



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

DETEKCE PROJEVŮ ONEMOCNĚNÍ NA SÍTNICI LIDSKÉHO OKA

DETECTION OF DISEASES ON THE HUMAN EYE RETINA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

GABRIEL KOŠTIALIK

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Prof. Ing., Dipl.-Ing. MARTIN DRAHANSKÝ, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce



22993

Student: **Košťalík Gabriel**
Program: Informační technologie
Název: **Detekce projevů onemocnění na sítnici lidského oka**
Detection of Diseases on the Human Eye Retina
Kategorie: Zpracování obrazu

Zadání:

1. Prostudujte literaturu týkající se sítnice lidského oka a na sítnici se vyskytujících onemocnění. Seznamte se s knihovnou OpenCV a dostupnou databází sítnice oka s projevy onemocnění.
2. Navrhněte metody a algoritmy pro detekci projevů dvou vybraných nemocí na sítnici oka.
3. Algoritmický postup z předchozího bodu implementujte a otestujte na dostupné databázi.
4. Shrňte dosažené výsledky, tyto diskutujte a nastiňte možná rozšíření.

Literatura:

- Scanlon P.H., Wilkinson C.P., Aldington S.J., Matthews D.R. *A Practical Manual of Diabetic Retinopathy Management*. Wiley-Blackwell, 2009, s. 230, ISBN 978-1-405-17035-2.
- Ryan S.J. *Retina*. 4th Ed., Elsevier Mosby, 2006, s. 2731, ISBN 0323025986.
- OpenCV library - <http://opencv.org/>

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 a 2.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Drahanský Martin, prof. Ing., Dipl.-Ing., Ph.D.**

Konzultant: Mňuk Tomáš, MUDr., FNUSA

Vedoucí ústavu: Hanáček Petr, doc. Dr. Ing.

Datum zadání: 1. listopadu 2019

Datum odevzdání: 14. května 2020

Datum schválení: 31. října 2019

Abstrakt

Najčastejšia príčina oslepnutia u ľudí, medzi 20 až 64 rokmi, je diabetická retinopatia. Toto ochorenie vzniká z nejasných dôvodov, no príčina je jasná. Diabetes mellitus, u nás známy aj ako cukrovka. Prognóza vývoja počtu chorých ľudí do budúcnosti je však veľmi zlá. Z tohto dôvodu, je skorá diagnostika diabetickej retinopatie veľmi potrebná, nakoľko neliečení pacienti môžu veľmi rýchlo prísť o zrak. Cieľom tejto práce je navrhnúť a implementovať algoritmus, ktorý dokáže automatizovane vyhľadávať určité prejavy tohto onemocnenia. Algoritmus pracuje na spôsobe adaptívneho prahovania. Veľmi dôležitou časťou algoritmu je aj predspracovanie a následná klasifikácia podozrivých oblastí. Vyhodnotenie úspešnosti detekcie prebehlo na 70 obrázkoch z rôznych databáz, na ktorých algoritmus dosahuje veľmi dobrú úspešnosť. Nasadenie tohto algoritmu do diagnostiky by mohlo značne pomôcť k automatizovaniu celého tohto procesu. V konečnom dôsledku by to znamenalo skoršiu liečbu pre pacientov, pri ktorej je čas začatia liečby kritický.

Abstract

The most common cause of blindness in humans, between 20 and 64 years, is diabetic retinopathy. This disease is due to unclear reasons, but the cause is clear. Diabetes mellitus. The prognosis of the number of sick people in the future is very bad. For this reason, early diagnosis of diabetic retinopathy is highly needed, as untreated patients may lose sight very quickly. Therefore, the aim of this work is to design and implement an algorithm, that can automatically search for certain symptoms of the disease. The algorithm works on a way of adaptive Gaussian thresholding. A very important part of the algorithm is also pre-processing and subsequent classification of suspicious areas. The detection success was evaluated on 70 images from various databases, where the algorithm achieves very good results. Deploying this algorithm in diagnostics could greatly help to automate the whole process. Ultimately, this would mean earlier treatment for patients where the start time of treatment is critical.

Kľúčové slová

Oko, sietnica, diabetická retinopatia, spracovanie obrazu, openCV, python

Keywords

Eye, retina, diabetic retinopathy, image processing, openCV, python

Citácia

KOŠTIALIK, Gabriel. *Detekce projevů onemocnění na sítnici lidského oka*. Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Prof. Ing., Dipl.-Ing. Martin Dražanský, Ph.D.

Detekce projevů onemocnění na sítnici lidského oka

Prehlásenie

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana prof. Ing. Martina Drahanického, Ph.D. Další informace mi poskytli Lukáš Semerád, MUDr. Mňuk Tomáš. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....

Gabriel Košťalik

23. mája 2020

Podakovanie

Chcel by som sa poďakovať vedúcemu mojej práce Prof. Ing., Dipl.-Ing. Martinovi Drahanickému, Ph.D., celému tímu kolegov pracujúcich na projekte Viderize a mojim rodičom za trpezlivú a dôkladnú pomoc pri opravovaní tejto práce.

Obsah

1	Úvod	3
1.1	Cieľ práce	3
1.2	Štruktúra práce	3
2	Zoznam skratiek	5
3	Ludské oko	6
3.1	Fungovanie zrakového vnemu	6
3.2	Anatómia ľudského oka	7
3.3	Sietnica	9
4	Choroby sietnice	12
4.1	Vekom podmienená makulárna degenerácia	13
4.1.1	Formy VPMD	13
4.2	Diabetická retinopatia	14
4.2.1	Neproliferatívna diabetická retinopatia	15
4.2.2	Proliferatívna diabetická retinopatia	16
4.2.3	Prejavy DR	16
4.2.4	Diabetes mellitus	18
4.2.5	Príčina DR	19
4.2.6	Liečba DR	19
4.3	Vyšetrenie sietnice	20
4.3.1	Oftalmoskopia	20
4.3.2	Štrbinová lampa	21
4.3.3	Digitálna fundus kamera	21
4.3.4	Fluorescenčná angiografia	22
4.3.5	Optická koherentná tomografia	23
5	Spracovanie obrazu	24
5.1	Úprava jasu a kontrastu	24
5.1.1	Logaritmická transformácia	24
5.1.2	Roztiahnutie kontrastu	24
5.1.3	Transformácia histogramu	25
5.2	Vyhľadovanie obrazu	25
5.2.1	Vychladzovanie priemerovaním (Averaging Filters)	26
5.2.2	Gaussovo vyhľadovanie (Gaussian Smoothing)	26
5.2.3	Mediánová filtrácia (Median Filtering)	26
5.3	Prahovanie	26

5.3.1	Globálne prahovanie	27
5.3.2	Lokálne prahovanie	27
5.3.3	Automatické získanie optimálneho prahu	28
5.3.4	Prahovanie s distribúciou chyby	28
5.4	Morfologické operácie	28
5.4.1	Dilatácia	30
5.4.2	Erózia	30
5.4.3	Otvorenie a uzatvorenie	30
6	Návrh algoritmu	32
6.1	Získanie masiek	32
6.1.1	Získanie masky pozadia	33
6.1.2	Získanie masky optického disku	34
6.1.3	Získanie masky krvného riečiska	34
6.2	Predspracovanie	35
6.3	Detekcia	36
6.3.1	Detekcia tvrdých exsudátov	37
6.3.2	Detekcia mäkkých exsudátov	39
6.3.3	Úprava algoritmu po konzultácii	40
6.4	Implementácia	41
7	Testovanie a zhodnotenie výsledkov	42
7.1	Použité databázy	42
7.2	Testovanie detekcie tvrdých a mäkkých exsudátov	43
7.3	Výsledky	43
8	Záver	45
	Literatúra	46
A	Obsah priloženého CD	49

Kapitola 1

Úvod

Zrak sa uvádza ako náš najdôležitejší zmysel. Väčšina informácií, ktoré človek pomocou svojich zmyslových orgánov za deň registruje, je vnímaná práve zrakom. Je veľmi ťažké predstaviť si život bez neho, a jeho strata znamená veľký zásah do života moderného človeka. Vďaka zraku dokážeme vnímať svetlo, tvary, farbu a orientovať sa v priestore. Choroby napádajú každú časť nášho tela, a oči nie sú výnimkou. No pri ochorení očí, je veľké riziko straty videnia, hlavne pri neskorej alebo žiadnej liečbe.

Táto práca sa zaoberá automatickým hľadaním prejavov diabetickej retinopatie, ktorá je najčastejšou príčinou oslepnutia u ľudí do 64 rokov. Často je slepota odvrátiteľná skorou liečbou. Pri tomto ochorení je veľmi podstatná skorá diagnostika a liečba. Liečba spočíva hlavne v kompenzovaní cukrovky, v neskorších fázach sa využíva laserová liečba. Na trhu momentálne neexistuje žiadny spoľahlivý nástroj, ktorý by bol schopný určiť rozsah poškodenia sietnice.

Z tohto dôvodu vznikol perspektívny projekt na vytvorenie automatizovaného nástroja, ktorý bude rozpoznávať závažnosť diabetickej retinopatie zo snímok sietnice. Táto práca je súčasťou tohto projektu a zaoberá sa rozpoznávaním určitých prejavov tohto ochorenia. Vďaka spolupráci v tíme, boli vyvinuté špecifické algoritmy, ktoré boli použité v mojej práci.

1.1 Cieľ práce

Hlavným cieľom mojej práce je vytvoriť algoritmus, ktorý bude schopný rozpoznať prejavy diabetickej retinopatie, zo snímky sietnice pacienta. Konkrétne sa jedná o tvrdé a mäkké exsudáty. Najdôležitejšia vlastnosť algoritmu bude spoľahlivosť a chybovosť detekcie. Tieto dve vlastnosti budú podrobne otestované na databázach snímok sietnic s prejavmi diabetickej retinopatie.

1.2 Štruktúra práce

Zhrnutie všetkých potrebných informácií sa nachádza v prvých troch kapitolách. Kapitola 3 opisuje fungovanie oka ako zmyslového orgánu, jeho funkcie a zloženie. Najväčšia pozornosť sa sústreďuje na podrobný opis sietnice a častí, z ktorých sa skladá. V kapitole 4 je zhrnutie informácií o chorobách sietnice. V krátkosti je spomenutá vekom podmienená makulárna degenerácia a hlavnú časť tvoria informácie o diabetickej retinopatii. Konkrétne ide o príčiny, prejavy, diagnostiku a možné spôsoby liečby. V krátkosti je aj opísaná hlavná

príčina DR, diabetes mellitus. Taktiež stručne zhrňuje informácie o aktuálnych metódach, akými sa vykonáva diagnostika oka, ale aj možnosti liečby ochorení, ktoré postihujú sietnicu. V kapitole 5, ktorá je poslednou teoretickou časťou bakalárskej práce, sa nachádzajú opisy algoritmov, ktoré sa často používajú pri spracovaní obrazu. Pričom, veľká časť týchto algoritmov bola aj použitá pri implementácii výsledného algoritmu. Kapitola 6 obsahuje samotný návrh algoritmu, predspracovanie, získanie masiek a jeho podrobný opis. V poslednej kapitole 7 sú uvedené spôsoby, akými sa testovali výsledky algoritmu a zhrnutie týchto výsledkov.

Kapitola 2

Zoznam skratiek

- **DM** - diabetes mellitus
- **VPMD** - vekom podmienená makulárna degenerácia
- **DR** - diabetická retinopatia
- **NDPR** - neproliferatívna diabetická retinopatia
- **PDR** - proliferatívna diabetická retinopatia
- **IRMA** - intraretinálne mikrovaskulárne abnormality
- **MA** - mikroaneurizmy
- **NV** - neovaskularizácia
- **NVS** - sietnicová neovaskularizácia
- **NVD** - neovaskularizácia zrkového disku
- **SE** - soft exudates (mäkké exsudáty)
- **HE** - hard exudates (tvrdé exsudáty)
- **FAG** - fluorescenčná angiografia
- **OCT** - optická koherentná tomografia
- **ŠP** - štrukturálny prvok

Kapitola 3

L'udské oko

Zrak je považovaný za najdôležitejší vnemový zmysel. Človek prijíma až 80 % všetkých informácií z vonkajšieho prostredia práve pomocou zraku. L'udská schopnosť vidieť neznamená len prijímať svetlo, ale aj vnímanie tvarov, farieb, vzdialeností či pohybu. Funkcie zraku môžeme rozdeliť na tieto časti:

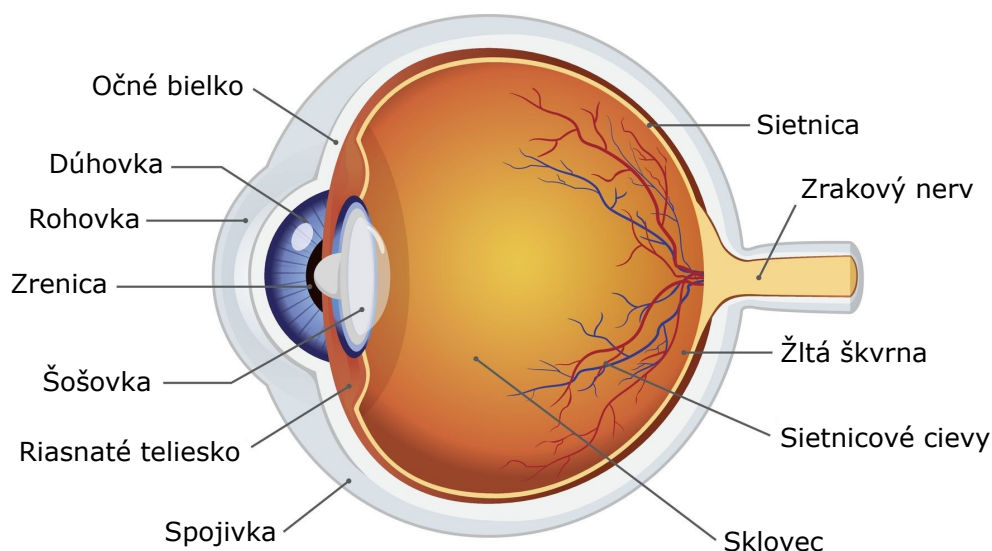
- *Ostrosť zraku* nám umožňuje vidieť predmety ostro a jasne, a vďaka ostrému videniu dokážeme rozpoznať aj malé detaily. Veľmi dôležitú úlohu v ostrom videní má na starosti žltá škvrna. [28]
- *Periférne videnie* vzniká dopadom svetla na sietnicu, do oblasti mimo žltej škvry. Ide o neostré videnie, ktoré nám pomáha hlavne pri orientácii v priestore ale aj pri ďalšom smerovaní nášho ostrého videnia. [28]
- *Farebné videnie* je možné vďaka tomu, že sietnica dokáže prijímať elektromagnetické vlnenie s rozsahom približne od 350 do 780 nm. Jednotlivé impulzy sa rozdelujú nasledovne, 450 - 470 nm = modrá, 520 - 540, nm = zelená, 580 - 600 nm = červenožltá. Tieto signály sa prenášajú do zrakového centra v mozgu, kde následne vyvolajú vnem určitej farby. Premiešavaním týchto farieb dokážeme vnímať vnemy aj iných farieb. [28]
- *Hĺbkové videnie* nám umožňuje vidieť priestorovo, to znamená že dokážeme odhadovať vzdialenosť, hĺbku či rýchlosť pozorovaných objektov. Pre správne fungovanie hĺbkového videnia je dôležitá bezchybná činnosť binokulárneho videnia. Binokulárne videnie je schopnosť mozgu zlúčiť signály z oboch očí v rovnaký okamih. [28]

Oko je párový orgán a najhlavnejším orgánom zraku, prispôsobený na prijímanie svetelného podráždenia. Je takmer guľovitého tvaru a nachádza sa v kostnej schránke, nazvanej očníca, na prednej stane lebky. Táto poloha je preň veľmi významná, hlavne z dôvodu ochrany pred zranením. Zrak u ľudí, ako aj u iných zvierat je binokulárny. Taktiež má aj významný vplyv na biorytmus človeka. [29, 33]

3.1 Fungovanie zrakového vnemu

Zrakový vnem začína vniknutím odrazených svetelných lúčov z okolia, ktoré sú v rozsahu viditeľného svetla, čo je asi 350 - 780 nm, do oka. Ak má žiarenie nižšiu frekvenciu ako viditeľné svetlo, hovoríme o infračervenom žiarení. Ak má žiarenie vyššiu frekvenciu, hovoríme o ultrafialovom žiarení. Oko nereaguje na žiadne iné žiarenie mimo viditeľného svetla

a nevyvoláva tak žiaden vzruch. Tieto lúče musia prejsť optickou sústavou, najskôr cez rohovku, komorovú vodu, šošovku, sklovec a nakoniec dopadnú na sietnicu. Pomocou opticky aktívnych prvkov sa svetelné lúče sústredia do ohniska, ktoré sa nachádza asi 13,7 mm pred sietnicou. Stred tohto obrazu sa nachádza presne v mieste najostrejšieho videnia. Obraz ktorý sa vytvorí je jasný, ostrý, zrkadlovo prevrátený a hore nohami. Svetlo, ktoré dopadne na sietnicu, sa vo svetlo citlivých bunkách absorbuje a mení sa na nervový vzruch, ktorý sa prenáša do mozgu. [29, 33]



Obr. 3.1: Anatomický popis ľudského oka. [19]

3.2 Anatómia ľudského oka

Veľkosť oka je na uhlopriečku približne 24,2 milimetra a môže sa líšiť u dospelých jedincov o 1 až 2 milimetre. Nezaznamenávame výrazné odlišnosti vo veľkosti oka u pohlaví alebo vekových skupín a jeho výslednú veľkosť získava približne v dvanástom roku života človeka. Zrak je veľmi zložitá schopnosť a vyžaduje si dokonalú spoluprácu všetkých častí zrakového systému. Ľudské oko sa skladá z viacerých častí (viz obrázok 3.1), ktoré musia bezchybne spolupracovať.

Stena očnej bulvy je tvorená tromi vrstvami: vonkajšia, stredná a vnútorná vrstva. **Vonkajšia vrstva** sa skladá z očného bielka a rohovky. **Strednú vrstvu** tvorí živnatka. Časť živnatky bližšie k optickej časti sietnice sa nazýva cievnatka. Predná časť živnatky prechádza do riasnatého telieska a dúhovky. **Vnútornú vrstvu** očnej bulvy pokrýva sietnica. Nasledovať bude detailný popis jednotlivých častí oka. [29, 33]

- **Očné bielko** (sclera) - je biele nepriehľadné tkanivo, ktoré obsahuje veľmi málo ciev. Tvorí približne až 5/6 obalu oka. Stavbou aj funkčne je hlavne podporným tkanivom. To znamená že hlavnou funkciou je udržiavanie tvaru očnej bulvy a taktiež mechanická ochrana oka. Upínajú sa naň aj okohybné svaly. Jeho hrúbka sa pohybuje od 0,4 do 1,5 mm a najhrubší je práve v zadnej časti bulvy, odkiaľ vychádza zrakový nerv.

Okrem vlákien zrakového nervu prechádza bielkom aj niekoľko žíl a nervových vetví. V prednej časti oka prechádza priamo do rohovky, má však odlišnú štruktúru. [29, 33]

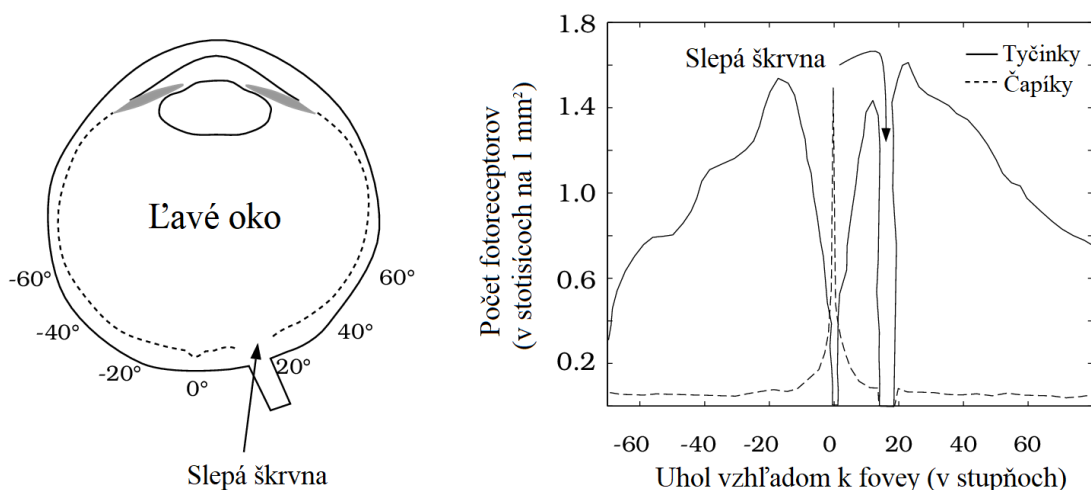
- *Rohovka* (cornea) - je priehľadná okrúhla predná časť oka, a s očným bielkom tvoria pevný obal oka. Má tvar takmer kruhového terču. Zaberá približne 1/6 povrchu bulvy a tvorí bariéru pred vonkajším svetom. Smerom do vnútra bulvy je v styku s komorovou vodou. Rohovka je tkanivo s najväčšou citlivosťou v ľudskom tele. Tkanivo rohovky je homogénne a bezcievne, preto je úplne priehľadné. Kdeže je bezcievne, všetku výživu čerpá z komorovej vody a slz. Horizontálny rozmer môže mať od 11,5 do 12 mm, vertikálny približne 11 mm. Rohovka svoju výslednú veľkosť získava už v 6. mesiaci života. [33]
- *Živnatka* (uvea) - je to označenie pre strednú vrstvu bulvy. Je tvorená z troch častí: dúhovky, riasnatého telieska a cievnatky. Nachádza sa medzi vonkajšou vrstvou a sietnicou, je veľmi dobre zásobená cievmi a je pigmentovaná. Jej hlavná funkcia je regulovanie vstupu svetla do oka, vyživovanie niektorých ďalších častí oka a vytváranie komorovej vody. [33]
- *Dúhovka* (iris) - má kruhový tvar s otvorom uprostred, nazývaným zrenička. Tvorí najprednejšiu časť živnatky. Na rozdiel od ostatných častí strednej vrstvy, ako jediná neprilieha k očnému bielku. Tvorí hranicu medzi prednou a zadnou očnou komorou. Množstvo svetla dopadajúceho na sietnicu sa reguluje pomocou dúhovkových svalov: zvieráč a rozvieráč zreničky. Roztiahnutím dúhovky sa vpúšťa viac svetla do oka, stiahnutím presný opak. Dúhovka je veľmi výrazná hlavne kvôli svojej farbe a rôznorodosti. Toto zafarbenie ovplyvňuje množstvo pigmentových buniek. [33]
- *Riasnaté teliesko* (corpus ciliare) - je priamym pokračovaním cievnatky. Spoločne s dúhovkou tvoria prednú časť cievnatej strednej vrstvy oka. Pri priečnom reze má tvar trojuholníka. Schopnosti šošovky zaostrovať, dopomáha práve svalová časť riasnatého telieska. Dokáže uvoľňovať a natahovať závesný aparát šošovky, ktorá sa môže následne viac alebo menej vyklenúť. Taktiež ním aj odteká časť vnútroočnej tekutiny. [33]
- *Cievnatka* (choroidea) - jej hlavnou úlohou je vyživovanie niektorých častí oka, pomocou množstva silných ciev, ktoré obsahuje. Je silno hnedo zafarbená, z dôvodu vysokého obsahu pigmentu. Nachádza sa skoro na celom rozsahu očnej bulvy, jedine v prednej časti prechádza bez ostrých hraníc do riasnatého telieska. S očným bielkom je pevne spojená iba v oblasti žltej škvrny. [33]
- *Šošovka* (lens) - je bikonvexného tvaru so zagulatenými okrajmi. Je tvorená hmotou, ktorá je úplne priehľadná a nenachádzajú sa tam žiadne cievy alebo nervy. Vo svojej polohe je zachytená pomocou závesného aparátu, ktorý je prichytený k riasnatému teliesku. Nachádza sa medzi sklovcom a dúhovkou. Jej zadná časť je vydutejšia než predná časť. Dôležitá vlastnosť šošovky je, že je elastická. To jej umožňuje meniť tvar a to pomocou vlákien závesného aparátu. Šošovka sa pri pohľade do rôznych vzdialeností rôzne zakrivuje a tým mení lomivosť svetla. Zakrivuje sa veľmi málo pri pohľade do diaľky, naopak pri pohľade na blízko sa zakrivuje oveľa viac. Veľkosť aj priehľadnosť šošovky sa značne mení vekom. [29, 33]
- *Sklovec* (corpus vitreum) - vyplní priestor medzi sietnicou, šošovkou a riasnatým telieskom. Tvorí najväčšiu časť oka, približne 80 % obsahu. Je úplne priehľadnej rô-

solovitej konzistencie, jeho viskozita je až 16-krát väčšia ako viskozita vody. To je spôsobené hlavne vysokým obsahom kyseliny hyalurónovej. Nenachádzajú sa v ňom cievy ani nervy. [33]

- *Predná očná komora* (camera oculi anterior) - je priestor medzi prednou plochou dúhovky a zadnou plochou rohovky, ktorý je naplnený komorovým mokom. Hĺbka tejto komory je približne 3 - 3,7 mm. Predná a zadná komora sú prepojené cez zorničku. [33]
- *Zadná očná komora* (camera oculi posterior) - je priestor medzi sklovcom a zadnou plochou dúhovky. Je značne menšia ako predná komora a najväčšiu hĺbku má približne 0,5 mm. [33]
- *Zrakový nerv* (nervus opticus) - je zväzok nervových vlákien, ktoré ďalej vedú kostným optickým kanálom až do mozgu. Skladá sa z ciev, nervového a podporného tkaniva. [33]
- *Sietnica* (retina) - keďže sa táto práca zaoberá spracovaním snímok sietnice, je potrebné túto časť oka opísať detailnejšie. Rozdelenie sietnice a ďalšie informácie sú uvedené v ďalšej sekcii. [33]

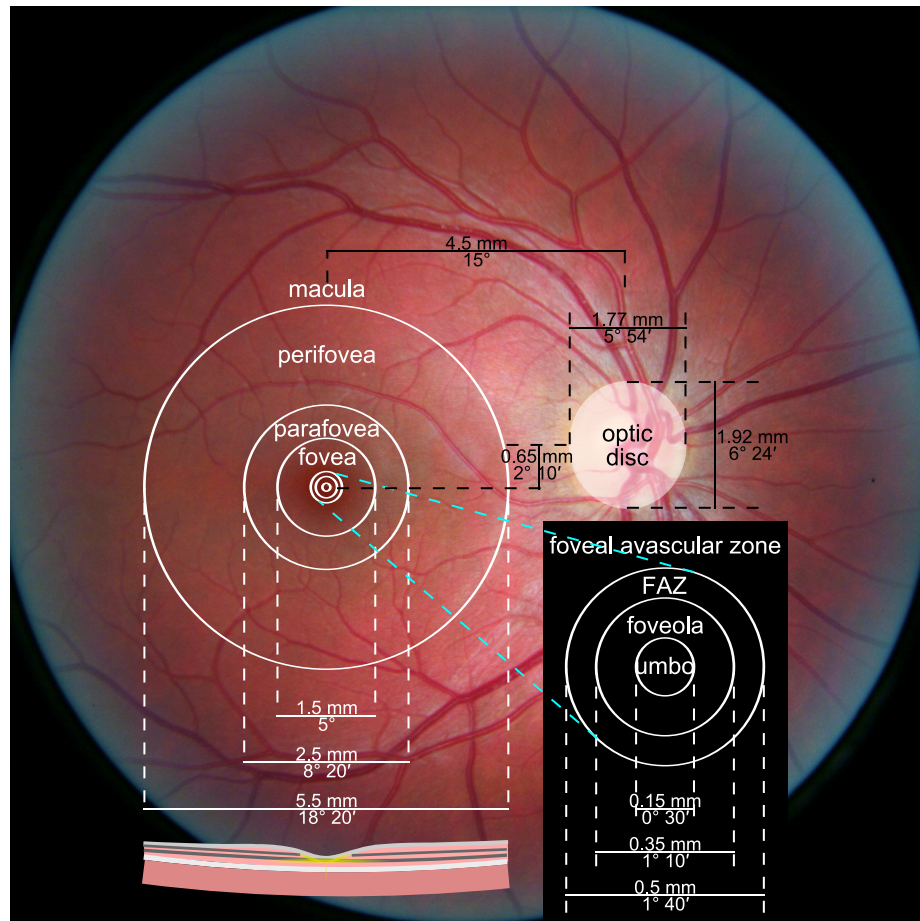
3.3 Sietnica

Sietnica (retina) sa nachádza na vnútornej vrstve očnej buľvy. Vonkajšia plocha sietnice je v kontakte s cievnatkou a vnútorná so sklovcom. Sietnica je jediná časť oka, ktorá reaguje na svetelné podnety. V prednej časti oka prechádza ostrou líniou do svojej slepej časti, ktorá následne prechádza do riasnatého telieska a dúhovky. V zadnej časti oka je sietnica o čosi mohutnejšia. Vnútorná vrstva sietnice je jemná, krehká a priehľadná blana. V zadnej časti oka je hrubá približne 0,4 mm a v prednej časti len okolo 0,1 mm. O výživu sietnice sa starajú dva cievne systémy. Je tvorená desiatimi vrstvami. Tieto vrstvy sú vzájomne prepojené nervovými bunky, pričom najvýznamnejšia vrstva, je vrstva svetlocitlivých buniek. [22]



Obr. 3.2: Histogram rozloženia a počtu tyčiniek a čapíkov v ľavom oku. [34]

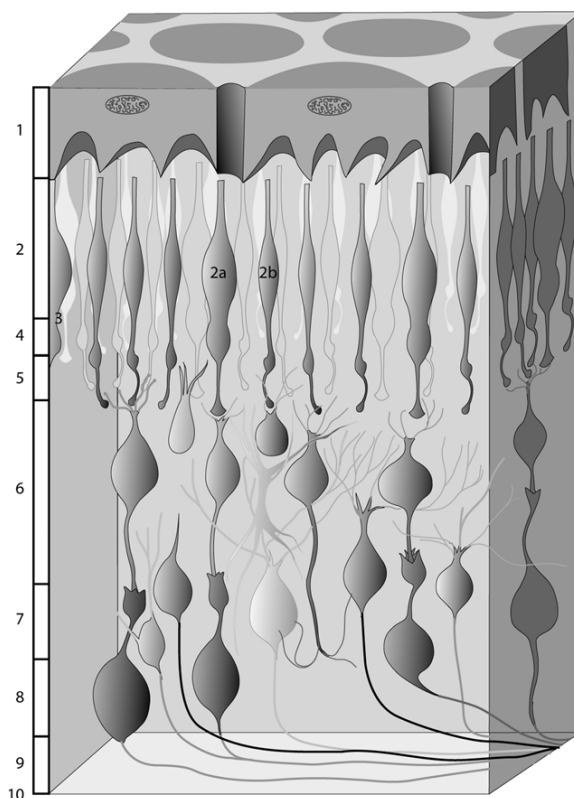
- *Svetlocitlivé bunky* sú špecializované senzorové bunky, ktoré sú schopné konvertovať svetelný signál na nervový vzruch. Nachádzajú sa na počiatku procesu videnia. Sú umiestnené na vonkajšej vrstve sietnice. Za svetlo citlivé bunky považujeme čapíky a tyčinky. Grafické znázornenie rozloženia týchto buniek v oku je zobrazené na obrázku 3.2. [22]



Obr. 3.3: Zloženie makuly. [3]

- *Čapík* je bunka sietnice, citlivá na svetlo. Týchto buniek sa na sietnici nachádza asi sedem miliónov. S najväčšou hustotou sa nachádzajú v oblasti najostrejšieho videnia, nazývaného žltá škvrna. Tieto bunky slúžia k ostrému videniu za svetla a dokážu rozoznať farby. Existujú tri druhy čapíkov: S, M a L. Každý druh má inú citlivosť na rôznu vlnovú dĺžku viditeľného spektra (červená, zelená, modrá). [33]
- *Tyčinka* - je tiež ako čapík, bunka reagujúca na svetelný podnet. Na sietnici sa ich nachádza oveľa viac ako čapíkov, približne až 130 miliónov. Slúžia len na rozpoznávanie tmy a svetla, ich využite je hlavne za slabších svetelných podmienok. [33]
- *Slepá škvrna* (optický disk) - je to malá plocha približne oválneho tvaru nachádzajúca sa na pozadí oka. Vystupuje cez ňu zrkový nerv, do ktorého sa zbierajú všetky nervové vlákna. Nie sú v nej prítomné žiadne svetlocitlivé bunky, takže neumožňuje videnie. Preto sa nazýva slepou škvrnou.

- *Žltá škvrna* (macula lutea) - táto oblasť má jemne žltozelenú farbu. Je to miesto najostrejšieho videnia na sietnici, hlavne kvôli vysokej hustote čapíkov. Nachádza sa na zadnej strane sietnice, a to priamo oproti zornici. Jej priemer je približne 5 mm. Miesto s najhustejšou koncentráciou čapíkov v žltej škvrne sa nazýva foveola. V tomto mieste sú fotoreceptory tak nahusto pri sebe, že nervované bunky a cievy sú vytlačené na okraj. To znamená že sietnica je v tomto mieste veľmi tenká. Detailné zobrazenie ďalších častí, z ktorých sa žltá škvrna skladá, je zobrazené na obrázku 3.3. [33]
- *Fovea* (fovea centralis) je oblasť nachádzajúca sa v centre makuly s veľkosťou asi 1,5 mm. Na tejto ploche sú zastúpené iba čapíky. [33]
- *Foveola* je to veľmi malá jamka nachádzajúca sa v centre fovey s priemerom asi 300-350 μm . Nie sú tu žiadne sietnicové kapiláry. Je to dôležitý orientačný bod, ktorý označuje centrum makuly.[33]
- *Vrstvy sietnice* je možné vidieť na histologickom reze sietnicou. Tieto vrstvy sú nasledovné (od vnútra) : vnútorná membrána, vrstva nervových buniek, vrstva gangliových buniek, vnútorná plexiformná vrstva, vnútorná jadrová vrstva, vonkajšia plexiformná vrstva, vonkajšia jadrová vrstva, vonkajšia limitujúca membrána, tyčinky a čapíky, sietnicový pigmentový epitel a jeho membrána (Bruchova). Zobrazenie týchto vrstiev je na obrázku 3.4. [33]



Obr. 3.4: Vrstvy sietnice: 1 - pigmentový epitel a Bruchova membrána, 2 - tyčinky a čapíky, 2a - čapíky, 2b - tyčinky, 3 - vonkajšia limitujúca membrána, 4 - vonkajšia jadrová vrstva, 5 - vonkajšia plexiformná vrstva, 6 - vnútorná jadrová vrstva, 7 - vnútorná plexiformná vrstva, 8 - vrstva gangliových buniek, 9 - vrstva nervových vlákien, 10 - vnútorná membrána. [25]

Kapitola 4

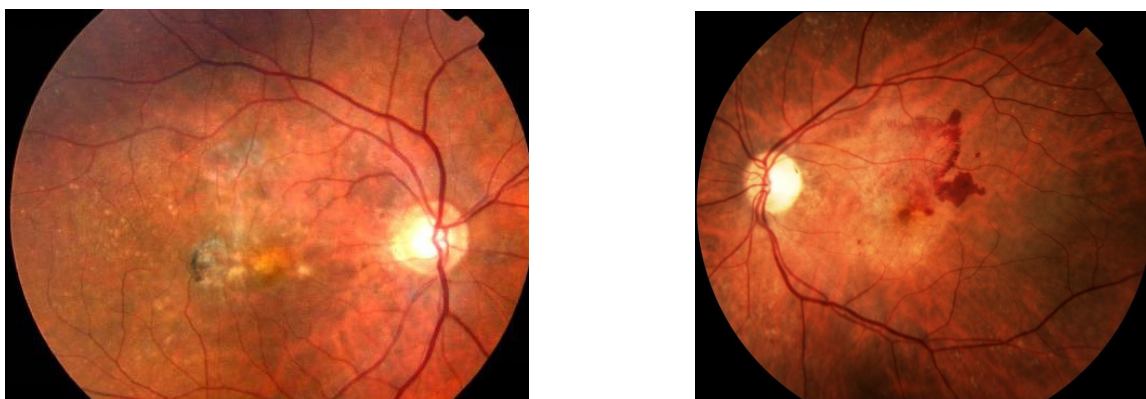
Choroby sietnice

Choroby sa nemusia týkať priamo len sietnice, ale taktiež aj ciev nachádzajúcich sa v sietnici. Tieto cievky sú zakončením cievneho systému človeka a môžeme ich na očnom pozadí veľmi dobre pozorovať. Dokonca je to jediné miesto v ľudskom tele, kde ich môžeme pozorovať priamo. V niektorých prípadoch nám môžu poskytnúť informácie o stave ciev aj v iných orgánoch. Veľa chorôb, ktoré postihujú celé telo, majú za následok poškodenie cievneho systému, tie vedú aj k chorobným zmenám na sietnici. Ak zaznamenáme poškodenie iba sietnicových ciev, tak budeme hovoriť o angiopatiách. Ak zaznamenáme poškodenie na sietnici, hlavne z dôvodu zlej výživy, hovoríme o retinopatii. V sietnici nie je vedené žiadne senzitivné nervové zásobovanie, čo má za následok že chorobné procesy v nej nespôsobujú žiadnu bolesť. Z tohto dôvodu prichádzajú pacienti až s vnímanými zmenami videnia. Rozdelenie možných ochorení sietnice:

- *Cievne zmeny (retinopatia)* - sú to nezápalové patologické zmeny ciev a sietnice. Hlavný dôvod ich vzniku je celkové ochorenia tela (napr. zvýšený krvný tlak, cukrovka, krvné choroby). V prípade, že sa na sietnici nenachádzajú ložiskové zmeny, ale sú postihnuté iba cievky, hovoríme o **angiopatii**. Poškodenie týchto ciev má za následok krvácanie do sklovca a sietnice. Toto krvácanie môže spôsobiť závažné poruchy videnia, v ťažkých prípadoch, až slepotu. Medzi tieto ochorenia patrí napríklad vekom podmienená makulárna degenerácia alebo diabetická retinopatia [33]
- *Dystroficko-degeneratívne zmeny* - sú to tiež nezápalové ochorenia, ktoré bývajú z veľkej väčšiny vrodené. Ich klasifikácia a delenie je veľmi zložitá, z dôvodu nemožnosti určenia, či sa jedná o poruchu sietnice alebo cievnatky. Tieto ochorenia spôsobujú zánik nervových prvkov sietnice a vznik atrofie. [33]
- *Zmeny zápalového charakteru (retinitida)* - sú to zápalové ochorenia sietnice. Hlavný dôvod ich vzniku býva poranenie oka alebo iné očné zápal (uveitida). Taktiež môže byť zápal spôsobený parazitmi. Najčastejšie vyskytujúce sa retinitidy je septický zápal sietnice, akútna nekróza sietnice a zápal sietnicových ciev. [33]
- *Zmeny podmienené nádorovým procesom*
- *Úrazy oka* - najčastejšie sa jedná o mechanické poškodenie, no existuje viac spôsobov úrazov: poškodenie žiarením, elektrickým prúdom, teplom alebo poleptaním. [33]

4.1 Vekom podmienená makulárna degenerácia

Táto choroba postihuje centrálnu časť sietnice (makulu), ktorá spôsobuje postupné ničenie buniek sietnice (viz obrázok 4.1). Jej dôsledkom je postupná strata centrálného videnia. Táto choroba je nevyliciteľná. Je to značný zásah do života človeka, postihnutý človek vidí pokrivené a deformované tvary predmetov, má problémy s čítaním či dokonca s rozpoznávaním ľudských tvárí. Taktiež samozrejme nemôže šoférovať automobil. Toto onemocnenie je hlavnou príčinou oslepnutia v rozvinutých krajinách u ľudí nad 65 rokov a až 30 % ľudí nad 75 rokov trpí touto chorobou. Keďže týmto onemocnením trpia hlavne starší ľudia a tým že naša populácia starne, tak sa s ňou budeme stretávať čoraz častejšie. Najväčšiu náchylnosť k tejto chorobe má kaukazská rasa. Neexistuje samostatný dôvod vzniku tohto ochorenia, ale je to skôr súhrn životosprávy a veku daného pacienta. Dôvody môžu byť rôzne, od zlého životného štýlu, obezity, fajčenia, genetickej a rasovej predispozície až po vystavovanie sa priamemu slnečnému žiareniu. Veľkú rolu hrá samozrejme aj vek. Najdôležitejšou časťou prevencie sú pravidelné prehliadky a samotná strava s výživovými doplnkami. Pre VPMD sú charakteristické tieto príznaky: drúzy, neovaskularizácia (tvorba nových ciev), krvácanie, kumulácia tekutiny a ďalšie. Drúzy sa veľmi líšia u každého pacienta, a to miestom aj ich vzhľadom. Sú to veľmi dobre viditeľné ložiská v sietnici, kde sa nazhromažďuje patologický materiál. Obsahujú hlavne neutrálne tuky a fosfolipidy ale aj veľa ďalších látok. Môžu byť buď mäkké alebo tvrdé. Mäkké drúzy sú väčšie ako tvrdé a nemajú jasne viditeľný okraj, teda často splývajú s pozadím sietnice. Tvrdé drúzy sú lepšie viditeľné hlavne kvôli výrazným okrajom. VPMD môže nadobúdať dve formy: vlhkú a suchú. Tieto formy sa môžu kombinovať v priebehu ochorenia. [16]



Obr. 4.1: Snímky sietnic pacientov trpiacich VPMD. [9, 10]

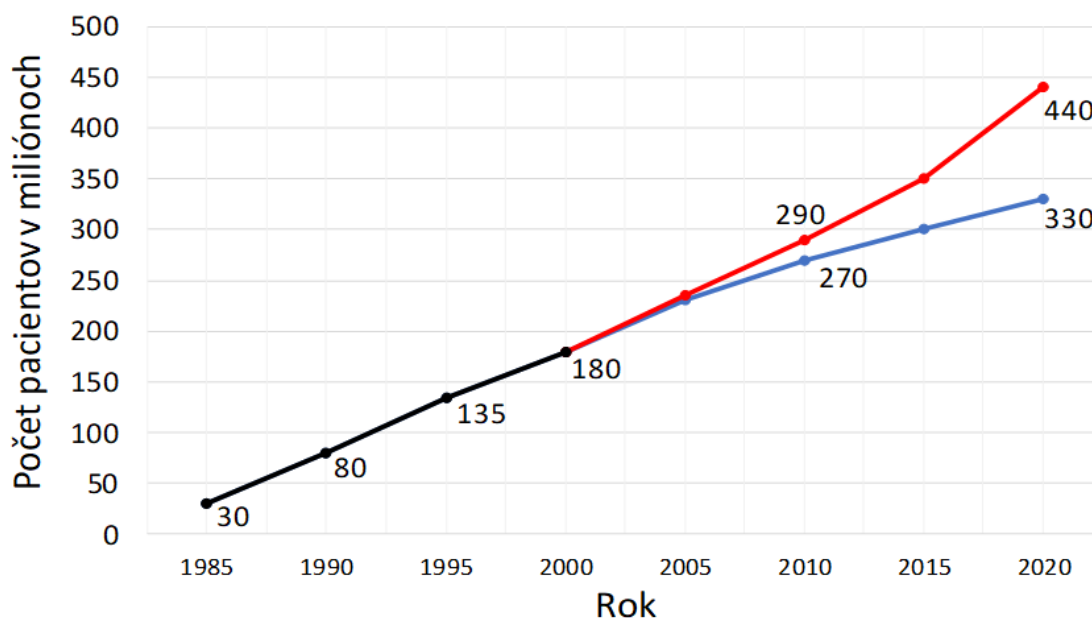
4.1.1 Formy VPMD

Viac častá forma tohto onemocnenia, ktorou trpí až približne 90 % pacientov, sa nazýva suchá forma degenerácie (atrofická, neexsudatívna). Táto forma má nasledovné prejavy: drúzy, stenčenie tkaniva sietnice, strata zmyslového a pigmentového epitelu. Pacient pociťuje pri začiatku tohto ochorenia hlavne stratu zrakovkej ostrosti pri čítaní. Na makule môžeme spozorovať tvrdé alebo mäkké drúzy. Menej častá forma tohto onemocnenia sa nazýva vlhká forma (exsudatívna, neovaskulárna), ale je oveľa viac závažnejšia, pretože dokáže postupovať veľmi rýchlo. Má odlišné prejavy od suchej formy: rast patologických ciev, zjazvenie a

krvácanie. Rozmazané videnie, deformácia ostrého videnia hlavne do blízka patria medzi najčastejšie symptómy. [16]

4.2 Diabetická retinopatia

Veľmi významným faktorom úspešnosti liečby je prevencia spojená s úzkou spoluprácou praktických lekárov, diabetológov, internistov a oftamológov. Taktiež je dôležité zvyšovanie povedomia pacientov o ich ochorení a možných limitoch ich liečby. Diabetická retinopatia (retinopathia diabetica) je mikrovaskulárne a neurodegeneratívne ochorenie a patrí medzi veľmi závažné ochorenia oka, bez skorej liečby často prechádza až do slepoty. Z tohto dôvodu je diabetická retinopatia uvádzaná za najčastejší dôvod slepoty v rozvinutých krajinách u ľudí medzi 20 - 64 rokmi. Len v Českej republike žije približne viac ako 600 000 ľudí s cukrovkou. Značná časť týchto pacientov, bude skôr či neskôr postihnutých DR. Graf 4.2 zobrazuje veľký nárast pacientov, trpiacich touto chorobou.



Obr. 4.2: Graf znázorňuje počet pacientov, ktorí trpia cukrovkou. Modrý graf je predpovedaný počet pacientov v roku 2000. Červený graf zobrazuje reálny počet pacientov. Takýto počet neodhľadovali ani tie najpesimistickejšie predpovede a tendencia nárastu je stále horšia. [15]

DR je dôsledkom metabolických porúch ľudí trpiacich cukrovkou 1. a 2. typu. Neskoro alebo vôbec neliečená DR, je u ľudí trpiacich cukrovkou príčinou až 25-krát vyššej pravdepodobnosti oslepnutia, v porovnaní s ľuďmi, ktorí netrpia cukrovkou. Príznaky sú pri oboch druhoch cukrovky podobné, no pravdepodobnosť ďalšieho vývinu DR je rôzna. Pri 1. type cukrovky v čase jej diagnostikovania, DR ešte nie je väčšinou vyvinutá. No percento pacientov s DR veľmi prudko narastá, po 15 rokoch ňou trpí až 98 % pacientov. Pri 2. type býva väčšinou DR už prítomná v dobe diagnostiky cukrovky. Počet pacientov s DR nestúpa až tak dramaticky ako je to u cukrovky 1. type. Po 15 rokoch od diagnostiky trpí DR od 58 do 85 % pacientov (horná hranica platí pre pacientov inzulínovo závislých). Diabetické zmeny sa prejavujú na sietnici, až po niekoľkých rokoch od začiatku ochorenia. V prípade

že nie je postihnutá foveola diabetickými zmenami aj v pokročilejšom štádiu DR, pacient nemá možnosť spozorovať žiadne príznaky. Väčšinou sú bezbolestné a nijako neovplyvňujú kvalitu života. V tomto štádiu, keď pacient veľmi často necíti žiadne subjektívne problémy, by mal byť už liečený. Následná strata zraku sa môže objaviť veľmi rýchlo. Približne až 88 % prípadom s ťažkým zrakovým postihnutím v dôsledku DR, by bolo možné predísť včasnou liečbou. **Medzi hlavné rizikové faktory** pre vznik DR patria [30]:

- *Dĺžka ochorenia* - je najdôležitejší faktor pri diagnostike DR. Napríklad ak sa diabetes zaznamená pred 30. rokom života, pravdepodobnosť DR po 10 rokoch je asi 50 %, po 30 rokoch 90 %. Z tohto dôvodu sú dôležité pravidelné vyšetrenia pacientov s diagnostikovaným diabetom. [13]
- *Liečenie ochorenia* - správne liečenie diabetu nie je prevenciou vzniku DR, ale môže oddialiť jej vznik. [13]
- *Tehotenstvo* - DR sa vyvinie u tehotných žien s pravdepodobnosťou približne až 10 %. U približne 4 % tehotných žien, neproliferatívna forma prejde do proliferatívnej formy. [13]
- *Zvýšený krvný tlak, obezita a anémia*
- *Fajčenie* - podľa štúdie[12], u fajčiarov s diagnostikovanou cukrovkou 1. typu je pravdepodobnosť DR a PDR značne vyššia, ako pri pacientoch ktorí nefajčia. Pri 2. type cukrovky je trend presne opačný. Pacienti, ktorí fajčia, majú nižšiu pravdepodobnosť získania DR a tiež aj PDR.

Na základe závažnosti zmien a prítomnosti retinálnych neovaskularizácií sa DR delí na **neproliferatívnu diabetickú retinopatiu**(NPDR) a **proliferatívnu diabetickú retinopatiu**(PDR). Prehľadný súhrn určenia závažnosti DR je zobrazený v tabuľke 4.1 [13]

4.2.1 Neproliferatívna diabetická retinopatia

Neproliferatívna diabetická retinopatia sa vyznačuje tým, že sú prítomné iba interetinálne mikrovaskulárne zmeny. Medzi tieto zmeny patria: MA, hemoragie, tvrdé a mäkké exsudáty, IRMA, omega kľučky a koralovitý vzhľad žíl. Ďalej sa rozdeľuje na tri skupiny, podľa závažnosti a rozšírenia príznakov na sietnici nasledovne:

- Pre **počiatočnú fázu NPDR**(4 - 0 - 0) je typický výskyt malých kapilárnych mikroaneuryziem, ktoré sa nachádzajú v okolí fovey. Okrem mikroaneuryziem môžeme spozorovať tvrdé exsudáty, hemorágie či dilatáciu žíl.
- V **stredne pokročilej NPDR**(4 - 1 - 0) sú rovnaké prejavy ako v začiatkovej fáze, no prejavy sa vyskytujú už na celej sietnici a vo väčšom počte, navyše sa ešte pridáva flebopatia (nepravidelne presvitajúce cievy) a mäkké exsudáty, ktoré sú charakteristické pre pokročilú fázu NPDR.
- Pri **ťažkej NPDR**(4 - 2 - 1) je rozsah poškodenia oveľa masívnejší po celej sietnici a začínajú sa objavovať IRMA. Pacient s vysokou pravdepodobnosťou prechodu do PDR.
- **Veľmi ťažká NPDR** splňuje aspoň dve kritéria z pravidla 4-2-1. [13, 25]

Čísla v zátvorkách vyjadrujú počet kvadrantov, v ktorých boli nájdené klinické prejavy uzáverov kapilár: hemorágie a mikroaneurizmy - flebopatie(segmentácia ciev) - IRMA.

4.2.2 Proliferatívna diabetická retinopatia

Táto forma DR sa prejaví u 5 % až 10 % pacientov s diagnostikovaným diabetom. Typickým prejavom je tvorba nových ciev (neovaskularizácia) a fibrózneho tkaniva na povrchu sietnice. Hoci aj iné spomínané cievne zmeny (IRMA) sú spôsobené proliferáciou, no za PDR sa považuje stav, pri ktorom novovzniknuté cievy či fibrózne tkanivo proliferujú zo sietnice alebo z terča zrakového nervu a následne sa šíria po vnútornom povrchu sietnice. Strata zraku pri PDR môže byť spôsobená aj trakčným odlúpnutím sietnice alebo krvácaním do sklovca. Novovzniknuté cievy sa rozširujú po celom povrchu sietnice, tieto cievy sú náchylné k prasknutiu pri pohybe sklovca. Prasknutia ciev následne spôsobujú hemorágie, ktoré môžu spôsobiť výpadok zorného poľa, prípadne stratu zraku. Pacienti vnímajú tieto hemorágie ako plávajúce škvrny v zrakovom poli. PDR sa ďalej podľa rozsahu a závažnosti príznakov rozdeľuje na začínajúcu PDR, vysoko rizikovú PDR a pokročilú PDR s komplikáciami. [13]

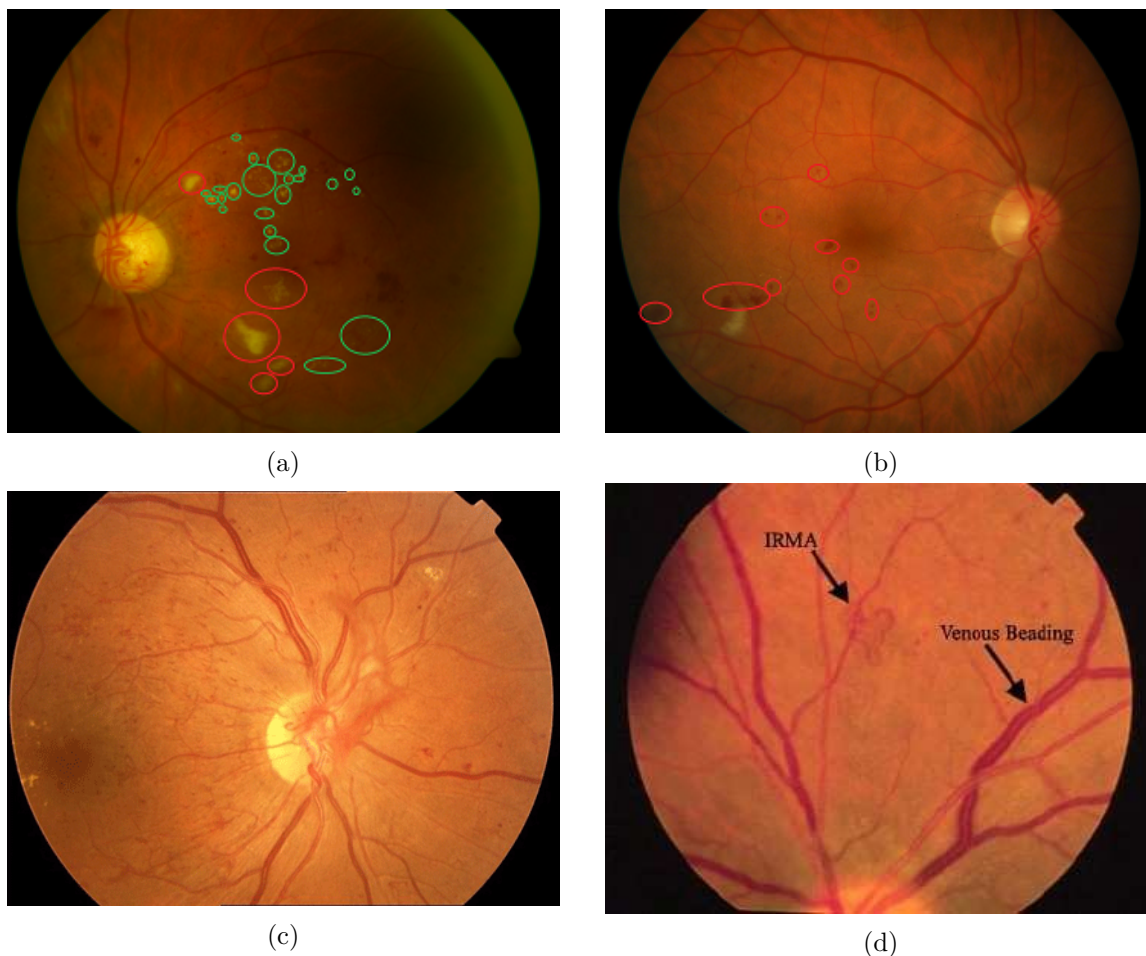
Tabuľka 4.1: Súhrnná klasifikácia DR. [13]

Stupeň DR	Nález
Neproliferatívna DR	
mierna NPDR	MA, tvrdé exsudáty, hemorágie
stredná NPDR	mierna NPDR + vatovité ložiská + flebopatia
ťažká NPDR	prítomnosť aspoň jedného z týchto prejavov: MA a hemorágie v 4 kvadrantoch / segmentácia ciev v 2 kvadrantoch / stredná IRMA v 1 kvadrante
veľmi ťažká NPDR	prítomnosť aspoň dvoch príznakov z pravidla 4-2-1
Proliferatívna DR	
PDR bez vysokého rizika	preretinálne krvácanie / fibrózna proliferácia / neovaskularizácia
PDR vysoko riziková	rozsiahla neovaskularizácia na papile (NVD) / NVD + preretinálne krvácanie / NVE + preretinálne krvácanie
pokročilá PDR s komplikáciami	odlúpnutie sietnice vrátane makuly / nemožnosť vyšetrenia kvôli veľkému krvácaniu do sklovca

4.2.3 Prejavy DR

Prejavy DR sú veľmi individuálne a každý pacient má iné prejavy. Zvyčajne platí, že čím je lézia bližšie makuly, tým pacient pociťuje závažnejšie poruchy videnia. Najčastejšie prejavy (viz obrázok 4.3) budú následne detailne opísané:

- *Tvrde exsudáty* - sú svetložlté tukovité ložiská na zadnej strane oka. Sú zložené z tukov a bielkovín. Vznikajú dôsledkom presakovania krvnej plazmy z vlásočnic a MA. Počas ochorenia môžu meniť svoju veľkosť, no spravidla sa zväčšujú. Ak sa tvrdé exsudáty nachádzajú v centre fovey, tak majú za následok nezvratné poškodenie sietnice a stratu zraku. Môžu nadobúdať rôzne tvary: malé, väčšie, hrudkovité alebo veľké flaky. [26]



Obr. 4.3: (a) Tvrdé exsudáty(zelené) a mäkké exsudáty(červené). (b) Hemorágie. (c) Neovaskularizácia na sietnici. [32] (d) IRMA a dilatácia žíl. [31]

- *Mäkké exsudáty* - alebo aj vatovité ložiská, sú žlto-biele chumáčiky vaty, bez výrazného ohraničenia, občas sú ohraničené mikroaneurizmami. Vznikajú v dôsledku infarktov. Nachádzajú sa v povrchovej vrstve sietnice, vo vrstve nervových vlákien. Nespôsobujú výrazné zrakové postihnutie, no v niektorých prípadoch môžu pacienti vnímať škvrny v zornom poli, ktoré väčšinou miznú po 5 až 7 týždňoch. Po nájdení mäkkých exsudátov u pacienta, je potrebné vykonať celkové vyšetrenie, nakoľko sú dôsledkom nejakého závažného systémového ochorenia, najčastejšie práve DR. [26]
- *Retinálne hemorágie* - vznikajú pri narušení stien kapilár alebo mikroaneurizmiem. Občas majú hemorágie stred zložený z malého vatového ložiska. Pri vyšetrení fluorescenčnou angiografiou zabraňujú fluorescencií, vďaka tomu ich môžeme odlišiť od MA. Na základe ich tvaru a veľkosti sa delia na bodkované, plamienkovité a striekancovité. Bodkované sú väčšinou malé a nachádzajú sa v stredných vrstvách sietnice. Môžeme ich často spozorovať spoločne s MA a najčastejšie sa nachádzajú v okolí makuly. Plamienkovité sú o niečo väčšie a nachádzajú sa v povrchovej vrstve nervových vlákien. Ich výskyt nie je obvyklý pri DR. Striekancovité hemorágie sa vyskytujú v strednej vrstve a sú z nich najväčšie. [26]

- *Mikroaneurizmy (MA)* - sú väčšinou prvým viditeľným nálezom u pacientov. Majú tvar malých červených bodiek o veľkosti približne 15-60 mikrometrov. Sú to kapilárne dilatácie (rozšírenia) v stredných vrstvách sietnice. Ich vznik je podmienený odumieraním pericytov, ktorých absencia vedie k oslabeniu stien vlásočníc. Samotné nepredstavujú závažnú patológiu, no s ich narastajúcim počtom sa objavujú ďalšie mikrovaskulárne zmeny. Prevažne sa nachádzajú na zadnej časti oka. Počas ochorenia môžu zanikať a opäť vznikať. Na snímkach sa javia ako červené bodky, ťažko rozoznateľné od hemoragií, no pri použití fluorescenčnej angiografie mikroaneurizmy jasne svietia. Pri tomto vyšetrení ich môžeme spozorovať oveľa viac ako pomocou oftalmologického vyšetrenia. [26]
- *Žilné abnormality* - patria medzi ne: dilatácia žíl, omega kľučka, IRMA a koralovitý vzhľad žíl. Dilatácia žíl je vlastne ich zhrubnutie z dôvodu slabšej pevnosti cievnych stien. Radí sa k prvým príznakom DR. [26]
- *Interretinálna mikrovaskulárna abnormalita (IRMA)* - sú dilatované kapiláry. Sú znakom ťažkej NPDR s veľkou pravdepodobnosťou prechodu do proliferatívnej DR. Dajú sa často spozorovať s mäkkými exsudátmi. Dávnejšie bola považovaná za jemnú interretinálnu NV. Pri fluorescenčnej angiografii na rozdiel od NV nepresakujú. [26]
- *Neovaskularizácia (NV)* - je rast nových jemných ciev, ktorý je špecifický pre sietnicu. Sietnica je jediný orgán, kde sa vytvárajú neovaskularizácie pri postihnutí diabetickou mikroangiopatiou. Tieto nové cievy vznikajú proliferáciou zo sietnicových žíl, hlavne v oblasti zadnej časti oka. Sú pomerne ťažko odlíšiteľné od IRMA a môžu nadobúdať rôzne tvary, slučky, trsy až po rozvetvené kríky. Na druhú stranu však môžu pripomínať obyčajné sietnicové cievy či IRMA. Rýchlosť rastu NV je veľmi premenlivá, v niektorých prípadoch môže zostať stabilná po niekoľko mesiacov, inokedy zas úplne opačne. V ojedinelých prípadoch môžu dokonca úplne zmiznúť. Na základe ich polohy rozlišujeme **sietnicové neovaskularizácie (NVS)** a **neovaskularizácie zrkovitého disku (NVD)**. O NVD hovoríme ak je NV na papile zrkovitého nerv, alebo ak je na sietnici, ale vo vzdialenosti maximálne priemeru zrkovitého terču. NVS je príčinou najväčších komplikácií spojených s DR: Krvácanie do sklovca a odlúpnutie sietnice. Pri vyšetrení fluorescenčnou angiografiou je možné spozorovať rýchlo sa plniace a presakujúce aktívne NVS. Hlavné nebezpečenstvo spojené s NVS je jemnosť týchto žíl a ich následné praskanie, taktiež aj vzniknutá trakcia spôsobená vzniknutým tkanivom, ktorá môže spôsobiť trakčné odlúpnutie sietnice. Neovaskularizácia zrkovitého terču je príznakom ešte ťažšej ischemie sietnice. Novovzniknuté cievy nevychádzajú len z retinálneho, ale aj z chorioidálneho riečiska. Pri neistote diagnostiky sa používa rovnako ako pri NVS fluorescenčná angiografia. [26]

4.2.4 Diabetes mellitus

Diabetes mellitus, u nás známy aj ako cukrovka je ochorenie, pri ktorom ľudské telo nepracuje správne s glukózou. Glukóza sa radí medzi jednoduché cukry a je obsiahnutá hlavne v ovocí. V krvi, zo všetkých druhov cukrov, sa nachádza najviac práve glukóza. Pre bunky v tele, je to najdôležitejší zdroj energie a život bez nej nie je možný. Krv u zdravého jedinca obsahuje pomerne stabilné množstvá glukózy, táto hladina glukózy v krvi sa nazýva *glykémia*. Glukóza sa dostáva do krvi dvoma možnými spôsobmi.

Prvým a hlavným zdrojom glukózy je jedlo. Veľká časť našej potravy ju v nejakej podobe obsahuje. Môže ju obsahovať priamo, alebo v zložitejších látkach, ktoré musí telo spraco-

vať a následne z nich uvoľniť glukózu. Glukóza sa nachádza napríklad v rožkoch, chlebe, zemiakoch, ovocí, mlieku a veľmi veľa ďalších potravinách.

Druhým zdrojom glukózy v krvi je jej uvoľňovanie z pečene, kde sa ukladá nadbytočná glukóza, v podobe glykogénu. Súhru ukladania a uvoľňovania glykogénu z pečene riadi súhrn hormónov, predovšetkým však inzulín, glukagon a adrenalín. Inzulín má ešte aj funkciu otvorenia buniek, aby mohli prijať glukózu, preto sa inzulín tvorí stále. Pri cukrovke táto spolupráca nefunguje a nastáva stúpanie glykémie.

Cukrovku delíme na viac druhov, no najviac sú zastúpené iba dva druhy. V oboch prípadoch je problematický nárast glykémie, avšak z rôznych dôvodov. [27]

Cukrovka 1. typu vzniká z dôvodu, že bunky v pankrease prestávajú vyrábať inzulín. To znamená, že ak telo prijme potravu a vstrebe glukózu do krvi, glykémia stúpa, no neprichádza žiadny povel na ukladanie prebytočnej glukózy. Keďže chýba inzulín, bunky sú uzatvorené a neprijímajú žiadnu glukózu, hoci je jej v krvi veľký nadbytok. Tento veľmi zlý stav je možné liečiť len doživotným podávaním inzulínu. Tento druh cukrovky vzniká väčšinou do 40. roku života, a jej vznik sa nanešťastie nedá nijako ovplyvniť.

Cukrovka 2. typu má taktiež za následok zvýšenú glykémiu, avšak z dôvodu, že telo nevie na inzulín správne reagovať a postupne stráca preň vnímavosť. Tento druh cukrovky súvisí vo veľkej miere so stravou a životným štýlom pacienta. Jeho liečba pozostáva zo začiatku primárne z diéty. Pomerne často veľké schudnutie vylieči tento druh diabetu. [27]

4.2.5 Príčina DR

Úplne presná príčina mikrovaskulárnych zmien pri cukrovke nie je doteraz známa. Základom pre vznik DR je poškodenie malých sietnicových ciev a kapilár (vlásočnice). K zmenám v štruktúrach a funkciách cievnych stien vlásočnic dochádza kvôli hyperglykémii. Hyperglykémia je stav, kedy sa hladina glukózy v krvi zvýši nad určitú úroveň. To môže byť spôsobné zlou diétou, liečbou, pridruženým ochorením alebo nedostatočným pohybom. Tieto zmeny v cievach majú za následok reťazec ďalších zmien. [26]

4.2.6 Liečba DR

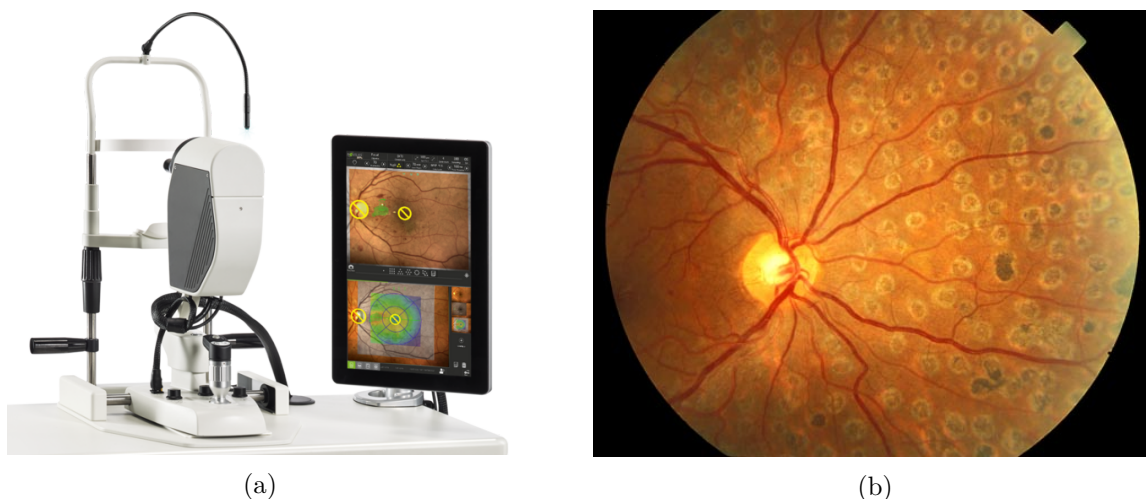
Spolahlivá **konzervatívna liečba DR** v podobe „väzivoprotektívnych“ liekov, aj napriek nemalým investíciám, stále neexistuje. Rôzne lieky s perspektívou pri liečbe DR sú stále vo vývoji. Momentálne ostáva pacientom prísne dodržiavať diétu a snažiť sa o čo najväčšiu kompenzáciu hypertenzie a lipidémie.

Na liečenie príznakov DR sa používa najčastejšie **laserová fotokoagulačná liečba**, ktorá prináša výsledky pri základných prejavoch DR: makulárny edém a neovaskularizácia. Avšak presné fungovanie účinkov tejto liečby nie je jasné. Je ale evidentné že značne znižuje riziko straty videnia a zvyšuje možnosť udržania alebo až zlepšenia ostrosti zraku. Bežne sa využíva už od 70. rokov. Laser vydáva intenzívne svetelné žiarenie, ktoré je absorbované pigmentovými bunkami a je premenené na teplo. Pri použití lasera na makulárny edém, zastavuje presakovanie MA ich stenami. Najpravdepodobnejším účinkom tejto liečby je deštrukcia veľkej časti ischemickej sietnice fotokoaguláciou. Cieľom laserovej fotokoagulačnej liečby je ústup neovaskularizácií a taktiež, aj prevencia ich ďalšieho vzniku. Laserový lúč je privedený na sietnicu, pomocou kontaktnej šošovky alebo biomikroskopickej bezkontaktnej šošovky. [30]

Argónový laser (vlnová dĺžka asi 514 nm) je najpoužívanejším zdrojom žiarenia, no existuje veľa alternatív: červený, infračervený a zelený diódový laser a ďalšie. Retina laser je zobrazený na obrázku 4.4a. Zelená a žltá farba laserového žiarenia je vhodná k zničeniu

NV. No v praxi nehrá farba veľkú rolu pri výbere lasera. Rozdiely medzi rôznymi farebnými lasermi nie sú podstatné. To znamená, že pri voľbe lasera skôr záleží na jeho dostupnosti na jednotlivých pracoviskách. Existuje viacero spôsobov liečby, no základné pravidla sú: liečbu je dôležité zahájiť včas, liečbu prevádzať opatrne s čo najmenším poškodením sietnice, liečbu prípadne doplňovať pri postupe ochorenia a včas indikovať chirurgickú liečbu. Snímka sietnice po aplikovaní fotokoagulačnej liečby je zobrazená na obrázku 4.4b.

Pri neúspechu laserovej liečby alebo jej neskorom začatí, keď je DR už v závažnom štádiu, nasleduje **chirurgická liečba**. V dôsledku NV môže nastať krvácanie do sklovca, prípadne do priestoru medzi sklovcom a sietnicou. Toto krvácanie je možné odstrániť pomocou mikrochirurgickej operácie nazývanej vitrektómia. [30, 25]



Obr. 4.4: (a) Retina laser. [6] (b) Snímka oka po použití retina lasera. [7]

4.3 Vyšetrenie sietnice

Najbežnejší spôsob vyšetrenia morfológických zmien sietnice oka je oftalmoskopia, tá môže byť priama alebo nepriama. Okrem oftalmoskopie je možné podľa potrieb vyšetrenia použiť optickú koherentnú tomografiu alebo vyšetrenie trojbodovým zrkadlom. Vela informácií o zmenách na sietnici môžeme taktiež získať pomocou farebnej fotografie, ktorú získame pomocou fundus kamery. Pri vyšetrení ciev sietnice sa využíva fluorescenčná angiografia. [26]

4.3.1 Oftalmoskopia

Táto vyšetrovacia metóda nám dáva možnosť vyšetriť očné pozadie, konkrétne sietnicu, miesto vstupu očného nervu a cievnatky. Pri tomto vyšetrení sa používa lekárska pomôcka, nazývaná oftalmoskop. Oftalmoskop pomocou nasmerovania svetelného lúču do oka, umožňuje jeho vyšetrenie. Oftalmoskopia sa rozdeľuje na: [26]

- *Priama oftalmoskopia* je metóda vyšetrenia, pri ktorej vyšetrujúci lekár pomocou priameho oftalmoskopu (viz obrázok 4.5a) pozerá pacientovi priamo do oka. Svetelný zdroj je zabudovaný v tomto prístroji. Svetlo, ktoré sa odráža od vyšetrovaného očného pozadia prechádza tou istou cestou späť, do oka vyšetrujúceho. Výsledný obraz

je priamy, a asi 16-krát zväčšený. Toto vyšetrenie je problematické, ak vyšetrujúci alebo pacient trpia nejakou refrakčnou vadou. Hlavná výhoda tohto vyšetrenia je silné zväčšenie, ktoré umožňuje detailné vyšetrenie sietnice. Nevýhoda spočíva v tom, že je možné vidieť len malú plochu povrchu sietnice. V dnešnej dobe sa používajú výlučne iba elektrické oftalmoskopy. [33, 26]

- *Nepriama oftalmoskopia* je zložitejšia ako priama, a vyžaduje si cvik a skúsenosti vyšetrujúceho lekára. Očné pozadie vidíme obrátené, 4-krát zväčšené a jasnejšie ako pri priamej oftalmoskopií. Kvôli tomuto menšiemu zväčšeniu je možné prehliadnúť väčšiu oblasť očného pozadia. Vyšetrujúci lekár má umiestnený prístroj so zdrojom svetla (viz obrázok 4.5b) na čele a približne 6 cm pred vyšetrovaným okom drží spojku. Druhou rukou drží pacientovi otvorené oko. [33, 26]



Obr. 4.5: (a) Priamy oftalmoskop.[11] (b) Nepriamy oftalmoskop. [4]

4.3.2 Štrbinová lampa

Štrbinová lampa (viz obrázok 4.6a) je optická zostava, primárne slúžiaca na vyšetrenie prednej časti oka. Úzky lúč svetla vychádza z prístroja umožňujúci veľmi detailné pozorovanie práve prednej časti oka. No s použitím špeciálnych šošoviek a rozšírením pacientových zreničiek, je možné vyšetrenie aj očného pozadia. Skladá sa z dvoch ramien. Na jednom je umiestnený binokulárny biomikroskop, na druhom sa nachádza svetelný zdroj. Rameno so svetelným zdrojom je pohyblivé, čo umožňuje zmenu uhla osvetlenia. Taktiež je možné dať pred zdroj svetla rôzne farebné filtre, z ktorých je najpoužívanejší modrý kobaltový filter. Ten sa používa pri pozorovaní s využitím fluorescinu. [33]

4.3.3 Digitálna fundus kamera

Vďaka čoraz väčšej dostupnosti a kvalite digitálnych fotoaparátov a adaptérov, je využívanie digitálnej fotografie oveľa častejšie. Bežne sa používajú kamery s rozsahom od 35° do 50°. Najčastejšie sa používajú na detekciu príznakov DR, zeleného zákalu alebo VPMD. Následná detekcia rôznych príznakov ochorení z fotografie, veľmi závisí na jej kvalite. Digitálna fundus kamera (viz obrázok 4.6b) slúži predovšetkým k tvorbe snímok zadného pólu

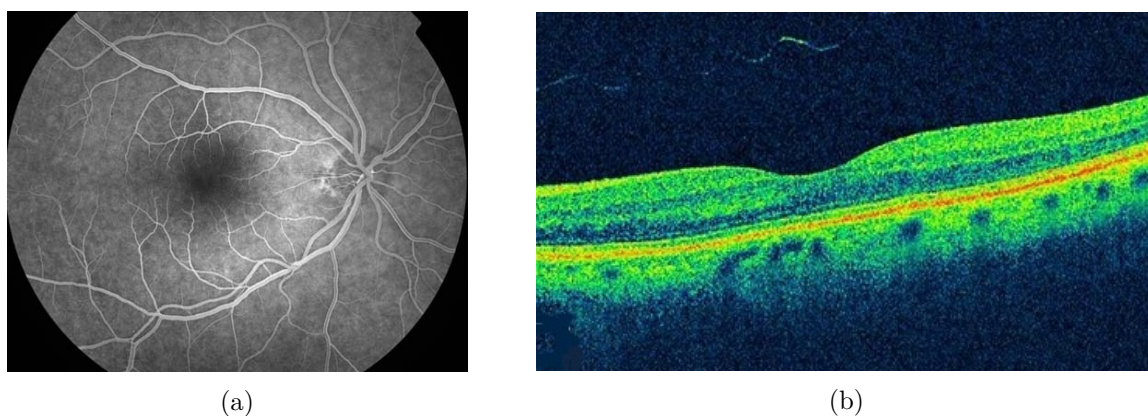
oka, teda sklovca, sietnice a terču zrakového nervu. Tieto snímky pomáhajú odhaliť zmeny alebo postupovanie ochorení. Taktiež sa používa na zachytenie obrazu pri vyšetrení ciev sietnice fluorescenčnou angiografiou. [33, 22]



Obr. 4.6: (a) Štrbinová lampa. [8] (b) Fundus kamera. [1]

4.3.4 Fluorescenčná angiografia

Fluorescenčná angiografia (FAG) značne prispieva k lepšej diagnostike a monitorovaniu ochorení na sietnici. V počiatkoch bola využívaná hlavne na laboratórne a klinické testy, až neskôr sa začala využívať k vyšetrovaniu chorôb sietnice. Dôležitú úlohu pri nej má farbivo, sodná soľ fluoresceínu, ktoré je rozpustná vo vode. Ak je excitovaná (podráždená) svetlom s vlnovou dĺžkou od 465 po 490 nm, emituje žltozelené svetlo (520-530 nm). Farbivo preniká do ciev vo vnútri oka, a následne je obraz cievneho systému oka, zachytený na fotografii. V prípade DR, nám pomáha FAG rozlíšiť medzi dvoma veľmi podobnými prejavmi DR: MA a hemoragiami. Za približne 4 minúty, od použitia roztoku, je možné vidieť fluoresceín v celom telesnom krvnom obeh, vrátane oblasti sietnice (viz obrázok 4.7a). [33, 25]



Obr. 4.7: (a) Fluorescenčná angiografia. [24] (b) Výsledok OCT skenu. [2]

4.3.5 Optická koherentná tomografia

Optická koherentná tomografia (OCT) je rýchla, neinvazívna a bezkontaktná vyšetrovacia metóda, pri ktorej je možné pozorovať priečny prierez biologickým tkanivom (viz obrázok 4.7b). Pri tejto metóde sa používa infračervené žiarenie. Využíva sa pri vyšetrení sietnice a prednej časti oka. Tento prístroj tvorí štrbinová lampa so zabudovanou šošovkou s optickou mohutnosťou 78 dioptrií, zdroj infračerveného žiarenia, kamera citlivá na toto žiarenie, interferometer a monitory. Je vyžarované infračervené žiarenie s vlnovou dĺžkou 820 nm a zdrojom tohto žiarenia je superluminiscenčná dióda. Výsledný obraz je podobný histologickému rezu tkaniva a je zobrazený vo falošnej škále farieb. Oblasti s najvyššou reflektivitou sú biele a červené, a modrá a čierna predstavujú oblasti s najnižšou reflektivitou. Napríklad neovaskulárne membrány sú zafarbené na červeno. [33, 25, 22]

Kapitola 5

Spracovanie obrazu

Predchádzajúca kapitola nám poskytla informácie o tom, čo máme hľadať, a táto kapitola nám ukáže ako to spraviť. Myslím si, že téma spracovania obrazu hrá najväčšiu úlohu v tom, ako úspešne vyriešiť zadanie bakalárskej práce. V nasledujúcich podkapitolách budú opísané viaceré jednoduchšie ale aj zložitejšie metódy spracovania obrazu a počítačového videnia, ktoré môžu v konečnom dôsledku dopomôcť pri riešení problému.

5.1 Úprava jasů a kontrastu

V tejto podkapitole budú uvedené postupy používané na úpravu jasů a kontrastu obrazu, ktorých cieľom je zlepšiť ich výsledné vlastnosti.

5.1.1 Logaritmická transformácia

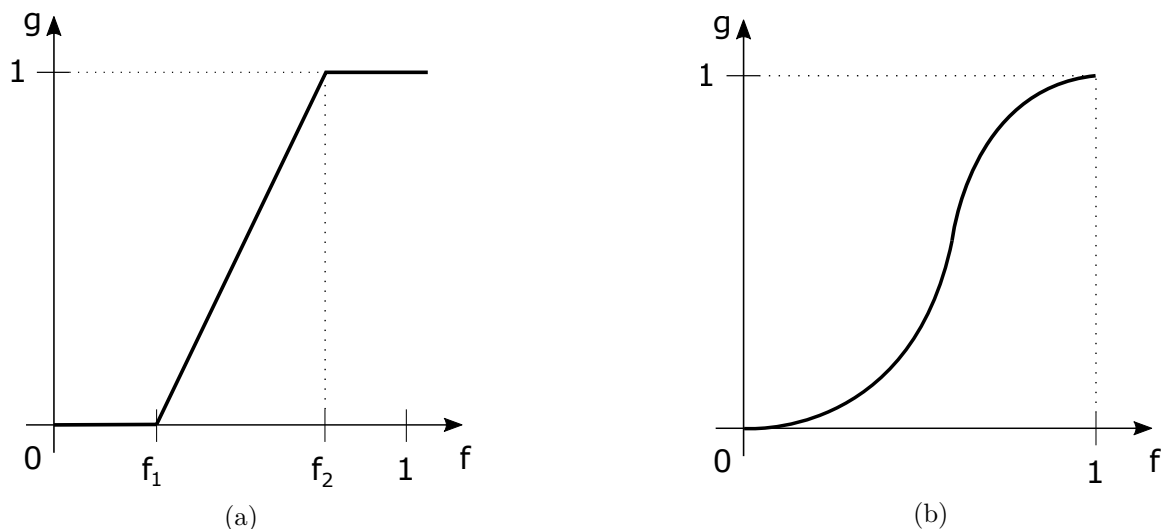
Logaritmická transformácia sa používa hlavne v prípade, ak pri výpočtoch vznikajú hodnoty v príliš veľkom rozsahu, ktorý nie sme schopní rozumne graficky reprezentovať na monitore. Takýto veľký rozsah hodnôt typicky vzniká po furiérovej transformácii, kde hodnoty pixelov môžu nadobúdať hodnoty od 0 až po 10^6 a viac. Počítanie s takýmito veľkými číslami nie je pre počítač problém, no zobrazenie takéhoto rozsahu pomocou lineárnej transformácie je veľmi nepresné. Výsledkom logaritmickej transformácie je zmenšenie rozsahu hodnôt, väčšinou do rozsahu 0 až 255. Je daná nasledujúcou rovnicou:

$$g = c \log(1 + f) \quad (5.1)$$

kde c je konštanta, ktorá slúži k normovaniu výsledku do zvoleného intervalu. Vypočíta sa na základe intervalu a maximálnej hodnoty vstupujúceho obrazu. Premenná f je vstupná hodnota a platí že $f \geq 0$. Hodnota g je výsledok transformácie. [14]

5.1.2 Roztiahnutie kontrastu

V situáciách, keď je obraz málo kontrastný, teda rozdiel medzi úrovňami jasů je pomerne malý, sa používa metóda roztiahnutia kontrastu. Malý kontrast môže byť spôsobený zlým osvetlením, zlým nastavením fotoaparátu ale aj inými problémami. Roztiahnutie kontrastu je proces, pri ktorom sa rozšíri rozsah intenzít jasů v obraze, tak že bude zaberat celý rozsah možného zobrazenia na monitore. Používa sa k tomu lineárna transformácia, pri ktorej sa môžu použiť rôzne prevodné krivky. Najčastejšie sa používa po častiach lineárna krivka (viz obrázok 5.1a) alebo nelineárna krivka (viz obrázok 5.1b). [14]



Obr. 5.1: Krivky používané pri rozťahnutí kontrastu: (a) po častiach lineárna krivka, (b) nelineárna krivka. [14]

5.1.3 Transformácia histogramu

Histogram zobrazuje počet jednotlivých úrovní jasu v danom obraze. Je to diskrétna funkcia (nespojité), kde na x-ovej osi sú znázornené konkrétne úrovne jasu, a na y-ovej osi je znázornená početnosť týchto úrovní jasu. Vo farebnom obraze bude odpovedať každej farebnej zložke práve jeden histogram.

Transformácia histogramu (Histogram Equalization) sa používa v prípade, keď sa zložky jasu v obraze vyskytujú nerovnomerne. V praxi sa používa nasledujúci prevodný vzťah, kde k -tu úroveň jasu získame:

$$g_k = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^k n_j \quad (5.2)$$

kde N je celkový počet pixelov nachádzajúcich sa v obraze a n_j je početnosť j -tej úrovne. Následne je potrebné výsledné úrovne jasu previesť späť do nami zvoleného intervalu hodnôt. [14]

5.2 Vyhladzovanie obrazu

Nasnímaný obraz nemusí byť negatívne ovplyvnený len malým kontrastom alebo nerovnomerným jasom, ale aj napríklad šumom. Existuje viac druhov šumu, ktorý môžeme pozorovať ako zrnenie v obraze. Je spôsobený hlavne zlým osvetlením pri fotografovaní a nevhodným nastavením fotoaparátu.

Vyhladzovanie obrazu sa používa k rozmazaniu obrazu a redukcii šumu. Rozmazanie sa používa na odstránenie veľmi malých detailov a zaplnenie malých medzier. Využíva sa k tomu filtrácia, ktorá zahŕňa vymezené okolie pomocou filtračnej masky, ktorá môže mať rôzne veľkosti, podľa toho, aké veľké okolie spracovávaného pixelu chceme zahrnúť. Najčastejšie sa používa veľkosť masky 3×3 . Metódy vyhladzovania sa líšia hlavne v koeficientoch použitých vo filtračnej maske. Na rôzne druhy šumu, je veľmi potrebné použiť správnu metódu vyhladzovania pre čo najlepší výsledok. [14]

5.2.1 Vychladzovanie priemerovaním (Averaging Filters)

Vychladzovanie priemerovaním je jeden z najjednoduchších postupov pri vyhladzovaní obrazu. Je to vlastne konvolúcia všetkých pixelov s normalizovanou maskou (viz obrázok 5.2). Každý pixel, ktorý je prekrytý filtračnou maskou, sa vynásobí s koeficientom v maske. Výsledná hodnota pixelu je súčet týchto hodnôt. [14]

$$\frac{1}{9} \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} \quad \frac{1}{16} \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline 2 & 4 & 2 \\ \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline \end{array}$$

(a) (b)

Obr. 5.2: Dve bežne využívané 3x3 vyhladzovacie masky. Konštanta pred maskou sa vypočíta tak, že sa číslo 1 vydolí súčtom všetkých koeficientov v maske. Na základe rôznych koeficientov v maske má vyhladzovanie rôzne výsledky. (a) V tejto maske má okolie spracovávaného pixelu rovnakú váhu ako samotný spracovávaný pixel. (b) V druhom prípade má najväčšiu váhu samotný spracovávaný pixel. [14]

5.2.2 Gaussovo vyhladzovanie (Gaussian Smoothing)

Gaussovo vyhladzovanie patrí medzi vyhladzovacie metódy na odstránenie šumu z obrazu. Taktiež využíva k filtrácii filtračnú masku, no s koeficientami, ktoré odpovedajú hodnotám vypočítaných Gaussovou funkciou. Koeficienty najbližšie k stredu masky majú najväčšiu hodnotu. Hodnoty koeficientov sa znižujú s ich narastajúcou vzdialenosťou od stredu. Táto metóda je veľmi efektívna pri odstraňovaní Gaussovského šumu. Gaussova funkcia v dvojrozmernom priestore je daná vzťahom:

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (5.3)$$

kde x a y sú súradnice pixelu, a σ je smerodajná odchýlka, ktorá určuje veľkosť masky. V prípade že σ je dostatočne malé, nie sú už ostatné hodnoty považované za významné. [14]

5.2.3 Mediánová filtrácia (Median Filtering)

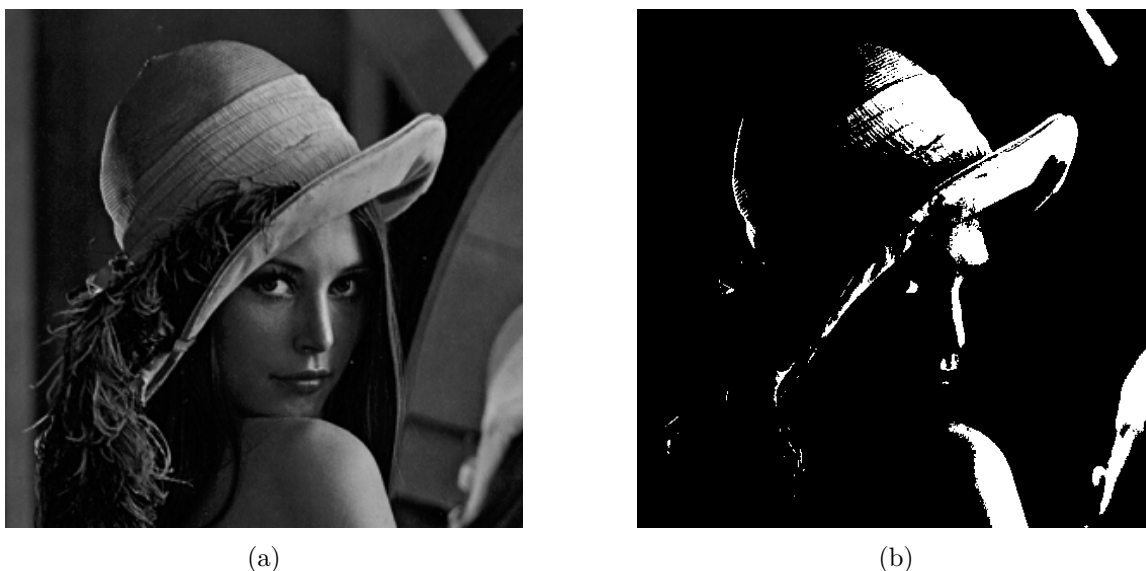
Mediánová filtrácia na rozdiel od prechádzajúcich spôsobov filtrácie nie je lineárna. Čo znamená, že nefunguje na princípe konvolúcie masky s pozadím, ale spracovávaný pixel bude mať výslednú hodnotu mediánu z pixelov prekrytých maskou. Táto metóda poskytuje veľmi dobré vlastnosti, napríklad pri redukcii šumu typu „Pepř a súľ“. [14]

5.3 Prahovanie

Prahovanie (thresholding) je jedna z najpoužívanejších metód na úpravu obrazov, pritom funguje na veľmi jednoduchom princípe. Prevádza obraz s viacerými úrovňami jasů na obraz,

ktorý bude obsahovať len dve úrovne jasu (čiernu a bielu). Obraz, ktorý obsahuje len čiernu a bielu farbu sa nazýva binárny. Táto metóda porovnáva intenzitu každého pixelu s prahovou hodnotou (prah). Ak je intenzita skúmaného pixelu menšia ako hodnota prahu, bude mať vo výslednom obraze hodnotu 0 (biela). V opačnom prípade, ak je hodnota intenzity väčšia ako hodnota prahu, tento pixel bude mať hodnotu 255 (čierna). Na obrázku 5.3b je znázornený príklad prahovania s globálnou prahovou hodnotou 127. Výsledok tejto metódy veľmi závisí od vhodne zvoleného prahu. V prípade, že obraz obsahuje časti s výrazne odlišným jasom, jedna hodnota prahu poskytuje veľmi zlé výsledky. Hodnotu prahu je možné nastaviť rôznymi spôsobmi, napríklad ručným nastavením jednej pevnej hodnoty, výberom z histogramu alebo automaticky. Následne sa prahovanie delí na základe použitia prahovej hodnoty na základné (globálne) a adaptívne (lokálne). Binárne prahovanie môžeme vyjadriť nasledujúcim vzťahom: [14, 17]

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{pre } f(x, y) \geq T \\ 0 & \text{pre } f(x, y) < T \end{cases} \quad (5.4)$$



Obr. 5.3: (a) Obrázok konvertovaný do odtieňov šedej. [5] (b) Obrázok po použití globálneho prahovania, s prahovou hodnotou jasu 127.

5.3.1 Globálne prahovanie

Pri globálnom prahovaní sa využíva jediná prahová hodnota, ktorá je zvolená, alebo vhodne automaticky vypočítaná už pred začatím prahovania. Táto prahová hodnota je použitá pre celý obraz a viac sa už nemení.

5.3.2 Lokálne prahovanie

Pri lokálnom prahovaní sa nepoužíva len jedna hodnota prahu na celý obraz, ale vypočítava sa pre každú oblasť zvlášť. Poskytuje oveľa lepšie výsledky ako globálne prahovanie pri obrazoch s rozdielnymi hodnotami jasu alebo nerovnomerným osvetlením v rôznych častiach

obrazu. Na základe toho, v akej časti obrazu sa vypočítava jedna hodnota prahu, sa lokálne prahovanie rozdeľuje:

- *Delenie obrazu* - pri tomto spôsobe sa obraz rozdelí na menšie neprekrývajúce sa obdĺžniky. Veľkosť týchto plôch by mala byť taká, že každá plocha bude obsahovať približne rovnakú úroveň jasů. Následne sa v každej z týchto plôch nájde ideálna hodnota prahu a prevedie sa prahovanie. Táto metóda funguje dobre v prípade, že objekt a pozadie sú zastúpené v dostatočne porovnateľnej miere. V prípade, že plocha bude obsahovať len objekt alebo len pozadie, tak táto metóda zlyháva. [14, 17]
- *Lokálne prahovanie na základe lokálnych vlastností* - je viac všeobecný prístup ako delenie obrazu. Veľký rozdiel je v tom, že sa prahová hodnota vypočítava pre každý bod obrazu zvlášť na základe určitých vlastností okolia tohto bodu. Táto metóda je značne výpočtovo zložitejšia ako predchádzajúca metóda. Patrí sem napríklad metóda adaptívneho prahovania (viz obrázok 5.4), ktorá môže byť rôzne upravená. [14, 17]

5.3.3 Automatické získanie optimálneho prahu

Automatické nájdenie prahu sa používa hlavne v prípade, keď je rozloženie jasů v obraze výrazné a histogram obrazu má dva značne výrazné vrcholy. Hodnoty jasů v týchto vrchoľoch predstavujú samotný objekt záujmu a pozadie. Môžeme využiť jednu z existujúcich automatických metód.

Prvá metóda je pomerne jednoduchá a funguje na princípe postupného hľadania prahu, ako priemer stredných hodnôt oblastí, ktoré odpovedajú objektu a pozadiu. Najskôr sa odhadne prah, obvykle je táto hodnota medzi minimálnou a maximálnou hodnotou jasů. Následne sa podľa prahu rozdelí na dve skupiny pixelov. V každej sa vypočíta priemerná hodnota jasů na základe ktorej sa vypočíta jej nová hodnota. Algoritmus takto pokračuje až pokiaľ rozdiel medzi týmito priemerami nie je dostatočne malý.

Druhá metóda automatického určenia prahu je **Otsuova metóda**. Tá na rozdiel od prvej spomínanej metódy, ako histogram využíva funkciu hustoty pravdepodobnosti. [14]

5.3.4 Prahovanie s distribúciou chyby

Je ďalšia metóda, ktorá sa používa v prípade, že chceme transformovať obraz na binárny a zároveň zachovať čo najviac z pôvodného obrazu. Najbežnejšie použitie tejto metódy je pri úprave obrazu pred tlačením alebo zobrazením obrazu na čiernobiely obrazovku. Princíp tejto metódy je taký, že sa pripočítava chyba medzi susednými pixelami (viz obrázok 5.5). Táto chyba je vypočítaná pre každý pixel a závisí na veľkosti jasů daného pixelu. Chyba každého pixelu sa následne pripočíta podľa nasledujúcej schémy, medzi susednými nespracovanými pixelami. Obraz sa začína spracúvať z ľavého horného rohu, a pokračuje smerom do pravého dolného rohu. Chyba pre každý pixel sa vypočíta podľa nasledujúcej rovnice: [14]

$$e(x, y) = f(x, y) - 255 * g(x, y) \quad (5.5)$$

5.4 Morfológické operácie

V matematickej morfológii sa zdôrazňuje úloha tvarov objektov v obraze. Vychádza z vlastností bodových množín, to znamená že sa obraz musí dať modelovať pomocou množín

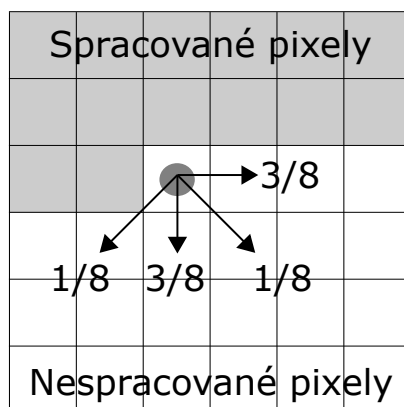


Obr. 5.4: (a) Algoritmus adaptívneho prahovania použitý na obrázok Lenny. (b) Adaptívne Gaussovo prahovanie. Rozdiel medzi týmito dvoma algoritmami je ten, že Gaussovo prahovanie využíva k výpočtu prahovej hodnoty okolie s hodnotami Gaussovskej funkcie.

súradníc bodov, ktoré patria nejakému objektu. Všetky tieto operácie pracujú na podobnom princípe: pixel obrazu je nahradený novou hodnotou, ktorá je vypočítaná na základe jeho susedov. Využitie morfologických operácií môžeme rozdeliť na dve časti, pri oboch je ako vstup obraz, no na výstupe môže byť:

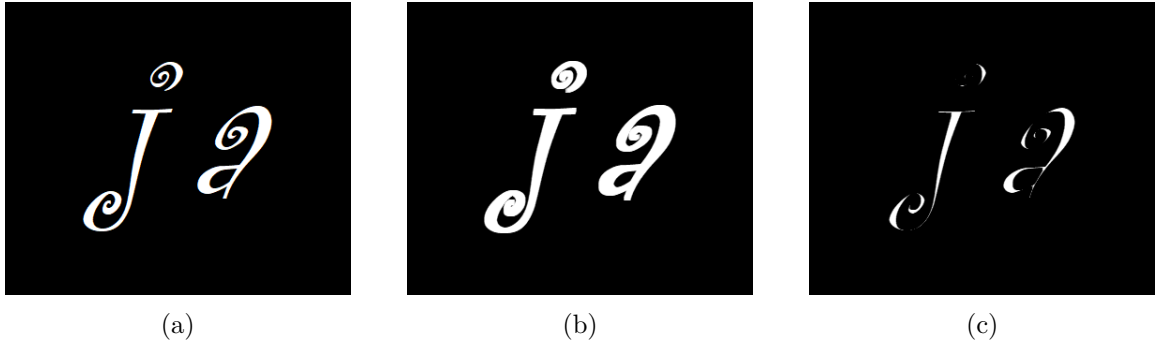
- *obraz* - môže ísť o predspracovanie (zjednodušenie tvaru, odstránenie šumu) alebo o následnú úpravu (stenčenie, zosilnenie, označenie objektu)
- *číselná hodnota* - plocha, obvod, ...

Morfologické operácie sú vlastne vzťahom dvoch bodových množín, bodovej množiny X (obraz), s menšou bodovou množinou B (štruktúrny prvok). Štruktúrny prvok (ŠP) je bodová množina, ktorá obsahuje jeden reprezentatívny bod. Prvok B prechádza postupne



Obr. 5.5: Prerozdelenie chyby medzi susediace pixely. [14]

celým obrazom a výsledok každého vzťahu sa ukladá do výsledného obrazu. Najzákladnejšie morfológické operácie sú erózia a dilatácia. [14, 21]



Obr. 5.6: (a) Neupravený obraz. (b) Obraz po úprave dilatáciou. Môžeme vidieť že objekt sa rozšíril na úkor pozadia a spojili sa miesta oddelené malým priestorom. (c) Obraz po úprave eróziou. Naopak ako v predchádzajúcom prípade, objekt sa zmenšil v prospech pozadia.

5.4.1 Dilatácia

Štruktúrny prvok postupne prechádza obrazom a vyhodnocuje najväčšiu hodnotu jasnosti z plochy, kde sa nachádza tento element (viz obrázok 5.6b). Hodnota s najvyššou jasnosťou sa zapisuje do reprezentatívneho bodu ŠP. Tento bod je ale už zapísaný do výsledného obrazu. Používa sa hlavne na zaplnenie dier a „zálivov“ medzi objektmi. Objekty sa pri dilatácii rozširujú na úkor pozadia. Obraz A dilatovaný elementom B má nasledujúci matematický zápis: [21, 20, 23]

$$X \oplus B = \{d \in E^2 : d = x + b, x \in X, b \in B\} \quad (5.6)$$

5.4.2 Erózia

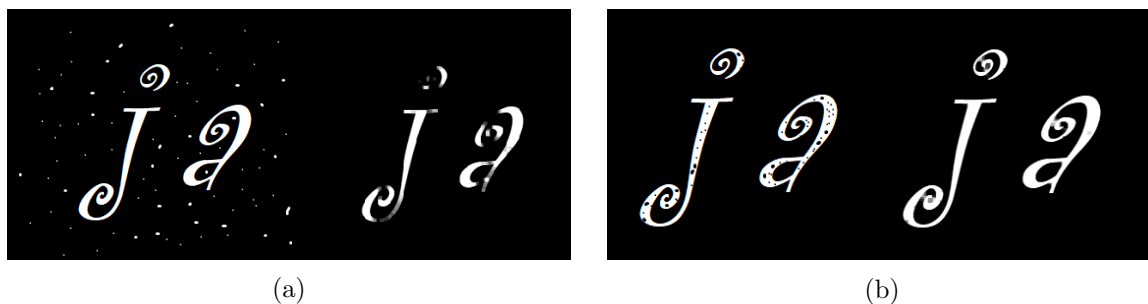
Princíp je veľmi podobný ako u dilatácie, s tým rozdielom že sa vyberá hodnota s najmenšou jasnosťou. Eróziou sa objekty zmenšujú, v prípade že je objekt menší ako ŠP, je objekt odstránený (viz obrázok 5.6c). Používa sa v prípade že chceme zjednodušiť štruktúru objektov a je duálna k dilatácii. Je invariantná k posunutiu, ale nie je komutatívna. Obraz A erodovaný elementom B má nasledujúci matematický zápis: [21, 20, 23]

$$X \ominus B = \{d \in E^2 : d + b \in X \text{ pre } \forall b \in B\} \quad (5.7)$$

5.4.3 Otvorenie a uzatvorenie

Tieto operácie vzniknú použitím vzájomnej kombinácie erózie a dilatácie. Výsledný obraz týchto operácií je zjednodušený oproti originálu, s menej detailmi, ale tvar objektov ostáva zachovaný. Opakovaným použitím týchto operácií sa nemení výsledok. Ak nasleduje erózia po dilatácii, hovoríme o **morfológickom uzavretí**. Táto operácia spojí objekty, ktoré sa nachádzajú vo vzájomnej blízkosti, vyhladí okraje a zaplní prípadné malé diery v objektoch, ktoré sú menšie ako ŠP (viz obrázok 5.7a). V opačnom prípade, ak po dilatácii nasleduje erózia, hovoríme o **morfológickom otvorení**. Morfológické otvorenie taktiež vyhladí okraje objektov, oddelí objekty spojené úzkym zálivom, prípadne vymaže objekty menšie ako ŠP

(viz obrázok 5.7b). Pri oboch týchto operáciách má veľký vplyv na výsledný obraz tvar a veľkosť ŠP [21, 20, 23].



Obr. 5.7: (a) Operácia morfológického otvorenia vymaže objekty menšie ako ŠP a oddelí objekty spojené tenkou líniou. (b) Operácia morfológického zatvorenia vyplní diery, menšie ako ŠP v objekte a spojí objekty, ktoré sú blízko pri sebe.

Kapitola 6

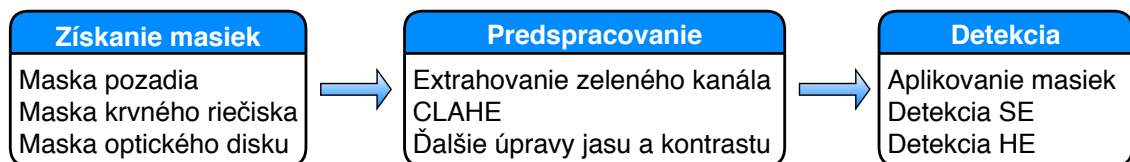
Návrh algoritmu

V tejto kapitole bude opísaný postup riešenia a opis mnou navrhnutého algoritmu na detekciu mäkkých a tvrdých exsudátov zo snímok sietnice ľudského oka. Na obrázku 6.1 je znázornená postupnosť krokov algoritmu. Pred samotným začatím detekcie je potrebné obrázok vhodne upraviť a získať z neho potrebné informácie.

Z tohto dôvodu, je ako prvý krok algoritmu detekcia optického disku a získanie masiek častí sietnice, ktoré môžu skomplikovať samotnú detekciu. Konkrétne ide o pozadie snímky, optický disk a krvné riečisko. Po získaní masiek týchto častí snímky nasleduje predspracovanie obrazu.

Pri vyšetrowaní snímky sietnice, lekárovi nerobí problém vysoký jas alebo nerovnomerné rozloženie kontrastu. No pri snahe nájsť exsudáty automatizovane, tieto nedokonalosti fotografie znamenajú veľký problém. Z tohto dôvodu je nevyhnutné tieto nedokonalosti čo najviac minimalizovať. Sú použité rôzne filtre a algoritmy, vďaka ktorým sú snímky lepšie použiteľné na automatickú detekciu ochorení. Bližší postup bude opísaný v ďalšej kapitole.

Po úspešnej úprave obrázku nasleduje samotná detekcia SE a HE a následne finálna úprava, ktorá odstráni všetky nežiadúce detegované oblasti. Všetky ďalšie podkapitoly opisujú jeden konkrétny krok algoritmu, a sú usporiadané v poradí, akým postupuje algoritmus.

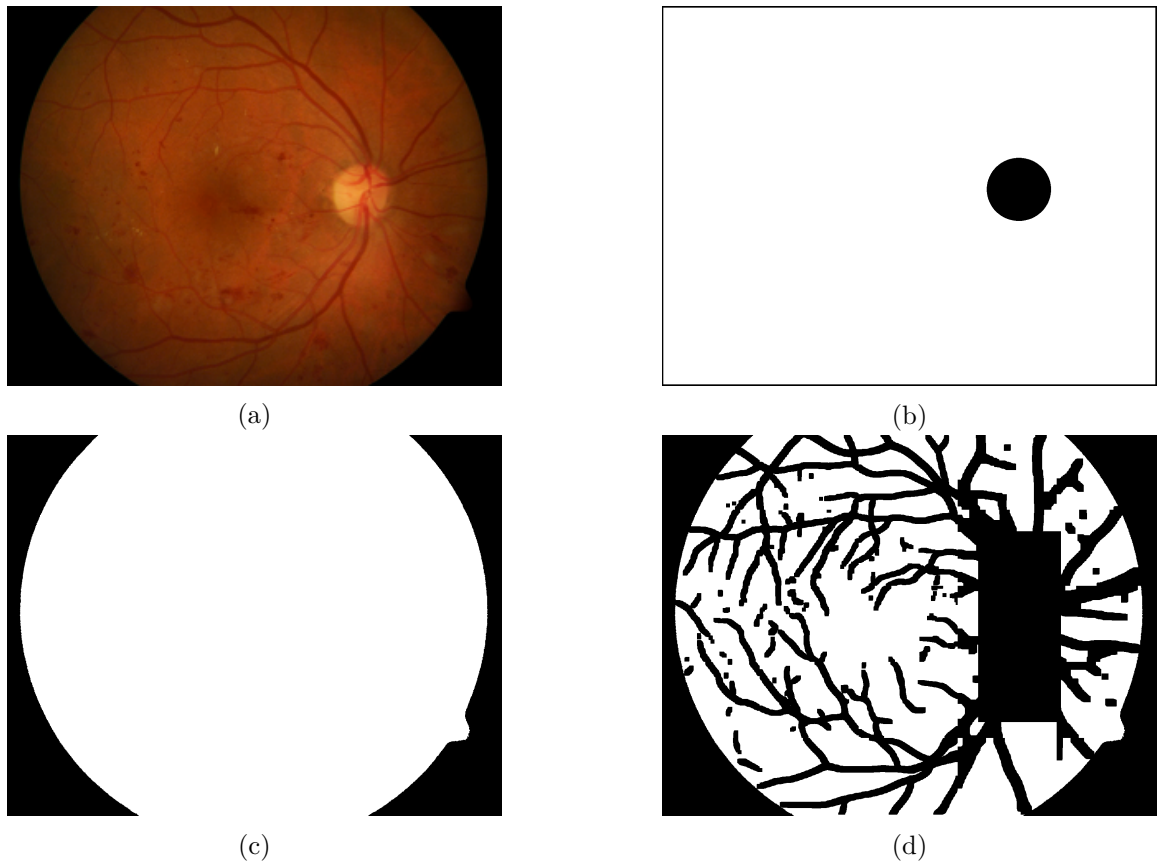


Obr. 6.1: Chronologický postup krokov celého algoritmu.

6.1 Získanie masiek

Hlavným dôvodom prečo je získanie masiek nevyhnutným postupom pri detekcii exsudátov je to, aby sme odstránili oblasti, ktoré by potencionalne mohli byť chybné vyhodnotené ako exsudáty. Jedná sa hlavne o oblasti v ktorých vzniká veľký farebný kontrast. Najčastejšie ide o svetlé oblasti nachádzajúce sa pri žilách. Medzi ďalšie takéto oblasti patrí aj samotný optický disk, ktorý ma veľmi podobnú farbu ako exsudáty. Najmenej časté sú prípady, keď sa chybné zdeteguje oblasť na rozmedzí pozadia snímku a čierneho pozadia. Pri správnom postupe, môžeme z veľkej časti eliminovať všetky tieto nežiadúce výsledky.

Finálna maska (viz obrázok 6.2d) sa skladá z troch masiek, ktorých získanie bude detailne opísané v ďalších podkapitolách. Táto maska bude použitá neskôr, algoritmom detekujúcim exsudáty.



Obr. 6.2: (a) Pôvodný obrázok. [32] (b) Finálna maska optického disku. (c) Finálna maska pozadia snímku. (d) Výsledna maska, po spojení všetkých troch masiek. Získanie masky krvného riečiska sa nachádza na obrázkoch 6.3.

6.1.1 Získanie masky pozadia

V tomto kroku sa získa maska čierneho pozadia snímky. Na tomto pozadí sa môžu nachádzať rôzne artefakty, ktoré môžu ovplyvniť detekciu ochorení. Napríklad čas pri zachytení fotografie alebo iné dodatočné informácie o fotografii. Taktiež aj prechod medzi samotnou snímku sietnice a čiernym pozadím môže ovplyvniť detekciu. A to z dôvodu, že vzniká veľa miest po celom obvode pozadia s veľkým kontrastom. V niektorých prípadoch sa tieto oblasti pri pozadí chybné detekujú ako exsudáty.

Získanie masky pozadia (viz obrázok 6.2c), v porovnaní s ostatnými maskami, je veľmi jednoduché. Na získanie tejto masky, je použité jednoduché prahovanie s morfológickou operáciou zatvorenia. Je to z dôvodu vyplnenia možných vzniknutých dier, napríklad informácií o čase. Následne je použitá operácia matematickej dilatácie, aby maska jemne prekryvala samotnú snímku sietnice. Toto prekrytie je použité práve z dôvodu eliminácie chybné detekcie.

6.1.2 Získanie masky optického disku

Pri detekcii exsudátov je veľmi dôležité odstrániť optický disk. Hlavne z dôvodu, že optický disk ma veľmi podobnú farbu a svetlosť ako hľadané exsudáty. Práve táto podobnosť s exsudátmi môže spôsobovať chybnú detekciu pri hľadaní exsudátov. Získanie masky optického disku (viz obrázok 6.2b) je zabezpečené algoritmom vyvinutým v našom tíme. Algoritmus funguje na princípe natrénovanej neurónovej siete. Tento postup funguje veľmi spoľahlivo a výsledky sú veľmi presné. Po detegovaní optického disku a získaní jeho polohy a veľkosti nasleduje jeho úprava. Táto úprava je veľmi dôležitá pre dosiahnutie lepších výsledkov. V oblasti tesne okolo optického disku sa nenachádzajú skoro žiadne exsudáty, no tieto oblasti majú veľký kontrast a vysoký jas. Čo môže spôsobovať chybnú detekciu. Z tohto dôvodu, je potrebné vyfiltrovať nie len samotný optický disk ale aj jeho okolie.

Z viacerých pokusov o ideálny tvar okolia optického disku, najlepšie výsledky dosahoval tvar obdĺžnika so šírkou o niečo dlhšou ako priemer optického disku a výškou približne 2-krát dlhšou ako priemer disku.

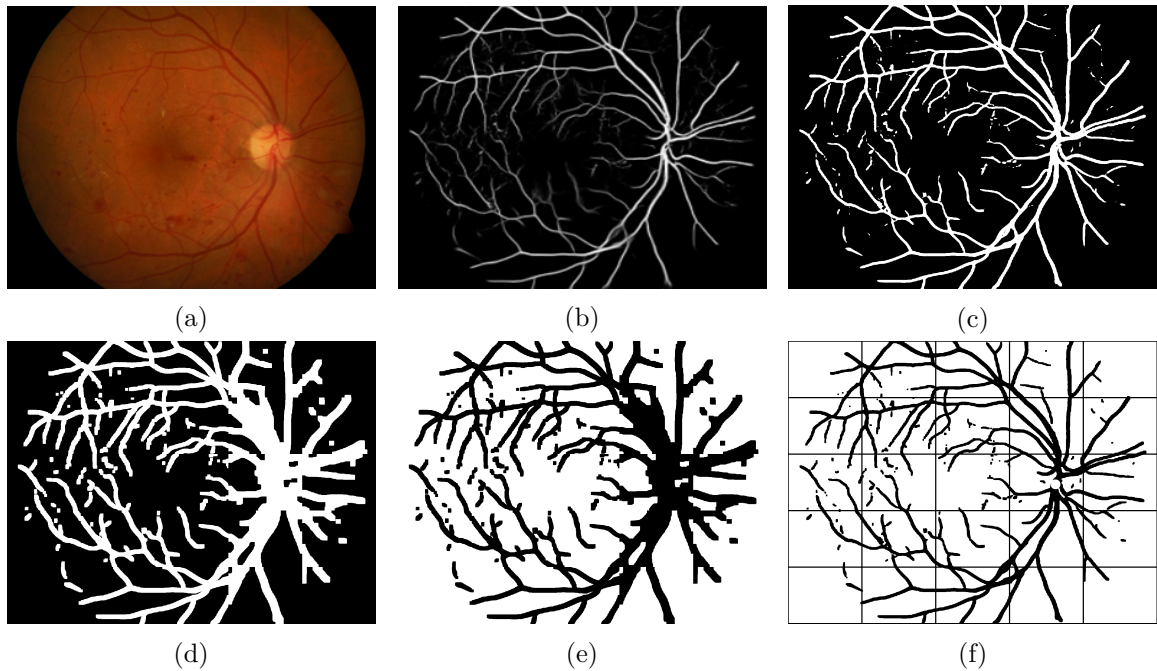
6.1.3 Získanie masky krvného riečiska

V tomto kroku spracovania snímky je extrahované krvné riečisko. V tesnej blízkosti žíl sa nachádzajú svetlé miesta, ktoré boli veľmi často chybné vyhodnotené ako exsudáty. Žily na snímke sú veľmi tmavé a vzniká tak veľký kontrast so svetlými username, preto je potrebné tieto oblasti eliminovať. Ako aj v predchádzajúcom prípade, pre kvalitnejšie výsledky a vyššiu spoľahlivosť bola natrénovaná neurónová sieť. Funkcionalita tohto algoritmu je značne zložitejšia ako pri hľadaní optického disku. Ukázalo sa, že neurónová sieť vytvára veľmi kvalitnú masku krvného riečiska, ktorá veľmi dobre postačuje pre ďalší postup.

Po samotnej extrakcii krvného riečiska nasleduje jeho úprava, ktorá je veľmi dôležitá pre ďalšie použitie. K odstráneniu príliš malých alebo málo výrazných žíl zo snímky použijeme najskôr algoritmus prahovania. Tieto malé žily nie sú v normálnej snímke sietnice skoro vidieť a majú len zanedbateľný kontrast voči pozadiu sietnice. Nakoľko je snímka v stupňoch šedi, k jej prekonvertovaniu do binárnej podoby je použité prahovanie.

Po tomto kroku je snímka rozdelená na 5 riadkov a 5 stĺpcov, vznikne teda 25 menších obrázkov. Toto rozdelenie masky krvného riečiska je potrebné, z dôvodu následnej lepšej úpravy na základe polohy konkrétnej časti snímky. Táto úprava zahŕňa morfologické operácie uzatvorenia, otvorenia a dilatácie. Na základe polohy je použitý rozdielny štruktúrny prvok. Na častiach snímky, ktoré sa nachádzajú na okrajoch alebo v blízkosti optického disku, je použitý väčší ŠP. V týchto miestach sa nachádzajú najhrubšie žily, ktoré sú veľmi tmavé, čím sa zvyšuje riziko chybnej detekcie a zároveň sa v týchto miestach nenachádza veľa exsudátov. Keďže potrebujeme vedieť polohu optického disku, je nevyhnutná jeho správna detekcia. Naopak v častiach snímky pri žltej škvrne sa nachádzajú veľmi jemné žily, preto je potrebné použiť menší ŠP. V týchto miestach sa nachádza najviac exsudátov a tie by nemuseli byť detegované pri použití väčšieho ŠP. Tento postup dosahuje oveľa lepšie výsledky, s porovnaním, keď na celý obrázok použijem jeden štruktúrny prvok.

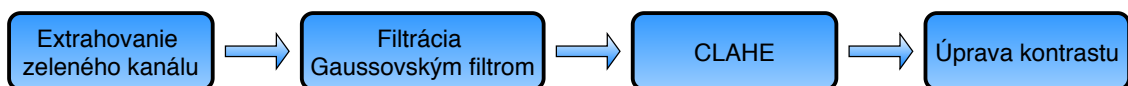
Najlepšie výsledky dosahovali ŠP s rozmermi v tejto tabuľke. Po všetkých operáciách sú snímky spojené opäť do jednej snímky a následne sa invertujú farby. Na snímke 6.3 je zobrazený postup úpravy masky krvného riečiska.



Obr. 6.3: (a) Pôvodná snímka sietnice. [32] (b) Krvné riečisko po detekcii neurónovou sieťou. (c) Aplikované prahovanie, z dôvodu odstránenia len málo výrazných ciev. (d) Použitie morfológických operácií uzatvorenia, otvorenia a dilatácie. (e) Invertované farby obrázka. (f) Snímka je rozdelená na 25 menších obrázkov z dôvodu presnejších výsledkov.

6.2 Predspracovanie

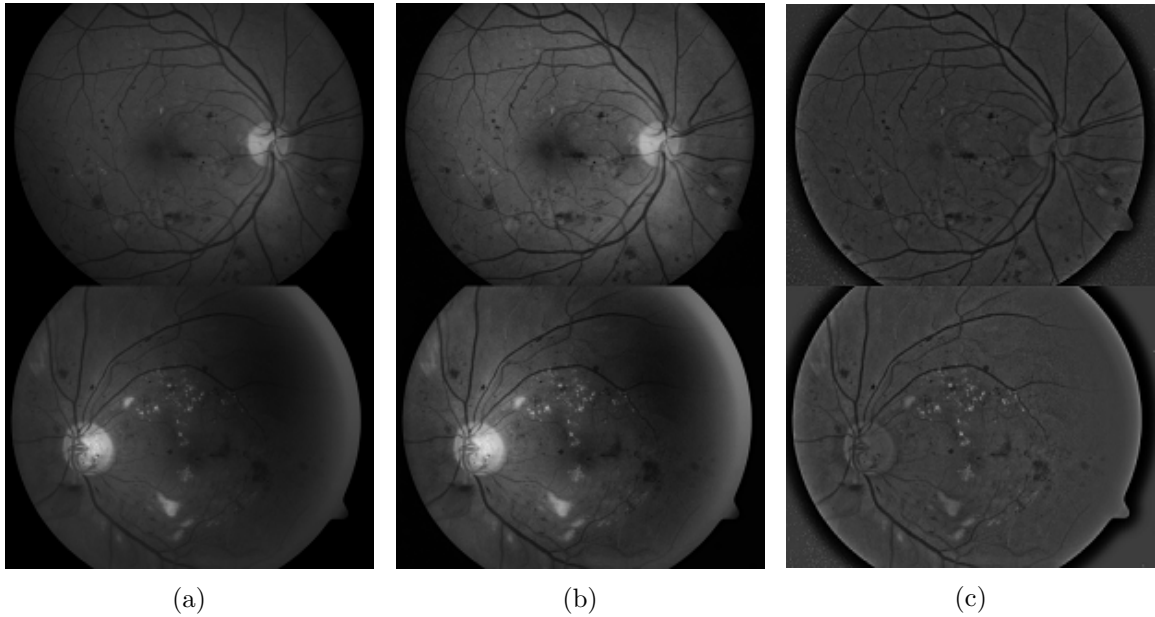
Predspracovanie snímky sietnice je nevyhnutným predpokladom pre úspešnú detekciu. Obrázky v skutočnosti sú často veľmi odlišné a nie príliš kvalitné. Veľa obrázkov má nevyrovnaný jas, určitá oblasť snímky je značne tmavšia ako zbytok obrazu. Popri vylepšovaní zlých fotografií do použiteľnej podoby, predspracovanie sa hlavne zameriava na zdokonalenie snímok pre potreby detekcie. Ide hlavne o vyrovnanie jasu v celej snímke, napríklad v oblasti fovei, je menšia hodnota jasu, ako v zbytku obrázku. Po úspešnom predspracovaní obrázku sú hodnoty v celom obraze približne rovnaké, pričom kontrast tiež zostáva podobný, čo nám uľahčí detekciu exsudátov. Obrázok 6.4 ukazuje postupnú aplikáciu algoritmov. Algoritmus určený na predspracovanie snímok je z veľkej časti navrhnutý podľa vedeckého článku [18].



Obr. 6.4: Proces predspracovania snímku pred detekciou.

Pre ďalšie spracovanie sa ukázal byť najvhodnejší práve zelený kanál (viz obrázok 6.5a). V zelenom kanály, spomedzi všetkých farebných kanálov, sú hľadané exsudáty najvýraznejšie.

Ďalší problém, ktorý bolo treba vyriešiť, bol veľký rozdiel medzi hodnotami jasu v rôznych oblastiach snímky a zvýšenie kontrastu snímky. Prvou vyskúšanou variantou bola metóda vyrovnávania histogramu. Táto metóda nebola príliš úspešná, a to hlavne z dô-



Obr. 6.5: (a) Extrahovaný kanál zo snímky sietnice. (b) Predchádzajúca snímka po aplikovaní CLAHE. (c) Finálna úprava jasnosti snímky sietnice.

vodu, že na snímkach je veľa oblastí s veľmi odlišnou hodnotou jasnosti. To spôsobilo, že svetlé oblasti sa stali ešte viac svetlejšími, hoci tmavšie oblasti získali lepší kontrast. Tento problém sa podarilo vyriešiť druhou vyskúšanou variantou, a to metódou CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization). Funguje na podobnom princípe ako obyčajné vyrovnanie histogramu. S tým rozdielom, že algoritmus aplikuje vyrovnanie histogramu na malé časti snímky (viz obrázok 6.5b). Typicky táto oblasť máva 8x8 pixelov.

Pre odstránenie šumu je ešte použitý Gaussovský filter. Výsledok, ktorý dostaneme označíme ako I_v . Zlepšenie vlastností jasnosti v snímke je vykonané pomocou vydelením obrazu s odhadovaným pozadím:

$$I_t = I_v / I_p \quad (6.1)$$

pričom I_p je odhadované pozadie vypočítané dostatočne veľkým mediánovým filtrom, takým aby boli eliminované žily alebo iné nežiaduce prvky sietnice. Výsledná úprava kontrastu je vykonaná vydelením tohto výsledku jeho smerodajnou odchýlkou:

$$I_f = I_t / \text{std}(I_t) \quad (6.2)$$

kde $\text{std}(I_t)$ je smerodajná odchýlka vypočítaná, z už upraveného obrazu. Toto je výsledný obraz (viz obrázok 6.5c) predspracovania a nasleduje už samotná detekcia.

6.3 Detekcia

V tejto časti bude opísaná najdôležitejšia časť algoritmu, detekcia exsudátov. Exsudáty už boli detailne opísané v teoretickej časti. Pri ich detekcii je dôležité vedieť, že sú to jasne žlté škvrny, a že v zelenom kanáli majú najväčší kontrast voči pozadiu. Detailnejší opis detekcie tvrdých a mäkkých exsudátov bude v ďalších podkapitolách.

6.3.1 Detekcia tvrdých exsudátov

Tvrde exsudáty na rozdiel od mäkkých majú veľmi výrazné okraje, čo značne ovplyvnilo výsledný algoritmus. Ako prvý krok detekcie je už spomínaná úprava snímky sietnice. Následne je použitý algoritmus Gaussovského vyhladzovania, ktorý odstraňuje prebytočný šum z obrazu. Na takto upravený obraz sa použije adaptívne prahovanie, konkrétne Gaussovo adaptívne prahovanie.

Tabuľka 6.1: Prehľad použitých filtrov pri detekcii tvrdých exsudátov.

Veľkosť obrázka	do 2000x2000	nad 2000x2000
Gaussova filtrácia	13x13	13x13
Gaussovo prahovanie	11x11, $\sigma = -1$	71x71, $\sigma = -20$ a 11x11, $\sigma = -1$
Mediánova filtrácia	5x5	5x5
Morfologické otvorenie	2x2	2x2
Morfologická dilatácia	4x4	4x4

Tento krok nám poskytne kandidátne oblasti, kde by sa mohli exsudáty nachádzať. Toto prahovanie funguje veľmi podobne ako klasické adaptívne prahovanie, no hodnoty prahu sú vypočítané z okolia na základe Gaussovských hodnôt. Pre nájdenie vhodných kandidátnych oblastí, najzložitejšou časťou vývoja algoritmu bolo nájsť správny spôsob prahovania. Gaussovo prahovanie dáva najlepšie výsledky spomedzi testovaných algoritmov. Po zvolení algoritmu, bolo ešte potrebné zvoliť najlepšiu veľkosť oblasti, z ktorej sa bude vypočítavať hodnota prahu. Najlepšie výsledky sú zhrnuté v tabuľke 6.1.



Obr. 6.6: Finálna detekcia a označenie tvrdých exsudátov.

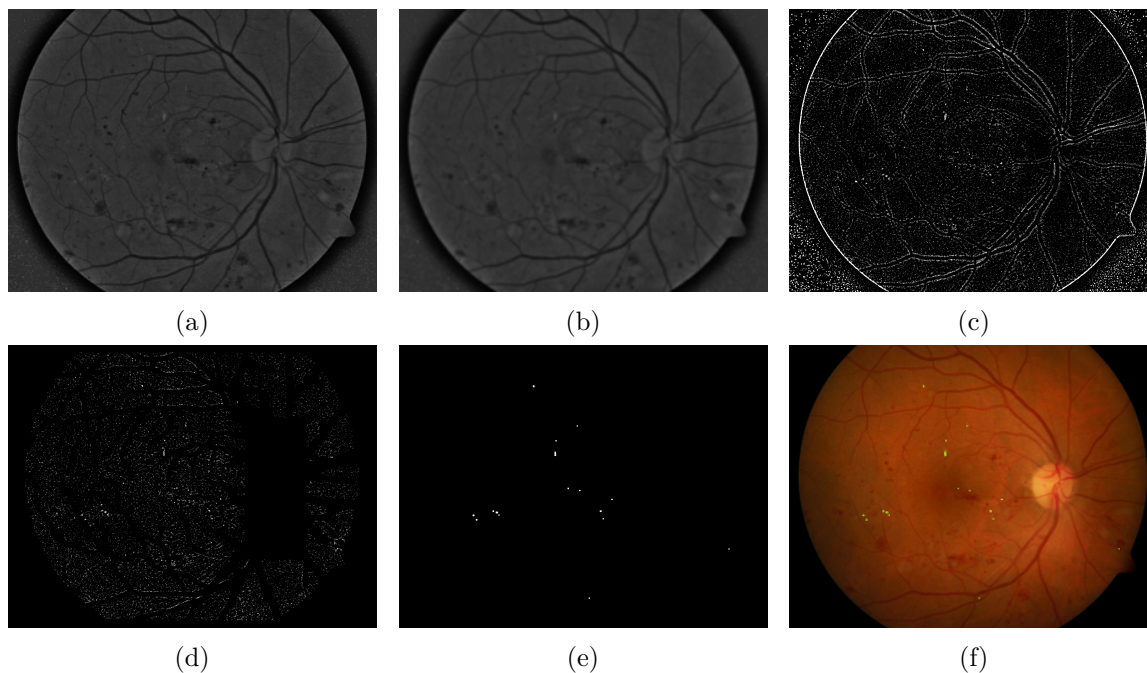
Oblasť s menšou veľkosťou sa ukázala byť nedostačujúca a bolo detegovaných len veľmi málo exsudátov. Naopak pri použití oblastí s väčšou veľkosťou spracovávanej oblasti bolo

detegovaných až príliš veľa oblastí, kde sa nenachádzali žiadne exsudáty. Na obrázku 6.8 je možné vidieť veľké rozdiely medzi jednotlivými veľkosťami oblastí.

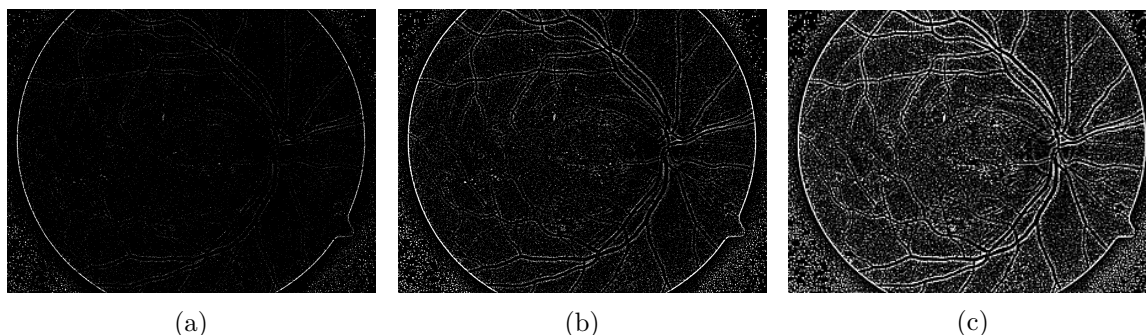
Dôležitou časťou algoritmu je odstrániť z kandidátnych oblastí miesta, kde sa nenachádzajú exsudáty. Táto eliminácia sa vykonáva pomocou morfológických operácií.

Po získaní kandidátnych oblastí sa z obrazu odstránia tie, ktoré sa prekrývajú s miestami nachádzajúcimi sa vo vopred pripravenej maske. Odstránia sa teda všetky kandidátne oblasti, ktoré sa nachádzajú v blízkosti žíl, pozadí alebo optického disku. Po odstránení týchto oblastí stále ostáva veľa miest, ktoré sú označené ako kandidátne, no nenachádzajú sa tam žiadne exsudáty. Tieto oblasti sú skoro vždy veľmi malé, kde náhodne vznikol väčší kontrast. Na odstránenie týchto oblastí je použité mediánové vyhladzovanie a následne operácia morfológického otvorenia. Veľkosť oblastí, ktoré algoritmy používajú pri výpočte som získal na základe pokusov a rozsiahleho testovania tak, aby výsledky boli čo najlepšie. Zároveň, aby nevznikali v najlepšom prípade, žiadne chybné detekcie. Následne sa použije morfológická operácia dilatácie, aby objekty získali späť svoju predchádzajúcu veľkosť. Detegované oblasti väčšinou nemajú úplne presný tvar, ako pôvodné exsudáty na snímke, no v našom prípade je dôležitý hlavne počet, veľkosť a poloha týchto exsudátov. Po tomto kroku dostávame mapu tvrdých exsudátov nachádzajúcich sa na snímke, v prípade že sa tam nejaké nachádzajú. Celý postup detekcie sa nachádza na obrázku 6.7.

Príklad finálneho zaznačenia exsudátov do pôvodného obrázka, je zobrazený na snímke 6.6. Podrobné testovanie tohto postupu bude detailne opísané v ďalšej kapitole.



Obr. 6.7: (a) Snímka sietnice po úprave. (b) Obraz upravený Guassovským filtrom, kvôli odstránenie šumu a malých detailov. (c) Aplikované Gaussovo adaptívne prahovanie. Na obrázku sa nachádza veľa zle označených miest, ktoré sa musia odfiltrovať. (d) Použije sa vopred získaná maska na odstránenie nežiadúcich objektov. (e) Aplikujú sa morfológické operácie, konkrétne otvorenie a dilatácia. (f) Výsledná snímka s detegovanými a vyznačenými tvrdými exsudátmi.



Obr. 6.8: Použitie adaptívneho Guassovského prahovanie s rôznymi parametrami. Veľkosť okolia, ktoré algoritmus spracováva: (a) 3x3, (b) 5x5, (c) 9x9 a konštantou danou $\sigma = 1$.

6.3.2 Detekcia mäkkých exsudátov

Mäkké exsudáty, ako bolo spomínané v teoretickej časti, sú väčšie vatovité ložiská tuku. Na snímkach sietnice majú žltú farbu, ale vo väčšine prípadoch je ich farba menej výrazná, ako je to pri tvrdých exsudátoch. Nakoľko sú tiež žlté, ich detekciu komplikujú tie isté časti snímky, ako pri HE. Z tohto dôvodu je predspracovanie identické s predchádzajúcim algoritmom.

Tabuľka 6.2: Prehľad použitých filtrov pri detekcii mäkkých exsudátov.

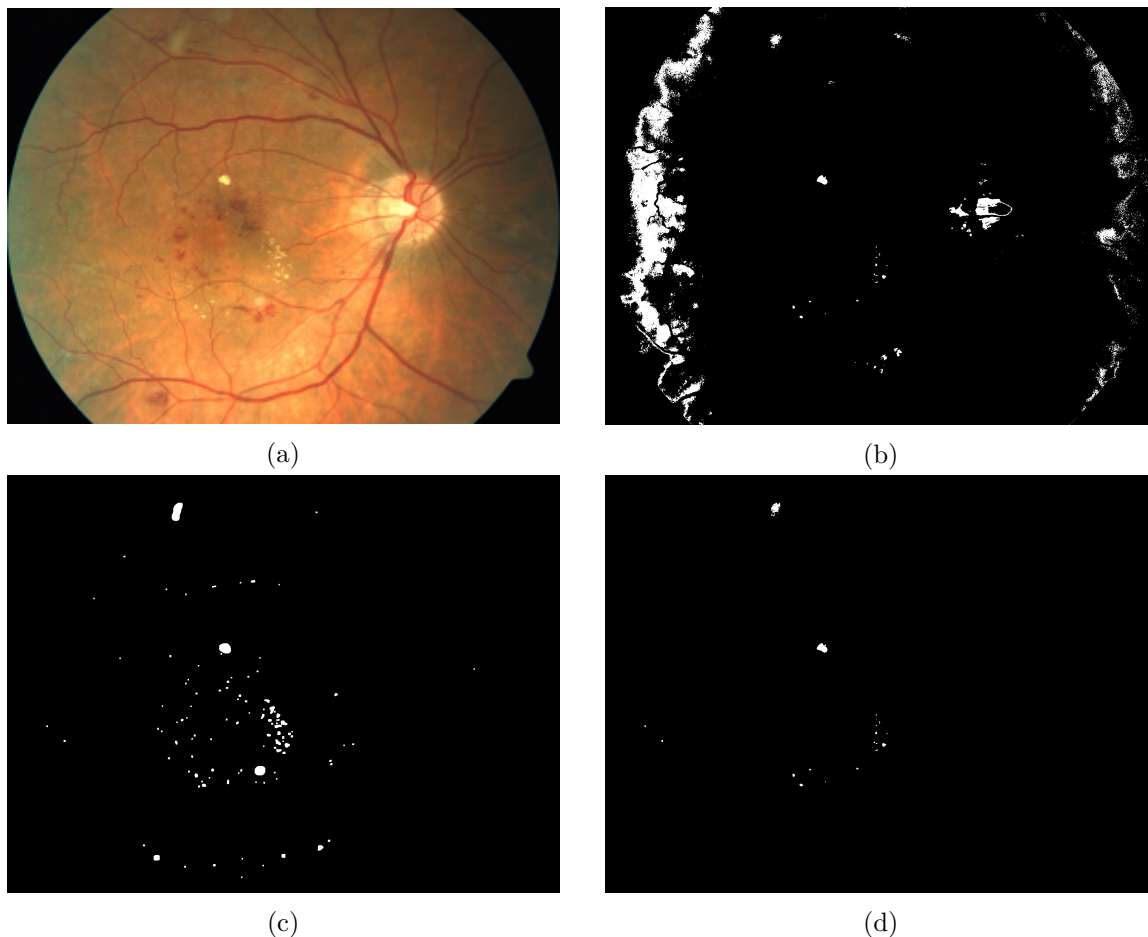
Veľkosť obrázka	do 2000x2000	nad 2000x2000
Gaussova filtrácia	23x23	23x23
Gaussovo prahovanie	201x201, $\sigma = -16$	201x201, $\sigma = -23$
Mediánova filtrácia	19x19	19x19
Morfologické otvorenie	10x10	10x10
Morfologická dilatácia	7x7	7x7

Na začiatku vývoja tejto časti algoritmu som použil rôzne filtre a morfológické operácie, ktoré využívajú fakt, že SE sú pomerne veľké oproti iným objektom. Najlepšie výsledky dosahovala mediánová filtrácia. Tento postup zvýraznil veľké svetlé časti, zatiaľ čo ostatné oblasti ostali nevýrazné. Avšak tento postup nedosahoval potrebné výsledky a nevidel som v ňom možnosť na zdokonalenie.

Z dôvodu predchádzajúceho neúspechu, som sa pokúsil inšpirovať postupom pri detekcii HE. Po úprave konštánt tohto algoritmu, boli dosiahnuté veľmi dobré výsledky aj pri SE. Najpodstatnejší rozdiel medzi týmito dvoma postupmi je vo veľkosti oblasti použitej pri Gaussovom adaptívnom prahovaní. Nakoľko sú SE oveľa väčšie, táto oblasť musí byť tak tiež väčšia. Následne je na výsledok prechádzajúceho kroku použitá vopred získaná maska pozadia, optického disku a krvného riečiska. Rozdielne veľkosti oblastí sú použité aj pri následnom redukování podozrivých oblastí. V tabuľke 6.2 sú zobrazené veľkosti použitých oblastí jednotlivými filterami.

6.3.3 Úprava algoritmu po konzultácii

Po konzultácií dosiahnutých výsledkov s očným lekárom, sme došli k záveru, že pri niektorých snímkach nie sú detegované všetky exsudáty. Ide hlavne o prípady, kedy je ohraničenie exsudátov veľmi neostré alebo časť snímku, kde sa exsudát nachádza, je rozmazaná. Tieto prípady sa dajú jednoducho vyriešiť zvýšením citlivosti detekcie algoritmu. No v tom prípade, je detegovaných aj veľmi veľa oblastí, v ktorých sa nenachádzajú žiadne exsudáty. Z tohto dôvodu som musel pridať do algoritmu metódu, ktorá dodatočne odstráni všetky detegované oblasti, v ktorých sa nenachádzajú exsudáty.



Obr. 6.9: Postup spresnenia výsledkov a odstránenie zle detekovaných oblastí: (a) Pôvodná snímka sietnice, (b) obrázok po odfiltrovaní oblastí s daným rozsahom farieb možných exsudátov, (c) obrázok obsahujúci detekované oblasti s možnými exsudátmi, (d) Finálne detekované oblasti po aplikovaní operácie AND na predchádzajúce dva obrázky.

Výhoda tejto metódy je, že slúži aj k získaniu presnejších okrajov detegovaných oblastí s exsudátmi. Pokusne som zistil, že exsudáty majú rozsah hodnôt farieb v HSV nasledujúci: Hue (odtieň) v rozmedzí 11-50, Saturation (sýtosť) 100-255, Value (jasová hodnota) 50-255. Tieto hodnoty sa vyfiltrujú z pôvodnej snímky, a následne sa použije operácia AND na vyfiltrovaný obrázok a na obrázok s detekovanými oblasťami. Týmto krokom sú odstránené oblasti, ktoré nespĺňajú daný rozsah farieb.

Po testovaní tohto postupu som si všimol, že snímky majú veľmi rozdielny jas a exsudáty môžu mať rôzne farby. Takýto veľký rozsah by neodstránil značnú časť zle detegovaných oblastí. Preto sa rozsah hodnôt prispôsobuje každému obrázku, na základe priemerných farieb v danom obrázku. Tento postup sa ukázal byť veľmi efektívny pri odstraňovaní zle detegovaných oblastí, ale taktiež aj pri spresňovaní výsledkov. Obrázok 6.9 znázorňuje fungovanie tohto postupu.

6.4 Implementácia

Aplikácia je implementovaná v jazyku Python, verzia 3.8.1. Aplikácia je multiplatformná. Využíva veľa funkcií z knižnice OpenCV, konkrétne verzia 4.0. Táto knižnica ponúka širokú ponuku implementovaných funkcií pre prácu a úpravu obrázkov. Taktiež má aj veľmi dobrú dokumentáciu, čo uľahčilo prácu s tou knižnicou. Samotná aplikácia sa skladá z viacerých skriptov. Hlavný skript *detection.py* slúži na spúšťanie aplikácie, skript *SE_detection* obsahuje funkcie na detekciu mäkkých exsudátov, skript *HE_detection.py* obsahuje funkcie na detekciu tvrdých exsudátov. Skript *mask.py* a skript *background_mask.py* slúžia na získanie všetkých potrebných masiek zo snímky. Posledný skript *preprocessing.py* implementuje funkcie na úpravu snímok.

Aplikáciu je možné spúšťať s rôznymi parametrami. Parameter *path* označuje zložku, kde sa nachádzajú potrebné snímky na spracovanie. Táto zložka musí obsahovať: snímku sietnice s názvom *retina.*(png/jpg/jpeg)*, extrahované krvné riečisko s názvom *mask.png* a detegovaný optický disk v súbore *optic_disk.png*.

Stručný prehľad jednotlivých možností spustenia aplikácie:

- `py ./detection.py -h` nápoveda
- `py ./detection.py path` - e detekcia exsudátov
- `py ./detection.py path - h` detekcia len tvrdých exsudátov
- `py ./detection.py path - s` detekcia len mäkkých exsudátov

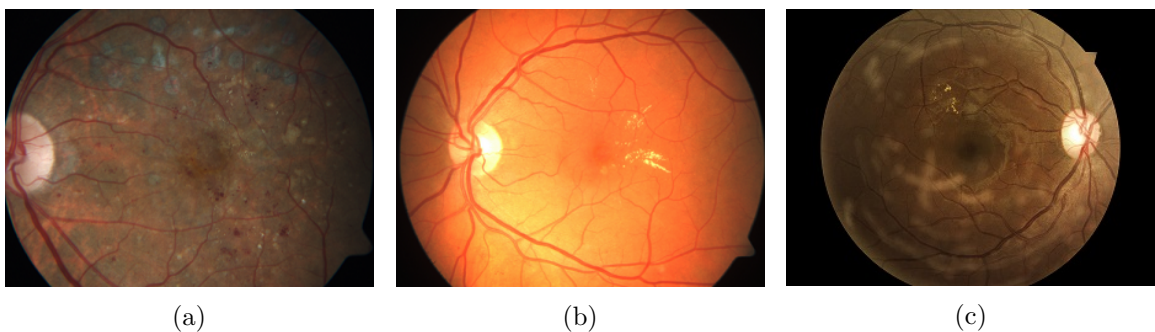
Kapitola 7

Testovanie a zhodnotenie výsledkov

Testovanie výsledkov detekcie je veľmi podstatná časť tejto bakalárskej práce. Z dôvodu otestovania čo najväčšej rozličnosti fotografií boli použité snímky z viacerých databáz, príklady vybraných snímok sú zobrazené na obrázku 7.1. Samotné testovanie je zamerané hlavne na správnosť detekcie tvrdých a mäkkých exsudátov, ale taktiež aj na chybovosť algoritmu. Ukázalo sa, že aj manuálne hľadanie exsudátov v snímke sietnice je veľmi zložitá a je naň potrebná dlhoročná prax. Z tohto dôvodu, bola potrebná spolupráca so skúseným lekárom.

7.1 Použité databázy

Dostupné databázy snímok sú nevyhnutným prvkom pri vývoji algoritmu, nakoľko získavanie veľkého množstva dát s danými ochoreniami bez nich je takmer nemožné. K implementácii a testovaniu boli použité hlavne databázy DB_TIF a DIARETDB1. Databáza snímok DB_TIF bola poskytnutá výskumnej skupine Viderize za účelom vývoju tohto algoritmu. Z týchto databáz bolo vybraných 70 obrázkov určených na ďalšie testovanie.



Obr. 7.1: Príklady veľmi odlišných použitých snímok na testovanie: (a) Snímka sietnice po ošetrení laserom, (b) Snímka s veľmi veľkým jasom, (c) Obrázok sietnice s nechceným odrazom svetla. [32]

7.2 Testovanie detekcie tvrdých a mäkkých exsudátov

Testovanie prebehlo na 70 snímkach vybraných z dvoch skôr spomenutých databáz. Všetky vybrané snímky mali správne detekovaný optický disk a extrahované krvné riečisko. Tieto snímky boli vybrané tak, aby otestovali čo najviac možných prípadov, ktoré sa môžu pri detekcii objaviť. To znamená, že do vybraných fotografií sa dostali okrem snímkov obsahujúcich exsudáty, aj zle osvetlené fotky, fotky na ktorých sa nachádzal nejaký artefakt, zdravé sietnice, sietnice s rôznymi ďalšími ochoreniami a aj sietnice po liečbe laserom. Taktiež bolo potrebné otestovať výsledky detekcie pri fotkách vyhotovených rôznymi zariadeniami na zachytávanie snímkov sietnice. Tieto kamery majú rôzne parametre snímania, ktoré môžu značne ovplyvniť kvalitu spracovania.

Testovanie prebiehalo z veľkej časti manuálne, pretože tento spôsob kontroly určenie správnosti detekcie bol rýchlejší ako vývoj ďalšej aplikácie určenej len na testovanie. Kontrola výsledkov detekcie prebiehala počas celého vývoja algoritmu a bola nevyhnutnou časťou vývoja. Po dokončení algoritmu bolo uskutočnené veľké testovanie a následná konzultácia so skúseným oftalmológom. Spätná väzba dopomohla odhaliť nedostatky algoritmu.

Medzi hlavné nedostatky pri detekcii exsudátov boli chybné detegované oblasti po predchádzajúcom ošetrení sietnice laserom a nedetegovanie väčších exsudátov s nejasnými hranicami. Oblasti po ošetrení laserom, na okrajoch zožltnú a majú veľmi podobnú farbu ako hľadané exsudáty.

Pri testovaní som nerozlišoval medzi tvrdými a mäkkými exsudátmi, hlavne kvôli problematickému rozlíšeniu medzi nimi.

7.3 Výsledky

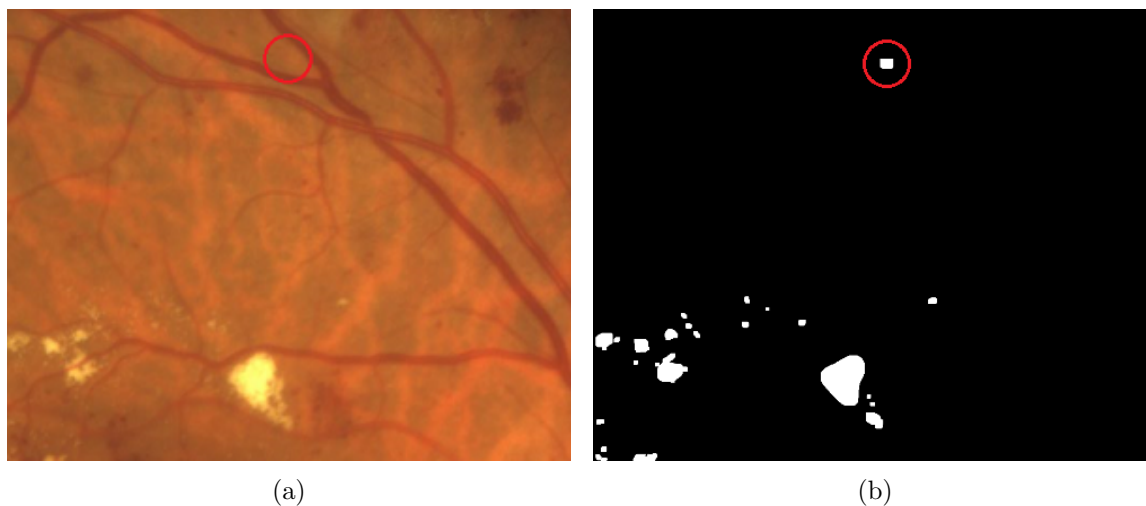
Pri výslednom testovaní sa každá snímka rozdelila na menšie plochy, ktoré mali veľkosť 100 pixelov. Následne bolo pri každej snímke určené, v ktorých z týchto oblastí sa nachádzajú exsudáty. Tieto oblasti boli porovnané s výsledkom algoritmu, ktorý bol tiež rozdelený na rovnaké časti. Výsledok tohto porovnania je počet percent, s akou úspešnosťou detegoval algoritmus exsudáty. Finálne výsledky detekcie sa nachádzajú v tabuľke 7.1. Pri detekcii je tiež veľmi dôležitá chybovosť algoritmu. Sú to oblasti, ktoré algoritmus označil ako exsudáty, no v skutočnosti tam nie sú. V tabuľke 7.2 je uvedený počet chybných detekcií a ich pomer k správne detegovaným exsudátom. Na obrázku 7.2 sa nachádza príklad chybné detegovanej oblasti.

Databáza	Oblasti s exsudátmi		
	Celkový počet	Správne detegovaných	
TIF	1315	1186	90,19 %
DIARETDB1	556	499	89,75 %
Spolu	1871	1685	90,06 %

Tabuľka 7.1: Výsledky testovania detekcie exsudátov. Tabuľka vyjadruje úspešnosť detekcie algoritmu voči skutočným výsledkom.

Databáza	Chybne detegované exsudáty	
	Počet	% zo správne detegovaných
TIF	37	3,12 %
DIARETDB1	11	2,20 %
Spolu	48	2,85 %

Tabuľka 7.2: Tabuľka ukazuje počet chybne zaznačených exsudátov v pomere so správne zaznačenými exsudátmi.



Obr. 7.2: (a) Pôvodná snímka sietnice. (b) Finálna detekcia exsudátov. V hornej časti obrázku sa nachádza oblasť, ktorá bola chybne detegovaná, ako exsudát. Takéto oblasti sa nachádzajú hlavne v blízkosti žíl.

Kapitola 8

Záver

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo navrhnúť a implementovať algoritmus, ktorý dokáže automatizovane detegovať príznaky diabetickej retinopatie na sietnici ľudského oka. Konkrétne išlo o mäkké a tvrdé exsudáty. Pred samotným návrhom algoritmu bolo nevyhnutné si naštudovať informácie týkajúce sa anatómie ľudského oka, možnosti vyšetrenia sietnice a taktiež aj o konkrétnom ochorení. Táto práca poskytuje teoretický základ k pochopeniu danej problematiky. Okrem teoretických informácií týkajúcich sa oka, sa v tejto časti práce nachádzajú aj informácie o algoritmoch, používaných pri práci s obrazmi. Veľká časť týchto algoritmov bola použitá aj pri vývoji výsledného algoritmu.

Algoritmus pred samotnou detekciou začína predspracovaním obrazu. Úprava každej snímky má výrazný vplyv na úspešnosť detekcie. Následne sa získajú všetky potrebné masky. Detekcia optického disku a masky krvného riečiska je zabezpečená vďaka tímovej spolupráci. Tieto útvary je potrebné odstrániť, kvôli zmenšeniu chybovosti algoritmu. Samotná detekcia exsudátov funguje na princípe adaptívneho prahovania. Okolie pixelov pre výpočet prahu je rôzny pre mäkké a tvrdé exsudáty. Nasleduje finálna klasifikácia oblastí, v ktorých sú odstránené oblasti, kde sa žiadne exsudáty nenachádzajú. Tento postup využíva vlastnosti exsudátov, hlavne ich farbu.

Pravidelné testovanie výsledkov detekcie, počas jeho vývoja, bolo veľmi podstatné pre konečný algoritmus. Finálne testovanie prebehlo na 70 snímkach z dvoch databáz. Pri testovaní nebol nijako upravovaný zdrojový kód. Testovaná bola hlavne úspešnosť detekcie ale aj chybovosť algoritmu. Úspešnosť algoritmu presahovala 90 %, pričom chybovosť bola len okolo 2,85 %.

Ďalšie zdokonalenie algoritmu vidím hlavne v adaptácií na rozdielnosť snímok. To znamená, že algoritmus by bol menej chybový pri veľmi zlých snímkach a zároveň podával rovnakú alebo lepšiu úspešnosť detekcie exsudátov. Vo vyvážení týchto dvoch vlastností je priestor na zlepšenie.

Využitie automatizovaného detegovania príznakov diabetickej retinopatie je určite žiadané. Na trhu sa momentálne nenachádza žiaden spoľahlivý nástroj na takúto automatickú detekciu. Preto je táto práca súčasťou projektu na vývoj takéhoto automatického nástroja. Jeho využitie spočíva hlavne v spojení s fundus kamerou pri diagnostike sietnice, kde by mohol zvýšiť efektívnosť a spoľahlivosť práce.

Literatúra

- [1] *AFC-330 Automated Fundus Camera* [online]. [cit. 2020-13-02]. Dostupné z: <https://marco.com/product/afc-330-automated-fundus-camera/>.
- [2] *Explaining OCT Scans* [online]. [cit. 2020-13-02]. Dostupné z: <https://www.rsipvision.com/explaining-oct-scans/>.
- [3] *Foveola* [online]. [cit. 2020-13-02]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Foveola#/media/File:Macula.svg>.
- [4] *Indirect ophthalmoscopes* [online]. [cit. 2020-13-02]. Dostupné z: <https://www.medicalexpo.com/medical-manufacturer/indirect-ophthalmoscope-31315.html>.
- [5] *The Lenna Story* [online]. [cit. 2020-13-02]. Dostupné z: www.lenna.org.
- [6] *Navilas laser system* [online]. [cit. 2020-13-02]. Dostupné z: <https://www.od-os.com/navilas-laser-system/>.
- [7] *Retinal diseases and treatments* [online]. [cit. 2020-13-02]. Dostupné z: <http://www.sneretina.com/retinal-diseases-and-treatments/retinal-laser.asp>.
- [8] *Štrbinová lampa Hwitz HS-7000* [online]. [cit. 2020-13-02]. Dostupné z: <http://www.ao-do.cz/sk/sterbinove-lampy/4643-5429-strbinova-lampa-hwitz-hs-7000.html>.
- [9] *The use of tissue antisera (Serocytol®) in age-related macular degeneration.* [online]. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: https://www.gfmer.ch/Presentations_En/Serocytol_age-related_macular_degeneration.htm.
- [10] *Wet Retina* [online]. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.optometrystudents.com/os-brand-photos/wet-retina/>.
- [11] *Zumax DM6C Mini Direct* [online]. [cit. 2020-13-02]. Dostupné z: <https://zonemedical.com.au/diagnostic-equipment/ophthalmoscopes/zumax-dm6c-a-mini-direct-ophthalmoscope-with-5-apertures/>.
- [12] CAI, X., CHEN, Y., YANG, W., GAO, X., HAN, X. et al. The association of smoking and risk of diabetic retinopathy in patients with type 1 and type 2 diabetes: a meta-analysis. *Endocrine*. 2018, roč. 62, č. 2, s. 299–306. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12020-018-1697-y>. ISSN 1559-0100.
- [13] CIHELKOVÁ, I. a SOUČEK, P. *Atlas makulárních chorob*. Galén, Praha, 1993. ISBN 8072623702.

- [14] DOBEŠ, M. *Zpracování obrazu a algoritmy v C#*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-233-6.
- [15] DUARTE, A. A., MOHSIN, S. a GOLUBNITSCHAJA, O. Diabetes care in figures: current pitfalls and future scenario. *The EPMA journal*. 2018, roč. 9, č. 2, s. 125–131. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s13167-018-0133-y>. ISSN 1878-5085.
- [16] ERNEST, J., HEJSEK, L., NEMEC, P. a REJMONT, L. *Makulární degenerace*. 1. vyd. Mladá fronta, 2010. ISBN 9788020423634.
- [17] GONZALEZ, R. C. *Digital image processing*. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson ; Prentice Hall, 2008. ISBN 0-13-168728-X.
- [18] HABIB, M., WELIKALA, R., HOPPE, A., OWEN, C., RUDNICKA, A. et al. Detection of microaneurysms in retinal images using an ensemble classifier. *Informatics in Medicine Unlocked*. 2017, roč. 9, s. 44 – 57. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352914817300229>. ISSN 2352-9148.
- [19] HELMENSTINE, A. M. *Structure and Function of the Human Eye* [online]. [cit. 2020-13-02]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/how-the-human-eye-works-4155646>.
- [20] HLAVÁČ, V. *Matematická morfologie* [online]. [cit. 2020-13-02]. Dostupné z: <http://people.ciirc.cvut.cz/~hlavac/TeachPresCz/11DigZprObr/71-3MatMorpholBinCz.pdf>.
- [21] HORÁK, K. *Morfologické operace* [online]. [cit. 2020-13-02]. Dostupné z: http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/ZVS/Exercise10/content_cz.php.
- [22] HYCL, J. a TRYBUČKOVÁ, L. *Atlas oftalmologie*. 2. vyd. Triton, 2008. ISBN 9788073871604.
- [23] IVETA, G. Binárna morfologická filtrácia. *Typo*. 2017, roč. 10, č. 5. ISSN 1338-0087.
- [24] KAŠČÁKOVÁ, M., MAJERNÍKOVÁ Ludmila a OBROČNÍKOVÁ, A. *ŠPECIFIKÁ OŠETROVATELSKEJ STAROSTLIVOSTI O PACIENTA S DIABETICKOU RETINOPATIOU*. 1. vyd. Prešovská univerzita v Prešove, 2014. 94 s. Dostupné z: <http://www.pulib.sk/web/kniznica/elpub/dokument/Kascakova1>. ISBN 978-80-555-1165-8.
- [25] KUCHYNKA, P. *Oční lékařství*. 2. vyd. Grada, 2016. ISBN 9788024750798.
- [26] KVAPILÍKOVÁ, K. *Vyšetřování oka*. Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, Brno, 1995. ISBN 80-7013-195-0.
- [27] LEBL, J., PRŮHOVÁ Štěpánka, ŠUMNÍK, Z. et al. *Abeceda diabetu*. 4. vyd. Maxdorf, 2015. ISBN 9788073454388.
- [28] OLÁH, Z. et al. *Očné lékařstvo*. Osveta, Bratislava, 1993. ISBN 80-217-0437-3.
- [29] ROZSÍVAL, P. *Oční lékařství*. 1. vyd. Galén, Praha, 2006. ISBN 80-7262-404-0.
- [30] VALEŠOVÁ, L. a HYCL, J. *Diabetická retinopatie*. Triton, 2001. ISBN 978-80-7254-230-7.

- [31] VALLABHA, D., DORAIRAJ, R., NAMUDURI, K. a THOMPSON, H. Automated detection and classification of vascular abnormalities in diabetic retinopathy. In.: 2004. ISBN 0-7803-8622-1.
- [32] VIDERIZE projekt. Poskytnutá databáza výskumnej skupine Viderize.
- [33] VLKOVÁ, E., PITROVÁ Šárka a VLK, F. *Lexikon očního lékařství*. František Vlk, 2008. ISBN 978-80-239-8906-9.
- [34] WANDELL, B. A. *The Photoreceptor Mosaic* [online]. [cit. 2020-13-02]. Dostupné z: <https://foundationsofvision.stanford.edu/chapter-3-the-photoreceptor-mosaic/>.

Príloha A

Obsah priloženého CD

Prehľad súborov nachádzajúcich sa na priloženom CD:

- Zdrojový kód programu
- Dokumentácia zdrojového súboru(Doxygen)
- Písomná správa vo formáte PDF
- Zdrojové súbory písomnej správy pre vytvorenie PDF súboru (latex)
- Testovacie snímky vrátané výsledkov
- Súbor README