poglavlju, umjetna inteligencija je još uvijek jako svježa tehnologija i razina zrelosti za konzistentno i pouzdano ocjenjivanje je i dalje upitna zbog raznih problema poput halucinacija. Prema nekim istraživanjima takvi sustavi imaju otprilike 85% točnosti. Točnost će kroz vrijeme sigurno rasti, no treba odgovoriti i na potencijalna etička pitanja [6].

Kroz ovaj rad nije cilj razviti vlastitu biblioteku za računalni vid, već će se koristiti već postojeće biblioteke ili okvire. Kroz priloženu tablicu prikazani su najpopularnije biblioteke i okviri, važno je napomenuti da se radi o bibliotekama i okvirima otvorenog koda.

Biblioteka	Ključne značajke	Prednosti	Nedostaci
OpenCV	2,500+ algoritama, podrška za više platformi	Optimiziran, GPU ubrzanje	Nema ugrađenu podršku za duboko učenje
Scikit-Image	Obrada slike s NumPy integracijom	Jednostavan, idealan za početnike	Nije optimiziran za duboko učenje
TensorFlow	Modeli dubokog učenja, TensorFlow Lite za mobilne uređaje	Skalabilan, produkcijski spreman	Strma krivulja učenja
PyTorch	TorchScript za izvođenje modela izvan Python-a, unaprijed obučeni modeli	Fleksibilan, jednostavno za korištenje i debugiranje	Manje skalabilan od TensorFlow-a
OpenVINO	Duboko učenje, Optimizirano za Intel sklopovlje	Visoka učinkovitost na Intel čipovima	Ograničen na Intel platforme
Detectron2	Napredna segmentacija i detekcija objekata	Vrlo precizan, podrška za PyTorch	Fokusiran samo na detekciju

Tablica 1: Usporedba biblioteka i okvira računalnog vida [7]

Iz priložene tablice mogu se vidjeti značajke, prednosti i nedostaci različitih biblioteka i

okvira za računalni vid. Neke, poput OpenCV-a i Scikit-Image, podržavaju samo tradicionalni računalni vid i obradu slike bez korištenja dubokog učenja, dok se druge, poput TensorFlow-a i PyTorch-a, fokusiraju samo na duboko učenje. Osim razlika u domeni primjene, postoje i razlike u programskim jezicima koje biblioteke podržavaju, kao i u sklopolju potrebnom za njihov rad. Inače je riječ je o vrlo popularnim alatima koji značajno olakšavaju razvoj softvera temeljenog na računalnom vidu [7].

Pošto će se ovaj rad više fokusirati na računalni vid temeljen na klasičnoj obradi slike, a ne na dubokom učenju, iz priložene tablice u obzir dolaze samo OpenCV i Scikit-Image biblioteke. U praktičnom dijelu rada bit će objašnjeno koja je biblioteka odabrana i koji su razlozi za njezin konačni odabir.

Prije prikaza konkretnih tehnika i tehnologija koje se u tu svrhu koriste, potrebno je definirati nekoliko osnovnih pojmoveva poput digitalne slike.

3.3. Digitalna slika

Za početak važno je razumjeti što su to digitalne slike i koje sve informacije one sadrže. Digitalna slika je zapravo računalna datoteka koja reprezentira fotografiju pomoću piksela. Piksela je zapravo najmanji element slike koji je reprezentiran s 3 kanala boja: Crvena (R), zelena (G), plava (B) u RGB modelu. Postoje i drugi kanali boja, ali za potrebe ovog rada fokus će biti na RGB modelu. [8].

Sama boja piksela se određuje kombinacijom vrijednosti iz RGB kanala. Dok je sam broj mogućih boja određen brojem bitova koji svaki RGB kanal može poprimiti. Taj koncept se još naziva dubinom boje (*eng. color depth*). Na primjer, pikseli 24-bitne slike mogu poprimiti do 16.777.216 unikatnih boja pošto svaki kanal ima 8 bitova. [8]:

$$\text{Broj boja} = 2^8 \times 2^8 \times 2^8 = 2^{24} = 16.777.216$$

S pomoću piksela se također može definirati veličinu slike, to jest rezolucija. Rezolucija je sveukupan broj piksela koje neka slika sadrži i izražava se množenjem širine slike s visinom slike:

$$\text{Ukupan broj piksela} = \text{Širina} \times \text{Visina}$$

Za sliku rezolucije 1920×1080 to je:

$$\text{Ukupan broj piksela} = 1920 \times 1080 = 2.073.600 \text{ piksela}$$

Obično veća rezolucija znači više detalja na slici. Što se više detalja nalazi na slici to su bolje šanse za izvući korisne informacije sa slike. No naravno da rezolucija sama ne određuje kvalitetu digitalne slike, već veliku ulogu igraju i fizički uvjeti u kojima je slika izrađena. Pod to spada osvjetljenje, čistoća kamere, kvaliteta senzora i sl.

Sliku se osim metrika poput dubine boja i rezolucije može opisati i omjerom slike (*eng. aspect ratio*). Omjer slike opisuje odnos broja piksela po širini i visini slike. Omjer slike većinom je vezan za način na koji je slika uslikana ili na način na koji se ona reproducira. Na primjer, profesionalni fotoaparati većinom koriste omjer slike 3:2, kamere pametnih telefona koriste omjer 4:3 dok računalni monitori koriste 16:9 [9].

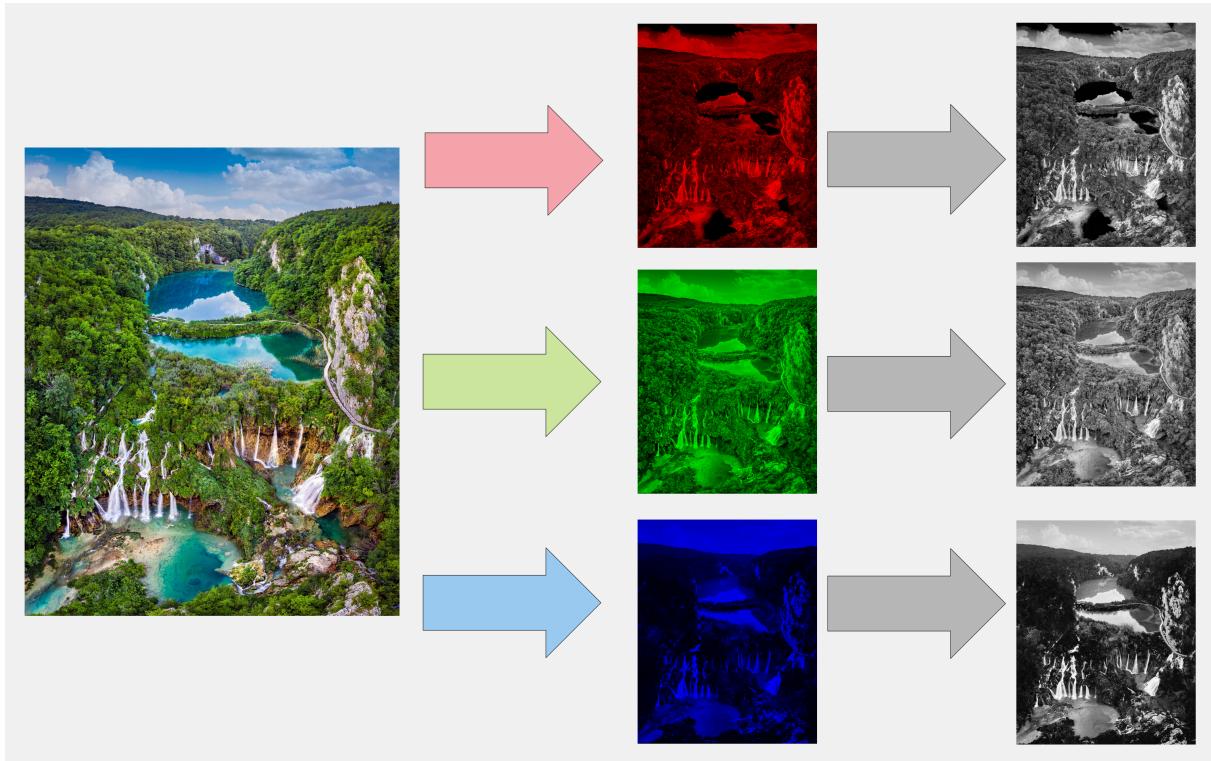
Važno je napomenuti da se većina do sada spomenutih pojmove odnosi isključivo na slike rasterske grafike, dok za vektorske slike vrijede neki drugi pojmovi i pravila. U ovom radu koristit će se rasterske slike, odnosno slike koje se sastoje od piksela. Za razliku od rasterske grafike, vektorska grafika nije bazirana na pikselima, već je definirana matematičkim funkcijama i krivuljama. To ujedno znači da za nju ne vrijedi pojmom rezolucije, budući da njezina kvaliteta nije ograničena statičnim informacijama poput piksela, već se dodatni detalji mogu izračunati iz definiranih funkcija [8].

3.3.1. Slike u boji

Povijest fotografije počinje 1830-ih godina, prve fotografije su bile crno-bijele. No to se već 1861. promjenilo pojavom prve slike u boji. Clerk Maxwell je korištenjem crvenih, zelenih i plavih filtera izradio prvu sliku u boji. Zatim je kompanija Kodak popularizirala slike u boji i danas su one de facto standard. Zatim se s vremenom analogna fotografija razvila u digitalnu fotografiju [10].

Danas većina digitalnih slika koje ljudi stvaraju sadrže boje i koriste sva tri kanala boje. Za razumijevanje ovog rada potrebno je razumjeti kakve informacije sadrži pojedini kanal boje. Svaki kanal predstavlja jednu primarnu boju poput crvene, zelene ili plave. I svaki piksel prima određenu vrijednost za svaki kanal, ovisno o kombinaciji bitova. Za 24-bitnu sliku svaki kanal ima 8 bitova to jest 256 mogućih vrijednosti.

To znači da u svakom kanalu postoji vrijednost od 0 do 255 koja definira jačinu svjetlosti za tu primarnu boju. Nulu bi označavala kompletno crna boja dok bi 255 bila potpuno osvjetljena primarna boja, ovisno o kojem se kanalu radi. Kombinacijom tih 3 kanala se zapravo dobivaju međuboje i time se stvara konačni izgled slike. [11].



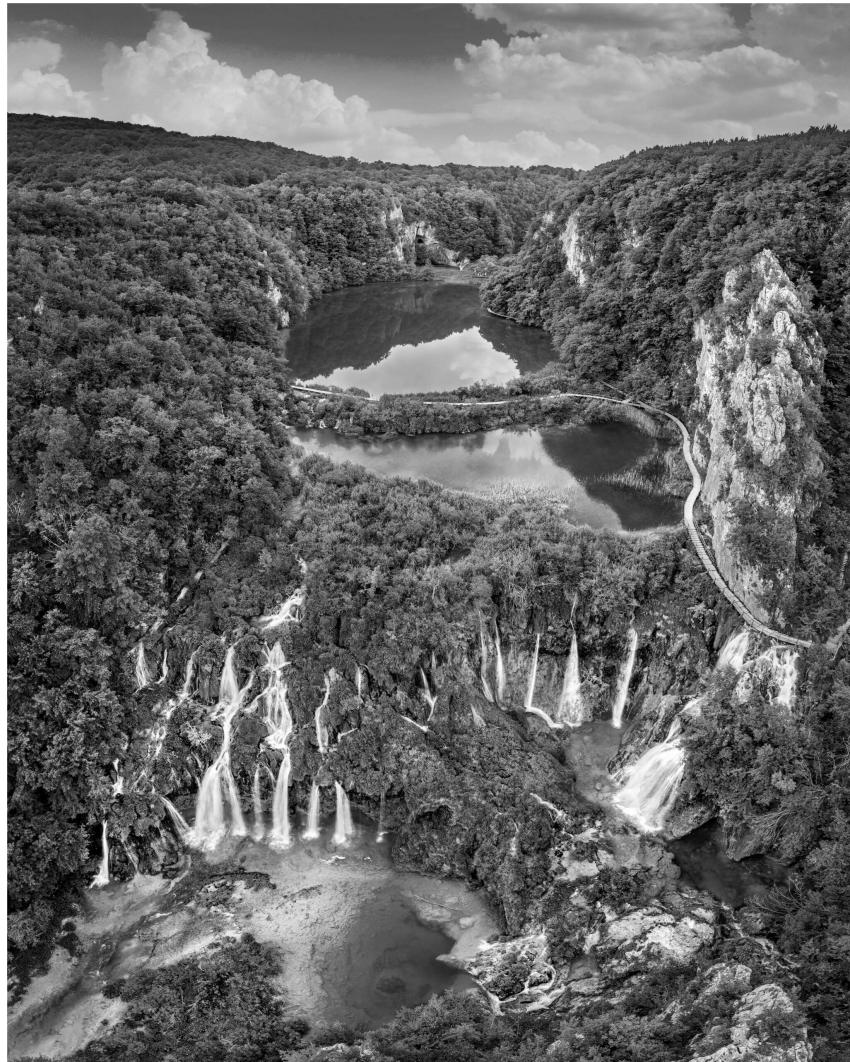
Slika 1: Prikaz slike u boji i pripadajućih kanala boja u RGB modelu (vlastita izrada)

Kao što je prikazano na slici, kanali boja prikazani su kao slike čiji pikseli poprimaju crnu, bijelu i nijanse sive boje. Također kanali se ponekad znaju vizualizirati pomoću primarne boje kanala kojeg reprezentiraju, ali sami podaci koje digitalna slika sadrži su uvijek jednaki, jedino način njihove vizualizacije varira.

3.3.2. Sive slike

Sive slike (*eng. grayscale*) su poseban tip digitalnih slika koji ima samo jedan kanal boja. U tom kanalu vrijednost piksela reprezentira svjetlinu piksela. Vizualizacija takvih slika poprima boje od bijele do crne uključujući nijanse sive. Na primjer za sliku s dubinom boja od 8 bitova, nula predstavlja crnu boju, 255 prestavlja bijelu boju, a međuvrijednosti su predstavljene nijansama sive boje [11].

Sive slike su jedan od važnijih koncepata obrade slike i računalnog vida. One su zapravo početna točka kod mnogih algoritama za procesiranje slika. Često se koriste kao prvi korak obrade. Izrazito su korisne za detekciju rubova, segmentaciju slike, prepoznavanje uzoraka i slično [12]. Kroz rad će se detaljnije prikazati njihova važnost i uloga u kontekstu detektiranja označenih odgovora na pismenim ispitima.



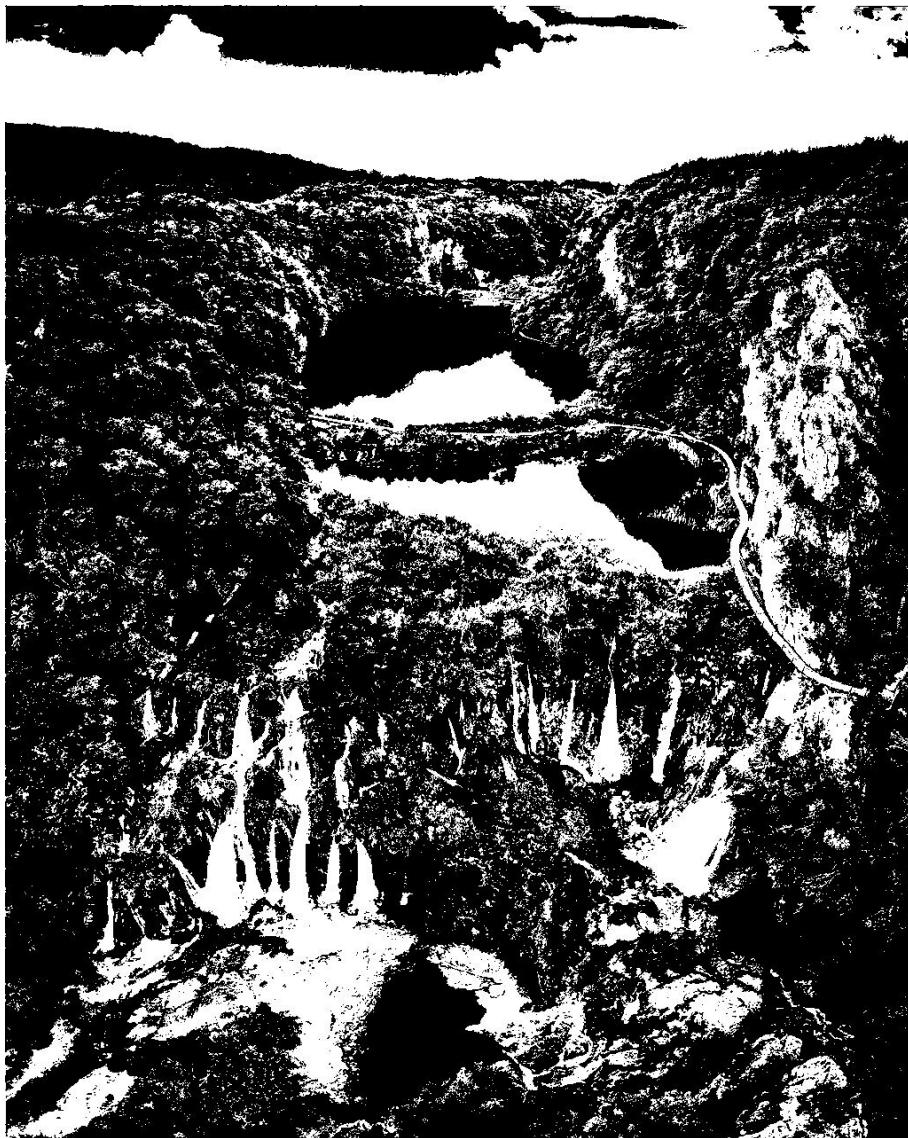
Slika 2: Prikaz sive slike (vlastita izrada)

Na priloženoj sivoj slici se također može vidjeti da je različita od sivih slika kanala prikazanih na slici 1. To je zato što se kod pretvorbe slike u boji u sivu sliku uzimaju u obzir vrijednosti piksela za sva 3 kanala prema formuli:

$$I_{\text{siva}}(x, y) = 0.299 \cdot R(x, y) + 0.587 \cdot G(x, y) + 0.114 \cdot B(x, y)[12]$$

3.3.3. Binarne slike

Osim slika u boji i sivih slika također postoje i binarne slike. Binarne slike su poseban tip slika gdje piksel može imati samo dvije moguće vrijednosti od kud im dolazi i naziv, te vrijednosti su nula ili jedan. Binarne slike sadrže puno manje informacija od ostalih tipova slika, ali isto tako smanjuju kompleksnost same slike i omogućuju fokusiranje na važne značajke slike. Baš zbog toga se jako često koriste kod obrada slika koristeći računalni vid [11].



Slika 3: Prikaz binarne slike (vlastita izrada)

Sam proces izrade binarne slike je dosta jednostavan. Za početak potrebno je imati sivu sliku. Zatim se definira granica (*eng. threshold*) u obliku postotka ili vrijednosti piksela. Ta granica se zatim koristi za određivanje nove vrijednosti piksela, ako je vrijednost iznad granice onda se vrijednost postavlja na jedan, a inače na nulu. Priložena formula prikazuje osnovni tip kreiranja binarne slike (*eng. thresholding*).

$$I_{\text{siva}}(x, y) = 0.299 \cdot R(x, y) + 0.587 \cdot G(x, y) + 0.114 \cdot B(x, y)$$

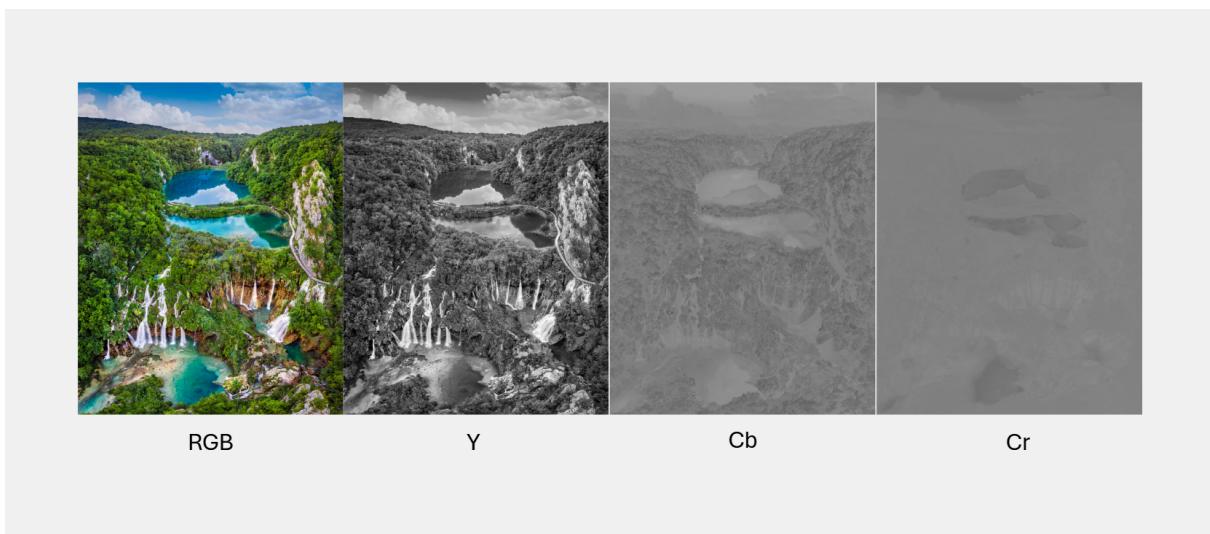
$$I_{\text{binarna}}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{ako } I_{\text{siva}}(x, y) \geq T \\ 0, & \text{ako } I_{\text{siva}}(x, y) < T \end{cases}$$

3.3.4. Važnost različitih tipova digitalnih slika

Do sada smo prošli kroz 3 najvažnija tipa digitalnih slika za ovaj rad. Kroz ovu cjelinu prikazat će se važnost pojedinog tipa slike naspram ostalih.

Zapravo najveća razlika između ovih tipova je broj kanala boje. Slike u boji imaju 3 kanala za razliku od sivih i binarnih slika koje imaju po jedan kanal. To zapravo znači da slike u boji sadrže značajno više informacija.

No ponekad nam te informacije nisu potrebne ovisno o problemu koji pokušavamo riješiti. Na primjer ako pokušavamo detektirati boju svjetla na semaforu onda su nam informacije o bojama izrazito važne. No ako pokušavamo pročitati tekst s prometnog znaka onda nam informacija o boji znaka i teksta ne doprinosi značajno rješavanju problema. Zapravo nam otežava rješavanje problema pošto moramo raditi s nepotrebnim informacijama.



Slika 4: Usporedba svjetlosne komponente i komponenta boja(vlastita izrada)

Na priloženoj slici prikazana je ista slika na različite načine:

- Slika u RGB formatu
- Slika u YCbCr formatu
 - Svjetlosne informacije u Y kanalu
 - Informacije o bojama u Cb i Cr kanalima

Na ovom primjeru je prikazana činjenica da svjetlosni kanali sadrže puno više informacija o strukturalnim elementima na slici. Baš zbog toga se u raznim algoritmima za detektiranje značajki, filtriranje, segmentiranje i sl. koriste baš sive slike [13].

Sive slike se koriste kada boja nije važan faktor u obradi slike. U tom slučaju je boja jednako korisna kao buka na slici pa je zbog toga uklonimo. Time se veličina slike smanjuje i ujedno se ubrzava daljnji proces obrade slike [13].

Ako je potreban još agresivniji pristup otklanjanju nepotrebnih podataka, binarne slike mogu biti korisne. One dodatno odstranjuju nepotrebne podatke tako da povećavaju razliku u kontrastu i time odvajaju razne strukturne elemente slike [13].

Važno je napomenuti da svaki tip slika ima svoju upotrebu ovisno o problemu koji se rješava. U ovom radu će veliku važnost imati sive i binarne slike pošto se radi o procesu detektiranja strukture fotografije i izvlačenja relevantnih informacija iz nje.

3.4. Digitalna obrada slike

Digitalna obrada slike (*eng. digital image processing*) podrazumijeva obradu digitalne fotografije koristeći računalne algoritme s ciljem unaprjeđivanja slike, izvlačenja korisnih informacija, analize, izrade izvještaja i slično. Predstavlja ključni korak u raznim primjenama računalnogvida temeljenog na dubokom učenju, poput prepoznavanja lica, detekcije objekata i optičke detekcije [14].

Sam proces digitalne obrade slike može se podijeliti u sljedeće faze [14]:

- Pribavljanje slike (*eng. image acquisition*)
- Poboljšanje slike (*eng. image enhancement*)
- Kompresija slike (*eng. image compression*)
- Morfološka obrada (*eng. morphological processing*)
- Segmentacija slike(*eng. image segmentation*)
- Reprezentacija i opis (*eng. representation and description*)
- Detekcija i prepoznavanje objekata (*eng. object detection and recognition*)

Naravno nisu sve faze uvijek potrebne, već se radi o generalnim smjernicama koje se prema specifičnostima problema mogu modificirati, smanjiti ili proširiti. U nekim slučajevima čak se redoslijed faza može promijeniti ili se faze mogu provoditi više puta.

Te faze se dodatno mogu podijeliti na **preprocesiranje, procesiranje i postprocesiranje slike**. U fazu **preprocesiranja** spadaju svi koraci koji pripremaju sliku za procesiranje, poput poboljšanja slike. Nakon preprocesiranja slijedi **procesiranje** koje se odnosi na korištenje algoritama za detekciju i prepoznavanje objekata i transformacije. Posljednja faza uključuje korake poput pripreme rezultata za prezentaciju, vizualizaciju i daljnju analizu [15].

3.4.1. Preprocesiranje slike

Preprocesiranje slike je ključan proces koji se provodi prije obrade slike. Kao ulaz prima izvornu, sirovu sliku, a kao izlaz vraća sliku u korisnjem formatu za daljnju obradu i analizu. Omogućuje da se sa slike odstrane ili istaknu područja relevantnih informacija te da se poboljša kvaliteta slike prije daljnje obrade [16].

3.4.1.1. Pribavljanje slike

Pribavljanje slike je proces nastajanja digitalne slike tako da se informacije iz realnog svijeta zapišu u digitalnom obliku kojim računalo zatim može manipulirati. Slika se može pribaviti raznim uređajima poput fotoaparata, pametnog mobitela i drugih tehnologija poput skenera. U ovom radu fokus će biti na fotografije pribavljene uređajima koji posjeduju digitalnu kameru [17].

Da bi bilo kakvo procesiranje moglo krenuti, prvo je potrebno pribaviti sliku. Moglo bi se reći da je pribavljanje slike čak najvažniji korak u cijelom procesu obrade slike, njegov rezultat ima veliku ulogu za postizanje krajnjeg rezultata obrade i analize slike. Pribavljena slika mora biti kvalitetna da bi ostali koraci bili uspješni. Na kvalitetu slike ne utječe samo rezolucija, već osvjetljenje i kut pod kojim je slika uslikana također imaju značajnu ulogu [17].

Razni algoritmi i koraci u preprocesiranju mogu korigirati pribavljenu sliku, no to nikad nije zamjena za sliku dobre kvalitete. Dobra i loša slika mogu biti razlika između uspješnog i neuspješnog detektiranja elemenata na slici. Naravno u većini slučajeva sustavi za obradu slike ne mogu utjecati na kvalitetu slike koje će im korisnik poslati. Zbog toga je važno detaljno testirati sustav u različitim uvjetima i utvrditi što su njegove granice i je li potrebno podržati neki dodatni korisnički slučaj od onih postojećih.

3.4.1.2. Poboljšanje slike

Poboljšanje slike je ključan korak, cilj mu je modificirati sliku tako da ona postane korisnija za daljnju obradu. To se može postići na više načina poput otklanjanja buke, isticanja važnih značajki slike, poboljšanja oštchine i kontrasta slike.

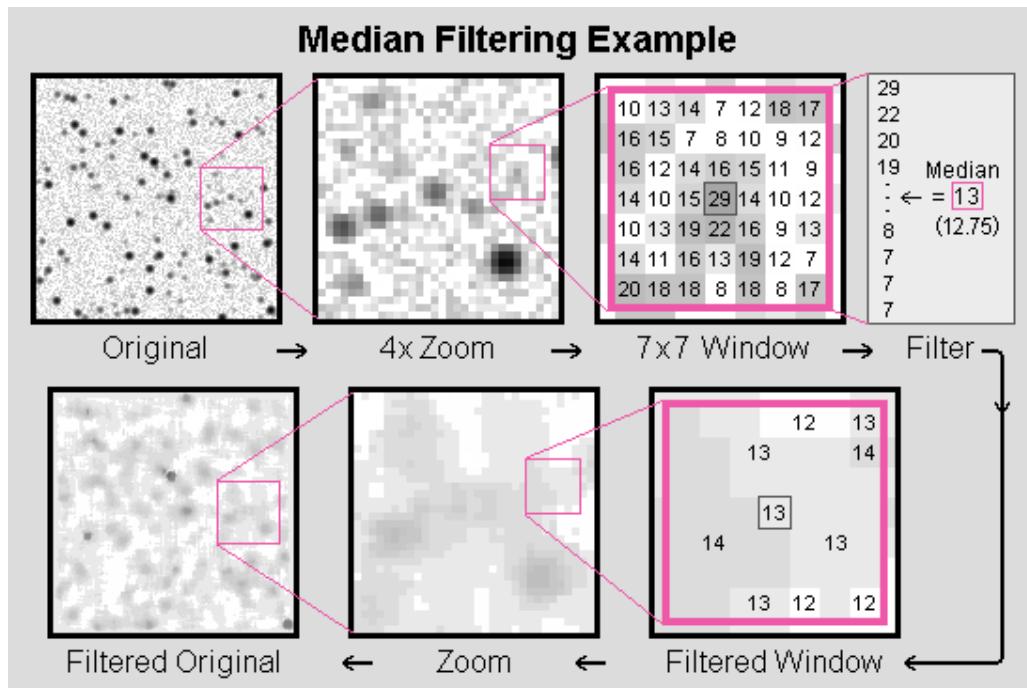
Do sada smo spomenuli da se nepotrebne informacije na slici mogu predstavljati buku. Baš zbog toga pretvaranje u sivu i binarnu sliku spada pod tehniku poboljšanja slike. Oba dvije operacije uklanjaju nepotrebne informacije o bojama sa slike što omogućuje bržu i jednostavniju obradu i analizu slike. Naravno to ima smisla samo ako nam informacije o tim bojama nisu potrebne.

Osim nepotrebnih boja, bukom se može smatrati i nasumična razlika u vrijednosti između susjednih piksela. U digitalnoj fotografiji buka je praktički neizbjegljiva i može se definirati kao nasumična varijacija signala u slici. Ta varijacija je reprezentirana različitim nijansama boja susjednih piksela. Buka se može smanjiti manipulacijom parametara digitalne kamere, ali ne može se kompletno ukloniti [18].

Takve informacije se zbog malih razlika u boji piksela većinom mogu smatrati nevažnim, a loše utječu na daljnju obradu slike. Zbog toga postoje razne tehnike za filtriranje buke. Najpopularnije tehnike za filtriranje buke su [19]:

- Gaussov filter (*eng. gaussian filter*)
- Srednji filter (*eng. mean filter*)
- Medijanski filter (*eng. median filter*)
- Bilateralni filter (*eng. bilateral filter*)

Svaki tip filtera ima svoju upotrebu i koristan je za određeni tip buke. Buka u digitalnim slikama je jako opširna tema koje se neće detaljnije objašnjavati u ovom radu.



Slika 5: Primjer medijanskog filtera [20]

Na priloženoj slici je prikazan proces korištenja medijanskog filtera koji naspram matrice susjednih vrijednosti određuje vrijednost piksela koristeći medijan svih vrijednosti.

Važno je napomenuti da su pojmovi poput oštine i mutnoće slike usko povezani s bukom. Jako često mutna slika sadrži manje buke, dok oštra slika može sadržavati više buke. Zbog toga je potrebno naći ravnotežu pri uklanjanju buke. Ako uklonimo previše buke, slika postaje mutna i gubi se previše informacija, obrnuto vrijedi ako uklonimo preveliko buke.

Uklanjanje buke jedan je od najvažnijih koraka jer se nakon njega u dalnjim fazama ne analiziraju nepotrebne i neželjene informacije. Moglo bi se reći da je to de facto obavezan korak preprocesiranja, budući da se izrazito često koristi.



Slika 6: Usporedba procesirane slike bez i s preprocesiranjem (vlastita izrada)

Na priloženoj slici moguće je vidjeti kako je znatno manje nevažnih informacija na desnoj binarnoj slici jer je preprocesiranjem uklonjena buka, čime su dobiveni puno čišći podaci koji se mogu koristiti za daljnju obradu.

Postoje još razne metode poboljšavanja slike poput povećavanja kontrasta, ali neće biti potrebne u ovom radu. Također u nekim literaturama se spominju tehnike poput smanjenja buke i raznih drugih transformacija u kontekstu restauracije slike. Ali u ovom radu će se o tome govoriti u kontekstu poboljšanja slike.

Druge važne metode poboljšavanja slike su razne geometrijske transformacije slike po-

put translacije, rotacije i skaliranja. Sve te osnovne geometrijske operacije koriste se kod ispravljanja perspektive. Baš zbog toga je ispravak perspektive puno zanimljivija operacija za ovaj rad [21].

Ispravljanje perspektive omogućuje da slika prikazuje kao da je slikana u nekoj drugoj ravnini u prostoru. To omogućuje da se uklone neželjene značajke pribavljene slike poput kuta kamere naspram subjekta fotografije, u ovom slučaju papira s matricom odgovora.

Korekcija perspektive mapira točku $\mathbf{p} = [x, y, 1]^T$ u originalnoj slici (slikanoj iz nekog neželjenog kuta) $\mathbf{p}' = [x', y', w']^T$ u sliku ispravljene perspektive s pomoću matrice H [22].

$$\mathbf{p}' = H \cdot \mathbf{p}$$

Gdje H predstavlja 3×3 homografsku matricu:

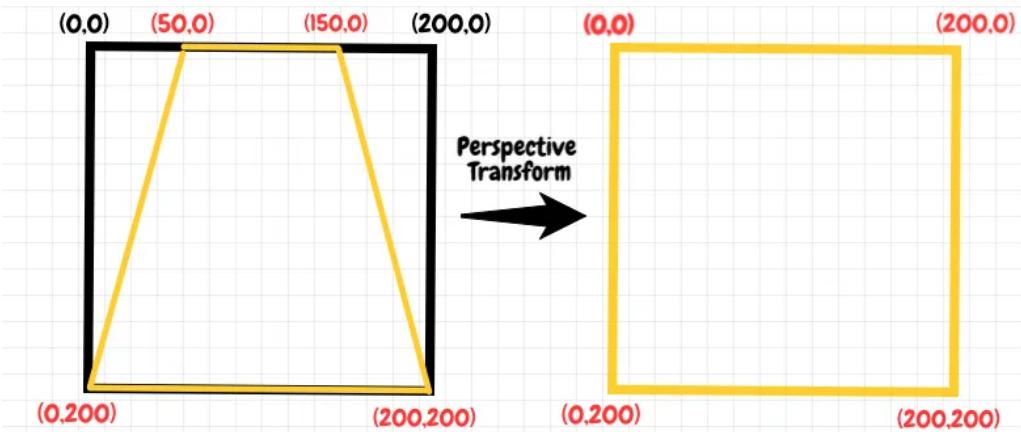
$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}$$

Transformirane koordinate se računaju na sljedeći način:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

Da bi te koordinate bile korisne potrebno ih je normalizirati s w :

$$x' = \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}}, \quad y' = \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}}$$



Slika 7: Prikaz procesa ispravka perspektive subjekta na slici [22]

Na priloženoj slici prikazano je kako se matrica transformacije koristi da bi se perspektiva ispravila. U praksi to funkcioniра tako da se matrica transformacije računa naspram 4

izvorne i 4 odredišne točke. Te se zatim prema formuli množi sa svakom izvornom točkom da bi se izračunale odredišne točke.

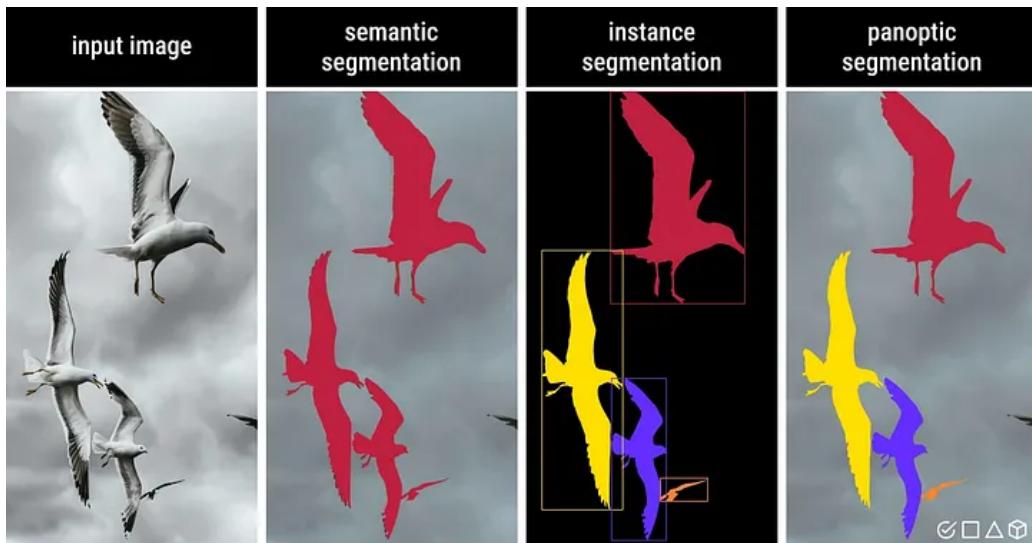
3.4.2. Procesiranje slike

Nakon što je faza preprocesiranja pretvorila sliku u korisniji format, kreće glavna faza obrade to jest procesiranje slike. Glavne tehnike kod procesiranja slike su segmentacija, detekcija objekata, morfološka obrada te reprezentacija i opis.

3.4.2.1. Segmentacija slike

Segmentacija slike je proces grupiranja piksela prema nekim obilježjima. Za razliku od običnih klasifikatora poput neuronskih mreža, segmentacija nudi informacije gdje se točno na slici nalazi objekt od interesa i koji su sve pikseli dio tog objekta. Isto kao kod klasifikatora potrebno je definirati moguće klase kojima piksel može pripadati. Definiranje tih klasa može se učiniti na tri načina, prema kojima dijelimo tipove segmentacije na [23]:

- semantička segmentacija (*eng. semantic segmentation*)
- segmentacija instance (*eng. instance segmentation*)
- panoptička segmentacija (*eng. panoptic segmentation*)



Slika 8: Usporedba tipova segmentacije [23]

Na priloženoj slici definirane su dvije klase: nebo i ptice. Semantička segmentacija je sve piksele ptica klasificirala kao jednu klasu, što znači da ne znamo točno kojoj ptici pripada pojedini piksel. Da bi to riješili postoji segmentacija prema instanci što odvaja svaku pticu u zasebnu klasu što je bolje od semantičke, ali znači da više ne znamo koji sve pikseli pripadaju roditeljskoj klasi ptica. Da bi to riješili postoji panoptička segmentacija koja kombinira ta dva

pristupa i pruža informacije o klasi piksela i kojoj instanci pripada. Tip segmentacije ovisi o specifičnostima problema koji se pokušava rješiti [23].

3.4.2.2. Morfološka obrada

Morfološka obrada je skup operacija koje se primjenjuju na sliku radi analize njenog oblika i strukture. Omogućuje pronalazak elemenata na slici sličnih definiranom obliku. Usporedbu oblika vrši tako da traži grupu piksela koji odgovaraju tom obliku [24].

Morfološka obrada se u nekim segmentima preklapa s segmentacijom slike, ali ne radi se o istim operacijama. Morfološke operacije se često koriste nakon segmentacije da uklone nedostatke iz detektiranih segmenata [24].

Dvije najvažnije morfološke operacije su erozija i dilatacija. Erozija funkcioniра na način da uklanja piksele s ruba objekta. Vrlo je korisna u slučajevima kada je potrebno odvojiti dva objekta određenog oblika [24].



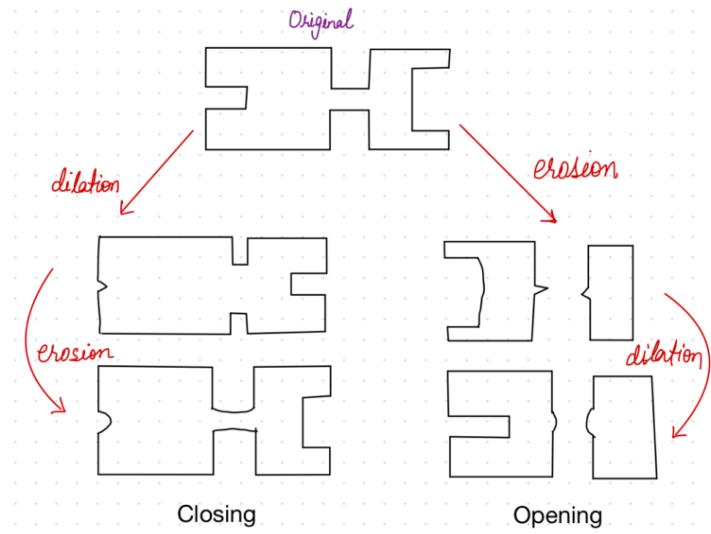
Slika 9: Prikaz erozije kao morfološke operacije [24]

Za razliku od erozije, dilatacija dodaje piksele oko ruba objekta. Time omogućuje da se popune praznine između objekata.



Slika 10: Prikaz dilatacije kao morfološke operacije [24]

Najčešće se te dvije operacije ne koriste zasebno već zajedno kao kompozitna morfološka operacija. Ako prvo provedemo eroziju, zatim dilataciju, radi se o otvaranju, dok obrnuti redoslijed operacija čini zatvaranje. [24].



Slika 11: Prikaz kompozitnih morfoloških operacija [24]

3.4.2.3. Reprezentacija i opis

Nakon što je obavljena segmentacija i po potrebi morfološka obrada većinom slijedi reprezentacija i opis segmentiranih dijelova. Cilj reprezentacije i opisa je reprezentirati piksele tako da budu korisniji za daljnju obradu [25].

Postoje dva glavna tipa reprezentacije segmentiranih objekata, ovisno o tome je li fokus na [25]:

- vanjskim karakteristikama, (kontura ili rub objekta))
- unutarnjim karakteristikama (pikseli koji čine objekt)

Reprezentacija prema vanjskim karakteristikama se često koristi kad nam je za obradu važan sam oblik, dok se unutarnje karakteristike koriste kada je potrebna informacija o boji i teksturi objekta. Iz dobivenih reprezentacija je moguće izvući razne opisne vrijednosti (*eng. descriptors*) koje su korisne kod daljnje obrade. Važno je napomenuti da je generalno pravilo da bi opisne vrijednosti trebale biti imune na promjenu skaliranja, translacije i rotacije [25].

Neke od korisnik opisnih vrijednosti su [25]:

- Dužina konture objekta
- Promjer konture objekta
- Zaobljenost
- Okvirna kutija
- Površina objekta

- Sličnost željenom obliku
- Odstupanje od simetrije
- Koeficijent istezanja

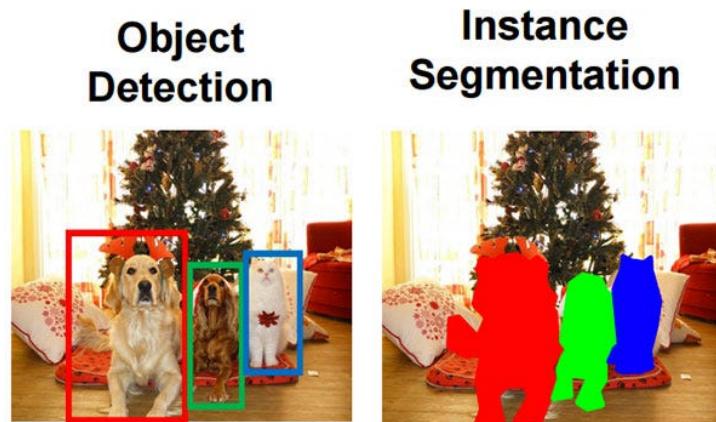
3.4.2.4. Detekcija i prepoznavanje objekata

Detekcija i prepoznavanje objekata je jedna od ključnih tehnika procesiranja slika na tradicionalan način, ali i s pomoću neuronskih mreža. Bazirano je na principu pronađaska objekta i crtanja okvirne kutije oko tog objekta [26], [27].

To mu je ujedno i glavna razlika naspram segmentacije slike, segmentacija dodjeljuje klasu svakom pikselu koji odgovara onome što se traži, dok detekcija objekta to ne radi već samo locira objekt određene klase na slici [26], [27].

Ponekad je samo informacija o lokaciji objekta dovoljna, u slučaju da nije onda segmentacija nudi puno više informacija o samom objektu.

Da bi detektiranje objekata bilo uspješno često se koriste konture. Konture su ništa drugo nego krivulje koje opisuju rubove objekata, zbog toga su jako korisne kod detektiranja oblika. Također se ponekad koriste i kod segmentiranja.

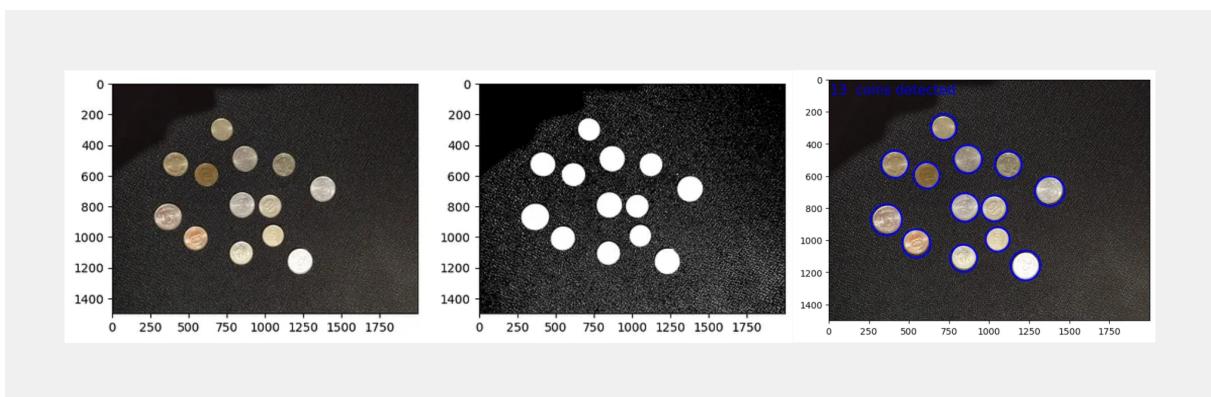


Slika 12: Usporedba segmentacije i detekcije objekta [27]

Da bi se moglo pronaći konture prvo je potrebno sliku pretvoriti u binarnu sliku i zatim provesti operaciju detektiranja kontura. Konture se detektiraju tako da se traži razlika između kontrasta piksela na binarnoj slici i time se utvrđuje ujedno i granica između objekata. Zatim se primjenjuje jedna od metoda za detekciju objekta nad tim konturama. Te metode zapravo traže konture koje odgovaraju traženom obliku s definiranim tolerancijama za oblik, veličinu i slično [28].

Budući da se u ovom radu koristi pristup temeljen na tradicionalnoj obradi slike, od posebnog su interesa sljedeće metode koje omogućuju detekciju i analizu geometrijskih oblika koristeći konture:

- **Aproksimacija kontura u poligone** - koristi se za pojednostavljenje kontura i prepoznavanje osnovnih geometrijskih oblika.
- **Izračun minimalnog pravokutnika oko konture** - omogućuje određivanje najmanjeg pravokutnika koji obuhvaća određeni objekt, što je korisno pri detekciji pravokutnih oblika.
- **Prilagodba elipse konturi** - koristi se za identifikaciju objekata eliptičnog oblika.
- **Detekcija ravnih linija Houghovom transformacijom** - omogućuje otkrivanje linijskih struktura unutar slike.
- **Detekcija kružnica Houghovom transformacijom** - primjenjuje se za prepoznavanje kružnih objekata.
- **Pronalaženje pravokutnog okvira oko konture (bounding box)** - omogućuje okvirno lociranje objekta unutar slike.
- **Detekcija kontura s hijerarhijskim odnosima** - omogućuje razlikovanje vanjskih i unutarnjih kontura, što je korisno pri analizi složenijih objekata.



Slika 13: Prikaz rezultata detekcije krugova pomoću kontura [27]

Na priloženoj slici je jasno prikazano kako se izvorna slika pretvara u binarnu sliku i zatim se s pomoću kontura i metode za detektiranje oblika naspram kontura pronalazi lokacija kruga.

3.4.3. Postprocesiranje slike

Nakon što je glavna faza obrade slike završena kreću aktivnosti postprocesiranja. Prijašnja faza je izvukla korisne podatke iz slike i pripremila ih u korisnom formatu. Cilj postprocesiranja je obrada tih podataka tako da se dođe do konačnog rješenja. Osim obrade podataka, postprocesiranje je također povezano s aktivnostima poput vizualizacije rezultata, kompresije i slično.

3.4.3.1. Obrada izvučenih podataka

Prije nego što se krene u konačnu obradu izvučenih podataka potrebno ih je pročistiti. Načini pročišćavanja podataka ovise o specifičnostima problema, ali neke od važnih metoda za ovaj rad su:

- Filtriranje po veličini objekta
- Filtriranje po obliku objekta
- Filtriranje po boji objekta
- Filtriranje po hijerarhijskoj odnosu objekta s ostalim objektima

Spomenute metode bazirane su na usporedbi opisnih vrijednosti iz faze reprezentacije i opisa. Nakon što su podaci pročišćeni kreće konačna faza obrade. Način konačne obrade ovisi o specifičnostima problema, ali često se koriste baze znanja.

Baze znanja omogućuju usporedbu traženih podataka s pročišćenim podacima koje omogućuje rješenje specifičnog problema. U ovom slučaju baza znanja bi bila lista odgovora za svako pitanje podijeljenih u dvije klase koje predstavljaju točne i netočne odgovore [14].

3.4.3.2. Vizualizacija rezultata

Nakon što su podaci obrađeni i utvrđen je rezultat kako često ga je potrebno vizualizirati. Vizualizacija nudi uvid u njihovu važnost i omogućuje da se jednostavnije analiziraju i izvode zaključci iz rezultata. Tip vizualizacije ovisi o domeni problema koji se rješava. Može biti u raznim oblicima poput PDF izvješća, vizualizacije rezultata nad originalnom slikom i slično [29].

Kod vizualiziranja rezultata važno je uzeti u obzir tip podataka koji se vizualizira i publiku za koju je vizualizacija namijenjena [29].

3.4.3.3. Kompresija slike

U slučaju potrebe za smanjenjem veličine slike, često se koristi kompresija. Komprezija nastoji smanjiti veličinu slike na način da pritom zadrži kvalitetu na zadovoljavajućoj razini. Često se primjenjuje kada je potrebno smanjiti veličinu slike pri prijenosu preko mreže, spremanju u memoriju ili za ubrzanje obrade [14].

Kompresija slike dijeli se na dva glavna tipa [30]:

- Kompresija s gubitkom podataka (*eng. lossy*)
- Kompresija bez gubitka podataka (*eng. lossless*)

Oba tipa smanjuju veličinu slike, ali se razlikuju u načinu na koji to postižu. Prvi pristup uklanja određene informacije iz slike kako bi smanjio njezinu veličinu (*lossy*), dok drugi pristup

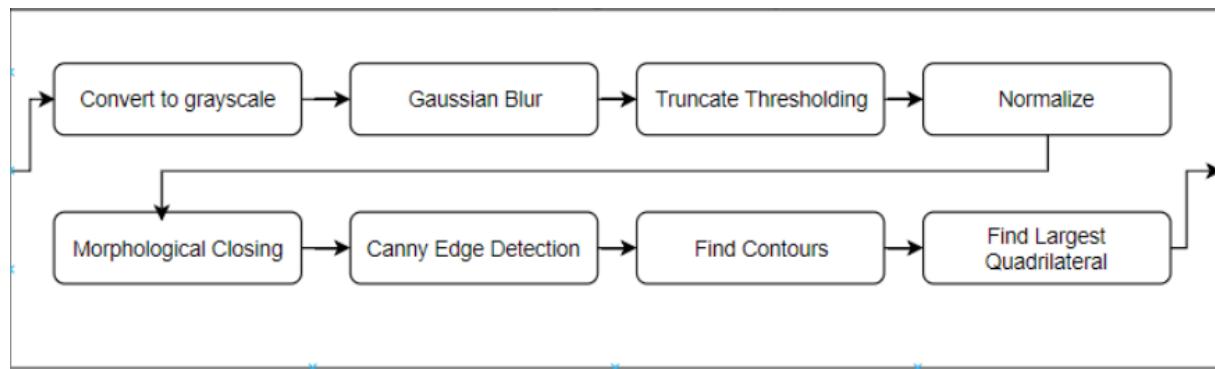
efikasnije zapisuje podatke bez gubitka informacija (lossless). Važno je napomenuti da je kod kompresije uvijek potrebno balansirati veličinu slike i kvalitetu. Što je slika više komprimirana, to je izraženija distorzija slike. Glavna razlika između ovih dvaju pristupa je u tome može li se originalna slika potpuno rekonstruirati iz komprimirane slike [30].

3.5. Analiza postojećih rješenja i pristupa problemu

Prije praktičnog dijela rada važno je analizirati postojeća rješenja na tržištu. Ova analiza fokusirat će se samo na detekciju odgovora na pismenim ispitima koristeći matricu odgovora to jest detekciju OMR tehnikom (*eng. optical mark recognition*). Pod OMR spadaju sve tehnike koje su do sada obrađene. Fokus ove analize je samo na rješenjima visoke razine točnosti.

Osim korištenja računalnog vida uz OMR sve češći su pristupi koji koriste elemente dubokog učenja, samostalno ili u kombinaciji s tradicionalnim računalnim vidom [31].

Analizirana su rješenja OMRChecker i OpenMCR, radi se o rješenjima izrazito visoke točnosti koji tu točnost zadržavaju i kada je slika uslikana u izrazito izazovnim uvjetima. Također oba rješenja podržavaju određeni stupanj konfiguracije liste s odgovorima [31].



Slika 14: Prikaz dijela toka procesiranja slike kod OMRChecker-a [32]

S priložene slike vidljivo je da OMRChecker koristi veliku većinu metoda i tehnika koje su do sada obrađene u ovom radu, za OpenOMR je situacije također dosta slična.

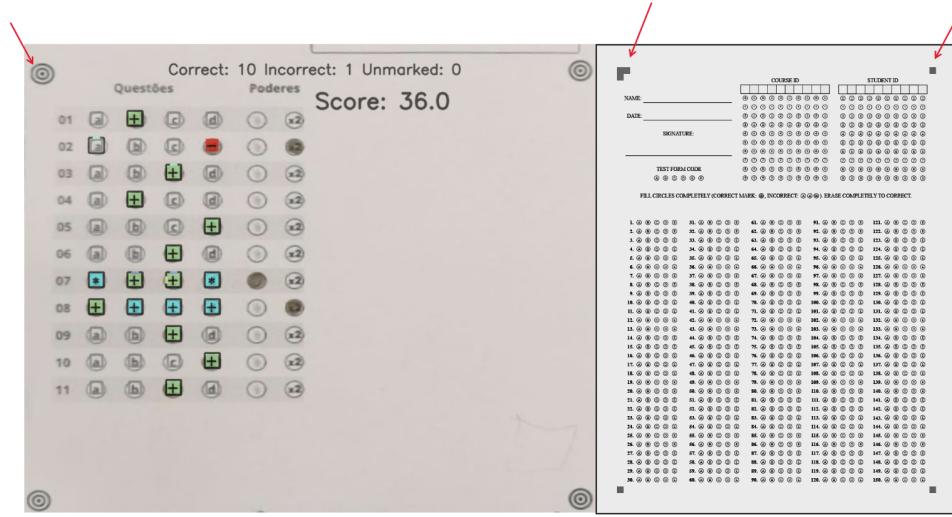
Osim samih značajki sustava važno je znati kako su se ti sustavi nosili sa problemima pri detekciji odgovora spomenutih u prijašnjim poglavljima. Jedan od glavnih problema je kvaliteta pribavljene fotografije. To uključuje loše uvjete osvjetljenja, udaljenost uređaja od papira, kut snimanja i slične čimbenike.

Rješenja poput OpenMCR riješila su problem kuta snimanja i rotacije papira tako da su na matricu odgovora postavljena posebne oznake pomoću kojih se precizno detektiraju kutovi matrice i određuje orientacija papira.

Na priloženoj slici prikazana su te posebne oznake koja olakšavaju detekciju kutova papira. Na lijevoj slici prikazana je matrica odgovora OMRChecker sustava, koja koristi četiri identične oznake za detekciju kutova papira. Na desnoj slici prikazana je matrica odgovora OpenMCR sustava, koja koristi tri identične oznake i jednu unikatnu. Ta različita oznaka omo-

gućuje ne samo detekciju kutova, već i određivanje orijentacije papira.

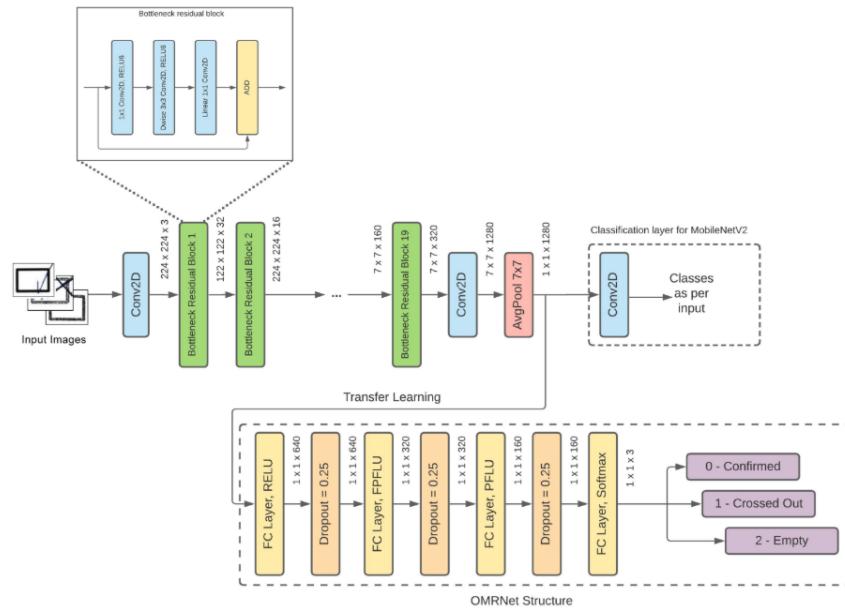
To znači da OpenMCR nudi kvalitetnije rješenje barem što se tiče korekcije kuta snimanja i rotacije papira u odnosu na OMRChecker.



Slika 15: Prikaz pomoćnih oznaka za detektiranje kutova matrice odgovora i orijentacije [32] [33]

Osim problema s kvalitetom pribavljene slike, postoje i problemi s neispravnim označavanjem područja za odgovor. Taj je problem teško riješiti korištenjem tradicionalne obrade slike, te stoga ima više smisla koristiti strojno učenje, odnosno određeni tip klasifikatora [34].

OMRNet je jedno od takvih rješenja. Ono nudi mogućnost klasifikacije područja odgovora kao označeno, neoznačeno i prekriženo. Zapravo se ne radi o cjelovitom sustavu za ocjenjivanje ispita, već o sustavu koji pruža REST API za klasifikaciju područja odgovora, te se može integrirati s drugim sustavima za detekciju odgovora i ocjenjivanje ispita [34].



Slika 16: Prikaz strukture OMRNet klasifikatora [34]

Također, važno je napomenuti da ova konvolucijska neuronska mreža koristi metodu prijenosa znanja (eng. transfer learning) s već prethodno treniranog modela MobileNet V2 [34].

Cijela svrha korištenja OMRNet-a ili neke druge implementacije dubokog učenja za klasifikaciju područja odgovora jest rješavanje problema koje OMR sustavi temeljeni isključivo na tradicionalnoj obradi slike imaju [34]:

- Teško je razaznati radi li se o prekriženom odgovoru ili o označenom odgovoru
- Problem definiranja praga koji određuje je li odgovor označen ili nije

Važno je napomenuti da su sva analizirana rješenja u određenoj mjeri ograničena kada je riječ o fleksibilnosti predloška matrice odgovora. Naime, postojeća rješenja očekuju da se na papiru nalaze određene strukture, poput oznaka za kutove i orientaciju, specifičan broj pitanja i odgovora i slično. Sama fleksibilnost rješenja ovisi o tome je li sustav dizajniran da strogo slijedi zadani predložak ili je već u samom dizajnu predviđena određena razina prilagodljivosti.

Također, sva rješenja variraju u razini pouzdanosti i konzistentnosti u ekstremnim uvjetima rada. Pod time se podrazumijevaju visoka razina šuma, loši uvjeti osvjetljenja, ekstremni kutovi fotografiranja i slično. Međutim, postavlja se pitanje je li uopće nužno da sustav pouzdano funkcioniра u takvim ekstremnim uvjetima. Na primjer nije jednaka razina pouzdanosti potrebna sustavu za ocjenjivanje ispita i sustavu za čitanje registarskih tablica na parkiralištu. Glavni razlog za to je činjenica da ocjenjivač može u velikoj mjeri kontrolirati uvjete i način pribavljanja fotografije, dok na parkiralištu to najčešće nije moguće.

Osim navedenih ograničenja, analizirana rješenja imaju i niz prednosti. Sva rješenja postižu izrazito visoku razinu točnosti koja je otprilike 99,5%. Važno je istaknuti da za postizanje te razine preciznosti nisu potrebni značajni računalni ni vremenski resursi. Takvi sustavi također značajno skraćuju sam proces ocjenjivanja ispita u usporedbi s čovjekom. Iako ovi

sustavi nisu savršeni, riječ je o zreloj i relativno jeftinoj tehnologiji koja pokazuje znatno nižu stopu pogrešaka u odnosu na čovjeka, pogotovo kada se uzme u obzir vrijeme potrebno za ocjenjivanje.

Za kraj, važno je napomenuti da je takve sustave teško međusobno uspoređivati, budući da se implementacije često razlikuju samo po korištenim metodama, dok su same faze obrade u većini slučajeva jednake i već su obrađene u prijašnjim poglavljima. Dobar primjer toga je otklanjanje šuma, koje je praktički neizostavan korak u svim sustavima, razlika je jedino u konkretnoj metodi koja se koristi za tu svrhu.

Ipak, postoje i inovativna rješenja koja pristupaju postojećim problemima na kreativan način. Dobar primjer za to je OMRNet klasifikator, koji primjenom metode dubokog učenja nudi novu perspektivu u detekciji označenih odgovora. Kombinacijom različitih aspekata postojećih rješenja moguće je dizajnirati kvalitetan i precizan sustav za detekciju i ocjenjivanje pismenih ispita zatvorenog tipa.

4. Definiranje zahtjeva

Kroz daljnji dio rada fokus će biti na izradi i prikazu komponente otvorenog koda za detekciju odgovora na pismenim testovima. Prikazat će se svi važni koraci i dizajnerske odluke koje utječu na konačni dizajn i funkcionalnost rješenja. Izrađena komponenta će također biti ugrađena u jednostavnu stolnu aplikaciju da bi se olakšalo razvoj i vizualizirao sam rad komponente.

4.1. Opis rješenja

Kao što je već spomenuto cilj je izraditi komponentu otvorenog koda za detekciju odgovora na pismenim ispitima. Fokus će biti na detektiranju odgovora s matrice odgovora. Prednost toga pristupa je to što nije potrebno slikati više stranica da bi se ocijenio jedan ispit, već je dovoljno ocijeniti samo matricu odgovora, to jest obraditi samo jednu stranicu.

Taj pristup detekciji odgovora je puno jednostavniji problem za riješavanje nego detekcija na standardnim ispitima. Jednostavniji je zbog toga što matrica može imati unaprijed definiranu i standardiziranu strukturu to jest predložak. Unatoč tome matrica limitira rješenje samo na pitanja s višestrukim ili jednostrukim odgovorima. No to nije problem za ovaj rad pošto drugi tipovi pitanja nisu u opsegu ovog rada.

Jedan od glavnih ciljeva ovog rješenja je da konzistentno pruža pouzdane rezultate, čak i ako uvjeti u kojima je slika uslika nisu idealni. Ta pouzdanost se treba postići za predloške koji mogu sadržavati varijabilan broj pitanja i odgovora. Da bi izrada predložaka bila jednostavnija, rješenje bi također trebalo biti sposobno prema određenim parametrima generirati predložak matrice odgovora u obliku PDF-a.

Također da bi se ubrzao rad s aplikacijom ideja je da korisnik ne unosi ručno podatke o točnim odgovorima za sva pitanja, već jednostavno slika ispravno riješen ispit te da komponenta sama izvuče te informacije iz fotografije. Da bi se dodatno ubrzao proces ocjenjivanja sustav treba biti dizajniran na način da detektirane odgovore usporedi s ispravnim odgovorima i ujedno prema korisnički definiranoj skali ocijeni ispit. Ocijenjeni ispit mora biti vizualiziran kako bi ocjenjivač mogao vidjeti je li došlo do greške kod ocjenjivanja.

U svrhu bržeg razvoja, pronalaska grešaka i slično sustav bi trebao imati mogućnost vizualiziranja svakog koraka obrade od samog unosa slike pa sve do rješenja. Ta opcija bi se trebala moći uključiti ili isključiti po potrebi.

Budući da se radi o komponenti otvorenog koda želja je da se ostavi mogućnost zamjene važnih biblioteka koje će sustav koristiti, poput one za računalni vid. Time će se omogućiti da netko po potrebi napiše svoju implementaciju i zamijeni zadanu biblioteku.

4.2. Funkcionalni zahtjevi

Identifikator	FZ-01
Zahtjev	Sustav mora detektirati odgovore s matrice odgovora.
Opis	Detekcija se temelji isključivo na obradi jedne stranice to jest matrice odgovora. Odgovori se trebaju detektirati, klasificirati prema tome jesu li označeni i zatim ih pridužiti odgovarajućem pitanju.
Način provjere	Prilikom unosa slike matrice odgovora, sustav treba pravilno označiti sve odgovore na slici i označitiji ih odgovarajućom bojom ovisno o klasi kojoj pripadaju.
Prioritet [1–5]	5
Identifikator	FZ-02
Zahtjev	Sustav mora omogućiti generiranje PDF predložaka za matricu odgovora.
Opis	Korisnici trebaju moći jednostavno izraditi matricu s unaprijed definiranim brojem pitanja i odgovora.
Način provjere	Iz sustava treba biti moguće izvesti generirani predložak u PDF formatu, parametri za unos su broj pitanja i broj odgovora po pitanju.
Prioritet [1–5]	3
Identifikator	FZ-03
Zahtjev	Sustav mora omogućiti automatsko prepoznavanje točnih odgovora iz slike ispravno riješenog ispita.
Opis	Korisnik ne mora ručno unositi odgovore; slika ispravnog rješenja bit će dovoljna za generiranje ključa.
Način provjere	Učitavanjem slike ispravno riješenog ispita sustav mora automatski prepoznati sve točne odgovore.
Prioritet [1–5]	4
Identifikator	FZ-04
Zahtjev	Sustav mora usporediti odgovore s točnim rješenjem i izračunati ocjenu prema skali koju je korisnik definirao.
Opis	Automatsko ocjenjivanje ubrzava proces ispravljanja i smanjuje mogućnost pogreške.
Način provjere	Nakon što se ispiti obrade, mora biti prikazana ocjena za svaki ispit u skladu sa skalom.
Prioritet [1–5]	4

Identifikator	FZ-05
Zahtjev	Sustav mora omogućiti vizualizaciju rezultata ocjenjivanja za svakog korisnika.
Opis	Omogućava ljudsku kontrolu rezultata i ispravnost prepoznavanja i ocjenjivanja.
Način provjere	Vizualna prezentacija ispita s označenim točnim i netočnim odgovorima mora biti dostupna.
Prioritet [1–5]	3
Identifikator	FZ-06
Zahtjev	Sustav mora omogućiti prikaz svih koraka obrade slike.
Opis	Korisnicima i developerima ova funkcionalnost je korisna za praćenje grešaka i ponašanja sustava. Slike se trebaju prikazati tijekom obrade i spremiti na disk računala.
Način provjere	Funkcionalnost prikazuje korake i sprema ih na disk ako je uključena, inače ne.
Prioritet [1–5]	5
Identifikator	FZ-07
Zahtjev	Sustav mora podržavati pitanja s jednostrukim i višestrukim odgovorima.
Opis	Korisnici trebaju imati mogućnost definiranja pitanja koja imaju jedan točan odgovor (jednostruki izbor) ili više točnih odgovora (višestruki izbor). Sustav mora pravilno detektirati i ocijeniti oba tipa pitanja.
Način provjere	Prilikom testiranja, sustav mora ispravno ocijeniti ispite koji sadrže oba tipa pitanja.
Prioritet [1–5]	4

Tablica 2: Funkcionalni zahtjevi

4.3. Nefunkcionalni zahtjevi

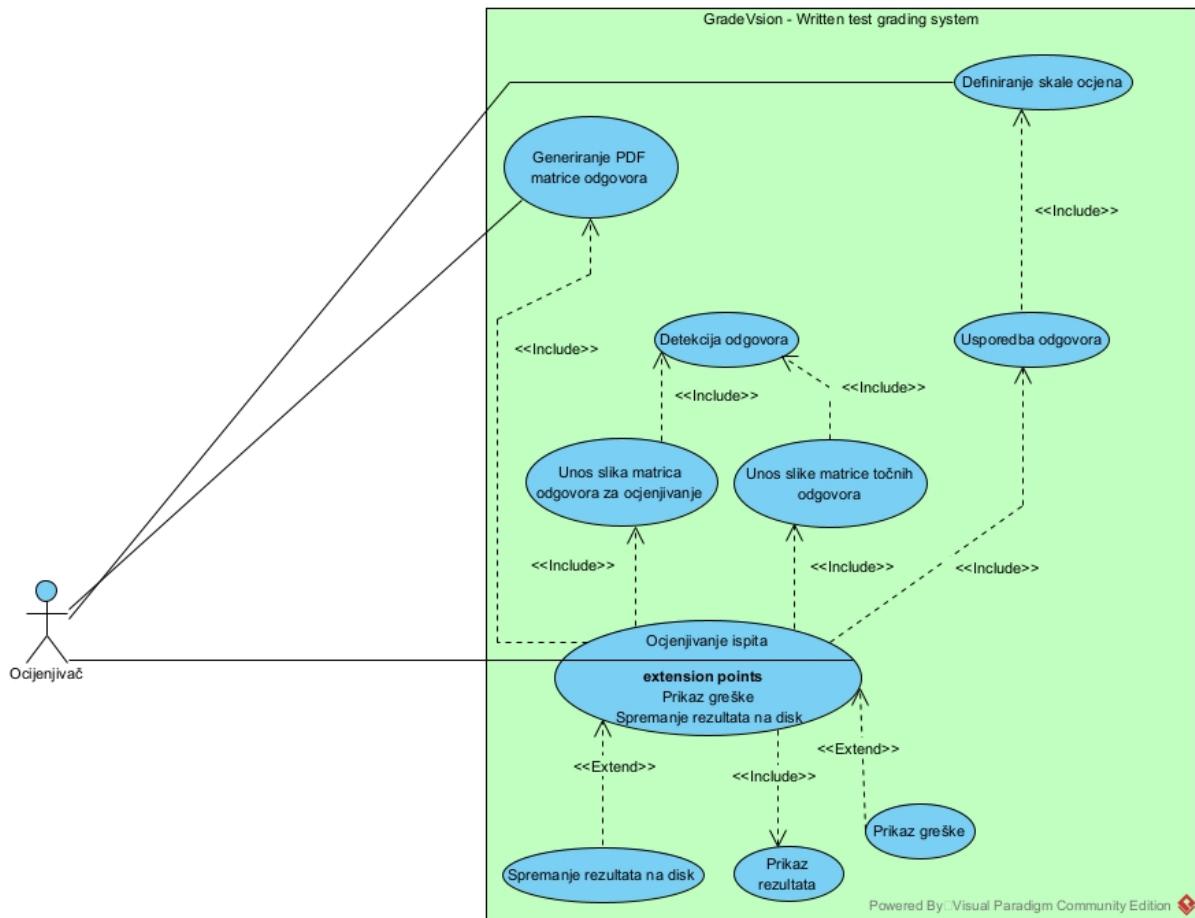
Identifikator	NFZ-01
Zahtjev	Sustav mora pružati pouzdane rezultate čak i u slučaju loših uvjeta pri snimanju (npr. sjenke, loš kontrast, zakrenutost).
Opis	U praksi slike ispita neće uvijek biti idealne kvalitete, sustav mora biti sposoban obraditi sliku i u takvim uvjetima.
Način provjere	Sustav se testira na uzorku slika s različitim uvjetima osvjetljenja, orientacije i kvalitete.
Prioritet [1–5]	3

Identifikator	NFZ-02
Zahtjev	Sustav mora omogućiti jednostavnu zamjenu vanjskih biblioteka poput one za računalni vid.
Opis	Komponenta pruža sučelje koje korisnici mogu naslijediti i napisati svoju implementaciju i time zamijeniti biblioteku za CV.
Prioritet [1–5]	2
Identifikator	NFZ-03
Zahtjev	Sustav mora moći detektirati odgovore na predlošku s varijabilnim brojem pitanja i odgovora
Opis	Korisnici će moći generirati predložak s različitim brojem pitanja i odgovora, sustav ih treba sve ispravno detektirati.
Način provjere	Testirati s raznim kombinacijama matrica odgovora sposobnost detekcije kada broj pitanja i odgovora nije fiksan, već varijabilan.
Prioritet [1–5]	2
Identifikator	NFZ-04
Zahtjev	Sustav mora pronaći odgovore na slici unutar 500 milisekundi.
Opis	Nakon što korisnik učita sliku i pritisne gumb za detekciju odgovora, sustav ima najviše 500 milisekundi za obradu slike i pronalazak odgovora. Ovo ograničenje vrijedi za slike koje ne prelaze 2K rezoluciju te se odnosi isključivo na rad izvan načina za otklanjanje pogrešaka. Vrijeme učitavanja i spremanja slika (I/O operacije) nije uključeno u navedeno vremensko ograničenje.
Način provjere	Izmjeriti prosječno vrijeme potrebno za detekciju odgovora sa slike u standardnim uvjetima.
Prioritet [1–5]	1

Tablica 3: Nefunkcionalni zahtjevi

4.4. Slučajevi korištenja

Kroz dijagram slučajeva korištenja moguće je vidjeti koji su korisnici sustava te koja je razina njihove interakcije s određenim funkcijama i dijelovima sustava. Važno je napomenuti da se radi o prikazu visoke razine, čiji elementi ne moraju nužno odgovarati programskom kodu jedan na jedan. Na konkretnom primjeru ovog sustava može se uočiti da su ocjenjivači jedini korisnici sustava. Oni imaju mogućnost iniciranja više različitih akcija unutar sustava.



Slika 17: Prikaz Use-case diagrama (Vlastita izrada)

4.4.1. Slučaj korištenja: Ocjenjivanje ispita

4.4.1.1. Korisnici

Kao što je već spomenuto, ocjenjivači su jedini korisnici ovog sustava. Oni su u koначnici odgovorni za sam proces ocjenjivanja ispita, a GradeVision softversko rješenje im služi kao alat koji im u tom procesu značajno pomaže. Pomaže im tako što ubrzava sam proces ocjenjivanja, što im omogućuje da više vremena posvete drugim obvezama, poput podizanja kvalitete nastave i sl.

4.4.1.2. Glavni scenarij

Glavni scenarij u ovom sustavu je ocjenjivanje ispita. Ocjjenivač pokreće tu aktivnost, koja zatim uključuje ostale dijelove sustava o kojima ovisi ispravan rad. To su druge aktivnosti poput generiranja PDF matrice odgovora, unosa slike i usporedbe odgovora.

4.4.1.3. Uključeni slučaj uporabe: Generiranje PDF matrice odgovora

Sustav ima mogućnost ocjenjivanja samo onih ispita koji imaju matrice odgovora u određenom formatu, stoga se prije ocjenjivanja ta matrica mora generirati. Taj format je donekle fleksibilan što se tiče broja pitanja i odgovora, ali osnovna struktura mora biti ista. Zbog toga ocjenjivač prije samog ocjenjivanja mora pokrenuti aktivnost "Generiranje PDF matrice odgovora" i definirati broj pitanja i odgovora kako bi kasnije mogao uspješno ocijeniti te matrice. Ako se ovaj korak preskoči i u sustav se učita matrica nekompatibilnog formata, sustav neće raditi.

4.4.1.4. Uključeni slučaj uporabe: Unos slike matrice točnih odgovora

Također, prije ocjenjivanja sustav mora znati koji su točni odgovori kako bi ih kasnije mogao usporediti. Stoga ocjenjivač mora učitati sliku matrice točnih odgovora čime se pokreće aktivnost "Unos slike matrice točnih odgovora".

4.4.1.5. Uključeni slučaj uporabe: Unos slike matrica odgovora za ocjenjivanje

Nakon što sustav ima učitanu sliku matrice točnih odgovora, potrebno je učitati slike matrica odgovora koje treba ocijeniti, jer bez tog koraka sustav ne zna što je potrebno ocijeniti. Učitavanjem tih slika pokreće se aktivnost "Unos slike matrica odgovora za ocjenjivanje".

4.4.1.6. Uključeni slučaj uporabe: Detekcija odgovora

Obje aktivnosti učitavanja matrica odgovora ovise o aktivnosti "Detekcija odgovora", koja je ujedno jedna od najvažnijih aktivnosti koje sustav provodi, budući da se tu nalazi cijela logika za obradu slika i izdvajanje podataka o označenim odgovorima.

4.4.1.7. Uključeni slučaj uporabe: Usaporedba odgovora

Nakon što su odgovori s učitanih matrica odgovora detektirani, pokreće se aktivnost "Usaporedba odgovora", koja uspoređuje odgovore s matrica za ocjenjivanje s točnim odgovorima iz matrice točnih odgovora. Ta aktivnost također ovisi o aktivnosti "Definiranje skale ocjena", koja definira raspone za postizanje određene ocjene u postocima. U slučaju da skala nije definirana, koristi se unaprijed zadana skala.

4.4.1.8. Ostali prošireni i uključeni slučajevi uporabe

Nakon što je ispit ocijenjen, pokreće se aktivnost "Prikaz rezultata", te po potrebi aktivnosti "Prikaz greške" i "Spremanje rezultata na disk". Zadnje dvije aktivnosti su opcionalne. Spremanje na disk korisnik može uključiti ili isključiti, dok se greške prikazuju samo ako postoje razlike između detektiranih odgovora za ocjenjivanje i točnih odgovora. To mogu biti razlike poput različitog broja pitanja i odgovora i sl.

4.4.1.9. Tijek aktivnosti

Ovo je pravilan tijek aktivnosti slučaja korištenja "Ocenjivanje ispita":

- 1. Generiranje PDF matrice odgovora**

Ocenjivač definira broj pitanja i odgovora te generira matricu u propisanom formatu.

- 2. Definiranje skale ocjena**

Ocenjivač može definirati vlastitu skalu ocjena. Ako se preskoči, koristi se zadana skala.

- 3. Unos slike matrice točnih odgovora**

Učitava se slika ispravno riješenog ispita kako bi sustav prepoznao točne odgovore.

- 4. Unos slika matrica odgovora za ocjenjivanje**

Učitavaju se slike ispita koje je potrebno ocijeniti.

- 5. Detekcija odgovora**

Sustav obrađuje slike i detektira i klasificira odgovore za svako pitanje.

- 6. Usporedba odgovora**

Detektirani odgovori uspoređuju se s točnim odgovorima na temelju zadane skale ocjena.

- 7. Prikaz rezultata**

Korisniku se prikazuju ocjene i vizualna oznaka točnih/netočnih odgovora.

- 8. Spremanje rezultata na disk (ako je uključena opcija)**

Rezultati se mogu trajno pohraniti, ako je uključena ta opcija.

- 9. Prikaz greške (samo ako je potrebno)**

Ako postoji nesukladnost između matrica, poput razlike u broju pitanja ili odgovora, korisnik će biti obavješten o nastanku greške.

5. Dizajn i izrada artefakta

Kroz ostatak rada fokus će biti na dizajnu i izradi artefakta za opisani problem. Artefakt će biti prikazan kroz različite dijagrame i zanimljive isječke koda.

5.1. Odabранe tehnologije

Prije prikaza samog rješenja, važno je razumjeti koje su tehnologije odabrane i koji su razlozi za njihov odabir. U prijašnjim poglavljima spomenute su relevantne tehnologije, odnosno biblioteke za računalni vid. Analizirane biblioteke mogu se podijeliti na biblioteke za obradu slike i biblioteke za strojno i duboko učenje. Kroz ovaj rad fokus će biti na izradi rješenja isključivo korištenjem obrade slike. Ta odluka donesena je iz osobnih preferencija. Time se izbor automatski sužava na dvije popularne biblioteke: OpenCV i Scikit-Image.

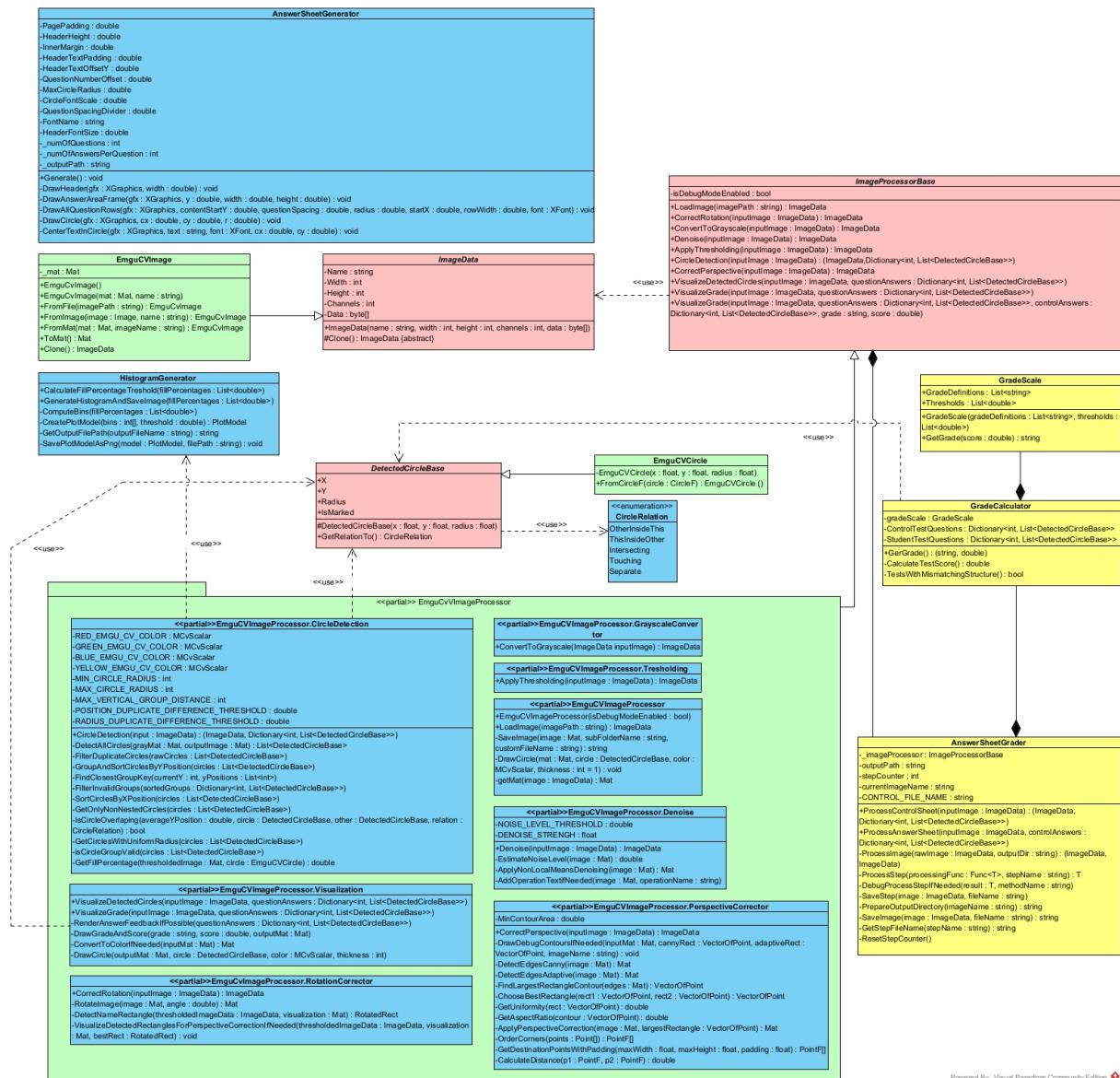
Osim biblioteke, važan je i programski jezik koji je odabran. Budući da je cilj ovog rada izraditi biblioteku otvorenog koda, donesena je odluka koristiti C# i .NET. Taj programski jezik omogućuje izradu biblioteke u obliku .dll datoteke, kao i jednostavnu izradu demo aplikacije korištenjem WinForms tehnologije, koja je također bazirana na C#-u i .NET-u.

Odabir programskog jezika ujedno je olakšao i odabir biblioteke za računalni vid. Budući da Scikit-Image ne podržava odabранe tehnologije, odlučeno je koristiti EmguCV. EmguCV je zapravo .NET omotač za OpenCV biblioteku. Odabir EmguCV-a omogućio je korištenje sve postojeće dokumentacije, materijala i više od 2500 metoda vezanih za OpenCV.

Važno je napomenuti da je prije početka dizajna artefakta donesena odluka da sustav mora biti neovisan o konkretnoj biblioteci za računalni vid. To znači da će se korisnicima omogućiti izrada vlastitih implementacija koristeći bilo koju drugu biblioteku za računalni vid.

Kako bi to bilo moguće, odlučeno je koristiti uzorak dizajna injektiranja ovisnosti (eng. dependency injection). Točnije, definirane su apstraktne klase koje korisnici mogu naslijediti i implementirati prema vlastitim potrebama, a zatim ih injektirati u glavnu klasu biblioteke ovog rješenja.

5.2. Strukturni model sustava



Slika 18: Prikaz dijagrama klasa (Vlastita izrada)

Na priloženoj slici prikazana je struktura izrađenog sustava za detekciju odgovora na pismenim ispitima nazvanog GradeVision. Struktura je prikazana korištenjem dijagrama klasa, što omogućuje detaljan uvid u atribute, metode i međuvisnosti svake klase. Klase na ovoj slici možemo podijeliti na klase koje se bave procesiranjem slika i klase temeljne poslovne logike. Nadalje, klase za procesiranje slika mogu se podijeliti na apstraktne i specifične klase.

Apstraktne klase (označene crvenom bojom) su: **ImageData**, **DetectedCircleBase** i **ImageProcessorBase**. U ovom slučaju, te klase postoje kako bi ispunile jedan od nefunkcionalnih zahtjeva (NFZ-02). Taj je zahtjev bio vezan uz jednostavnu zamjenu biblioteka za računalni vid. Specifične klase (označene zelenom bojom) su: **EmguCvImage**, **EmguCvCircle** i **EmguCvImageProcessor**. One predstavljaju zadatu implementaciju apstraktnih klasa,

napisanu korištenjem biblioteke EmguCV za računalni vid.

Važno je napomenuti da klasa **EmguCvImageProcessor** nasljeđuje apstraktnu klasu **ImageProcessorBase**, ali ne implementira sve njezine metode u jednoj C# datoteci. Metode su implementirane u više datoteka koristeći koncept parcijalnih klasa u programskom jeziku C#. To smanjuje potrebu za implementacijom više sučelja prilikom kreiranja nove implementacije. Klasa **EmguCvImageProcessor** definirana je kroz sljedeće datoteke, pri čemu svaka datoteka poštuje načelo jedinstvene odgovornosti (*eng. Single Responsibility Principle*):

- **EmguCVImageProcessor.cs**
 - Klasa koja sadrži konstruktor te sve zajedničke i pomoćne metode koje nisu specifične samo za jedan korak obrade
- **EmguCVImageProcessor.CircleDetection.cs**
 - Sadrži logiku za detekciju krugova, njihovo grupiranje, filtriranje i klasificiranje
- **EmguCVImageProcessor.Denoise.cs**
 - Sadrži logiku za uklanjanje šuma u slučaju da je razina šuma iznad definiranog praga
- **EmguCVImageProcessor.GrayscaleConvertor.cs**
 - Sadrži logiku za pretvorbu slike u boji u sivu sliku
- **EmguCVImageProcessor.PerspectiveCorrector.cs**
 - Sadrži logiku za detekciju papira ili unutarnjih okvira ispita te ispravljanje perspektivne deformacije
- **EmguCVImageProcessor.RotationCorrector.cs**
 - Sadrži logiku za određivanje orijentacije papira i korekciju pogrešne rotacije
- **EmguCVImageProcessor.Tresholding.cs**
 - Sadrži logiku za pretvorbu sive slike u binarnu sliku korištenjem tehnike adaptivnog praga (*engl. Adaptive Thresholding*)
- **EmguCVImageProcessor.Visualization.cs**
 - Sadrži logiku za vizualizaciju označenih odgovora i ocjena

Svi koraci procesiranja slike definirani su unutar klase **ImageProcessorBase**, a implementirani u klasi **EmguCvImageProcessor**. Važno je naglasiti da u tim klasama nije definiran ni redoslijed operacija ni logika ocjenjivanja testova. Taj je dio izdvojen u klase (označene žutom bojom): **AnswerSheetGrader**, **GradeCalculator** i **GradeScale**. To su ujedno i klase s kojima bi korisnici biblioteke trebali imati najviše interakcije.

5.2.1. Klase **ImageData** i **EmguCvImage**

Kako bi se omogućila zamjena biblioteke za računalni vid, bilo je potrebno koristiti podatkovni model slike koji nije vezan ni uz jednu konkretnu biblioteku. Zbog toga je kreirana apstraktna klasa **ImageData**, koja sadrži sve potrebne podatke za daljnje procesiranje slike. To uključuje naziv datoteke, širinu, visinu, broj kanala, podatke o slici u obliku niza bajtova te metodu za kloniranje. Na taj način svaka implementacija tog sučelja može biti predstavljena na isti način.

Na primjer, **EmguCvImage** je implementacija koja predstavlja objekt tipa Mat iz biblioteke EmguCV u obliku **ImageData**. Također sadrži razne pomoćne metode poput ToMat, FromMat,FromFile i sličnih, što omogućuje još jednostavniji razvoj.

ImageData se koristi u svim dijelovima koda koji moraju biti neovisni o biblioteci za računalni vid, dok se **EmguCvImage** koristi isključivo u specifičnoj implementaciji koja koristi biblioteku EmguCV.

5.2.2. Klase **DetectedCircleBase** i **EmguCvCircle**

DetectedCircleBase je klasa koja je također nastala iz potrebe da sustav bude neovisan o specifičnoj biblioteci za računalni vid. Njezina je svrha pohranjivanje svih podataka o detektiranim krugovima, dok se specifične implementacije poput **EmguCvCircle** brinu za prikaz specifičnih objekata biblioteke računalnog vida u tom obliku.

DetectedCircleBase sadrži sve važne informacije o detektiranom krugu poput: x koordinate, y koordinate, radiusa i vrijednosti koja označava je li krug ispunjen. Osim toga, sadrži i metodu koja provjerava odnos jednog objekta tipa **DetectedCircleBase** u odnosu na drugi objekt iste klase. Time se može saznati radi li se o krugu koji se preklapa i slično, što će u dalnjem dijelu rada biti iznimno važno.

EmguCvCircle samo nasljeđuje **DetectedCircleBase** i omogućuje kreiranje objekta na temelju modela podataka **CircleF**, koji je prisutan u biblioteci EmguCV.

5.2.3. Klasa **EmguCvImageProcessor**

Kao što je već spomenuto, **EmguCvImageProcessor** je konkretna klasa koja implementira metode naslijedene iz apstraktne klase **ImageProcessorBase**. Budući da se radi o parcijalnoj klasi, metode su implementirane u različitim datotekama.

Može se reći da je ova klasa zapravo jezgra ovog rješenja. Ona je odgovorna za sve korake koji spadaju pod preprocesiranje, procesiranje i dio postprocesiranja.

Najvažniji dijelovi logike provode se u fazi preprocesiranja, budući da se ondje nalazi sva logika koja priprema sliku za daljnju obradu. U toj fazi također su implementirani mehanizmi koji omogućuju da sustav ispravno radi i u uvjetima koji nisu idealni.

Kasnije u radu prikazat će se točan redoslijed tih operacija, koji je definiran klasom

AnswerSheetGrader. Također će biti prikazani zanimljivi i nestandardni dijelovi implementacije za svaki od tih koraka.

Sam redoslijed operacija namjerno nije definiran unutar klase **EmguCvImageProcessor**, budući da je ideja bila izdvojiti što više poslovne logike izvan klase koje ovise o određenoj biblioteci za računalni vid. Time je omogućeno da se u budućnosti, po potrebi, napiše nova konkretna implementacija klase **ImageProcessorBase** bez potrebe za ponovnim pisanjem cijele poslovne logike. Može se reći da je u ovom slučaju **EmguCvImageProcessor** "motor" GradeVision sustava, dok je **AnswerSheetGrader** "vozač".

5.2.4. Klase GradeCalculator i GradeScale

Klase **EmguCvImageProcessor** na kraju obrade slike vraća listu odgovora po pitanjima. Ta lista se zatim predaje klasi **GradeCalculator**, koja je zadužena za izračun bodova i postotka točnosti ispita, a potom uz pomoć klase **GradeScale** određuje ocjenu koja će se ispitu dodijeliti.

GradeScale predstavlja unaprijed definiranu skalu ocijena, ali postoji i mogućnost definiranja vlastite skale, što ocjenjivačima pruža dodatnu fleksibilnost.

Unutar ove dvije klase enkapsulirana je sva logika za ocjenjivanje ispita. Trenutna implementacija podržava ocjenjivanje pitanja s jednostrukim i višestrukim odgovorima. Proses bodovanja temelji se na strogoj logici: bod se dodjeljuje samo ako je odgovor u potpunosti točan, to jest nema parcijalnih bodova ni penalizacije za djelomične odgovore.

Važno je napomenuti da ove dvije klase također sudjeluju u fazi postprocesiranja, točnije u konačnom koraku **Obrada izvučenih podataka**, gdje koriste prethodno definiranu bazu znanja (listu točnih odgovora iz kontrolnog ispita). Nakon toga se ocjene vizualiziraju, a za tu funkcionalnost ponovno je zadužena klasa **EmguCvImageProcessor**.

5.2.5. Ostale klase

Od ostalih klasa postoje **HistogramGenerator** i **AnswerSheetGenerator** klase. Radi se o generatorima sadržaja. Klasa **AnswerSheetGenerator** odgovorna je za generiranje matrice odgovora prema zadanim parametrima, kao što je definirano u funkcionalnom zahtjevu FZ-02. Za razliku od ostalih klasa, riječ je o potpuno neovisnoj komponenti sustava, čija se metoda **Generate()** može pozvati u bilo kojem trenutku izvođenja programa, bez utjecaja na njegovo daljnje izvođenje.

S druge strane, klasa **HistogramGenerator** je pomoćna klasa koja ima ključnu ulogu u procesu detekcije krugova. Implementira algoritam za određivanje praga koji definira je li neki odgovor označen ili nije. Izračunati pragovi se zatim vizualiziraju i pohranjuju u obliku histograma na disk. Histogrami se spremaju samo kada je program pokrenut u načinu rada za otklanjanje pogrešaka (*engl. debug mode*), koji je definiran u funkcionalnom zahtjevu FZ-06.

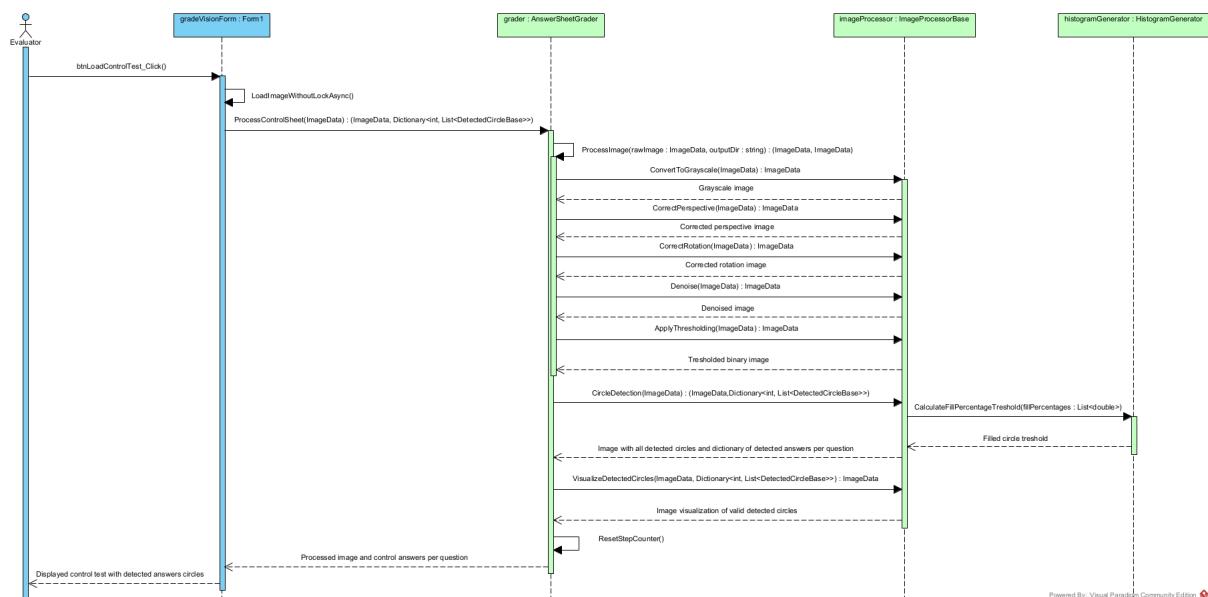
Važno je napomenuti da je klasa **HistogramGenerator** potpuno neovisna o bibliotekama za računalni vid, iako se primarno koristi od strane **EmguCVImageProcessor** klase.

Ona prima listu decimalnih brojeva koji predstavljaju odgovore na ispitnim listovima s određenim postotkom ispunjenosti. Te podatke obrađuje i vraća prag ispunjenosti kruga u obliku postotka. Ako je postotak ispunjenosti viši od izračunatog praga, krug se smatra označenim.

5.3. Modeliranje ponašanja sustava

Kroz sljedeće dijagrame slijeda prikazat će se interakcije između korisnika i različitih dijelova sustava na visokoj razini, dok će se kroz daljnji rad prikazati zanimljivi dijelovi detaljnije. Svaki dijagram slijeda vezan je uz jedan od koraka koje ocjenjivač može napraviti i time pokrenuti neku interakciju sa sustavom.

5.3.1. Ponašanje sustava tijekom detekcije odgovora s kontrolnog ispita



Slika 19: Prikaz dijagrama slijeda za detekciju odgovora s kontrolnog ispita (Vlastita izrada)

Dosad se **GradeVision** spominjao samo kao biblioteka, ali za potrebe testiranja i demonstracije izrađena je jednostavna WinForms aplikacija koja koristi mogućnosti te biblioteke, a koja će se u dalnjem dijelu rada spominjati kao **GradeVision korisničko sučelje**, dok će se biblioteka spominjati kao **GradeVisionLib**. Također, u dalnjem dijelu rada spominjat će se pojmovi **kontrolni ispit** i **ispit za ocjenjivanje**. Kontrolni ispit označava ispit koji sadrži sve točne odgovore za svako pitanje, dok ispit za ocjenjivanje označava ispit čija je točnost nepoznata te se tek treba utvrditi usporedbom detektiranih odgovora s detektiranim odgovorima kontrolnog ispita (eng. control test).

Priloženi dijagram prikazuje proces detekcije odgovora s kontrolnog ispita. To je vrlo važan proces, budući da je njegov konačni rezultat izrada baze znanja s točnim odgovorima za svako pitanje, koja se kasnije koristi pri ocjenjivanju.

Taj proces pokreće ocjenjivač tako da učita sliku kontrolnog ispita u **GradeVision** korisničko sučelje. Zatim aplikacija GradeVision poziva **AnswerSheetGrader**, koji je dio GradeVisionLib-a. Točnije, poziva se metoda **ProcessControlSheet(ImageData)**, čime se zapravo pokreće obrada slike. Veći dio obrade slike izvodi se u metodi **ProcessImage(ImageData rawImage, string outputDir)**, koja orkestrira sve aktivnosti pretpresiranja pozivanjem metoda konkretnе implementacije klase **ImageProcessorBase** sljedećim redoslijedom:

- ConvertToGrayscale(image)
- CorrectPerspective(image)
- CorrectRotation(image)
- Denoise(image)
- ApplyThresholding(image)

Naravno ove metode kasnije pozivaju svoje privatne pomoćne metode no to će uvijek ovisiti o biblioteci računalnog vida koja se koristi pa taj dio nije prikazan na dijagramu. Metoda **ProcessImage(ImageData rawImage, string outputDir)** se također koristi i kod pretpresiranja ispita za ocjenjivanje što će u nastavku biti prikazano. Važno je napomenuti da je sam redoslijed aktivnosti pretpresiranja dobiven kroz opsežno testiranje i iteriranje tijekom razvoja i ova varijanta se pokazala najboljom. Kvaliteta redoslijeda tih aktivnosti bila je mjerena prema preciznosti samog sustava nad skupom podataka vlastite izrade koji će također biti priloženi uz ovaj rad.

Osim toga, metoda **ProcessImage(ImageData rawImage, string outputDir)** se također koristi pri pretpresiranju ispita za ocjenjivanje, što će biti prikazano u nastavku. Naravno, ove metode kasnije pozivaju svoje privatne pomoćne metode, što će uvijek ovisiti o biblioteci računalnog vida koja se koristi, pa taj dio nije prikazan na dijagramu zbog čitljivosti.

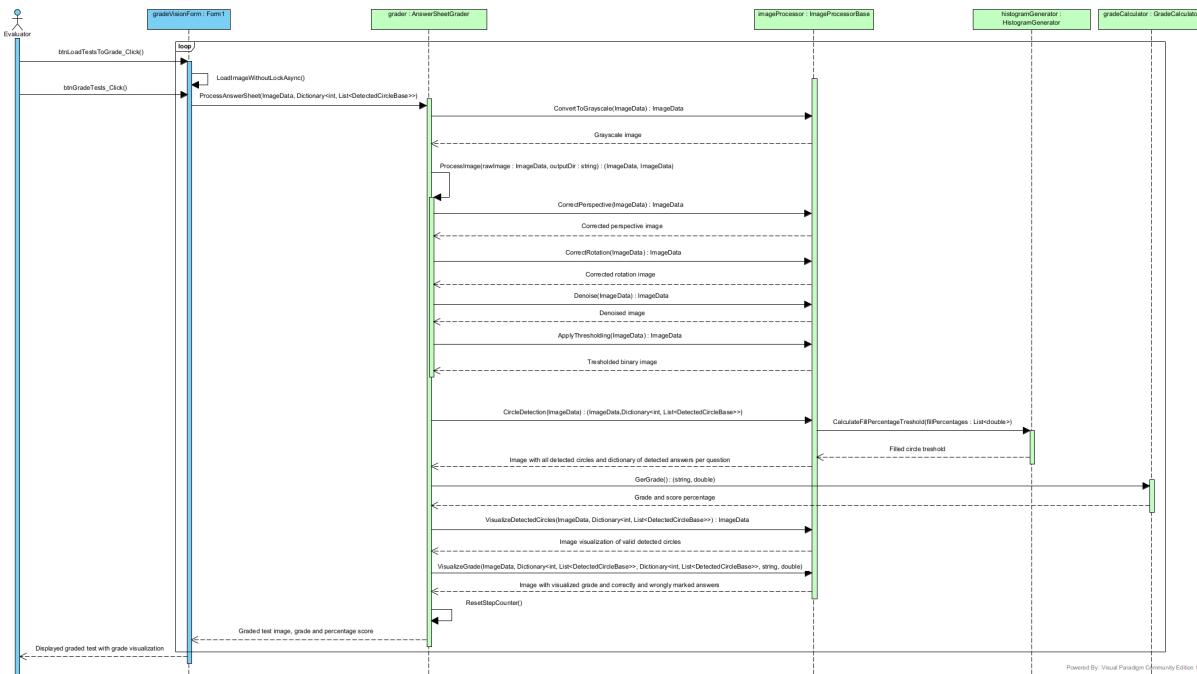
Nakon što je pretpresiranje završeno, započinje faza procesiranja tako što **AnswerSheetGrader** poziva metodu **CircleDetection(ImageData inputImage)**. Metoda **CircleDetection** jedan je od najvažnijih dijelova ovog rada, budući da se u njoj odvija detekcija odgovora i njihovo klasificiranje u dvije klase: označen i neoznačen odgovor.

Sama logika klasificiranja koristi opisne vrijednosti ispunjenosti objekta, koje izražavaju postotak u kojem je pojedini odgovor ispunjen. Međutim, samo poznavanje postotka ispunjenosti nije dovoljno za ispravnu klasifikaciju odgovora. Potrebno je odrediti prag ispunjenosti koji razdvaja te dvije klase. Taj se prag može postaviti proizvoljno, no takav pristup nije pouzdan jer ne ispunjava svaka osoba krug odgovora na isti način. Osim toga, dodatni čimbenici poput veličine kruga odgovora na papiru također utječu na rezultate.

Zbog toga je bilo potrebno osmisliti preciznije rješenje. Ono je implementirano u klasi **HistogramGenerator**, unutar metode **CalculateFillPercentageThreshold(List<double> fillPercentages)**. Upravo se ta metoda poziva unutar **CircleDetection** metode prije nego što se vrati slika sa svim detektiranim odgovorima i rječnik klasificiranih odgovora grupiranih po pitanjima.

Klase **AnswerSheetGrader** zatim poziva metodu **VisualizeDetectedCircles** iz klase **ImageProcessorBase** kako bi se klasificirani odgovori vizualizirali. Nakon toga se kreirana slika vraća sve do GradeVision korisničkog sučelja, gdje je prikazana ocjenjivaču.

5.3.2. Ponašanje sustava tijekom ocjenjivanja



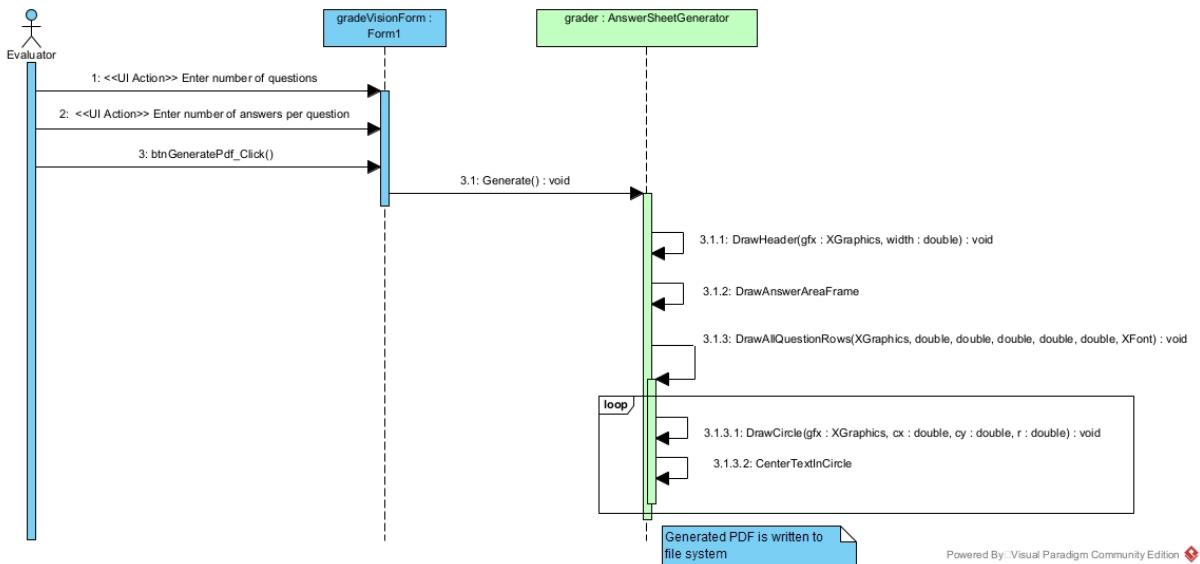
Slika 20: Prikaz dijagrama slijeda ocjenjivanja ispita (Vlastita izrada)

Priloženi dijagram ima mnogo sličnosti sa prijašnjim dijagramom slijeda, ali razlikuje se u par ključnih stvari. Prva razlika je da korsnik ne unosi samo jednu sliku u sustav već više njih. Zatim se poziva metoda **ProcessAnswerSheet(ImageData inputImage, Dictionary<int, List<DetectedCircleBase>> controlAnswers, GradeScale gradeScale)** koja procesira ispite za ocjenjivanje. Preprocesiranje ponovno provodi **ProcessImage(ImageData rawImage, string outputDir)** metoda već spomenutim koracima i redoslijedom. Zatim se provodi detektiranje krugova koje je također već spomenuto, no tu sve sličnosti sa prijašnjim dijagramom završavaju. Nakon detektiranja krugova poziva se **GradeCalculator** klasa, točnije njezina metoda **GetGrade()**.

Nakon što metoda vrati ocjenu i postotak rješenosti, poziva se sljedeći korak. Taj korak uključuje vizualizaciju ocjene na način da se na ispitu označe točno i krivo označeni odgovori te da se u gornjem desnom kutu slike napiše postotak i ocjena. Zatim se slika sa vizualizacijom ocjene vraća na ekran ocjenjivača i ponavlja se isti proces za ostale ispite koji još nisu ocijenjeni.

Važno je napomenuti da se ovaj slijed ne može pokrenuti dok god se ne izvrše svi koraci iz prvog dijagrama slijeda za kontrolni ispit. Također, generalna struktura ispita za ocjenjivanje se mora poklapati sa kontrolnim ispitom, pod to spada isti broj pitanja i odgovora.

5.3.3. Dijagram slijeda - Generiranje matrice odgovora



Slika 21: Prikaz dijagrama slijeda za generiranje PDF matrice odgovora (vlastita izrada)

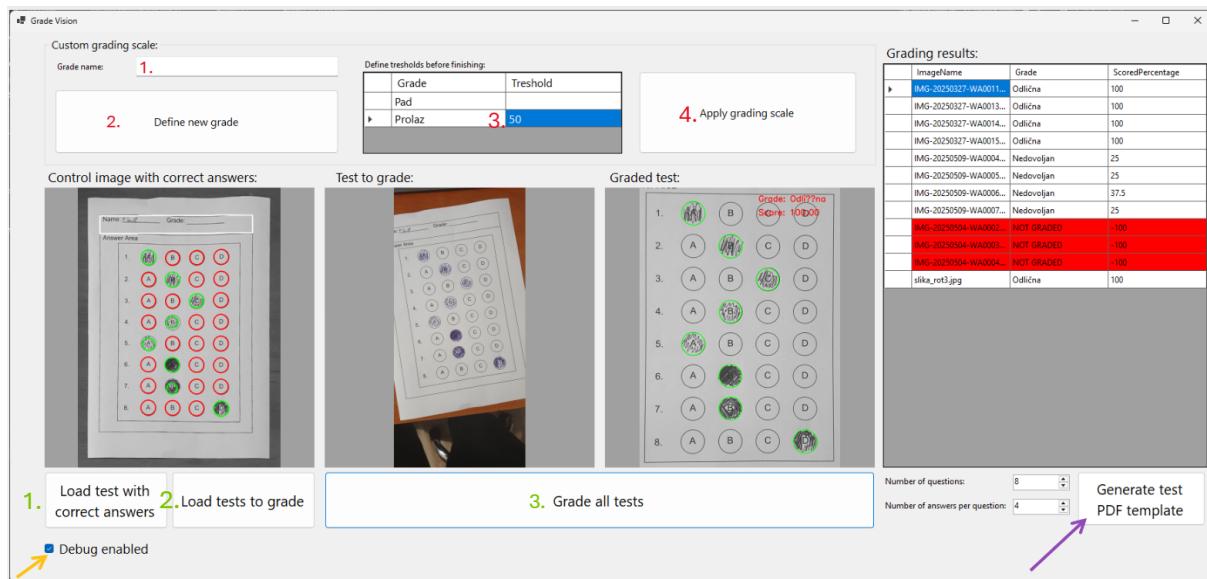
Kroz priloženi dijagram slijeda može se vidjeti da je samo generiranje matrice odgovora u obliku PDF-a prilično jednostavno. Kako bi se PDF generirao, korisnik najprije mora definirati ukupan broj pitanja i broj ponuđenih odgovora po pitanju. Nakon što su ti parametri definirani, pritišće se gumb za generiranje PDF-a, čime se daljnja kontrola nad izvođenjem predaje klasi forme u WinForm aplikaciji. Ta klasa zatim poziva metodu **Generate()** klase **AnswerSheetGenerator**.

Metoda **Generate** je metoda bez povratnog tipa podataka, što nije problem jer ona izravno generirani PDF spremi na disk. Metoda **Generate** poziva svoje privatne metode sljedećim redoslijedom:

- **DrawHeader** - Crta pravokutni okvir na vrhu stranice i ispisuje tekst s poljima za ime i ocjenu osobe koja piše ispit.
- **DrawAnswerAreaFrame** - Crta pravokutni okvir koji označava područje u kojem se nalaze pitanja i odgovori.
- **DrawAllQuestionRows** - Ispisuje redove s brojevima pitanja i pripadajućim krugovima za svaki ponuđeni odgovor.
 - **DrawCircle** - Crta jedan krug koji predstavlja ponuđeni odgovor.
 - **CenterTextIntoCircle** - Centrira i ispisuje pripadajuće slovo unutar prethodno nacrtanog kruga.

5.4. GradeVision aplikacija

Cilj ovog rada je izrada biblioteke za detekciju odgovora, no kako bi se ista mogla testirati i demonstrirati, izrađena je GradeVision stolna aplikacija. Aplikacija je izradena korištenjem .NET Core, C# i WinForms tehnologija. Te su tehnologije odabране zbog jednostavnosti i brzine izrade demo aplikacije, ali i zato što je i GradeVision biblioteka napisana korištenjem .NET Core i C#.



Slika 22: Prikaz korisničkog sučelja GradeVision stolne demo aplikacije (vlastita izrada)

Korisničko sučelje s priložene slike možda na prvi pogled djeluje komplikirano, no zapravo je poprilično jednostavno i sadrži sve potrebne elemente za testiranje i demonstraciju rada biblioteke. Glavni elementi korisničkog sučelja su tri okvira za prikaz slika. Prvi okvir prikazuje kontrolni ispit koji se, nakon učitavanja i ocjenjivanja, prikazuje na tom mjestu. U drugom okviru nalazi se izvorna slika koja se ocjenjuje, dok se desno od nje prikazuje ocijenjena verzija te slike. Također, s desne strane nalazi se i tablica koja prikazuje povijest ocjenjivanja.

Osim tih elemenata, u gornjem lijevom kutu nalaze se kontrole za definiranje nove skale ocjenjivanja, ako je to potrebno. U donjem desnom kutu nalaze se parametri matrice odgovora i gumb za njezino generiranje. Također u dolnjem lijevom kutu postoji gumb za uključivanje i isključivanje načina rada za otklanjanje grešaka.

5.4.1. Način rada

GradeVison demo aplikacija vrlo je jednostavna za korištenje. Na slici 22 označeni su koraci za korištenje raznih funkcionalnosti aplikacije.

Kako bi se prikazala cijelokupna funkcionalnost aplikacije, najbolje je za početak generirati PDF predložak matrice odgovora. Za generiranje predloška potrebno je u donjem desnom kutu aplikacije odabrati broj pitanja i broj odgovora po pitanju. Zatim je potrebno pritisnuti gumb

Generate, koji će generirati PDF matricu odgovora i spremiti je na radnu površinu računala u mapu **ProcessedImages**. Važno je napomenuti da PDF matrica ima određenu razinu fleksibilnosti što se tiče broja pitanja i odgovora, no broj pitanja je ograničen na minimalno 8, a maksimalno 20, dok je minimalan broj odgovora 4, a maksimalan 8.

Nakon što je matrica odgovora generirana, potrebno ju je isprintati i podijeliti pristupnicima ispita na rješavanje. Osim toga, ocjenjivač treba jednu matricu odgovora riješiti potpuno točno. Slijedi fotografiranje matrica odgovora i unos slika matrica u sustav.

Za unos kontrolne matrice u sustav potrebno je u donjem lijevom kutu aplikacije pritisnuti gumb **Load test with correct answers** i zatim u datotečnom sustavu odabrati fotografiju kontrolne matrice. Čim se slika učita, automatski se pokreće proces detekcije označenih odgovora na matrici. Kada taj proces završi, izvorna slika u prvom okviru zamjenjuje se slikom s detektiranim odgovorima. Time se omogućuje ocjenjivaču uvid u rad sustava i provjera njegove ispravnosti.

Nakon unosa kontrolne matrice potrebno je unijeti slike matrica odgovora polaznika. Za to je potrebno pritisnuti gumb **Load tests to grade** i zatim u datotečnom sustavu odabrati slike matrica koje je potrebno ocijeniti. Nakon što su matrice učitane, potrebno je pritisnuti gumb **Grade all tests**, koji pokreće detekciju odgovora i ocjenjivanje matrica polaznika. Ocijenjeni ispiti vizualiziraju se tijekom ocjenjivanja, a rezultati se upisuju u tablicu na desnoj strani aplikacije. U slučaju da je potrebna dodatna vizualizacija cijelog procesa, moguće je uključiti **debug mode** klikom na potvrđni okvir u donjem lijevom kutu.

U slučaju da korisnik nije definirao vlastitu skalu ocjenjivanja, sustav koristi unaprijed definiranu skalu:

Ocjena	Prag (%)
1	< 50
2	50
3	63
4	75
5	85

Tablica 4: Unaprijed definirane ocjene i odgovarajući pragovi u obliku postotka

Osim prikazanih ocjena u tablici, postoji i posebna ocjena **NOT GRADED**, koja se dodjeljuje u slučaju kada sustav zaključi da nije moguće usporediti matricu polaznika s kontrolnom matricom, iz nekog razloga.

Ako ocjenjivač želi koristiti vlastitu skalu ocjenjivanja, i to je moguće. Potrebno je u gornjem lijevom kutu aplikacije upisati ime ocjene i zatim pritisnuti gumb **Define new grade**. Taj je postupak potrebno ponoviti više puta, ovisno o broju ocjena koje je potrebno definirati. Nakon što su ocjene definirane, pragovi se dodjeljuju u tablici ocjena i pragova. Prag se dodaje tako da se upiše u tablicu pod stupac **Threshold**. Važno je napomenuti da se za prvu, tj. negativnu ocjenu, ne može definirati prag. Njezin prag je automatski manji od druge definirane ocjene.

Kada je skala definirana u tablici, potrebno je pritisnuti gumb **Apply grading scale** i

ponovno pokrenuti proces ocjenjivanja, koji će se zatim odvijati prema novoj skali.

5.5. Značajni dijelovi koda GradeVision biblioteke

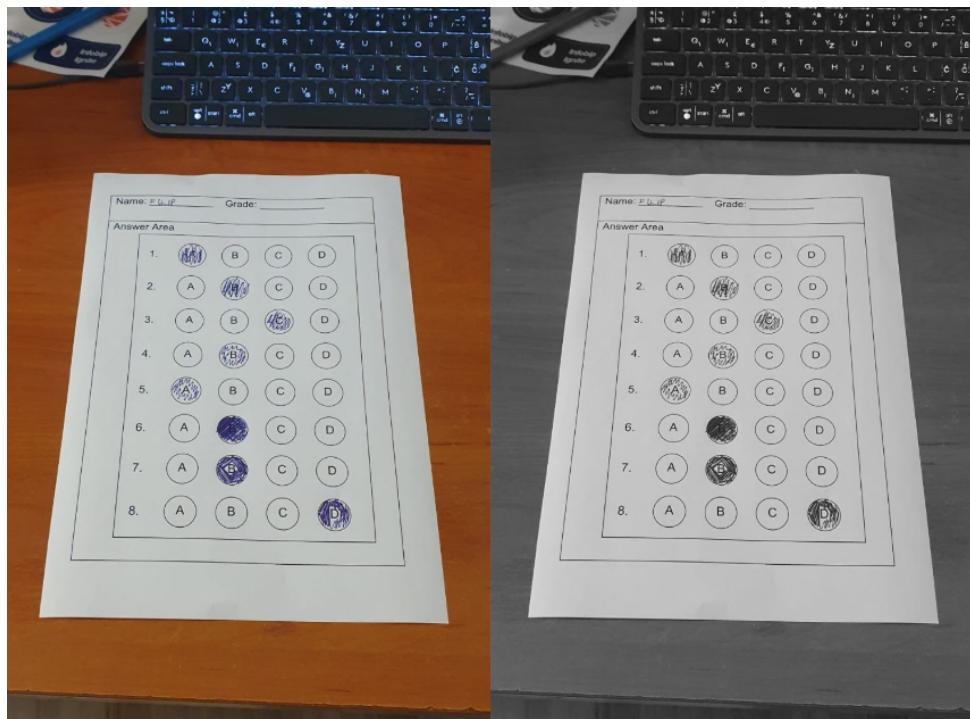
Kroz ovo poglavlje fokus je na prikazu interesantnih dijelova koda GradeVision biblioteke. Sama analiza prolazit će kroz redoslijed operacija prikazan na dijagramu slijeda na slici 20, a fokus će većinski biti na analizi implementacije metoda **ImageProcessorBase** koristeći EmguCV biblioteku.

Prvi korak procesiranja slike je pretvorba slike u boji u sivu sliku. Za to je odgovorna metoda **ConvertToGrayscale**:

```
1 override public ImageData ConvertToGrayscale(ImageData inputImage) {  
2     var inputMat = getMat(inputImage);  
3     Mat grayMat = new Mat();  
4     CvInvoke.CvtColor(inputMat, grayMat, ColorConversion.Bgr2Gray);  
5     return EmguCvImage.FromMat(grayMat, inputImage.Name);  
6 }
```

Isječak koda 1: Metoda za konverziju slike u boji u sivu sliku

Priložena metoda zapravo je prvi korak preprocesiranja slike. Metoda prvo iz apstraktne klase **InputImage** izvlači **Mat** objekt, koji je zapravo reprezentacija slike u EmguCV biblioteci. Zatim se pomoću operacije **CvInvoke.CvtColor** početna matrica pretvara u matricu sive slike koristeći mod konverzije **ColorConversion.Bgr2Gray**. Na priloženoj slici moguće je vidjeti ulaz i izlaz **ConvertToGrayscale** metode.



Slika 23: Prikaz ulazne i izlazne slike ConvertToGrayscale metode (vlastita izrada)

Pretvorba u sivu sliku bila je logični prvi korak obrade slike, pošto su za detekciju odgovora boje nebitna komponenta, tako da su odmah na početku uklonjene kako bi se smanjila količina informacija za obradu. Zatim je bilo potrebno odrediti sljedeće korake. Očito je bilo da će biti potrebno smanjiti šum na slici te ispraviti perspektivu i orientaciju papira nastalu tijekom pribavljanja fotografije, no nije bilo jasno koji je najefikasniji redoslijed tih operacija. Za početak je odabrano smanjenje buke kao sljedeća operacija, ta odluka se evaluirala i mijenjala kroz razvoj artefakta.

```

1 override public ImageData Denoise(ImageData inputImage) {
2     var inputMat = getMat(inputImage);
3     var noiseLevel = EstimateNoiseLevel(inputMat);
4
5     if (noiseLevel >= NOISE_LEVEL_THRESHOLD) {
6         inputMat = ApplyNonLocalMeansDenoising(inputMat);
7         AddOperationTextIfNeeded(inputMat, "${noiseLevel:F2} NL-Means");
8     }
9     else{
10        AddOperationTextIfNeeded(inputMat, "${noiseLevel:F2} No Denoise");
11    }
12
13    return EmguCvImage.FromMat(inputMat, inputImage.Name);
14 }
```

Isječak koda 2: Metoda za smanjenje buke na slici

Metoda **Denoise** odgovorna je za analizu buke na slici pomoću metode **EstimateNoiseLevel** i uklanjanje buke pomoću metode **ApplyNonLocalMeansDenoising**. Buka se smanjuje samo u slučaju da je vrijednost veća od definiranog praga **NOISE_LEVEL_THRESHOLD**. U slučaju da je buka ispod tog praga, smatra se da se radi o dozvoljenoj razini buke, to jest razini koja ne bi trebala imati utjecaja na daljnju obradu slike. Taj prag pažljivo je kalibriran tijekom razvoja. Također, ova metoda je odgovorna za prikaz teksta o razini buke i provedenoj operaciji uklanjanja buke. Taj se tekst prikazuje na slici samo ako je sustav u načinu rada za otkrivanje grešaka.

```

1 private double EstimateNoiseLevel(Mat image) {
2     using (Mat temp = new Mat()) {
3         CvInvoke.MedianBlur(image, temp, 3);
4         CvInvoke.Subtract(image, temp, temp);
5         temp.ConvertTo(temp, DepthType.Cv32F);
6
7         var mean = new MCvScalar();
8         var stdDev = new MCvScalar();
9         CvInvoke.MeanStdDev(temp, ref mean, ref stdDev);
10        return stdDev.V0;
11    }
12 }
```

Isječak koda 3: Procjena razine buke na slici

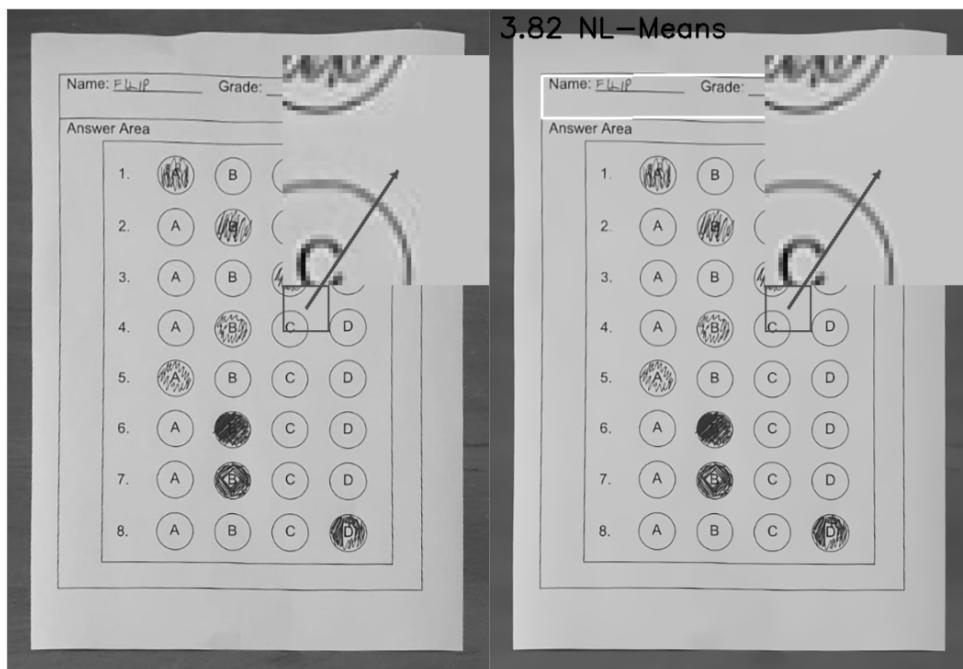
Priloženi isječak koda odgovoran je za procjenu buke spomenutu u prijašnjem isječku. Procjena buke izvodi se tako da se na pomoćnom **Mat** objektu smanji buka pomoću metode **CvInvoke.MedianBlur**, a zatim se metodom **CvInvoke.Subtract** oduzmu **Mat** objekti te se nad rezultatom pronađe standardna devijacija. Važno je napomenuti da ova metoda daje dobre rezultate za sitnu buku visoke frekvencije, što je u ovom slučaju i potrebno. Rezultat ove metode naknadno se uspoređuje s definiranim pragom i utvrđuje se je li potrebno provesti operaciju uklanjanja buke. Ako je potrebno, tada se izvršava metoda iz sljedećeg isječka.

```

1 private Mat ApplyNonLocalMeansDenoising(Mat image) {
2     var result = new Mat();
3     CvInvoke.FastNlMeansDenoising(image, result,
4         h: DENOISE_STRENGTH,
5         templateWindowSize: 5,
6         searchWindowSize: 15);
7     return result;
8 }
```

Isječak koda 4: Metoda za smanjenje buke

Priložena metoda smanjuje buku koristeći metodu **CvInvoke.FastNLMeansDenoising**. Radi se o algoritmu poznatom po očuvanju detalja i smanjenju buke, posebno na fotografijama sa sitnim detaljima. Odluka za korištenje ovog algoritma donesena je kroz testiranje raznih algoritama i usporedbu preciznosti cijelog sustava. Na kraju je odlučeno da je ovo najkonzistentnija opcija. Metoda **CvInvoke.FastNLMeansDenoising** prima tri argumenta koja opisuju jačinu uklanjanja buke i veličinu matrice za pretraživanje i usporedbu blokova piksela.



Slika 24: Prikaz ulazne i izlazne slike Denoise metode (vlastita izrada)

Sa prikazane slike vidljivo je da je buka analizirana i procijenjena kao 3.82, što je iznad definiranog praga, te se primjenila metoda za uklanjanje buke. Razlika u razini buke najbolje je

vidljiva na području oko papira i na povećanim sekcijama. Nepotrebna sitna buka na pozadini papira uklonjena je, dok su strukturni elementi ostali većinski očuvani. Smanjenje buke je izrazito važno jer olakšava daljnju obradu slike.

Nakon smanjenja buke, sljedeća faza bila je ispravak perspektive, a zatim ispravak rotacije, to jest orijentacije. Ispravak perspektive bio je jedan od najizazovnijih dijelova ovog rada. Izazov je predstavljala odluka da matrica odgovora neće sadržavati nikakve posebne oznake, poput oznaka za kutove i orijentaciju papira. Zbog toga je bilo potrebno detektirati obrub papira i prema tome ispraviti perspektivu. Kroz priložene isječke prikazani su samo najvažniji i zanimljiviji isječci koda za ispravak perspektive.

```
1 override public ImageData CorrectPerspective(ImageData inputImage) {  
2     var inputMat = getMat(inputImage);  
3     Mat cannyEdges = DetectEdgesCanny(inputMat);  
4     Mat adaptiveEdges = DetectEdgesAdaptive(inputMat);  
5  
6     VectorOfPoint cannyRect = FindLargestRectangleContour(cannyEdges);  
7     VectorOfPoint adaptiveRect = FindLargestRectangleContour(adaptiveEdges)  
8         ;  
9  
9     DrawDebugContoursIfNeeded(inputMat, cannyRect, adaptiveRect, inputImage  
10        .Name);  
10    VectorOfPoint bestRect = ChooseBestRectangle(cannyRect, adaptiveRect);  
11  
12    if (bestRect == null)  
13        return EmguCvImage.FromMat(inputMat, inputImage.Name);  
14  
15    return EmguCvImage.FromMat(ApplyPerspectiveCorrection(inputMat,  
16        bestRect), inputImage.Name);  
16 }
```

Isječak koda 5: Metoda za ispravak perspektive slike

Iz priloženog koda vidljivo je da se pokušavaju detektirati rubovi svih struktura na slici koristeći dvije različite metode: **DetectEdgesCanny** i **DetectEdgesAdaptive**. Zatim se pokušavaju pronaći dvije najveće pravokutne konture koje odgovaraju veličini papira. Zatim se pomoću metode **ChooseBestRectangle** zaključuje koji je pravokutnik bolji odabir za ispravak perspektive, te se perspektiva ispravlja pomoću metode **ApplyPerspectiveCorrection**.

Zanimljivost ove metode je u tome što zapravo koristi dva različita pristupa za detekciju rubova. Analiza sljedećih isječaka prikazuje primijenjene metode i objašnjava prednosti i mane oba pristupa.

```

1 private Mat DetectEdgesCanny(Mat image) {
2     Mat edges = new Mat();
3     CvInvoke.Canny(image, edges, 50, 150);
4
5     Mat dilatedEdges = new Mat();
6     Mat structuringElement = CvInvoke.GetStructuringElement(ElementShape.
7         Rectangle, new Size(3, 3), new Point(1, 1));
8     CvInvoke.Dilate(edges, dilatedEdges, structuringElement, new Point(-1,
9         -1), 1, BorderType.Reflect, new MCvScalar(1));
10
11    return dilatedEdges;
12}
13
14 private Mat DetectEdgesAdaptive(Mat image) {
15     Mat thresh = new Mat();
16     CvInvoke.AdaptiveThreshold(image, thresh, 255, AdaptiveThresholdType.
17         GaussianC, ThresholdType.BinaryInv, 11, 2);
18
19     Mat morph = new Mat();
20     Mat kernel = CvInvoke.GetStructuringElement(ElementShape.Rectangle, new
21         Size(3, 3), new Point(-1, -1));
22     CvInvoke.MorphologyEx(thresh, morph, MorphOp.Close, kernel, new Point
23         (-1, -1), 2, BorderType.Default, new MCvScalar());
24
25    return morph;
26}

```

Isječak koda 6: Metoda za detekciju rubova tijekom ispravka perspektive

Glavna razlika između priloženih metoda je odabrani pristup za detektiranje rubova.

Metoda **DetectEdgesCanny** naglašava sve rubove na slici koristeći **CvInvoke.Canny** algoritam uz pomoć morfološke operacije dilatacije, koja omogućuje spajanje prekinutih rubova, što povećava preciznost sustava u ekstremnim uvjetima.

Dok metoda **DetectEdgesAdaptive** ne koristi standardni pristup detektiranju rubova, već koristi **CvInvoke.AdaptiveThreshold** algoritam koji pretvara ulaznu sivu sliku u binarnu sliku. Ova implementacija namijenjena je specifično kreiranju binarne slike u varijabilnim uvjetima osvjetljenja. Nakon binarizacije, detektiraju se strukturalni elementi te se nad njima izvršava morfološka operacija zatvaranja kako bi se povezale i očistile strukturne komponente slike.

Nakon što su rubovi detektirani, započinje proces analize rubova i pronađaska pravokutnika koji najbolje opisuje rub papira na slici. Za to služi metoda **FindLargestRectangleContour**:

```

1 private VectorOfPoint FindLargestRectangleContour(Mat edges) {
2     using (VectorOfVectorOfPoint contours = new VectorOfVectorOfPoint()) {
3         CvInvoke.FindContours(edges, contours, null, RetrType.List,
4             ChainApproxMethod.ChainApproxSimple);
5         double maxArea = 0;
6         VectorOfPoint largestRectangle = null;
7         for (int i = 0; i < contours.Size; i++) {
8             using (VectorOfPoint contour = contours[i])
9             {
10                 double area = CvInvoke.ContourArea(contour);
11                 if (area < MinContourArea) continue;
12                 using (VectorOfPoint approx = new VectorOfPoint()) {
13                     CvInvoke.ApproxPolyDP(contour, approx, 0.02 * CvInvoke.
14                         ArcLength(contour, true), true);
15                     if (approx.Size == 4 && area > maxArea) {
16                         maxArea = area;
17                         largestRectangle = new VectorOfPoint(approx.ToArray
18                             ());
19                     }
20                 }
21             }
22         }
23     }
24 }
```

Isječak koda 7: Metoda za pronađak najvećeg pravokutnika koji predstavlja papir

Ova metoda funkcioniра тако да помоћу методе **CvInvoke.FindContours** проналази све контуре на слици. Затим се израчунава површина контуре помоћу **CvInvoke.ContourArea**. Ако је површина мања од унапријед дефинирани minimalne vrijednosti **MinContourArea**, контура се прескаче. У случају да је површина довољно велика, контура се апроксимира у полигон помоћу методе **CvInvoke.ApproxPolyDP**. Тада апроксимирани полигон мора имати точно четири врха, тј. мора бити правокутник. Ако је такав правокутник већи од претходно пронађеног највећег, тада се поставља као нови највећи правокутник.

Nакон што су израчуната два највећа правокутника према подацима из метода **DetectEdgesCanny** и **DetectEdgesAdaptive**, потребно је одлуčити који је правокутник заправо највише сличан обрису папира. За то се користи метода **ChooseBestRectangle**:

```

1 private VectorOfPoint ChooseBestRectangle(VectorOfPoint rect1,
2     VectorOfPoint rect2) {
3     if (rect1 == null) return rect2;
4     if (rect2 == null) return rect1;
5     var areal = CvInvoke.ContourArea(rect1);
6     var area2 = CvInvoke.ContourArea(rect2);
7     var aspect1 = GetAspectRatio(rect1);
8     var aspect2 = GetAspectRatio(rect2);
9     var isValid1 = aspect1 is > 0.5 and < 2.0;
10    var isValid2 = aspect2 is > 0.5 and < 2.0;
11
12    if (isValid1 && isValid2){
13        var uniformity1 = GetUniformity(rect1);
14        var uniformity2 = GetUniformity(rect2);
15        return uniformity1 < uniformity2 ? rect1 : rect2;
16    }
17    if (isValid1) return rect1;
18    if (isValid2) return rect2;
19    return areal > area2 ? rect1 : rect2;
}

```

Isječak koda 8: Metoda za odabir najboljeg pravokutnika

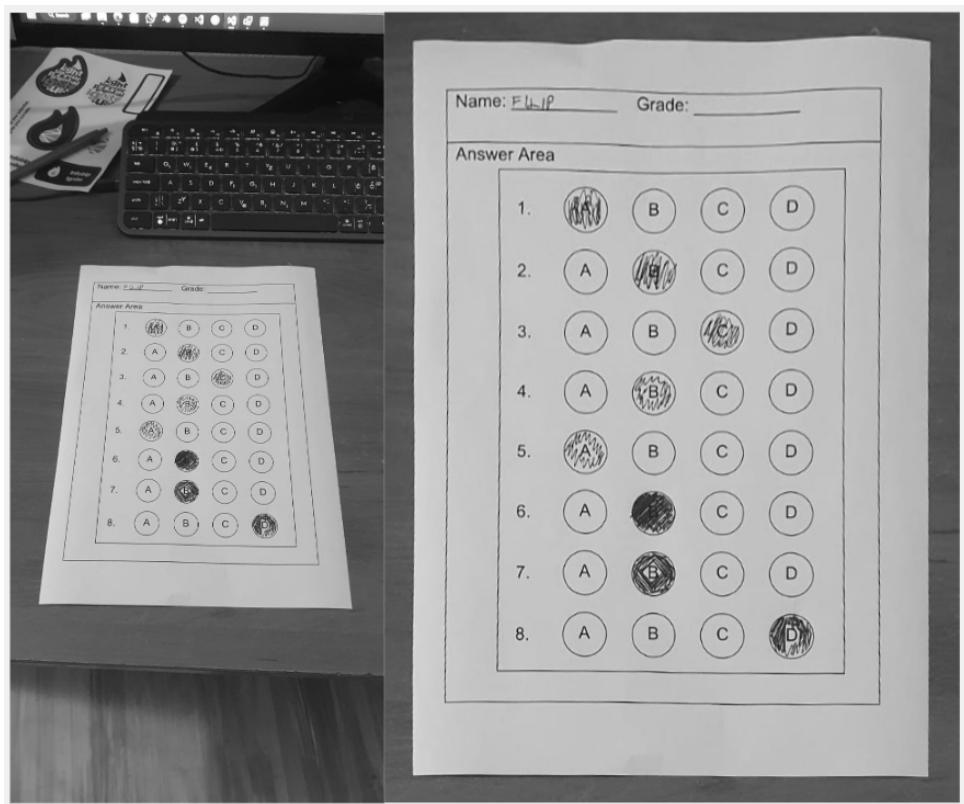
Radi se o metodi koja u slučaju da je detektiran samo jedan pravokutnik vraća taj pravokutnik, dok u slučaju da su pronađena dva pravokutnika analizira koji je bolji prema određenim parametrima. Parametri za provjeru su omjeri stranica pravokutnika i jednakost paralelnih stranica pravokutnika. Za te provjere su zadužene pomoćne metode **GetAspectRatio** i **GetUniformity** koji nisu prikazane kroz ovaj rad. Na kraju se vraća pravokutnik koji najbolje zadovoljava sve spomenute parametre.

Pomoću tog pravokutnika zatim se ispravlja perspektiva slike koristeći metodu:

```
1 private Mat ApplyPerspectiveCorrection(Mat image, VectorOfPoint
2     largestRectangle){
3
4     PointF[] srcPoints = OrderCorners(largestRectangle.ToArray());
5
6
7     float detectedWidth = (float)CalculateDistance(srcPoints[0], srcPoints
8         [1]);
9     float detectedHeight = (float)CalculateDistance(srcPoints[1], srcPoints
10        [2]);
11
12    const float A4_WIDTH = 2480f;
13    const float A4_HEIGHT = 3508f;
14    float scaleFactor = Math.Min(detectedWidth / A4_WIDTH, detectedHeight /
15        A4_HEIGHT);
16    float maxWidth = A4_WIDTH * scaleFactor;
17    float maxHeight = A4_HEIGHT * scaleFactor;
18    const float padding = 25f;
19    maxWidth += padding * 2;
20    maxHeight += padding * 2;
21
22
23    PointF[] dstPoints = GetDestinationPointsWithPadding(maxWidth,
24        maxHeight, padding);
25    Mat transformMatrix = CvInvoke.GetPerspectiveTransform(srcPoints,
26        dstPoints);
27
28
29    Mat output = new Mat();
30    CvInvoke.WarpPerspective(image, output, transformMatrix, new Size((int)
31        maxWidth, (int)maxHeight));
32
33    return output;
34 }
```

Isječak koda 9: Metoda za odabir najboljeg pravokutnika

ApplyPerspectiveCorrection metoda koristi razne pomoćne metode, ali glavna logika odnosi se na izračun faktora skaliranja i izračun matrice transformacije te njezinu primjenu na originalnoj slici. Za izračun faktora skaliranja pronalaze se trenutna širina i visina slike pomoću metode **CalculateDistance**, a zatim se dijele s unaprijed definiranim vrijednostima širine i visine koje predstavljaju papir u A4 formatu. Nakon što je skaliranje gotovo, izračunavaju se destinacijske točke pomoću metode **GetDestinationPointsWithPadding**. Nakon što su točke izračunate, kreira se matrica transformacije koristeći metodu **CvInvoke.GetPerspectiveTransform**, te se zatim primjenjuje koristeći metodu **CvInvoke.WarpPerspective**. Na priloženoj fotografiji vidljiv je rezultat metoda za ispravak perspektive.



Slika 25: Prikaz ulazne i izlazne slike CorrectPerspective metode (vlastita izrada)

Jedna od zanimljivosti ovog pristupa je to što se jako jednostavno može podržati ispravak perspektive slike na kojoj se ne nalazi cijeli papir. U tom slučaju pokušat će se i dalje pronaći najveći pravokutnik željenih proporcija, što u praksi znači da će se jedan od unutarnjih okvira sa slike uzeti u obzir. Time samo rješenje postaje još fleksibilnije.

Ispravak perspektive daje dobre rezultate, kao što je vidljivo na slici. Na slikama koje su također rotirane, rezultati su izrazito dobri jer ispravak perspektive ujedno ispravlja i rotaciju. No, u određenim slučajevima događa se da ispravak perspektive ne okreće papir pravilno, već je papir krivo orijentiran. Za takve situacije implementirana je sljedeća faza pretprocesiranja slike pomoću metode **CorrectRotation**:

```

1 override public ImageData CorrectRotation(ImageData inputImage) {
2     var inputMat = getMat(inputImage);
3     var thresholded = ApplyThresholding(inputImage);
4     RotatedRect nameRect = DetectNameRectangle(thresholded, inputMat);
5
6     bool isUpsideDown = nameRect.Center.Y > inputMat.Height / 2;
7
8     if (isUpsideDown) { inputMat = RotateImage(inputMat, 180); }
9
10    return EmguCvImage.FromMat(inputMat, inputImage.Name);
11 }
```

Isječak koda 10: Metoda za provjeru i ispravak orijentacije slike

```

1 private Mat RotateImage(Mat image, double angle){
2     PointF center = new PointF(image.Width / 2, image.Height / 2);
3     Mat rotationMatrix = new Mat();
4     CvInvoke.GetRotationMatrix2D(center, angle, 1.0, rotationMatrix);
5
6     Mat rotatedImage = new Mat();
7     CvInvoke.WarpAffine(image, rotatedImage, rotationMatrix, image.Size,
8         Inter.Linear, Warp.Default, BorderType.Constant, new MCvScalar(255,
9         255, 255));
10
return rotatedImage;
}

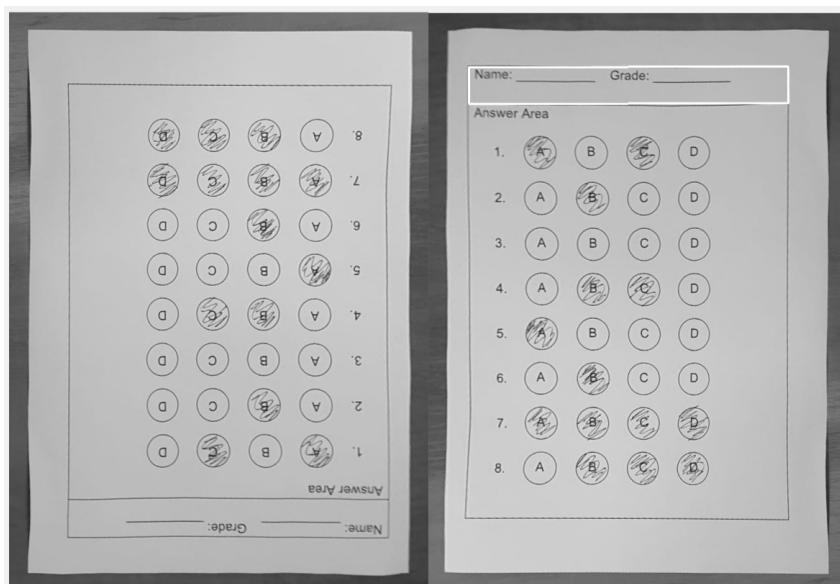
```

Isječak koda 11: Metoda za rotaciju slike

Ova metoda bila je jedna od prvih razvijenih metoda. Prva iteracija obuhvaćala je izračun kuta papira i ispravak tog kuta. Međutim s vremenom je metoda za ispravak perspektive preuzeila dio tih odgovornosti, tako da je ova metoda sada isključivo odgovorna za detekciju orijentacije papira i rotaciju za 180 stupnjeva u slučaju da je papir u krivoj orijentaciji.

Kao što je već spomenuto, predložak matrice odgovora ne sadrži posebne oznake za kutove i orijentaciju papira. Zbog toga je bilo potrebno pronaći druge referentne strukture na predlošku. Odlučeno je koristiti okvir u kojem se nalaze polja za ime i ocjenu polaznika. Taj okvir nalazi se pri vrhu papira, stoga u slučaju da ga se detektira na dnu, znamo da je slika naopako okrenuta te ju se rotira za 180 stupnjeva pomoću metode **RotateImage**.

Ta je metoda bazirana na izračunu matrice rotacije koja se zatim primjenjuje na originalnu sliku. Matrica se izračunava pomoću metode **CvInvoke.GetRotationMatrix2D** i primjenjuje pomoću metode **CvInvoke.WarpAffine**.



Slika 26: Prikaz ulazne i izlazne slike **CorrectRotation** metode (vlastita izrada)

Sa priložene slike vidljiv je rad **CorrectRotation** metode. S lijeve strane je ulazna slika s ispravljenom perspektivom, ali s krivom orijentacijom. S desne strane je rezultat metode koji prikazuje detektirani okvir za ime i ocjene te sliku nakon ispravka orijentacije.

Nakon provođenja svih dosad spomenutih operacija, rezultat je siva slika ispravne perspektive i orijentacije, sa smanjenom razinom buke. Prije nego što je moguće krenuti u analizu struktura radi pronalaska krugova, potrebno je ukloniti ostatak nepotrebnih informacija, poput nijansi sive boje. Upravo zbog toga proces izrade binarne slike provodi se pomoću metode **ApplyThresholding**:

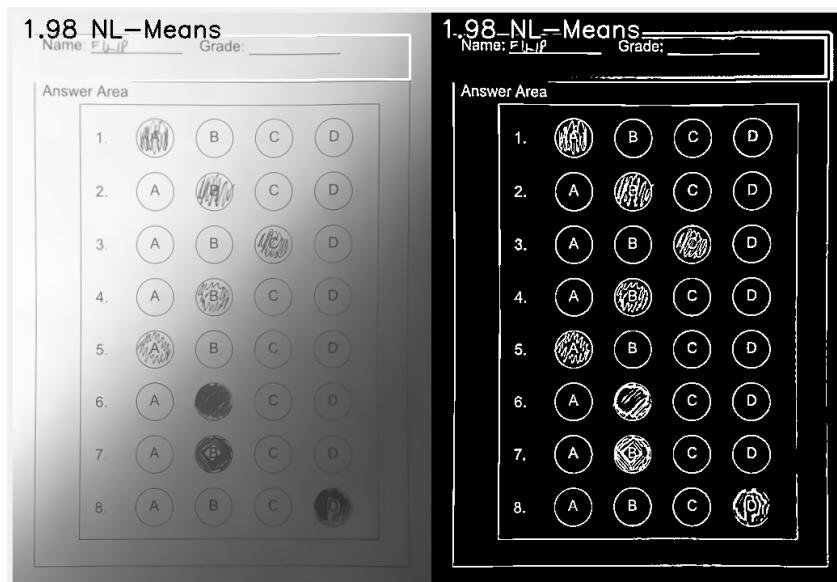
```

1 override public ImageData ApplyThresholding(ImageData inputImage) {
2     var inputMat = getMat(inputImage);
3     Mat threshMat = new Mat();
4     CvInvoke.AdaptiveThreshold(inputMat, threshMat, 255,
5         AdaptiveThresholdType.GaussianC, ThresholdType.BinaryInv, 11, 2);
6     return EmguCvImage.FromMat(threshMat, inputImage.Name);
}

```

Isječak koda 12: Metoda za pretvorbu sive slike u binarnu sliku

Priložena metoda poprilično je jednostavna i bazirana na metodi **CvInvoke.AdaptiveThreshold**, koja omogućuje bolje rezultate u varirajućim uvjetima osvjetljenja u usporedbi s klasičnom metodom **CvInvoke.Threshold**. Ovaj dio rada konstantno se mijenja i kalibrira tijekom razvoja. Na početku se koristila metoda **CvInvoke.Threshold**, što se pokazalo nedovoljnim kada je testni skup podataka proširen slikama koje sadrže sjene i slično. U tom trenutku počela se koristiti adaptivna verzija te metode. Osim toga, testirani su različiti algoritmi te metode, a na kraju je odabran GaussianC algoritam zbog manje količine buke u usporedbi s ostalim ponuđenim algoritmima.



Slika 27: Prikaz ulazne i izlazne slike ApplyThresholding metode (vlastita izrada)

Na lijevoj slici vidljivo je da je gornji dio slike jače osvijetljen naspram donjeg dijela slike, no na desnoj slici vidljivo je da je metoda uspjela izraditi ujednačenu binarnu sliku unatoč lošim uvjetima.

Time završava faza pretprecesiranja slike, što znači da je slika spremna za detektiranje strukturnih elemenata i njihovu analizu. Za taj dio odgovorna je metoda **CircleDetection**. Radi se o metodi koja zajedno s metodom za ispravak perspektive čini najkompleksniji dio sustava. Iz tog razloga primjeri prikazuju samo najznačajnije dijelove koda.

```

1  override public (ImageData, Dictionary<int, List<DetectedCircleBase>>)
2      CircleDetection(ImageData input){
3          var inputMat = getMat(input);
4          var outputMat = new EmguCvImage().ToMat();
5          //for debug
6          CvInvoke.CvtColor(inputMat, outputMat, ColorConversion.Gray2Bgr);
7          var allCircles = DetectAllCircles(inputMat, outputMat);
8          var sortedCircleGroups = GroupAndSortCirclesByYPosition(allCircles);
9          var random = new Random();
10         DrawGroupedCircles(sortedCircleGroups, outputMat, random);
11         var filteredGroups = FilterInvalidGroups(sortedCircleGroups, outputMat)
12             ;
13         var fillPercentages = filteredGroups.SelectMany(group => group.Value)
14             .Select(c => GetFillPercentage(
15                 inputMat, (EmguCVCircle)c))
16             .ToList();
17         var threshold = HistogramGenerator.CalculateFillPercentageThreshold(
18             fillPercentages);
19         GenerateAndSaveFillPercentageHistogramIfNeeded(input, fillPercentages,
20             threshold);
21         DrawFilteredAndMarkGroups(filteredGroups, random, inputMat, threshold,
22             outputMat);
23     return (EmguCvImage.FromMat(outputMat, input.Name), filteredGroups);
24 }
```

Isječak koda 13: Metoda za detektiranje odgovora na slici

Kroz kod može se vidjeti da je metoda **CircleDetection** odgovorna za:

1. Detekciju svih krugova pomoću metode **DetectAllCircles**
2. Grupiranje i sortiranje krugova po pitanjima pomoću metode **GroupAndSortCirclesByYPosition**
3. Uklanjanje neispravnih krugova i grupa krugova pomoću metode **FilterInvalidGroups**
4. Izračun praga za označenost pitanja pomoću klase **HistogramGenerator** i metode **CalculateFillPercentageThreshold**

Osim navedenih odgovornosti, ova metoda odgovorna je i za vizualizaciju svih koraka koje obavlja, no taj dio koda nema prevelik značaj.

Prva odgovornost ove metode je detekcija svih krugova pomoću metode:

```
1 private List<DetectedCircleBase> DetectAllCircles(Mat grayMat, Mat
2     outputImage) {
3     VectorOfVectorOfPoint contours = new VectorOfVectorOfPoint();
4     CvInvoke.FindContours(grayMat, contours, null, RetrType.List,
5         ChainApproxMethod.ChainApproxSimple);
6     var rawCircles = new List<DetectedCircleBase>();
7     foreach (var contour in contours.ToArrayOfArray()) {
8         using (VectorOfPoint contourPoints = new VectorOfPoint(contour))
9         {
10             if (contourPoints.Size >= 20) {
11                 RotatedRect ellipse = CvInvoke.FitEllipse(contourPoints);
12                 var circle = new CircleF(ellipse.Center, (float) (ellipse.
13                     Size.Width / 2));
14                 if (circle.Radius > MIN_CIRCLE_RADIUS && circle.Radius <
15                     MAX_CIRCLE_RADIUS) {
16                     rawCircles.Add(EmguCVCircle.FromCircleF(circle));
17                 }
18             }
19         }
20     }
21     var nonDuplicateCircles = FilterDuplicateCircles(rawCircles);
22     return GetOnlyNonNestedCircles(nonDuplicateCircles, outputImage);
23 }
```

Isječak koda 14: Metoda za detekciju svih krugova na slici

Detekcija krugova vrši se pronalaskom kontura pomoću metode **CvInvoke.FindContours**, a zatim pronalaskom kontura koje odgovaraju krugovima pomoću metode **CvInvoke.FitEllipse**. Osim same detekcije krugova, ova metoda obavlja i validaciju krugova te naknadno filtriranje. Validacije se odnose na provjeru broja točaka od kojih se kontura sastoji. Što više točaka kontura ima, to je vjerojatnije da je ta kontura relevantna. Ako je kontura relevantan krug, provjerava se je li taj krug unutar očekivanog raspona što se tiče radijusa. Ako jest, onda se dodaje u listu koja se zatim filtrira tako da se uklanjaju duplikati, to jest slični krugovi koji se preklapaju. Nakon toga lista krugova još se filtrira tako da se iz nje uklone svi krugovi koji se nalaze unutar drugih krugova.

Nakon prve faze filtriranja i validacije krugova kreće grupiranje krugova po y koordinati, što zapravo znači da krugovi pripadaju istom pitanju. Zatim slijedi druga faza filtriranja, kojoj je cilj uklanjanje svih pitanja i krugova koji nisu valjani. Sljedeći kod prikazuje tu metodu:

```

1 private Dictionary<int, List<DetectedCircleBase>> FilterInvalidGroups(
2     Dictionary<int, List<DetectedCircleBase>> sortedGroups, Mat outputImage)
3 {
4     var validGroups = new Dictionary<int, List<DetectedCircleBase>>();
5     foreach (var group in sortedGroups) {
6         var circles = group.Value;
7         var sortedCircles = SortCirclesByXPosition(circles);
8         var nonNestedCircles = GetOnlyNonNestedCircles(sortedCircles,
9             outputImage, sortedCircles.Average(it => it.Y));
10        var uniformCircles = GetCirclesWithUniformRadius(nonNestedCircles);
11        if (isCircleGroupValid(uniformCircles, outputImage))
12            validGroups.Add(group.Key, uniformCircles);
13    }
14    return validGroups;
15 }
```

Isječak koda 15: Metoda za filtriranje neispravnih krugova i pitanja

Prije same validacije, krugovi se za svako pitanje sortiraju po x koordinati, što osigurava ispravan redoslijed odgovora. Zatim se dohvaćaju samo krugovi koji se ne nalaze unutar drugih krugova. Tim krugovima dodatno se validira jednakost radiusa i validnost grupe, to jest validnost razmaka između odgovora. Ovo je jedna od najvažnijih metoda, budući da uklanja nerelevantne i neispravno detektirane krugove. Rezultat ove metode je lista ispravnih krugova grupiranih po pitanjima. Zatim slijedi izračun praga ispunjenosti kruga pomoću metode :

```

1 private double GetFillPercentage(Mat thresholdedImage, EmguCVCircle circle)
2 {
3     using (Mat mask = new Mat(thresholdedImage.Size, DepthType.Cv8U, 1))
4     {
5         mask.setTo(new MCvScalar(0));
6         DrawCircle(mask, circle, new MCvScalar(255), -1);
7         MCvScalar mean = CvInvoke.Mean(thresholdedImage, mask);
8         return (mean.v0 / 255.0) * 100;
9     }
10 }
```

Isječak koda 16: Metoda za izračun postotka ispunjenosti kruga

Ova metoda izračunava postotak ispunjenosti tako da uspoređuje prosječnu vrijednost piksela unutar originalnog kruga s vrijednostima unutar binariziranog (crnog) kruga. Rezultat se vraća kao postotak ispunjenosti. No, da bi se moglo zaključiti je li krug ispunjen ili ne,

potrebno je dobivenu vrijednost usporediti s pragom ispunjenosti koji je izračunat pomoću klase **HistogramGenerator** i metode **CalculateFillPercentageThreshold**:

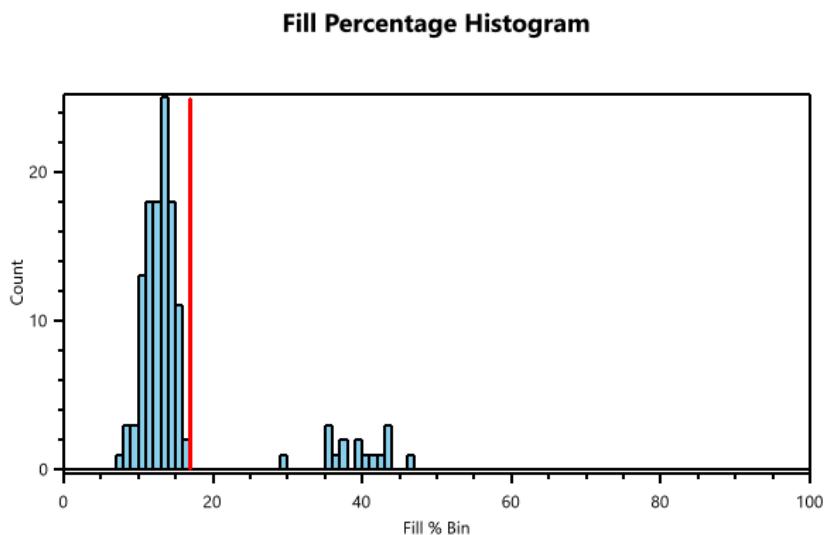
```

1 public static double CalculateFillPercentageThreshold(List<double>
2     fillPercentages) {
3     var histogram = new List<int>(new int[101]);
4     fillPercentages.ForEach(fill => histogram[(int)Math.Floor(fill)]++);
5     var startOfFirstPeak = histogram.FindIndex(x => x > 0);
6     var endOfFirstPeak = histogram.Skip(startOfFirstPeak + 1).ToList() .
7         FindIndex(x => x == 0) + startOfFirstPeak + 1;
8     while (endOfFirstPeak + 2 < histogram.Count &&
9            (histogram[endOfFirstPeak + 1] > 0 || histogram[endOfFirstPeak
10           + 2] > 0)) {
11         endOfFirstPeak++;
12     }
13     return endOfFirstPeak;
14 }
```

Isječak koda 17: Metoda za filtriranje neispravnih krugova i pitanja

Priložena metoda računa prag ispunjenosti kruga. Na početku razvoja definirana je konstanta koja je predstavljala taj prag, no taj pristup se kroz razvoj pokazao nedovoljnim. Problem je u tome što matrice odgovora mogu imati različit broj pitanja i odgovora, što znači da postotak ispunjenosti kruga značajno varira o veličini kruga na predlošku. Osim toga, postotak ispunjenosti također ovisi o načinu na koji se matrica ispunjava.

Zbog toga definiranje praga pomoću konstante više nije bilo adekvatno rješenje. U tom trenutku bilo je jasno da je potrebno izračunati prag ispunjenosti, no rješenje nije bilo jasno. Zbog toga je generirana sljedeća slika koja je pružila uvid u podatke o ispunjenosti svih krugova na slici.

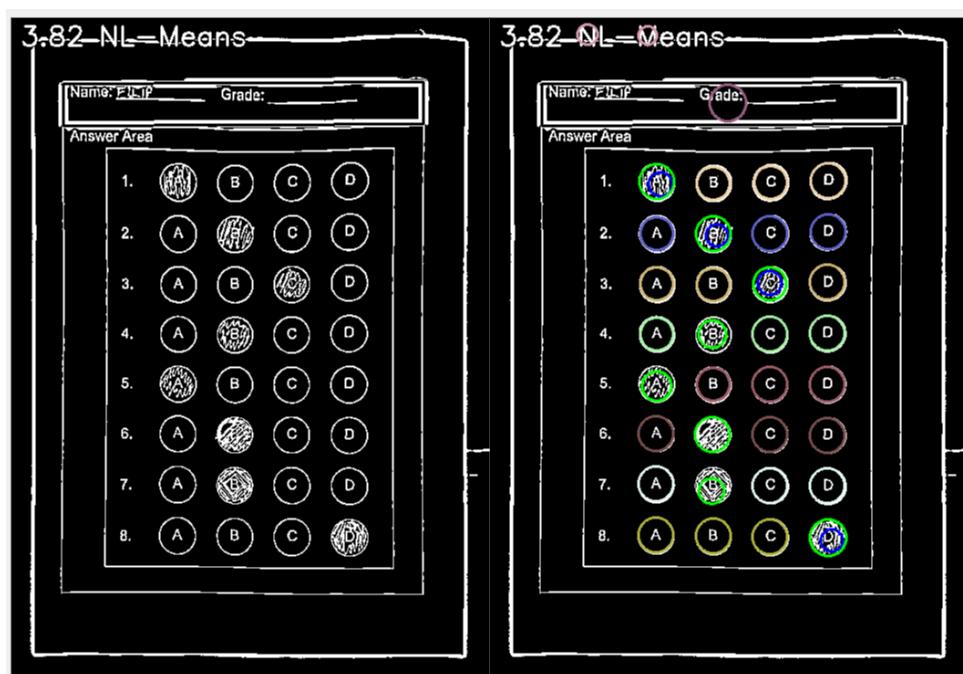


Slika 28: Prikaz histograma postataka ispunjenosti krugova (vlastita izrada)

Sa priložene slike bilo je jasno da postoje dva jasno definirana i odvojena dijela grafa. Prvi dio podataka prikazuje postotak ispunjenosti za prazne krugove, dok drugi dio prikazuje postotak ispunjenosti za ispunjene krugove. Važno je napomenuti i da prazni krugovi imaju određeni postotak ispunjenosti zbog oznaka odgovora koje mogu biti od slova A do H.

Nakon analize histograma bilo je jasno da je prag ispunjenosti kraj prvog seta podataka na grafu. Točno to se vidi u metodi **CalculateFillPercentageThreshold**. Pronalazi se početak prvog seta podataka, a zatim prvo točka koja nakon sebe ima barem dva prazna postotna boda, što znači da je zapravo to ispravna granica. Ovo rješenje automatski rješava jedan od tradicionalnih problema OMR sustava, gdje korisnici ne prate upute za ispunjavanje odgovora.

Prikazane metode zajedno omogućuju detekciju odgovora i pitanja prikazanu na priloženoj slici.



Slika 29: Prikaz ulazne i izlazne slike CircleDetection metode (vlastita izrada)

Lijeva slika prikazuje ulazne podatke metode **CircleDetection**, dok desna slika prikazuje dio izlaznih podataka te metode. Na desnoj slici vidljivi su krugovi u raznim bojama, gdje svaka boja označava grupu pitanja. Važno je napomenuti da ta slika sadrži i nevažeće krugove koji su bili uklonjeni. Ta slika sadrži sve te podatke radi lakšeg pronalaska grešaka. Do sada su svim metodama za obradu slike glavni rezultati također bile slike, no ovdje je glavni rezultat lista validnih odgovora grupiranih i sortiranih po pitanjima.

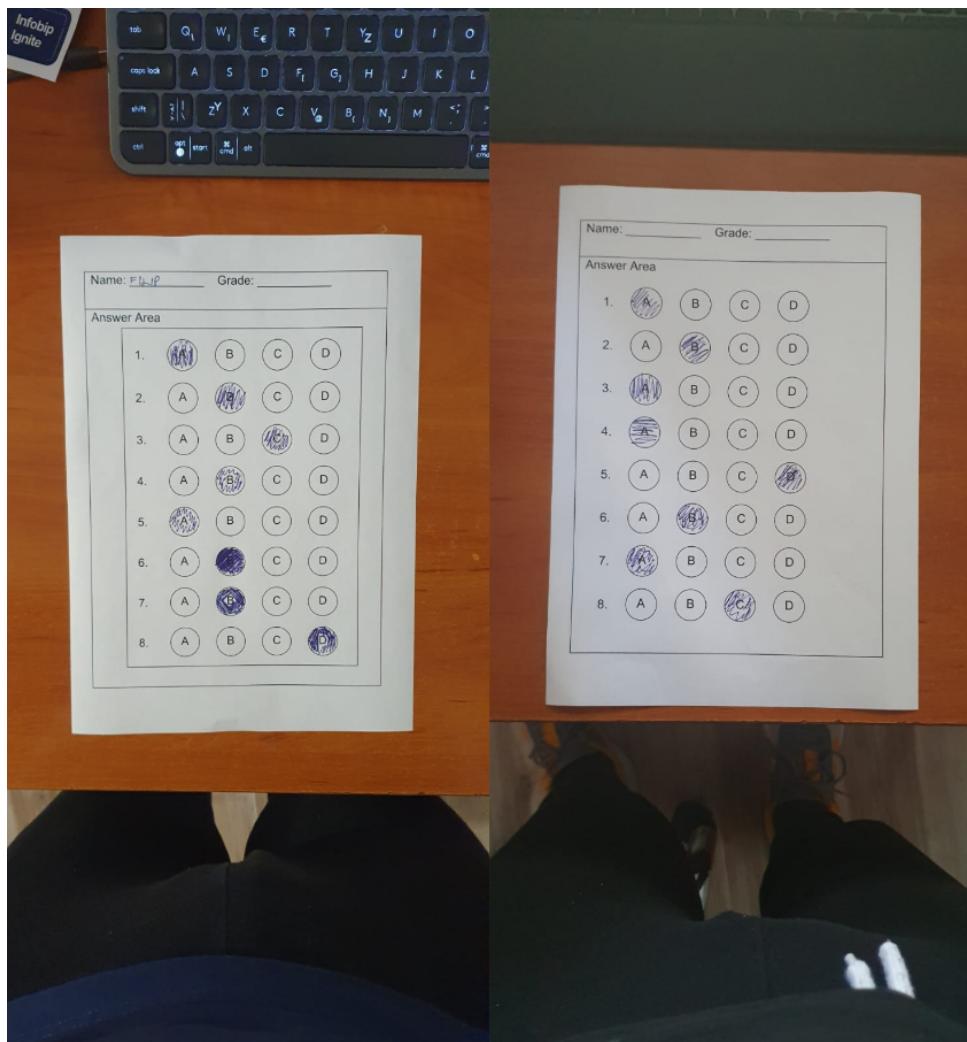
Ostale metode obrade slike nisu prikazane kroz kod jer ne sadrže zanimljivu ni značajnu logiku. Većinom se radi o metodama za vizualizaciju rezultata ocjenjivanja i klasama za ocjenjivanje koje su bazirane na usporedbi lista odgovora.

6. Evaluacija

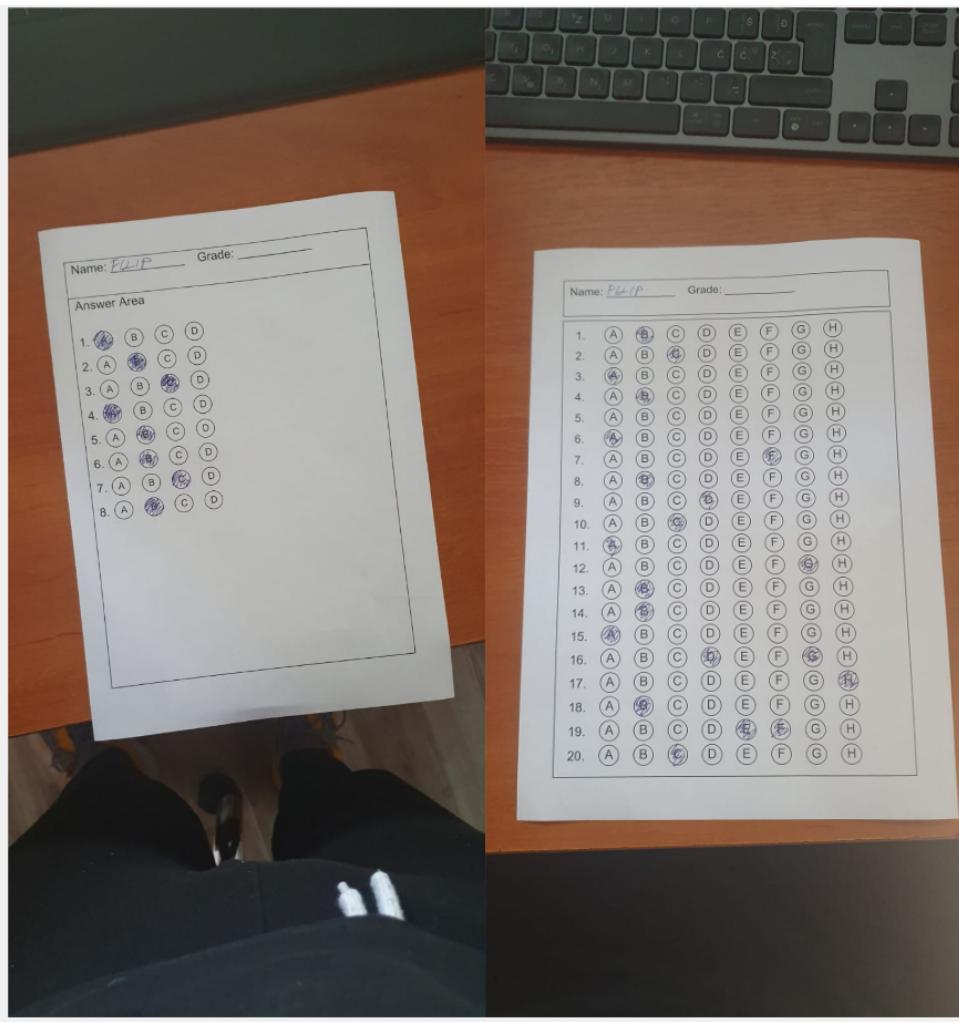
Kroz ovo poglavlje fokus će biti na prikazu načina evaluacije razvijenih artefakata. Pod to spada prikaz različitih tipova testnih podataka, koraka obrade i načina manualnog testiranja artefakata. Također će se objasniti utjecaj testiranja i testnih podataka na razvoj artefakata.

6.1. Skup testnih podataka

Testni podaci uključuju razne tipove matrica odgovora. Matrice sadrže različit broj pitanja i odgovora što omogućuje verifikaciju funkcionalnosti detektiranja odgovora na različitim konfiguracijama. Osim različitih konfiguracija, testni podaci također sadrže slike s različitim pozadinama iza papira, udaljenostima kamere od papira, uvjetima osvjetljenja i slično. Na priloženoj slici vidljivi su različiti tipovi matrica odgovora korištenih za testiranje.



Slika 30: Prikaz različitih tipova matrica odgovora - primjer 1 (vlastita izrada)



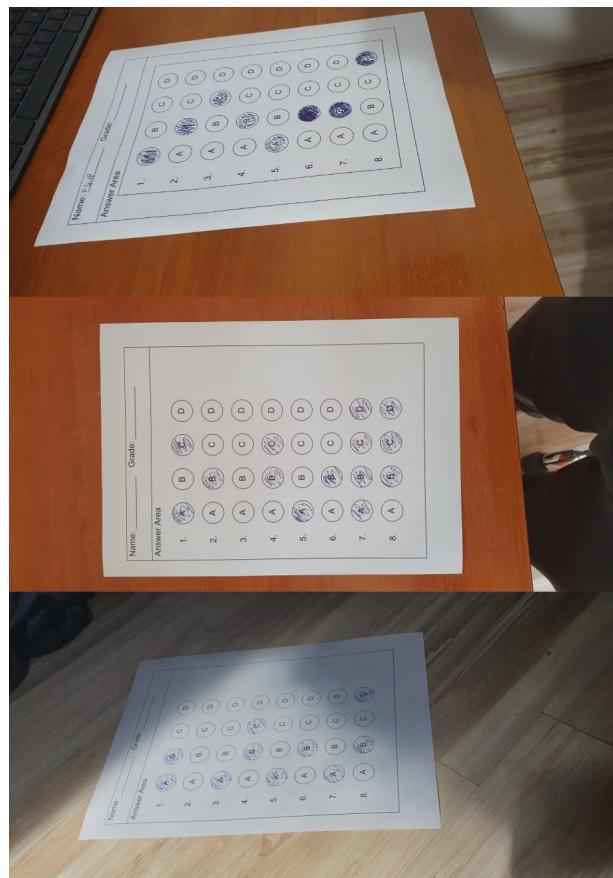
Slika 31: Prikaz različitih tipova matrica odgovora - primjer 2 (vlastita izrada)

Sa priloženih slika vidljivo je da postoji razlika u broju pitanja i odgovora po pitanju, veličini krugova za odgovore te u samoj strukturi matrice odgovora. Lijeva slika na slici 30 prikazuje jedan od prvih izrađenih predložaka. Sastojao se od okvira za ime i ocjenu polaznika, okvira za područje odgovora te još jednog dodatnog okvira unutar tog okvira. Ti su okviri na početku testiranja služili da sustavu daju priliku za detekciju okvira u slučaju da rub papira nije uspješno detektiran. Tijekom razvoja, ti su okviri postali sve manje važni za funkcioniranje sustava, pa je unutarnji okvir uklonjen. Ostali okviri su ostali jer služe kao pomoć sustavu kada slika ne sadrži sva tri kuta papira, tada se koristi okvir kao alternativa.

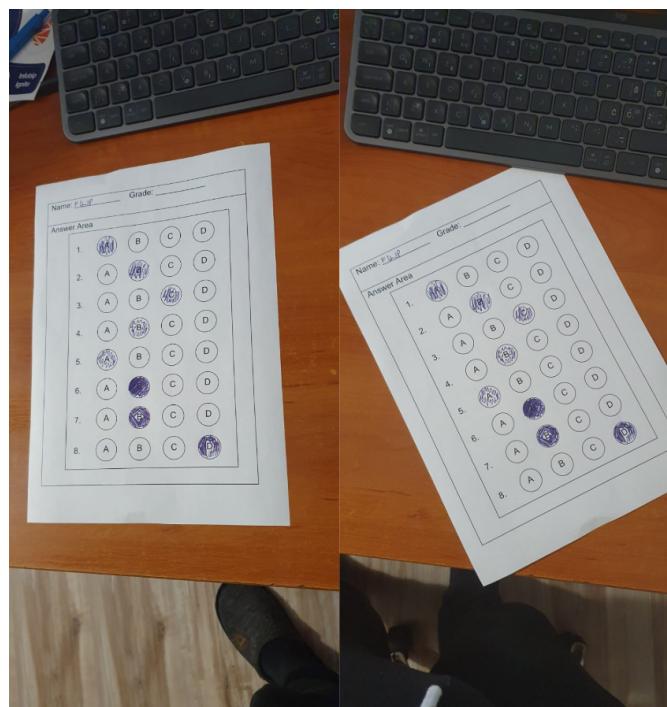
Osim toga, moguće je primijetiti da je okvir za ime na desnoj slici (slika 31) odvojen od glavnog okvira za pitanja. To je jedna od zadnjih promjena na predlošku. Cilj te promjene bio je provjeriti hoće li se preciznost detekcije okvira za ime poboljšati ako su okviri odvojeni. Kroz testiranje je zaključeno da jest, te da je preciznost porasla.

Osim struktturnih elemenata, na slikama se mogu vidjeti različiti kutovi i nagibi kamere u odnosu na papir, kao i pozadinski elementi poput tipkovnice. Slike su snimljene na takav način da se provjere mogućnosti sustava. Ovi primjeri prikazuju uvjete korištenja koje sustav može u većini slučajeva bez problema podnijeti.

Na sljedećim primjerima prikazane su slike snimljene u zahtjevnijim uvjetima:



Slika 32: Prikaz matrica odgovora uslikanim u izazovnijim uvjetima - primjer 1 (vlastita izrada)

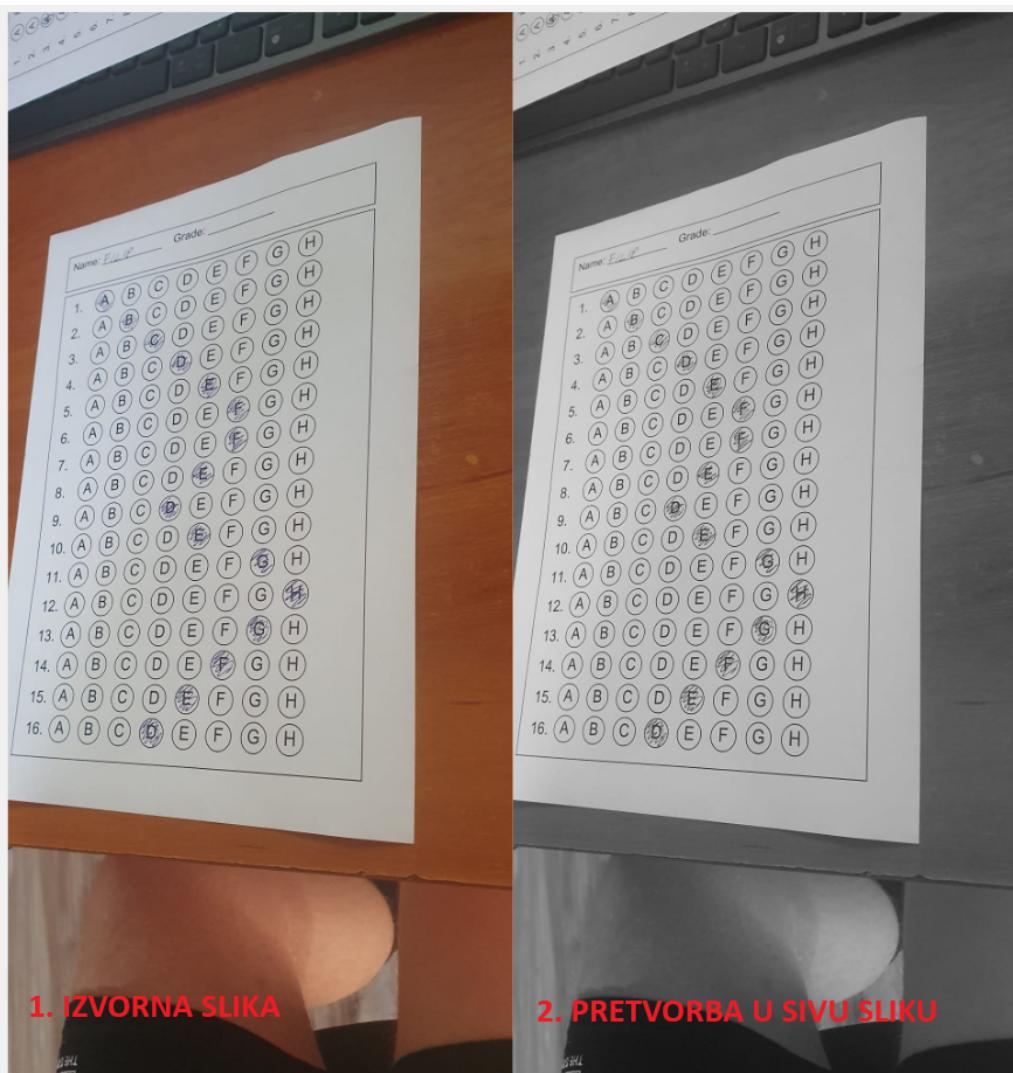


Slika 33: Prikaz matrica odgovora uslikanim u izazovnijim uvjetima - primjer 2 (vlastita izrada)

Radi se o slikama snimljenim s krivim orientacijama papira, ekstremnim perspektivama i nepovoljnim uvjetima osvjetljenja. Na nekim slikama također nedostaju kutovi papira. Takvi uvjeti nisu idealni za rad sustava, ali upravo zahvaljujući njima sustav je testiran i poboljšan kako bi mogao raditi preciznije čak i u ekstremnim situacijama. Sustav je dizajniran da vizualizira rezultate ocjenjivanja te da javi grešku ukoliko ne može ispravno obraditi sliku. Time se ocjenjivačima omogućuje da provjere rezultate ocjenjivanja, budući da su oni ipak odgovorne osobe u cijelom procesu.

6.1.1. Prikaz koraka obrada slike nad testnim podatcima

Kroz ovo poglavlje prikazat će se ukratko svi koraci kroz koje slika prolazi prije nego što se rezultat ocjenjivanja prikaže na ekranu ocjenjivača. Koraci su vrlo slični koracima prikazani u analizi koda no redoslijed operacija se malo promjenio kroz razvoj artefakta.



Slika 34: Prikaz izvorne slike i pretvorbe u sivu sliku na primjeru (vlastita izrada)

Name: Filip Grade: _____	
1.	A B C D E F G H
2.	A B C D E F G H
3.	A B C D E F G H
4.	A B C D E F G H
5.	A B C D E F G H
6.	A B C D E F G H
7.	A B C D E F G H
8.	A B C D E F G H
9.	A B C D E F G H
10.	A B C D E F G H
11.	A B C D E F G H
12.	A B C D E F G H
13.	A B C D E F G H
14.	A B C D E F G H
15.	A B C D E F G H
16.	A B C D E F G H

3.ISPRAVAK PERSPEKTIJE

Name: Filip Grade: _____	
1.	A B C D E F G H
2.	A B C D E F G H
3.	A B C D E F G H
4.	A B C D E F G H
5.	A B C D E F G H
6.	A B C D E F G H
7.	A B C D E F G H
8.	A B C D E F G H
9.	A B C D E F G H
10.	A B C D E F G H
11.	A B C D E F G H
12.	A B C D E F G H
13.	A B C D E F G H
14.	A B C D E F G H
15.	A B C D E F G H
16.	A B C D E F G H

4.ISPRAVAK ROTACIJE/ORIENTACIJE

Slika 35: Prikaz ispravka perspektive i rotacije na primjeru (vlastita izrada)

4.02-NL-Means	
Name: Filip Grade: _____	
1.	A B C D E F G H
2.	A B C D E F G H
3.	A B C D E F G H
4.	A B C D E F G H
5.	A B C D E F G H
6.	A B C D E F G H
7.	A B C D E F G H
8.	A B C D E F G H
9.	A B C D E F G H
10.	A B C D E F G H
11.	A B C D E F G H
12.	A B C D E F G H
13.	A B C D E F G H
14.	A B C D E F G H
15.	A B C D E F G H
16.	A B C D E F G H

5.SMANJIVANJE BUKE

4.02-NL-Means	
Name: Filip Grade: _____	
1.	A B C D E F G H
2.	A B C D E F G H
3.	A B C D E F G H
4.	A B C D E F G H
5.	A B C D E F G H
6.	A B C D E F G H
7.	A B C D E F G H
8.	A B C D E F G H
9.	A B C D E F G H
10.	A B C D E F G H
11.	A B C D E F G H
12.	A B C D E F G H
13.	A B C D E F G H
14.	A B C D E F G H
15.	A B C D E F G H
16.	A B C D E F G H

6.PRETVORBA U BINARNU SLIKU

Slika 36: Prikaz smanjivanja buke i pretvorbe u binarnu sliku na primjeru (vlastita izrada)

4.02-NL=Means	
Name: Filip	Grade: _____
1.	<input checked="" type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
2.	<input checked="" type="radio"/> A <input checked="" type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
3.	<input checked="" type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input checked="" type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
4.	<input checked="" type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input checked="" type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
5.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input checked="" type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
6.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input checked="" type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
7.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input checked="" type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
8.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input checked="" type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
9.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input checked="" type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
10.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input checked="" type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
11.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input checked="" type="radio"/> G <input type="radio"/> H
12.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input checked="" type="radio"/> G <input type="radio"/> H
13.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input checked="" type="radio"/> G <input type="radio"/> H
14.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input checked="" type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
15.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input checked="" type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
16.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input checked="" type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
7.DETEKCIJA KRUGOVA/ODGOVORA	
8.VIZUALIZACIJA OZNAČENIH ODGOVORA	

Slika 37: Prikaz detekcije odgovora i vizualizacije označenih odgovora na primjeru (vlastita izrada)

Name: Filip Grade: 5	
Score: 100.00	
1.	<input checked="" type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
2.	<input checked="" type="radio"/> A <input checked="" type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
3.	<input checked="" type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input checked="" type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
4.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input checked="" type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
5.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input checked="" type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
6.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input checked="" type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
7.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input checked="" type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
8.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input checked="" type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
9.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input checked="" type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
10.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input checked="" type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
11.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input checked="" type="radio"/> G <input type="radio"/> H
12.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input checked="" type="radio"/> H
13.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input checked="" type="radio"/> G <input type="radio"/> H
14.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input checked="" type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
15.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input checked="" type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
16.	<input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input checked="" type="radio"/> D <input type="radio"/> E <input type="radio"/> F <input type="radio"/> G <input type="radio"/> H
9.VIZUALIZACIJA OCJENE	

Slika 38: Prikaz vizualizacije ocjene na primjeru (vlastita izrada)

Sa priloženih slika vidljivi su koraci kroz koje je izvorna slika prošla da bi se mogla ocijeniti. Radi se o slici koja nije snimljena u idealnim uvjetima. Neki od problema vidljivih na slici su neispravna perspektiva, papir koji nije u potpunosti prikazan, blaga neujednačenost osvjetljenja, te prisutnost neželjenih elemenata poput tipkovnice u kadru. Unos slike u sustav predstavlja prvi korak obrade.

Od samog početka razvoja bilo je jasno da je drugi korak preprocesiranja pretvorba slike u sivu skalu, odnosno uklanjanje boja. Testni podaci nisu značajno utjecali na ovu odluku, no imali su važnu ulogu u određivanju redoslijeda ostalih operacija u fazi preprocesiranja.

Razvoj je započeo s uklanjanjem buke kao trećom operacijom, popraćenom ispravkom rotacije. Međutim, tijekom testiranja postalo je jasno da slike ne moraju imati samo krivu rotaciju papira, već i kut kamere u odnosu na papir, odnosno perspektivnu distorziju. Dosadašnji pristup u takvim slučajevima nije bio dovoljan, pa je razvijen korak za ispravak perspektive. Dalnjim testiranjem zaključeno je da je preciznost sustava veća ako se smanjivanje buke postavi nakon ispravka perspektive i rotacije. Tako je dobiven sljedeći redoslijed koraka:

1. Unos slike u sustav
2. Pretvorba u sivu sliku
3. Ispravak perspektive
4. Ispravak rotacije
5. Smanjivanje buke

Taj redoslijed opisuje gotovo cijelu fazu preprocesiranja slike, s tim da kao završni korak preprocesiranja nedostaje još samo pretvorba u binarnu sliku. Taj korak omogućuje uklanjanje nepotrebnih informacija i fokusiranje na ključne strukture prisutne na slici. U binarnoj slici pozadina je prikazana crnom bojom, dok su sve relevantne strukture označene bijelom bojom.

Nakon završetka preprocesiranja, slijedi faza procesiranja slike, gdje je prvi logičan korak detekcija krugova. Sama detekcija krugova relativno je jednostavna za implementirati, kao što je prikazano u kodu. Međutim, ključni dio ove faze je odvajanje relevantnih krugova od nerelevantnih te izračun praga ispunjenosti kruga. Upravo je ovaj segment sustava najviše unaprijeden zahvaljujući raznovrsnom skupu testnih podataka.

Na slici 37 prikazana je vizualizacija svih koraka rada ove faze. Nakon detekcije ispunjenih krugova, slijede još dva koraka fokusirana na vizualizaciju rezultata.

Važno je istaknuti da su priložene slike generirane u načinu rada za otklanjanje grešaka te se spremaju u mapu na radnoj površini. Ova funkcionalnost omogućila je dubinski uvid u rad sustava tijekom razvoja i znatno ubrzala pronađak i otklanjanje grešaka. Osim toga, može biti vrlo korisna i ocjenjivačima koji žele provjeriti gdje je ocjenjivanje određenog ispita eventualno pošlo po krivu. Ključna značajka ovog rješenja je da se svaka greška uvijek može reproducirati jer će isti ulazni podatak uvijek rezultirati istim izlazom.

6.2. Manualno testiranje rješenja

Identifikator	TS-01
Naziv scenarija	Detekcija odgovora na matrici
Cilj	Provjeriti ispravnost detekcije odgovora s učitane slike matrice odgovora.
Ulaz	Slika ispunjene matrice odgovora s različitim vrstama označenih odgovora (označeni, prazni, djelomično označeni).
Očekivani ishod	<ul style="list-style-type: none"> • Sustav točno identificira pozicije svih odgovora. • Klasificira ih kao označene ili prazne. • Pridružuje ih ispravnom pitanju.
Identifikator	TS-02
Naziv scenarija	Usporedba odgovora i dodjela ocjene
Cilj	Testirati ispravnost usporedbe odgovora i dodjele ocjene prema definiranoj skali.
Ulaz	Lista detektiranih odgovora na ispitu za ocjenjivanje, lista kontrolnih odgovora, definirana skala ocjenjivanja.
Očekivani ishod	<ul style="list-style-type: none"> • Dodijeljena odgovarajuća ocjena prema definiranoj skali. • Prikazana vizualna oznaka točnih i netočnih odgovora. • Prikaz postotka točnosti ispita
Identifikator	TS-03
Naziv scenarija	Generiranje predloška
Cilj	Testirati generiranje PDF predloška.
Ulaz	Definirani broj pitanja i odgovora po pitanju.
Očekivani ishod	<ul style="list-style-type: none"> • Predložak se ispravno generira i odgovara zadanim parametrima.

Tablica 5: Scenariji za manualno testiranje

Ovo su glavni scenariji prema kojima se testiralo rješenje tijekom razvoja. Upute za sve scenarije su iste i uključuju pokretanje sustava nad cijelim skupom testnih podataka te verifikaciju ishoda u sučelju ili analizu datoteka generiranih u načinu rada za otklanjanje grešaka.

7. Diskusija

Kroz ovaj rad često su se spominjale prednosti, nedostaci i različite metrike kojima se opisuju rješenja za ocjenjivanje pismenih ispita. Cilj ovog poglavlja je staviti u kontekst rezultate ovog rada i izrađenog artefakta, istaknuti njegova ograničenja te ukazati na područja koja bi se dodatnim razvojem i istraživanjem mogla dodatno unaprijediti.

7.1. Analiza rezultata

Da bi se sami rezultati mogli pravilno analizirati, važno je ponovno istaknuti ciljeve ovog rada. Glavni cilj bio je izraditi biblioteku otvorenog koda za detekciju odgovora na pismenim ispitima. Budući da je detekcija odgovora na pismenim ispitima vrlo širok pojam, ovaj rad fokusirao se specifično na detekciju odgovora na matricama odgovora koje mogu sadržavati pitanja s jednim ili više točnih odgovora.

Glavna metrika koju je ovaj rad nastojao postići bila je što viša razina preciznosti. Kao što je već ranije spomenuto, sustav je testiran na raznovrsnom skupu podataka koji je uključivao slike kako iz idealnih uvjeta, tako i one koje predstavljaju ekstremne slučajeve.

Na kombiniranom skupu podataka razvijeno rješenje postiglo je preciznost od 90%. Ta je preciznost izračunata na temelju skupa od 30 ispita, od kojih je 27 uspješno ocijenjeno, dok 3 ispita nisu. Važno je napomenuti da se u sva tri slučaja radilo o slikama snimljenima u ekstremnim uvjetima koji nadilaze očekivane radne uvjete sustava. Međutim, sustav je u tim slučajevima ispravno detektirao problem te je slike označio oznakom NOT_GRADED, što je znatno prihvativije od mogućnosti pogrešnog ocjenjivanja. Dodatno, svi ispitni snimljeni u uobičajenim radnim uvjetima uspješno su i točno ocijenjeni.

Osim same preciznosti, uspješnost rada može se analizirati i kroz funkcionalne i nefunkcionalne zahtjeve. Svi funkcionalni zahtjevi uspješno su implementirani, a isto vrijedi i za nefunkcionalne. Jedna od važnijih značajki ovog rješenja je njegova učinkovitost, sustav ne zahtijeva značajne računalne resurse, a vrijeme obrade slike izrazito je kratko.

Nefunkcionalni zahtjev NFZ-04 specificirao je da sustav mora biti sposoban obraditi i ocijeniti sliku unutar 500 ms, pod uvjetom da slika nije veća od 2K rezolucije i da sustav nije u načinu rada za otklanjanje grešaka. Sustav je ne samo zadovoljio taj zahtjev, već ga je i nadmašio. Prema aritmetičkoj sredini vremena obrade u više mjerena provedenih nad cijelim skupom testnih podataka, prosječno vrijeme obrade iznosilo je 253 milisekunde.

7.2. Limitacije rješenja

Nijedan sustav nije bez ograničenja, pa tako i ovo rješenje ima svoje specifične izazove. Kroz rad su istaknuti tradicionalni problemi OMR sustava, poput kvalitete ulazne slike i ljudskih faktora pri ispunjavanju ispita. U ovom radu tim je izazovima pristupljeno na kreativan i netradicionalan način, osobito u kontekstu detekcije odgovora.

Tijekom testiranja, najveća ograničenja pokazala su se u fazi pretprecesiranja slike. To je bilo očito u tri testna slučaja u kojima sustav nije uspješno ocijenio ispit. Zajednička karakteristika tih primjera bila je neuspješna korekcija perspektive. Zbog toga su svi kasniji koraci, koji očekuju ispravno poravnatu sliku, ostvarili slabije rezultate. Analizom je utvrđeno da se ti problemi javljuju kada je slika snimljena s neuobičajeno velike udaljenosti te u prisutnosti brojnih vizualnih smetnji, što može otežati pravilno prepoznavanje papira i ispravljanje perspektive.

Osim izazova s korekcijom perspektive, moguće je da sustav u određenim slučajevima ne prepozna označeni odgovor ako je krug vrlo slabo ispunjen. U takvim situacijama, postotak ispunjenosti može biti sličan onome kod praznih krugova, što otežava ispravnu klasifikaciju.

7.3. Poboljšanja rješenja

Kroz razvoj rješenja identificirana su i potencijalna poboljšanja koja bi mogla značajno unaprijediti preciznost i pouzdanost sustava. Jedno od prvih područja koje bi se moglo unaprijediti odnosi se na logiku za ispravak perspektive. To poboljšanje uključivalo bi kvalitetniju detekciju papira na slici. Tijekom izrade ovog rada korištena je isključivo EmguCV biblioteka za obradu slike, no uključivanje dodatnih specijaliziranih biblioteka za detekciju rubova papira moglo bi uvelike povećati točnost i robusnost sustava.

Drugo ključno područje za nadogradnju odnosi se na logiku klasifikacije ispunjenosti krugova. Trenutačno se koristi pristup temeljen na pragu ispunjenosti koji dijeli odgovore na označene i neoznačene. Iako je ovaj pristup jednostavan za implementaciju, pokazao je određene slabosti. Jedno moguće rješenje bilo bi korištenje klasifikatora temeljenog na konvolucijskoj neuronskoj mreži. Na taj način sustav bi mogao samostalno prepoznavati lokacije odgovora na papiru te preciznije klasificirati je li krug označen ili nije, na temelju naučenih značajki.

Navedena poboljšanja odnose se na sustav za detekciju odgovora, no dodatni iskoraci mogući su i u dijelu sustava za ocjenjivanje. Sustav bi se mogao proširiti podrškom za različita pravila ocjenjivanja, poput parcijalnog bodovanja, negativnih bodova, različitih bodovnih vrijednosti po pitanju i slično.

Bilo bi također zanimljivo istražiti načine kako sustav učiniti još fleksibilnijim u pogledu dizajna predloška matrice odgovora. Iako je trenutna fleksibilnost sustava već na visokoj razini zbog neovisnosti o veličini, poziciji te broju pitanja i odgovora, daljnji razvoj u tom smjeru mogao bi dodatno povećati upotrebljivost i primjenjivost sustava u različitim kontekstima.

8. Zaključak

Cilj ovog rada bila je izrada komponente otvorenog koda za detekciju odgovora na pismenim ispitima. Da bi se taj cilj ostvario, bilo je potrebno razumjeti koji problem ovaj sustav pokušava riješiti te koje su sve metode, tehnike i alati potrebnii za njegovo rješavanje. Problem koji se rješava zapravo je ubrzavanje procesa ocjenjivanja pismenih ispitova koji sadrže pitanja s ponuđenim odgovorima. Ocjenjivanje takvih ispitova ne zahtijeva kreativno razmišljanje, već se radi o usporedbi označenih odgovora polaznikovog ispita s kontrolnim ispitom. Takvi zadatci mogu se okarakterizirati kao repetitivni i dosadni, no još je važnije da oduzimaju značajan dio vremena ocjenjivačima, koji bi svoje kompetencije mogli koristiti na puno značajnije načine.

Radi se o vrlo starom problemu, pogotovo kada se ispitovi provode za veliki broj ljudi. Zbog toga je već krajem 1930-ih nastao prvi OMR sustav s ciljem automatizacije procesa ocjenjivanja. U početku su takvi sustavi ovisili o posebnom i skupocjenom sklopovlju, no s ubrzanim razvojem tehnologije te su se limitacije postupno uklonile. Danas se takvi sustavi mogu koristiti uz pomoć osobnog računala i uređaja za pribavljanje slike poput skenera ili pametnog telefona.

Takvi sustavi tradicionalno koriste računalni vid, odnosno obradu digitalne slike, no danas se pojavljuju i druge tehnologije poput umjetne inteligencije koje mogu unaprijediti tradicionalni pristup.

Ovaj rad fokusirao se na tradicionalan pristup OMR tehnologiji koristeći obradu slike. Važno je napomenuti da se radi o zreloj grani računalnog vida i da su preciznost i pouzdanost takvih sustava dokazane kroz brojna istraživanja i praktičnu primjenu. No, i dalje se to područje suočava s problemima vezanim uz kvalitetu pribavljene slike, neispravno ispunjavanje ispitova i ovisnost sustava o predlošcima. Ti se problemi u OMR sustavima najčešće pokušavaju mitigirati kroz fazu preprocesiranja – primjerice, ispravkom perspektive, smanjivanjem buke i sličnim tehnikama.

Jedna od početnih ideja za dizajn GradeVision sustava bila je izrada što jednostavnijeg sustava te brzo prototipiranje vođeno rezultatima kontinuiranog testiranja. Testiranje i analiza rezultata pokazali su se kao ključni dijelovi rada, jer su pružali povratne informacije o dijelovima sustava koji zahtijevaju poboljšanja. Taj je pristup omogućio da se sustav od samog početka dizajnira za rad sa slikama snimljenima u ekstremnim uvjetima.

Sam pristup rješavanju problema u određenim se aspektima razlikovao od postojećih sustava. Dobar primjer toga je odluka da predlošci neće sadržavati posebne označke za rubove papira. Takve su odluke sustav učinile fleksibilnijim u smislu podrške različitim predlošcima, ali i osjetljivijim kada se slike snimaju u izrazito nepovoljnim uvjetima.

Važno je napomenuti da je sustav izrazito točan kada se slike pribavljaju u razumnim uvjetima, iako podržava i izazovnije scenarije. No, postoje područja koja bi se mogla značajno unaprijediti daljnijem razvojem i primjenom tehnologija poput neuronskih mreža.

Za kraj mogu reći da sam zadovoljan izrađenim rješenjem te da sam kroz ovaj rad naučio mnogo o računalnom vidu i općenito o računalnoj obradi slike. Smatram da su određeni problemi riješeni na kreativan i nekonvencionalan način, što je sustav poboljšalo u nekim seg-

mentima. No, također je važno poznavati postojeća rješenja kako bi se iz njihovih mana mogao pronaći prostor za daljnji napredak.

Popis literature

- [1] A. Bloomfield, „Evolution of a digital paper exam grading system,” *2010 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, [pristupano 29.04.2025.], IEEE, str. 27–30. DOI: 10.1109/FIE.2010.5673292.
- [2] sabbott, „Standardized Test Definition,” *Glossary of Education Reform*, studeni 2015., [pristupano 29.04.2025.] adresa: <https://www.edglossary.org/standardized-test>.
- [3] S. Leonard, „Automated Grading for Subjective Assessments: Challenges and Solutions,” *TAO*, veljača 2025., [pristupano 29.04.2025.] adresa: <https://www.taotesting.com/blog/automated-grading-for-subjective-assessments-challenges-and-solutions>.
- [4] E. Miguel de Elias, P. Tasinazzo i R. Hirata Jr, „Optical Mark Recognition: Advances, Difficulties, and Limitations,” *SN Computer Science*, sv. 2, rujan 2021., [pristupano 30.04.2025.] DOI: 10.1007/s42979-021-00760-z.
- [5] M. E. Alam, F. Akter, T. Alam, S. Farid, M. I. Haque i M. Arefin, „Approaching Computer Vision And Image Processing Technique For Optical Mark Recognition Sheet Scan And Verification,” *2022 International Conference on Recent Progresses in Science, Engineering and Technology (ICRPSET)*, [pristupano 30.04.2025.], 2022., str. 1–5. DOI: 10.1109/ICRPSET57982.2022.10188569.
- [6] G. Smith, R. Haworth i S. Zitnik, „Computer Science Meets Education: Natural Language Processing for Automatic Grading of Open-Ended Questions in eBooks,” *Journal of Educational Computing Research*, sv. 58, svibanj 2020., [pristupano 30.04.2025.] DOI: 10.1177/0735633120927486.
- [7] Saiwa, *Top 10 Computer Vision Libraries |A Comprehensive and Detailed Guide*. China: Medium, studeni 2024., [pristupano 30.04.2025.], ISBN: 978-745304301. adresa: <https://medium.com/@saiwadotai/top-10-computer-vision-libraries-a-comprehensive-and-detailed-guide-745c304e3016>.
- [8] *What Is a Digital Image? - Ricoh Scanners*, [pristupano 13.04.2025.], travanj 2025. adresa: <https://www.pfu-us.ricoh.com/blog/what-is-a-digital-image>.
- [9] *Understanding Aspect Ratios in Photography | Adobe Express*, [pristupano 30.04.2025.], travanj 2025. adresa: <https://www.adobe.com/express/discover/sizes/photo-aspect-ratio>.

- [10] *Color photography history, tips, and techniques - Adobe*, [pristupano 30.04.2025.], travanj 2025. adresa: <https://www.adobe.com/creativecloud/photography/type/color-photography.html>.
- [11] *Grayscale Image - an overview | ScienceDirect Topics*, [pristupano 20.04.2025.], travanj 2025. DOI: 10.1016/B978-0-12-822271-3.00013-X.
- [12] linkgit, „Why use Grayscale Conversion when Processing Images?” *Grayscale Images*, svibanj 2024., [pristupano 21.04.2025.] adresa: <https://www.grayscaleimage.com/why-use-grayscale-conversion-when-processing-images>.
- [13] *why we should use gray scale for image processing*, [pristupano 20.04.2025.], travanj 2025. adresa: <https://stackoverflow.com/questions/12752168/why-we-should-use-gray-scale-for-image-processing>.
- [14] *Image Processing: Techniques, Types, & Applications [2024]*, [pristupano 21.04.2025.], travanj 2025. adresa: <https://www.v7labs.com/blog/image-processing-guide>.
- [15] R. C. Gonzalez i R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 4. izdanje. Pearson, [pristupano 21.04.2025.] adresa: https://www.c172.org/090imagePLib/books/Gonzales_Woods-Digital.Image.Processing.4th.Edition.pdf.
- [16] M. Patel, „The Complete Guide to Image Preprocessing Techniques in Python,” *Medium*, listopad 2023., [pristupano 22.04.2025.], ISSN: 3080-4550. adresa: <https://medium.com/@maahip1304/the-complete-guide-to-image-preprocessing-techniques-in-python-dca30804550c>.
- [17] *Image Acquisition | Cloudinary*, [pristupano 22.04.2025.], travanj 2025. adresa: <https://cloudinary.com/glossary/image-acquisition>.
- [18] *What is noise in photography*, [pristupano 22.04.2025.], travanj 2025. adresa: <https://www.adobe.com/creativecloud/photography/hub/guides/what-is-noise-in-photography.html>.
- [19] A. Swain, „Noise filtering in Digital Image Processing - Anisha Swain - Medium,” *Medium*, srpanj 2023., [pristupano 22.04.2025.] adresa: <https://medium.com/@anishaswain/noise-filtering-in-digital-image-processing-d12b5266847c>.
- [20] *Caption for Median Filtering Illustration*, [pristupano 22.04.2025.], listopad 2022. adresa: <https://visns.neocities.org/MedianFiltering>.
- [21] *Image preprocessing and enhancement | Geospatial Engineering Class Notes | Fiveable*, [pristupano 24.04.2025.], travanj 2025. adresa: <https://fiveable.me/geospatial-engineering/unit-4/image-preprocessing-enhancement/study-guide/L5fa2eI0Xk8chrKd>.
- [22] R. Shaikh, „OpenCv Perspective Transformation - Analytics Vidhya - Medium,” *Medium*, veljača 2024., [pristupano 24.04.2025.] adresa: <https://medium.com/analytics-vidhya/opencv-perspective-transformation-9edffefb2143>.

- [23] R. Pulapakura, „Image Segmentation — A Beginner’s Guide | Medium,” *Medium*, veljača 2024., [pristupano 24.04.2025.] adresa: <https://medium.com/@raj.pulapakura/image-segmentation-a-beginners-guide-0ede91052db7>.
- [24] P. Chhikara, „Understanding Morphological Image Processing and Its Operations | Towards Data Science,” *Towards Data Science*, siječanj 2025., [pristupano 24.04.2025.] adresa: <https://towardsdatascience.com/understanding-morphological-image-processing-and-its-operations-7bcf1ed11756>.
- [25] [pristupano 25.04.2025.], studeni 2022. adresa: https://cmrcet.ac.in/files/ECE/ececoursefile/13.pdf?utm_source=chatgpt.com.
- [26] M. Abramov, „Semantic Segmentation vs Object Detection: Differences | Keymakr,” *Keymakr*, veljača 2025., [pristupano 25.04.2025.] adresa: <https://keymakr.com/blog/semantic-segmentation-vs-object-detection-understanding-the-differences>.
- [27] P. Sharma, „Image Classification vs. Object Detection vs. Image Segmentation,” *Medium*, prosinac 2021., [pristupano 25.04.2025.] adresa: <https://medium.com/analytics-vidhya/image-classification-vs-object-detection-vs-image-segmentation-f36db85fe81>.
- [28] siromer, „Contour Detection using OpenCV - siromer - Medium,” *Medium*, siječanj 2025., [pristupano 25.04.2025.] adresa: <https://medium.com/@siromermer/contour-detection-using-opencv-detecting-and-counting-coins-2d5192597e3c>.
- [29] *Post-processing and visualization | Applications of Scientific Computing Class Notes | Fiveable*, [pristupano 28.04.2025.], travanj 2025. adresa: <https://library.fiveable.me/applications-of-scientific-computing/unit-8/post-processing-visualization/study-guide/6jrpX4V64bjrgSLQ>.
- [30] R. Sheldon, „image compression,” *WhatIs*, srpanj 2022., [pristupano 28.04.2025.] adresa: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/image-compression>.
- [31] MenyePy, „2 free open-source OMR grading projects on github,” *DEV Community*, veljača 2022., [pristupano 28.04.2025.] adresa: <https://dev.to/menyePy/2-free-open-source-omr-projects-on-github-2dl3>.
- [32] *[v1] Diagrams · Udayraj123/OMRChecker Wiki*, [pristupano 29.04.2025.], travanj 2025. adresa: <https://github.com/Udayraj123/OMRChecker/wiki/%5Bv1%5D-Diagrams>.
- [33] *open-mcr*, [pristupano 25.05.2025.], svibanj 2025. adresa: <https://github.com/iansan5653/open-mcr>.
- [34] S. Mondal, P. De, S. Malakar i R. Sarkar, „OMRNet: A lightweight deep learning model for optical mark recognition,” en, *Multimedia Tools and Applications*, srpanj 2023., [pristupano 30.04.2025.], ISSN: 1380-7501, 1573-7721. DOI: 10.1007/s11042-023-15408-8. pogledano 13. srpnja 2023. adresa: <https://link.springer.com/10.1007/s11042-023-15408-8>.

Popis slika

1.	Prikaz slike u boji i pripadajućih kanala boja u RGB modelu (vlastita izrada)	8
2.	Prikaz sive slike (vlastita izrada)	9
3.	Prikaz binarne slike (vlastita izrada)	10
4.	Usporedba svjetlosne komponente i komponenta boja(vlastita izrada)	11
5.	Primjer medijanskog filtera [20]	14
6.	Usporedba procesirane slike bez i s pretpresiranjem (vlastita izrada)	15
7.	Prikaz procesa ispravka perspektive subjekta na slici [22]	16
8.	Usporedba tipova segmentacije [23]	17
9.	Prikaz erozije kao morfološke operacije [24]	18
10.	Prikaz dilatacije kao morfološke operacije [24]	18
11.	Prikaz kompozitnih morfoloških operacija [24]	19
12.	Usporedba segmentacije i detekcije objekta [27]	20
13.	Prikaz rezultata detekcije krugova pomoću kontura [27]	21
14.	Prikaz dijela toka procesiranja slike kod OMRChecker-a [32]	23
15.	Prikaz pomoćnih oznaka za detektiranje kutova matrice odgovora i orijentacije [32] [33]	24
16.	Prikaz strukture OMRNet klasifikatora [34]	25
17.	Prikaz Use-case diagrama (Vlastita izrada)	31
18.	Prikaz dijagrama klase (Vlastita izrada)	35
19.	Prikaz dijagrama slijeda za detekciju odgovora s kontrolnog ispita (Vlastita izrada)	39
20.	Prikaz dijagrama slijeda ocijenjivanja ispita (Vlastita izrada)	41
21.	Prikaz dijagrama slijeda za generiranje PDF matrice odgovora (vlastita izrada) .	42
22.	Prikaz korisničkog sučelja GradeVision stolne demo aplikacije (vlastita izrada) .	43
23.	Prikaz ulazne i izlazne slike ConvertToGrayscale metode (vlastita izrada)	45

24. Prikaz ulazne i izlazne slike Denoise metode (vlastita izrada)	47
25. Prikaz ulazne i izlazne slike CorrectPerspective metode (vlastita izrada)	53
26. Prikaz ulazne i izlazne slike CorrectRotation metode (vlastita izrada)	54
27. Prikaz ulazne i izlazne slike ApplyThresholding metode (vlastita izrada)	55
28. Prikaz histograma postataka ispunjenosti krugova (vlastita izrada)	59
29. Prikaz ulazne i izlazne slike CircleDetection metode (vlastita izrada)	60
30. Prikaz različitih tipova matrica odgovora - primjer 1 (vlastita izrada)	61
31. Prikaz različitih tipova matrica odgovora - primjer 2 (vlastita izrada)	62
32. Prikaz matrica odgovora uslikanim u izazovnijim uvjetima - primjer 1 (vlastita izrada)	63
33. Prikaz matrica odgovora uslikanim u izazovnijim uvjetima - primjer 2 (vlastita izrada)	63
34. Prikaz izvorne slike i pretvorbe u sivu sliku na primjeru (vlastita izrada)	64
35. Prikaz ispravka perspektive i rotacije na primjeru (vlastita izrada)	65
36. Prikaz smanjivanja buke i pretvorbe u binarnu sliku na primjeru (vlastita izrada) .	65
37. Prikaz detekcije odgovora i vizualizacije označenih odgovora na primjeru (vlastita izrada)	66
38. Prikaz vizualizacije ocjene na primjeru (vlastita izrada)	66

Popis tablica

1.	Usporedba biblioteka i okvira računalnog vida [7]	5
2.	Funkcionalni zahtjevi	29
3.	Nefunkcionalni zahtjevi	30
4.	Unaprijed definirane ocjene i odgovarajući pragovi u obliku postotka	44
5.	Scenariji za manualno testiranje	68

1. Prilozi

Na priloženim linkovima nalaze se izvorni kod, izvršna verzija aplikacije i testni skup podataka:

- **Test data:** Preuzmi testni skup podataka
- **Demo app:** Preuzmi demo aplikaciju
- **GitHub repozitorij:** Otvori GitHub repozitorij