

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV ENERGETIKY



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2023

Využití fotogrammetrie pro studium  
vzniku hrubé vodní disperze v parních  
turbínách

Lukáš Jirásek

## Anotační list

---

<b>Jméno autora:</b>	Lukáš Jirásek
<b>Název BP:</b>	Využití fotogrammetrie pro studium vzniku hrubé vodní disperze v parních turbínách
<b>Anglický název:</b>	An application of the photogrammetric method for a study of the coarse droplets in steam turbine
<b>Akademický rok:</b>	2022/2023
<b>Ústav:</b>	Ústav energetiky
<b>Vedoucí BP:</b>	Ing. Ondřej Bartoš, Ph.D.
<b>Bibliografické údaje:</b>	Počet stran: 69 Počet obrázků: 53 Počet tabulek: 0 Počet příloh: 0
<b>Klíčová slova:</b>	Fotogrammetrie, eroze parních turbín, segmentace, hrubá vodní disperze, MATLAB
<b>Keywords:</b>	Photogrammetry, steam turbine erosion, segmentation, coarse droplets, MATLAB
<b>Anotace:</b>	Práce se zabývá experimentálním studiem vzniku hrubých kapek způsobujících erozi lopatek posledních stupňů parních turbín. Pro experiment bylo simulováno prostředí parní turbíny pomocí experimentální dýzy a k měření se použila fotogrammetrická metoda. Pro vyhodnocování je nastíněn vzhled do problematiky segmentace obrazu.
<b>Abstract:</b>	This paper deals with an experimental study of coarse droplet formation causing erosion at the last stage of steam turbines. An environment of the steam turbines was simulated by the utilisation of an experimental nozzle. The photogrammetric method was used for the measurement and the image segmentation was presented for the future study.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Datum: .....

Podpis: .....

## **Poděkování**

Přeji si poděkovat panu Ing. Ondřeji Bartošovi, Ph.D. za jeho cenné rady při konzultování řešení práce a provádění experimentů. Mé poděkování také patří rodině a blízkým, kteří mne podporovali během celého studia.

# Obsah

1. Úvod .....	7
2. Teoretická část .....	8
2.1. Parní turbíny .....	8
2.1.1. Vývoj parních turbín .....	8
2.1.2. Současné parametry parních turbín .....	9
2.2. Eroze nízkotlakých dílů parních turbín .....	11
2.2.1. Klasická teorie nukleace .....	11
2.2.2. Vznik hrubých kapek .....	12
2.2.3. Dopad kapky na povrch lopatky .....	14
2.2.4. Mechanismus eroze .....	15
2.2.5. Faktory ovlivňující erozi .....	16
2.2.5.1. Velikost kapek .....	17
2.2.5.2. Drsnost povrchu lopatek .....	17
2.2.5.3. Rychlost kapek a materiál lopatek .....	17
2.2.6. Ochrana před erozí .....	18
2.2.6.1. Laserové kalení .....	18
2.2.6.2. Vysokorychlostní aerosolové povlakování .....	18
2.2.6.3. PVD povlakování .....	18
2.2.6.4. Stelit .....	19
2.3. Aerodynamické tunely .....	20
2.3.1. Historie a vývoj .....	20
2.3.2. Části a stavba aerodynamického tunelu .....	20
2.3.2.1. Otevřené tunely .....	20
2.3.2.2. Uzavřené tunely .....	21
2.3.3. Lavalova dýza .....	22
2.4. Optické metody měření vodních kapek .....	23
2.4.1. Fotogrammetrie .....	23
2.4.2. Vybrané segmentační metody .....	24
2.4.2.1. Otsuova metoda .....	24
2.4.2.2. Metoda adaptivního prahování .....	25
2.4.3. Mieho teorie rozptylu světla .....	25
2.4.4. Rayleighova teorie rozptylu světla .....	26
3. Experimentální část .....	27
3.1. Experiment na trysce .....	27

3.1.1.	Popis experimentální tratě .....	27
3.1.2.	Segmentace obrazu .....	28
3.1.2.1.	Převod na obrázek ve stupních šedi .....	28
3.1.2.2.	Vyhlazení hran .....	29
3.1.2.3.	Zvýšení jasů a kontrastu .....	30
3.1.2.4.	Vyplnění děr a spojení .....	31
3.1.3.	Vhodné segmentační metody .....	31
3.1.3.1.	Otsuova metoda .....	31
3.1.3.2.	Adaptivní prahování – Gaussův průměr .....	32
3.1.3.3.	Adaptivní prahování – funkce světlého pozadí .....	34
3.1.3.4.	Adaptivního prahování – medián oblasti .....	35
3.1.3.5.	Bradleyho metoda .....	36
3.1.4.	Závěr .....	37
3.2.	Experimentální dížka .....	39
3.2.1.	Popis experimentální tratě .....	39
3.2.2.	Výpočet rychlosti proudění .....	41
3.2.3.	Vyhodnocení rychlostí .....	43
3.2.3.1.	Náhlé otevření ventilu .....	43
3.2.3.2.	Konstantní rychlost .....	45
3.2.3.3.	Skokové otevírání ventilu .....	47
3.2.4.	Segmentace snímků .....	48
3.2.4.1.	Ekvalizace histogramu .....	49
3.2.4.2.	Porovnání postupu se snímkem z trysky .....	51
4.	Výsledky měření .....	52
4.1.	Nízké rychlosti .....	52
4.2.	Přechodné rychlosti .....	54
4.3.	Vysoké rychlosti .....	55
5.	Závěr .....	58
6.	Seznam značek a symbolů .....	60
7.	Seznam obrázků .....	61
8.	Použitá literatura .....	63

# 1. Úvod

V současné době patří oblast energetiky mezi hojně diskutovaná témata v médiích i veřejné sféře. Neustávající zvyšování množství vypouštěných skleníkových plynů do atmosféry a současná politická a společenská situace v Evropě tlačí na vyhledání řešení, které musí přijít od techniků, cestou pokroku ve sféře výroby elektřiny, tepla a udržitelného způsobu mobility. Pro udržení současného životního stylu obyvatel hospodářsky rozvinutých zemí a umožnění udržitelného a na životní prostředí ohleduplného rozvíjení zemím, které se transformují ve státy vyspělé, je důležitý a nezbytný vývoj v oblasti energetiky, která má v konečném důsledku na růst životní úrovně svůj nepopiratelný vliv.

Podle IEA bylo v roce 2021 přes 65 % [1] elektrické energie ve světě vyrobeno ze spalitelných zdrojů, tj. fosilních paliv a biomasy, a zhruba 16 % elektrické energie světa bylo vyrobeno pomocí jádra. V drtivé většině je základním principem výroby elektrické energie z těchto zdrojů přeměna chemické, nebo jaderné energie na tepelnou, která ohřívá médium elektrárny, nejčastěji vodu, expanduje v páru a roztáčí turbínu, která pohání generátor. Za výrobou většiny elektrické energie světa tak stojí parní turbíny. Je od nich obecně vyžadováno fungování v náročných pracovních podmínkách a odolávání jim bez časté údržby. Každá odstávka ať už za účelem revize, běžné kontroly či výměny určité součástky stojí energetické společnosti velké sumy peněz, které se podepíší v koncové ceně energie zaplacené spotřebitelem.

Nejzranitelnější částí turbín jsou lopatky. Ty totiž podléhají erozi způsobenou hrubou vodní disperzí. Obecně se dá tvrdit, že se eroze projevuje výrazným zhoršením kvality povrchu lopatek. Tyto nedokonalosti mohou narušit přesnou geometrii a vyváženost turbíny a snížit různými netěsnostmi či naopak nežádoucími kolizemi mezi rotorovou a statorovou částí stroje účinnost parní turbíny. Studium jevů, které stojí za erozí tak může pomoci s prodloužením životnosti a vývojem, který povede k tíženému zdokonalení samotného procesu a technologie výroby elektrické energie.

Studií, které empiricky zkoumají vznik hrubé vodní disperze, je stále poměrně málo. Moderní výzkumy popisují mechanismy odtékání kapek po lopatce a následné tvoření hrubých kapek v různých režimech proudění a nenachází mezi nimi další souvislosti. V zájmu současného bádání je zejména lepší porozumění mechanismu odtoku a následného odtrhávání v závislosti na rychlosti proudění kapek, protože by podle dříve provedených studií, které jsou v textu citovány, měla mít právě rychlost proudění spojitost s hrubou vodní disperzí. Touto problematikou se také zabývá výzkum Ústavu energetiky Fakulty strojní Českého vysokého učení technického v Praze, díky kterému mohla práce vzniknout.

## 2. Teoretická část

Teoretická část práce otevírá problematiku vzniku hrubé vodní disperze úvodem do vývoje a současné konstrukce parních turbín. Poté se věnuje rešerši v oblasti problematiky eroze lopatek turbín, kde nastiňuje doposud známé teorie, o které se opírá výzkum a současný stav poznatků v tomto odvětví energetiky a mechaniky tekutin. Dále jsou připomenuty kapitoly související s aerodynamickými tunely, jejichž znalost a pochopení fungování jsou důležité pro zvládnutí provedení experimentů na experimentální dýze. Poslední kapitola teoretické části je věnována teorii rozptylu světla a fotogrammetrie spolu se segmentací obrazu, tedy metodou vyhodnocování dat fotogrammetrií získaných.

### 2.1. Parní turbíny

Jsou zdrojem mechanické rotační energie pro alternátory tepelných elektráren, kde se vyrábí většina elektrické energie světa. Znalost parametrů páry, při kterých turbíny pracují a jich samotných je v kontextu důležitá pro porozumění teorie eroze způsobené hrubou vodní disperzí.

#### 2.1.1. Vývoj parních turbín

První turbína využívající ke svému rozpořybování páru byla navržena již v prvním století našeho letopořtu Heronem Alexandrijským [2][3]. Šlo o reakční turbínu, která navíc neměla žádného praktického využití. Současné stavbě se alespoň podobající zařízení vzniklo v Itálii v 17. století, ze kterého taktěž nebylo možno využít žádnou práci. Další rozvoj impulzních turbín umožnila až průmyslová revoluce a zdokonalení parního stroje [2]. Většího zapojení i do průmyslové výroby se povedlo vynálezu Williamu Averyovi, který zkonstruoval roku 1847 ve Spojených státech impulzní parní turbínu vhodnou pro použití například k pohonu pil nebo zpracovatelem bavlny. Těchto zařízení bylo nasazeno kolem padesáti a u jednoho z nich se experimentovalo i s poháněním lokomotivy [4].

Až konec 19. století přinesl zázemí vhodné pro vývoj moderních parních turbín. Zdokonalení žárovky Edisonem v roce 1879 přineslo větší poptávku po elektrické energii [4]. Angličan Parsons roku 1884 zjistil, že k navýšení účinnosti turbíny je vhodné ji rozdělit do několika stupňů, protože se může tepelná energie lépe přerozdělit. Nutno zmínit dva konstruktéry 80. až 90. let 19. století – Laval a Curtise. Švéd Laval navrhl několik turbín s klasickou stavbou statoru rotoru s lopatkami na hřídeli, které našly užití u pohonu lodí, ale také turbíny diskovitého tvaru s lopatkami po svém obvodu, na které byl tryskán proud páry. Tyto turbíny dosahovaly obrovských otáček a byly



vhodné jen pro omezené množství aplikací, jedna z nich byla například pro separaci smetany [3]. V roce 1896 přišel Američan Curtis s novou myšlenkou pohonu generátoru na výrobu elektrické energie. Pro společnost General Electric Co. zkonstruoval vysokorychlostní více stupňovou parní turbínu, která se již podobala těm moderním [2].

Pokrok a vývoj v oblasti využití páry k výrobě elektrické energie byl opravdu znatelný v první polovině 20. století. Mezi lety 1900-1910, kdy se výkon největších turbín zvýšil z 1,2 MW na hodnoty nejdokonalejších spalovacích motorů té doby, tedy až 30MW [3]. Pracovní teploty parních turbín z konce 19. století dosahovaly hodnot pro sytou páru (180 °C pro tehdejší parametry stroje) a před 2. světovou válkou bylo možné i díky značnému pokroku v oblasti materiálového inženýrství dosáhnout teplot, kdy vznikala přehřátá pára, tedy 315-510 °C [4][5]. Hodnoty pracovního tlaku se ve stejné době více než zdevítinásobily až na 9300 kPa. Zároveň se zvýšila účinnost technologie ohřevu vody o 75 % [4].

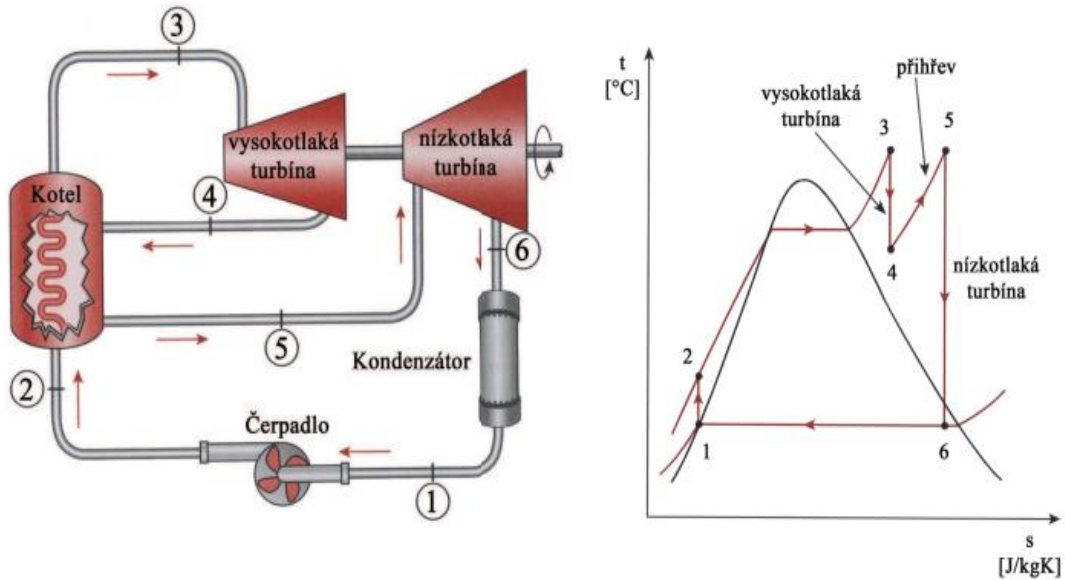
### 2.1.2. Současné parametry parních turbín

Vývoj dospěl k plánovaným parním turbínám s výkonem až 1,7 GW. Tyto turbíny vyvíjí firma GE Steam Power a mají pohánět generátory jaderných elektráren. V klasických tepelných elektrárnách je díky důmyslnému systému znovu ohřevu páry dosahováno již běžně za posledních 60 let superkritických hodnot a nové feritické slitiny umožňují konstruovat stroje, které budou moci pracovat při teplotách nad 620 °C. Běžné parametry pro turbíny Škoda 200 MW jsou 16,7 MPa/538 °C/538 °C. Modernější turbíny s parametry 28,5 MPa/600 °C/620 °C dosahují účinnosti přeměny energie z uhlí zhruba 45 %, ty nejlepší maximálně 48,5 % [7].

U současných parních turbín jsou kladeny velké nároky na vysoký výstupní výkon a zařízení musí pracovat za vysokých entalpických spádů, neboť tato konfigurace zaručuje lepší účinnosti oběhu. Pro dosažení těchto parametrů je nutné turbínu rozdělit do více stupňů, tedy umístit více řad rotorových i statorových lopatek [8], provést i opakovaný přihřev páry a rozdělit turbínu na více turbín podle tlaku, při kterém pracuje. Navýšení účinnosti turbín, které pracují podle Rankin-Clausiova cyklu, je možné docílit zvýšením rozdílu teploty na vstupu a výstupu. Několikanásobným ohřevem se dá přiblížit k ideálnímu Rankin-Clausiově cyklu, zvýší se tedy účinnost a sníží vlhkost páry [9].

Příklad Rankin-Clausiova cyklu s jedním přihřevem je na obrázku 2.1. Z t-s diagramu lze vyčíst, že krok 1-2 je izoentropická komprese. Voda je z bodu 2 izobaricky ohřívána, přechází v plynnou fázi a je přehřívána až do stavu 3. Následně je vedena vysokotlakou turbínu (4), kde se ochladí předáním energie lopatkám. Z vysokotlaké turbín proudí pára zpět do

přehříváku, odkud je vedena na nízkotlakou turbínu (5). Z ní putuje pára do kondenzátoru, kde přechází v kapalnou fázi. Z diagramu je patrné, že na vysokotlaké turbíně má pára stále superkritické parametry. Na nízkotlaké turbíně však přechází přesycená pára do syté a následně i do fáze mokré páry. Právě lopatky nízkotlaké turbíny a konkrétně jejich poslední stupně jsou kvůli výskytu fázové změny erozí nejvíce ohroženy.



Obrázek 2.1: Rankin-Clausiusův cyklus s přehřevem [8] (upraveno)

## 2.2. Eroze nízkotlakých dílů parních turbín

Eroze způsobená hrubými vodními kapkami se od kavitace liší tím, že probíhá výhradně v plynném prostředí s kapkami vody [10]. Kavítace je naproti tomu jev, který je možno sledovat v prostředí, kde převládá kapalná fáze a kde jsou za opotřebením materiálu odpovědné rázy při zániku bublinek, které jsou naplněny párou. Ta vzniká v kapalině vlivem vysoké rychlosti, tedy poklesem tlaku, kdy se voda začne vařit. Kavítaci je možno pozorovat například u lodních šroubů.

Erozi lopatek turbíny je možné definovat jako odstraňování materiálu z povrchu lopatek zapříčiněné srážkou kapky s velkou kinetickou energií a lopatky [10] [11]. Kapky obecně zdrsňují a zakřivují povrch lopatek, což zhoršuje průtok páry, tvoří víry a snižuje účinnost turbíny [12]. Primární kapky vznikají při procesu expanze páry podle teorie klasické nukleace. Na lopatkách se tyto kapky spojí a vytvoří film, který se po lopatce přesouvá až k její špičce, kde se utrhuje ve formě hrubých kapek s průměrem až 1 mm, ty se však vlivem vysoké rychlosti rozpadají na menší kapky, které jsou označovány jako sekundární nebo hrubé [12]. K výzkumu a vyhodnocování mechaniky utrhuje kapek se používají optické metody měření [13]. Sekundární kapky dále putují turbínou a naráží na rotující lopatky. Tento jev se nazývá *water-hammer* a jeho důsledky velmi namáhají povrch lopatek velkým tlakem. Míra poškození je mimo rychlosti a velikosti dopadajících kapek závislá na úhlu dopadu, distribuci dopadů a jejich četnosti, materiálu lopatek a viskozitě tekutiny [12][14]. V současnosti probíhá výzkum v oblasti nových možností ochrany lopatek [15].

### 2.2.1. Klasická teorie nukleace

K porozumění problematice vzniku eroze je nutné se zabývat tím, jak vznikají v okruhu páry kapky způsobující erozi. Tento proces je důsledkem nukleace. Nukleace je jev, který nastává, když je mateřská fáze nebo skupenství uvedeno do nerovnovážného stavu a zároveň vysvětluje také podstatu vytváření kapek, které jsou zodpovědné za erozi turbín. Při expanzi přehřáté páry dochází v určitém okamžiku k přesycení, tedy podchlazení páry. V tomto momentu supersaturace je relativní vlhkost větší než 100 %. Masa molekul nemá stejný chemický potenciál a jejich rozdíl tak donutí nestabilní shluky molekul, které se nacházejí v termodynamicky nerovnovážném systému, zkondenzovat v malé kapky. Rozdíl chemických potenciálů tedy vytváří aktivační energii potřebnou k překonání maximální energie soustavy a soustava se po tomto překonání dostává do nerovnovážného stavu a kondenzací kapek do stavu stabilnějšího, kdy vzniká mokrá pára. Zvyšování tlaku v soustavě za konstantní teploty tedy vyvolá

energeticky výhodnější možný stav, kdy má soustava menší celkovou energii [16, 17, 18, 19, 20].

Nukleace se řídí Gibbsovým zákonem volné energie a zároveň popisuje mechanismus tvorby primárních kapek. Změna Gibbsovy energie je pospána jako funkce poloměru kapky  $r$  rovnicí (2.1) [17],

$$\Delta G = 4\pi r^2 \sigma_K - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_K R T_P \ln S \quad (2.1)$$

kde  $\sigma_K$  je povrchové napětí kapaliny,  $\rho_K$  hustota kapaliny,  $R$  plynová konstanta a  $S$  je supersaturační konstanta, která je pro přesycenou páru větší než 1. Vzhledem k tomu, že supersaturační konstanta  $S$  je vždy kladná a pro přesycenou páru větší než 1, Gibbsovu energii může snížit kapka, která má poloměr větší než kritický poloměr  $r^*$ . V opačném případě by menší kapka nesnížila celkovou energii soustavy a ta by tak dále zůstala v energeticky nevýhodném stavu. Kritický poloměr  $r^*$  je určen rovnicí (2.2) a stanovuje minimální potřebný průměr kapky, která sníží energii soustavy [17].

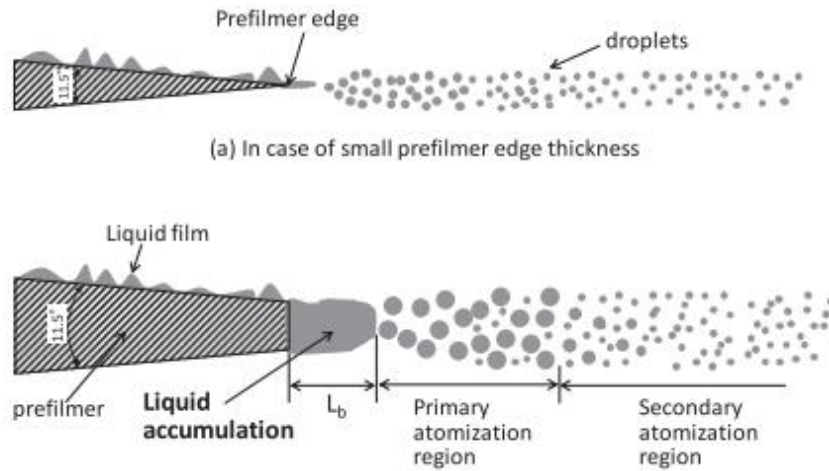
$$r^* = \frac{2\sigma_K}{\rho_K R T_P \ln S} \quad (2.2)$$

Pokud tedy vznikne kapka, která splňuje kritérium dané kritickým poloměrem  $r^*$ , má tendenci růst, neboť čím větší je, tím více je schopna snížit Gibbsovu energii a přivést termodynamickou soustavu do energeticky výhodnějšího stavu [17]. Navíc během procesu nukleace není latentní teplo, které se do soustavy uvolní kondenzací, předáno páře, ale kapkám vody. Proces kondenzace kapek tedy způsobuje úbytek energie proudící páry a projeví se ve snížení jejího objemového toku [12].

### 2.2.2. Vznik hrubých kapek

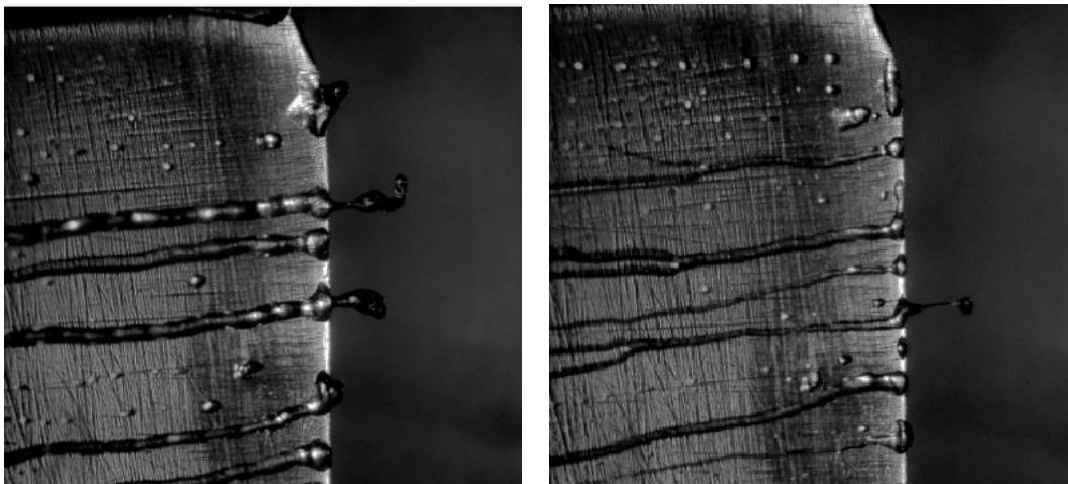
Shlukování molekul a následná kondenzace řídicí se Gibbsovým zákonem volné energie vytváří primární kapky o velikosti desetin až jednotek mikrometrů [13]. Ty jsou stále velmi malé, pro lopatky samy o sobě neškodné a putují poháněny pohybující se párou kolem nízkotlaké turbíny. Některé z nich však dopadnou až na povrch lopatek, neboť jsou přitahovány k povrchu turbulentním difúzním mechanismem. Ten strhává primární kapky proudící v proudu páry přes mezní vrstvu až na povrch lopatek, kde vytváří vodní film [21]. Vlivem setrvačné síly kolem proudící páry mohou z filmu tvořit malé pramínky, které míří ke konci odtokové hrany lopatek, kde se voda odtrhává. Samotné odtržení je mimo jiné ovlivněno tloušťkou konce odtokové hrany. K lopatce s větší šířkou hrany má proud tendenci se přimykávat, na konci se

tak akumuluje voda a až z tohoto shluku se poté odtrhávají kapky [22]. Porovnání mechanismu odtržení u dvou typů hran lopatek je na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Porovnání odtrhávání kapek z lopatky s tenkou hranou a silnější hranou [22]

Odtržením vznikají kapky, které se v proudu rychle se pohybující páry rozpadají na sekundární (hrubé) kapky o velikosti v řádech stovek mikrometrů, které způsobují erozi a jsou tak pro lopatky turbíny nebezpečné. Odtrhávání kapek od odtokové hrany je zobrazeno na snímku na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Odtrhávání kapek z hrany lopatky

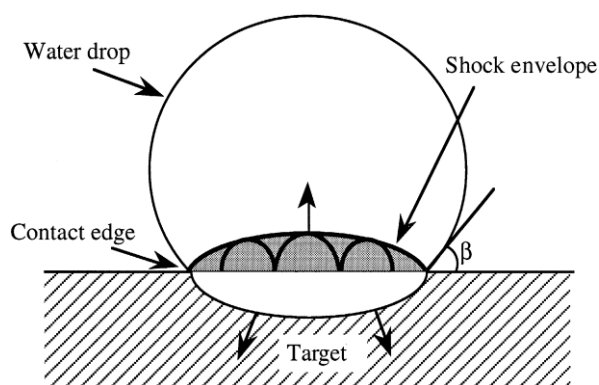
Výzkumu mechanismu odtrhávání hrubých kapek se věnuje studie Bartoše [13], která pro měření využívá optické fotogrammetrické metody. Potvrzuje, že odtrhávání je silně stochastické a zkoumala důvody, proč se vytváří kapky větších průměrů, než předkládá Weberovo číslo  $We$ , které je dáno rovnicí (2.3),

$$We = \frac{\rho u^2 d}{\sigma_K} \quad (2.3)$$

kde  $\rho$  je hustota páry,  $u$  relativní rychlost kapek vůči rychlosti proudícího plynu, tedy páry,  $d$  je průměr kapek a  $\sigma$  povrchové napětí vody. Toto podobnostní číslo dává do poměru setrvačné síly, v tomto případě tah proudící páry, a povrchové napětí kapek. Weberovo kritickým číslem je možno určit maximální možný průměr, který může kapka po odtržení mít. Podle Heinze je Weberovo kritické číslo pro náhlé vystavení, tedy při podmínkách podobných u problematiky eroze na parních turbínách, rovno třinácti. Ve studii [13] bylo však fotogrammetrickým měřením zjištěno, že vznikají i větší kapky. Tento jev může být vysvětlen rychlostním profilem, který neodpovídá turbulentnímu proudění, avšak k jednoznačnému vysvětlení doposud nedošlo.

### 2.2.3. Dopad kapky na povrch lopatky

V prostředí páry způsobují erozi hrubé vodní kapky, které vznikají z primárních kapek jako výsledek odtrhávání vodního filmu z lopatek. První studie erozivních jevů týkajících se parních turbín vznikaly již na začátku minulého století například díky slovenskému vědci A. Stodolovi [23] a od té doby jsou díky snaze zvyšování účinnosti výroby elektrické energie hojně studovány. Eroze je čistě mechanický jev a je poměrně dobře popsán množstvím studií jako např. [24], [25] nebo [26]. Rychle se pohybující kapky s velkou kinetickou energií poháněné proudem páry se srazí s až nadzvukově rychle se pohybující lopatkou. Dopad kapky na povrch lopatky do ní vnese napětí, která jsou způsobena velkým tlakem vyvolaným srážkou lopatky a kapky. Tento tlak je znám jako tzv. *water-hammer* [24] a zjednodušeně ho lze popsat jako prudké zvýšení tlaku při rychlém zastavení proudu tekutiny [26]. Šíření rázové vlny je zobrazeno na obrázku 2.4.

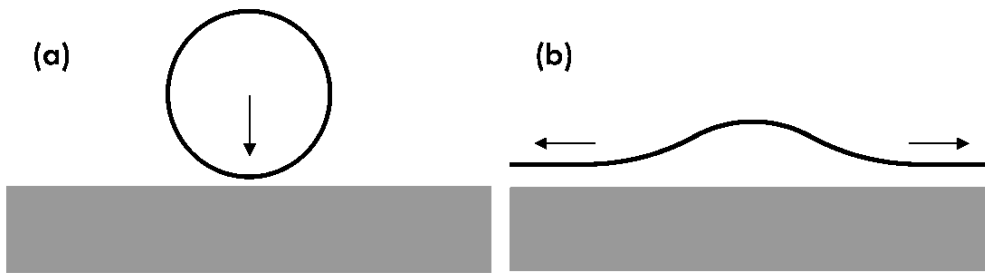


Obrázek 2.4: Šíření rázové vlny při nárazu kapky na povrch lopatky [24]

V Lesserově práci [25] je uvedeno, že lze tento jev modelovat pomocí Huygenových principů, které kvantitativně popisují šíření vln. Tlak  $p$  při dopadu kapky na pohybující se předmět lze popsat rovnicí (2.4) [24],

$$p = \frac{v\rho_L a_L \rho_K a_K}{\rho_K a_K + \rho_L a_L} \quad (2.4)$$

kde  $\rho$  je hustota kapky a lopatky,  $a$  rychlost šíření mechanického vlnění, tedy rychlost zvuku v prostředí kapky a lopatky a  $v$  nárazová rychlost. Tlak na kontaktní ploše může být až třikrát větší, než uvádí rovnice (2.4) [24]. Kapka se následně rozplyne, jak ukazuje obrázek 2.5 a vymílá povrch, což bude popsáno v následující kapitole.

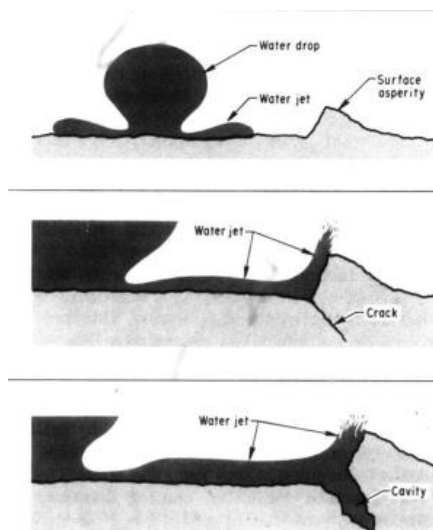


Obrázek 2.5: Rozplynutí kapky [27]

#### 2.2.4. Mechanismus eroze

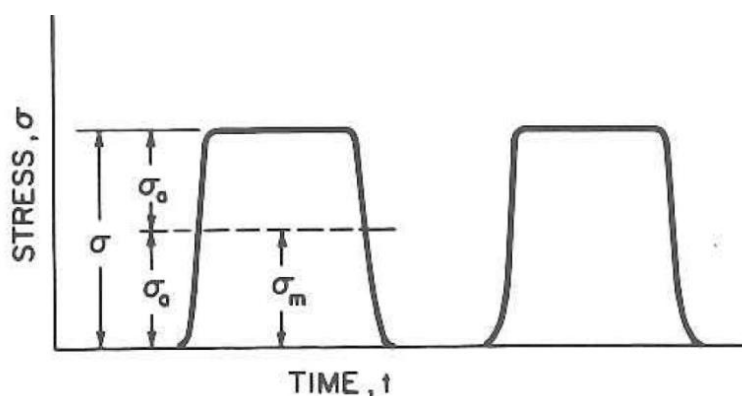
Samotný mechanismus eroze se dá popsat čistě z mechanického pohledu a má několik fází, které rozebírá ve své práci Springer [28]. Nejprve probíhá inkubační doba, kdy se eroze neprojevuje ztrátou materiálu a v případě lopatek turbín nijak výrazně nenarušuje jejich běžnou funkčnost. Povrch se může deformovat, zhrubovat a poškrabovat, což vytváří v mikroskopickém měřítku malé krátery, které zvyšují náchylnost povrchu na opotřebení a zrna materiálu se deformují. Doba trvání inkubační doby je dána parametry turbíny i páry. Například pro turbínu, která se otáčí 10 000 otáčkami za minutu, proudí přes ní 98 % mokrá pára o teplotě 150 °C, její lopatky mají délku 30 cm a průměrná velikost kapek je 0,05 mm trvá inkubační doba na náběžné hraně zhruba 260 hodin [28].

Pokud je materiál vystaven erozivním činitelům delší dobu, nastává fáze stálého úbytku hmotnosti [28]. V této fázi materiál již ztrácí svou hmotnost tím, že se krátery, které vytvořily dřívější dopady kapek, rozšiřují, až tlačení a deformace začnou být pro materiál neúprosné a zrna se začnou po svých hranicích oddělovat. Takto vznikají mikropraskliny, které se rozšiřují a prohlubují, dokud se postižený segment materiálu neoddělí od zbytku. Odtrhávání části materiálu způsobené vodní erozí je zobrazeno na obrázku 2.6. Fáze stálého úbytku hmotnosti se nazývá stála, protože je její časový průběh ztráty materiálu téměř lineární funkcí času. Když už materiál ztratí vlivem eroze své kvalitativní i kvantitativní vlastnosti a je pro danou aplikaci nepoužitelný, hovoří se o koncové fázi eroze [28].



Obrázek 2.6: Mechanismus eroze [29]

Napětí vnášená do materiálu dopady kapek se dají zjednodušeně modelovat jako mívivý cyklus, jak naznačuje obrázku 2.7,



Obrázek 2.7: Mívivý cyklus [28]

kde je  $\sigma_m$  předpětí,  $\sigma_a$  je amplituda střídavého cyklu a  $\sigma$  je napětí od dopadu kapky. Pro určení únavy a například předpovědění životního cyklu lopatky se používá dynamický ekvivalent napětí  $\sigma_e$  [28].

V současnosti také existuje celá řada modelů pro popis chování eroze na lopátkách turbín. Jedna z nich [30] provedená pro Škoda Turbine Plzeň, vytváří optimalizovaný model pro lopatky z titanu, stelitu i tvrzených ocelí a popisuje monotónně chování eroze už od počátku narušování vodními kapkami.

## 2.2.5. Faktory ovlivňující erozi

První studie erozivních jevů týkajících se parních turbín vznikaly již na začátku minulého století například slovenským vědce A. Stodolou [23]. Snaha těchto studií byla stejná jako ta dnešní, měly za úkol prodloužit



životnost turbíny a vytvořit jisté modely toho, co erozi způsobuje, jak je opotřebení, a tedy životnost závislá na době zatěžování a jak je možné těmto škodlivým mechanismům předcházet. S rostoucím využíváním parních turbín v energetice se také zvyšoval zájem o studium těchto vlivů. Výsledky řady studií z přelomu šedesátých a sedmdesátých let vedly k zjištění, že erozi výrazně ovlivňuje hned několik faktorů.

#### 2.2.5.1. Velikost kapek

*Water-hammer*, tedy vysoký tlak způsobený nárazem kapky do turbíny, odezní po relaxačním čase (v řádu nanosekund), který je dán rychlostí zvuku a velikostí kapky. Větší kapky tedy mohou způsobit lopatkám větší poškození než ty menší, neboť rázové vlně, která vznikne při nárazu, trvá déle, než kapku pohltí a zdeformuje a ráz je delší, má tedy destruktivnější charakter.

Teorii rázu aplikovanou na problematiku eroze potvrzují výsledky experimentu [31]. Během něj bylo zjištěno, že když se průměr dopadající kapky zvýší z 0,1mm na 0,5mm, při zachování stejného celkového objemu všech kapek, tedy snížení jejich počtu stovacetipětinásobně, jsou důsledky eroze horší. Dá se tedy říci, že 125 kapek o průměru 0,1mm má méně destruktivní vliv než jediná kapka o průměru 0,5 mm. Proto je tak důležité zabývat se vznikem velkých kapek.

#### 2.2.5.2. Drsnost povrchu lopatek

Drsnosti povrchu lopatek, co by dalšímu parametru, který ovlivňuje erozi, nebyla delší doba věnována větší pozornost. Až studie Kirolse [32] se zabývá, jak jakost povrchu ovlivňuje spolu s měnící se rychlostí a velikostí kapek výslednou míru destrukce materiálu. V jeho studii byl použit vzorek martenzitické nerezové oceli a slitiny titanu Ti6Al4V. Testy prokázaly, že kvalitativně lepší povrch může prodloužit inkubační fázi eroze. U frézované martenzitické oceli došlo po vyleštění na drsnost 3,2 Ra k prodloužení inkubační fáze o 70 % a u titanové slitiny vyleštěné z 0,3 Ra na 0,006 Ra dokonce až ke zdvojnásobení trvání inkubační fáze, čímž se oddaluje začátek fáze stálého úbytku hmotnosti. Efekt zlepšení povrchu je však stále závislý i na ostatních parametrech, kterými jsou v této studii [32] velikost a rychlost proudění kapek.

#### 2.2.5.3. Rychlost kapek a materiál lopatek

Velký dopad na výslednou erozi má rychlost vodní kapky při srážce s lopatkou turbíny. U posledních stupňů parních turbín je díky moderním dlouhým lopatkám (až 1 m) rychlost střetu vůbec největší, neboť jejich konce rotují největší obvodovou rychlostí a jsou tak ne erozi velmi náchylné. Podle výsledků experimentů Mansoor (2009) [33], který testoval 5 různých vzorků materiálů, konkrétně povrchově neupravenou a tvrzenou ocel X5CrNiCuNb

16-4, ocel X5CrNiMoCuNb 14-5, chromovou ocel X20Cr13 a titanovou slitinu Ti6Al4V, na erozivní odolnost zjistil a ověřil, že v závislosti na rychlosti tekutiny činící erozi všechny vzorky vykazují exponenciální závislost.

## 2.2.6. Ochrana před erozí

Dopad eroze se dá snížit buď změnou parametrů na vstupů na turbínu nebo takzvanou štítovou ochranou. Jedná se o povrchové úpravy samotných lopatek turbín, které mají za cíl zvýšit tvrdost a únavovou pevnost materiálu. Modernější metody pracují s novými materiály vyvíjenými speciálně pro aplikaci na abrazivně těžce namáhaných součástkách.

### 2.2.6.1. Laserové kalení

Mezi nejčastější metody, které se používají ke zvýšení těchto parametrů, patří laserové kalení. To má od ostatních způsobů kalení výhodu v malém zásahu do materiálu a nízké prokalené vrstvě, zároveň však zvyšuje životnost kaleného povrchu a vytváří velmi jemné struktury, které snižují riziko mikrotrhlin a vnesení vnitřních napětí. Patří mezi metody využívající princip samokalení, kdy je malý ohřátý kus materiálu prudce chlazen okolním materiálem, resp. se teplo vnesené laserem rychle odvede do okolí. [35] Nevýhodou kalení povrchů je, že nemůže být použito u každého materiálu. Materiály vhodné pro kalení, které se používají pro výroby parních turbín, jsou například ocel T671 nebo titanová slitiny Ti6Al4V a TiAlN. Další nevýhodou použití samotného kalení je možnost ztráty těchto vlastností provozem ve velmi vysokých teplotách. Proto jsou například firmou Doosan Škoda Power [36] vyvíjeny nové metody na zvýšení protikorozní ochrany.

### 2.2.6.2. Vysokorychlostní aerosolové povlakování

Dalším způsobem je HVOF, neboli vysokorychlostní aerosolové povlakování. Jde v podstatě o sprejování povrchu, které má za úkol zabránit abrazivním a erozivním jevům. Ze všech zmíněných způsobů je díky němu možno dosáhnout nejvyšší tvrdosti až 1500 HV a tloušťky ochranné vrstvy až 1 mm. [36]

### 2.2.6.3. PVD povlakování

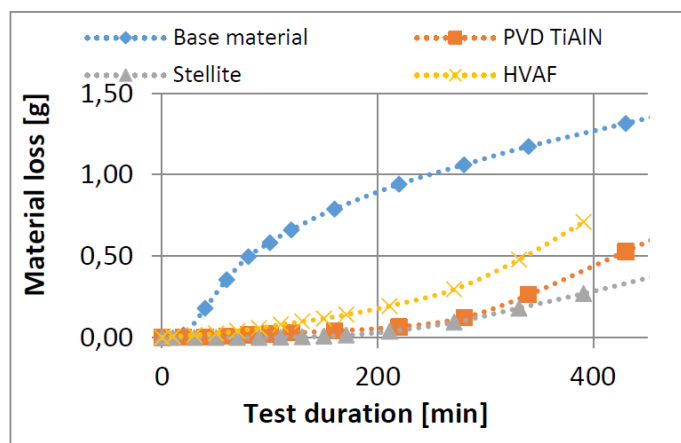
Jedna z metod, která může být použita pro zvýšení tvrdosti je PVD povlakování. Spočívá v naprašování tvrdých látek, kdy kationty narážející do povrchu katody z ní vyráží atomy a ty dopadají na povlakovaný (tvrzený) povrch. Pro ochrnu lopatek parních turbín se často používají karbidy chromu. Podle studie Safonova a spol. [37] je to výhodnější než použití nitridů chromu, oceli Armco nebo samotné slitiny 18Cr10NiT. V oblastech s největšími dopady eroze však po třiceti minutách testování docházelo ke křehkému lomu

ochranné vrstvy. Oproti klasickému kalení je nevýhodou cena, která může být až desetinásobná, avšak PVD povlakování zaručuje vyšší tvrdost [36].

#### 2.2.6.4. Stelit

Metoda ochrany proti erozi, která na sebe v současné době strhává nejvíce pozornosti je použití stelitu. Jedná se o netvárnou slitinu kobaltu, chromu, molybdenu, wolframu a uhlíku, který vytváří tvrdé a vůči opotřebování odolné karbidy. Pro povlakování je zkoumána nová technologie roztavení práškového stelitu laserem, která má namísto již používané metody připájení stelitových plátů na náběžné hrany lopatek výhodu v podobě eliminování možnosti odtrhnutí plátu od lopatky. Metodou svaření se na druhou stranu může do materiálu vnést napětí. Tento jev se však dá ovlivnit a regulovat intenzitou laserového paprsku či jinými pokročilejšími metodami [36].

Díky výsledkům experimentů společnosti Doosan Škoda Power týkajících se ochrany lopatek turbín posledního stupně před erozí, při kterých byla udržovaná rychlost 523 m/s a průměr kapek 410  $\mu\text{m}$  po dobu 400 minut. Takové podmínky odpovídají zhruba půl roku provozu při nižším zatížení. Experimentem bylo zjištěno, že nejlepších výsledků dosahuje ochrana stelitem, jak dokazuje také porovnání jednotlivých způsobů na obrázku 2.8.



Obrázek 2.8: Porovnání způsobů ochrany [36]

## 2.3. Aerodynamické tunely

Aerodynamické tunely jsou dnes již neodmyslitelnou součástí výzkumu, vývoje a inovací v široké oblasti inženýrských aplikací. V současnosti jsou však stále často používány matematické numerické simulace, které tunely dokáží do určité míry nahradit. Kvůli ověření správnosti numerických metod a úvah s nimi spojenými je však nezbytné experimenty na nich stále provádět.

### 2.3.1. Historie a vývoj

Snaha vytvořit zařízení pro zkoušky aeronautických strojů sahá již do počátků letectví. Již Leonardo da Vinci nebo Isaac Newton hledali způsob, jak své modely otestovat, aniž by je museli zničit hozením ze skály doufajíce, že jejich výtvar poletí. Až průmyslová revoluce přinesla první zařízení, které by se dalo označit jako původce dnešních aerodynamických tunelů. Šlo o horizontální větrný tunel poháněný parním strojem podle návrhu britského námořního inženýra F. H. Wenhama. Při své práci potřeboval lepší zařízení než do té doby jedinou známou pomůcku, kterou byla *Whirling Arm* anglického matematika Benjamina Robinse, případně její vylepšená verze od britského konstruktéra kluzáků Sira Cayleyho. Wenhamům tunel z roku 1871 a jeho další úpravy pomohly porozumět mechanice proudění vzduchu a při svém výzkumu ho využil například i Osborne Reynolds, který na základě něj popsál a definoval turbulentní a laminární proudění [38].

Kromě řady výzkumů našly uplatnění větrné tunely především v aeronautice. Staly se tak nedílnou součástí inženýrské práce ve všech odvětvích, kde se uplatňuje mechanika proudění. Po řadě konstrukčních pokusů například od Otty Lilienthala, Langleyho nebo Sira Maxima si lidstvo podmanilo i oblaka, neboť roku 1903 se i díky zkouškám ve větrném tunelu vzneslo nad zem letadlo bratří Wrightů [38].

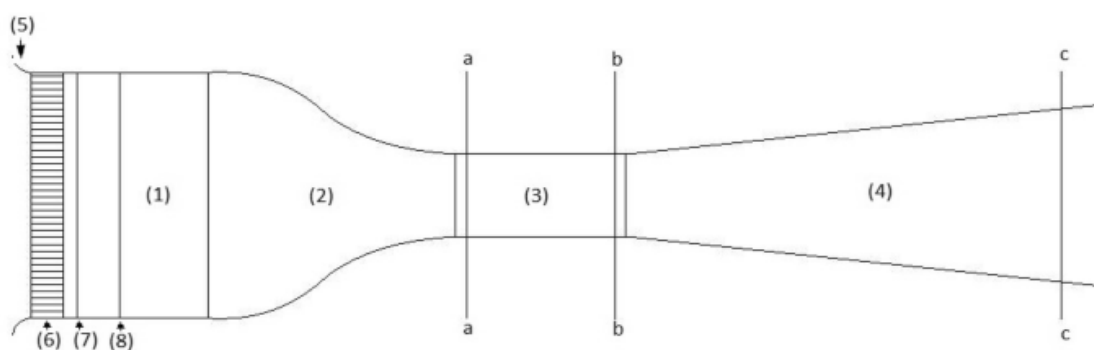
### 2.3.2. Části a stavba aerodynamického tunelu

Z hlediska konstrukce se dají aerodynamické tunely rozdělit na dva základní typy z nichž každý má své výhody a specifické možnosti použití.

#### 2.3.2.1. Otevřené tunely

Otevřené tunely jsou aerodynamické tunely, kde vzduch neobíhá v uzavřeném prostoru. Příkladem takového tunelu může být ten, který zkonstruovali bratři Wrightové nebo Gustav Eiffel [39]. Proud vzduchu do něj vstupuje z okolí, což má za následek horší kontrolu jeho kvalitativních parametrů. Před vstupem do tunelu musí být proto okolní vzduch upraven.

Pro dosažení ideálně suchého vzduchu se proud často prohání přes hydrofilní látky a požadované teploty se dosáhne jeho ohřátím. Ve venkovních podmínkách však mohou být jeho parametry stále proměnné, kvůli nestálosti kvalit atmosférického vzduchu, což je jedna z nevýhod toho typu. Další nevýhoda je nutný ohřev stále nového vzduchu, jelikož ten, který tunel opouští se zpět již nevrací. U otevřených tunelů tak nedochází k rekuperaci tepla a jejich provoz může být kvůli tomu a nutnosti stále urychlovat vzduch výrazně nákladnější. Tunely jsou navíc hlučné, a proto se často opatřují různými protihlukovými nástavbami. Výhodou otevřených tunelů je jejich nižší pořizovací cena, než je u tunelů uzavřených a také možnost použití kouře, kdy není potřeba kouř separovat, protože vzduch je do tunelu vháněn stále nový a opouští ho ven.

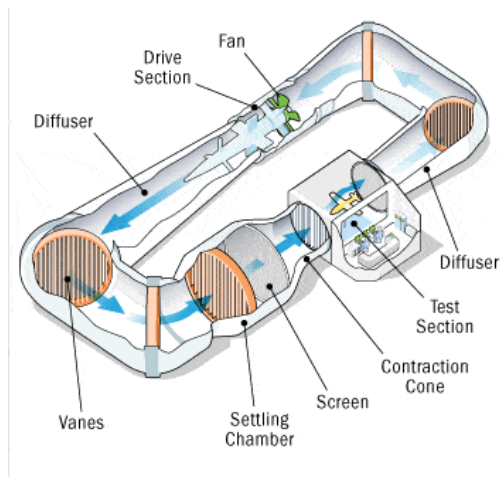


Obrázek 2.9: Otevřený aerodynamický tunel [40]

Stavba otevřeného tunelu je zobrazena na obrázku 2.9 [40], odkud je vidno, že vzduch vstupuje do tunelu přes usměrňovače proudu, tzv. plástve. Dále pokračuje do ustalovací komory, kde se ustálí a následně je stlačen v dýze, aby získal potřebné parametry v měřícím úseku. Poté putuje difuzérem, kde expanduje ven, zatím co je poháněn ventilátorem

### 2.3.2.2. Uzavřené tunely

V těchto tunelech cirkuluje vzduch o již předem dosáhnutých parametrech, takže ho není třeba neustále urychlovat z klidových hodnot jako je tomu u tunelů otevřených, čímž klesají náklady na jeho provoz. Ventilátor zde pouze dodává proudu potřebnou energii k setrvání na stejné rychlosti proudění. Energie pro pohon se vlivem třecích ztrát a ztrát v kolenech disipuje v nízko potenciální teplo, které ohřívá vzduch v tunelu. To má za následek nutnost jeho chlazení, které je realizováno například tepelnými výměníky. Nevýhodou uzavřených tunelů je kromě nutnosti chlazení nevhodnost pro použití kouře v měření, protože by se z něj musel následně odebírat a také větší rozměry a pořizovací náklady [41].

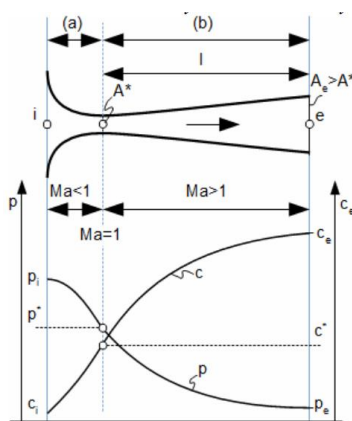


Obrázek 2.10: Uzavřený aerodynamický tunel [41]

Na obrázku 2.10 [41] je schéma Prandtlova tunelu, kde jsou viditelné lopatky usměrňující proud vzduchu v rozích. Tato konstrukce má za cíl alespoň částečně kompenzovat ztráty v kolenech a usměrňovat proud.

### 2.3.3. Lavalova dýza

Dýzy neboli trysky jsou kanály, ve kterých proudí tekutiny a mají plynule měnit se průtočný průměr, takže dokáží měnit tlak a kinetickou energii proudící tekutiny podle Bernoulliovy rovnice [42]. Lavalova dýza je konvergentně-divergentní tryska. V zužující se části dochází ke kompresi a urychlování proudu až do maximální rychlosti, která je dána kritickým průměrem [43]. Za ním proud proudí nadzvukovou rychlostí a expanduje. Výtoková rychlost z Lavalovy dýzy je vyšší než  $Ma=1$ , jak ukazuje obrázek 2.11.



Obrázek 2.11: Ideální Lavalova dýza [43]

U ideální Lavalovy dýzy je rozšiřující se část navržena tak, aby mohl plyn expandovat podle stejného diagramu jako u konvergentní dýzy. Z konstrukce Lavalovy dýzy vychází také dýza Vitošinského, jejíž geometrie

byla použita pro konstrukci části experimentální dýzy před kritickým průřezem, kde se provedly experimenty v experimentální části této práce.

## 2.4. Optické metody měření vodních kapek

Pro měření hrubé vodní disperze na parních turbín se v dnešní době používá několik metod. Podkapitola 2.4 se nejvíce věnuje fotogrammetrii a jejímu způsobu vyhodnocování a také úvodu do teorie rozptylu světla, kde jsou popsány dvě základní teorie rozptylu světla a sice Mieho a Rayleighova.

Jedno z prvních měření velikosti kapek za použití optických metod použili v 80. letech minulého století Japonci Tatsuno a Nagao [45]. Za pomoci optického vlákna a metody rozptylování světla zjistili, že velikost kapek utrhávajících se z lopatek posledního stupně turbín o výkonu 10 MW je 0,2 až 1  $\mu\text{m}$  a jejich velikost je závislá na vlhkosti a radiální vzdálenosti. Roku 2014 se poprvé použila metoda PIV (Particle Image Velocity) a 4 roky poté metoda PTV (Particle Tracking Velocity) [46].

### 2.4.1. Fotogrammetrie

V této práci se k měření odtrhávání kapek a snímání proudu z trysky použila metoda fotogrammetrická. Fotogrammetrie je optická metoda měření, která vyhodnocuje vlastnosti objektu na základě obrazového záznamu ze snímků nebo vizuálních záznamů. Fotogrammetrická metoda je hojně využívanou v problematice měření vodních kapek a díky novým způsobům měření přináší jisté výhody. Měřit se pomocí ní dají i kapky, které jsou rozloženy nehomogenně v rozmezí jednotek až tisíců kapek na centimetr krychlový, což se děje u kapek vznikajících v posledních stupních parní turbíny. Nové způsoby fotogrammetrie navíc dokážou poskytnout data pro popis vektorového pole [47].

Kamery, kterými se snímky pořizují, dokáží běžně vytvořit snímek s velikostí pixelu 2 až 6  $\mu\text{m}$  [47]. Velikost kapek se však pohybuje mezi tisícinou milimetru až půl milimetrem [47], z čehož vyplývá, že ty nejmenší kapičky nemusí být vůbec detekovány nebo jsou data o jejich velikosti a rozmístění nepřesná. Kamery jsou přitom na své hranici současných možností. Jejich zvětšení obrazu už není možné navyšovat, neboť je omezuje minimální expoziční čas. Při větším zvětšení by kapka, která se může pohybovat rychlostí až 200 m/s, urazila delší vzdálenost, než je samotný snímáný objem. Rychlost kapek a expoziční čas potřebný pro získání fotografie tak limitují možné maximální zvětšení. Kapky, které se nepohybují jen v rovinách rovnoběžných s osou kamery, by na fotografiích s příliš velkým zvětšením byly zobrazeny jako čáry, které by mohly mít svůj konec mimo

měřený objem, tedy mimo snímek a nebylo by tak možné určit jejich velikost ani získat informace o vektorovém poli proudu.

## 2.4.2. Vybrané segmentační metody

Po vyfotografování se snímek zpracovává segmentací, aby z něj mohly být získána číselná data. Snímek je složen z určitého počtu pixelů a každý pixel nese v barevném snímku informace o intenzitě červené, zelené a modré složky. Maticově je tedy reprezentován 3D maticí, se kterou není v tomto případě vhodné pracovat a je převedena algoritmem na matici černobílou, která je již dvourozměrná a každý pixel nese informaci o stupni šedi. Pro maximalizaci využití možného rozlišení stupně šedi se dá černobílý snímek ekvalizovat. Znamená to, že se zvětší rozptyl možného stupně šedi až na maximální hodnoty, kterými jsou 0 pro černou a 255 pro bílou. Tento postup tedy tmavší oblasti ztmaví a světlejší zesvětlí, aby byl mezi jednotlivými stupni šedi co možná největší rozdíl za současného zachování kvality stínování [48][49].

### 2.4.2.1. Otsuova metoda

Existuje řada algoritmů, které jsou schopny převést černobílý obrázek na binární, kde je možné, aby pixel nabyl pouze hodnoty 1, nebo 0, tedy je černý, nebo bílý. Výběr toho správného může v konkrétní aplikaci přinášet poměrně značné rozdíly mezi výsledky. Jenda z metod, která se používá pro segmentaci je Otsuova metoda. Spočívá v nalezení prahu mezi pozadím a objektem, neboť ty mají rozdílný jas, tedy jinak tmavě šedý pixel reprezentovaným číslem. Hranice, kterou algoritmus určí jako práh mezi objektem a pozadím, je dána nejmenším možným váženým rozptylem mezi nimi. Otsuova metoda tak iteruje přes všechny možné prahové hodnoty dokud nenajde tu s nejmenším rozšířením [50]. Její nevýhodou je velká citlivost na malé nuance v odstínech šedé pozadí, neboť jeho určité segmenty může snadno vyhodnotit jako odstín patřící objektu, nikoliv pozadí. Takovému stavu může snadno dojít kvůli nedokonalému osvětlení či stínění.



Obrázek 2.12: Volba prahu šedi při Otsuově metodě [51]



### 2.4.2.2. Metoda adaptivního prahování

Metoda adaptivního prahování funguje na podobném principu jako ta Otsuova. Algoritmus je ale vhodnější pro špatně osvětlené snímky, jelikož dokáže rozlišit i drobnější nuance způsobené osvětlením [52]. Toho dosahuje díky prahování na menším úseku, nikoliv obrázku jako celku. Kód navíc umožňuje, na rozdíl od klasické Otsuovy metody, zvolit si stupeň prahování.

Jedna ze základních metod adaptivního prahování je Wellnerova metoda [52]. Každý pixel je během segmentace porovnáván s průměrem okolních pixelů. Pokud je pixel světlejší nebo tmavší (v závislosti na nastavení algoritmu) o více procent, než je nastaveno, vyhodnotí ho algoritmus jako bílý nebo černý. Výhoda této metody je její rychlost. Algoritmus nemusí iterovat a o každém pixelu je rozhodnuto hned po prvním zpracování. Nevýhoda je, že záleží na pořadí zpracování pixelů a na možném znepečnění způsobeném okamžitým přiřazením černé nebo bílé barvy, neboť každé předcházející přiřazení změní průměr okolních pixelů pro pixel následující.

Bradleyho algoritmus eliminuje tento problém a jeho výsledek je nezávislý na pořadí výpočtu. Obrázek je zpracován nejprve jako celek a v druhém propočtu je pixelům přiřazena jejich binární hodnota. Pokud je hodnota pixelu nižší než nastavená hodnota, je vyhodnocen jako černý [53].

### 2.4.3. Mieho teorie rozptylu světla

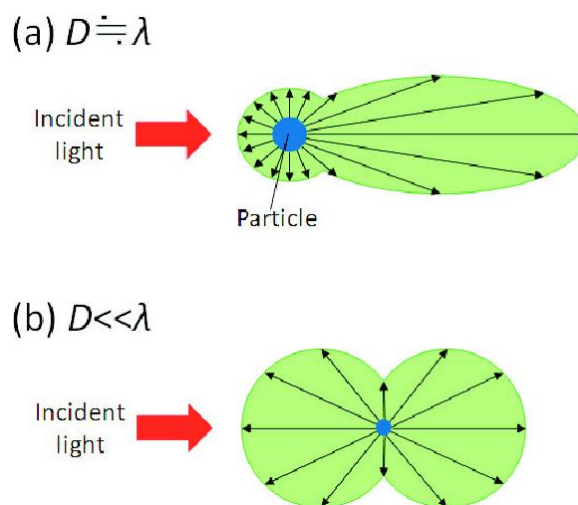
Dalším způsobem, jak je možné měřit za pomoci optických metod velikost a distribuci kapek je aplikace teorie o rozptylu světla. Za používáním rozptylování světla k určení velikosti a polohy částic stojí Mieho teorie [54]. Opírá se o Maxwellovy zákony popisující makroskopicky elektromagnetické pole a předpokládá, že měřené částice jsou kulovité a homogenní, rozptýlené světlo je detekováno před jeho dalším rozptýlením jinou částicí a Jedná se převážně o elastický rozptyl, při kterém dochází k malým ztrátám energie, celková kinetická energie soustavy je tedy změněna, protože se část rozptylovaného světla pohltí a směr pohybu částice se difrakcí pozmění. Dá se použít pro měření částic, které jsou větší než vlnová délka zdroje světla, které osvětluje měřené částice Mieho teorie předpovídá intenzitu rozptýleného světla pomocí vztahu mezi indexem lomu částice a prostředí a kvantitativně popisuje, jak je závislé množství pohlceného a lámaného světla v částici [55][56].

Dříve se kvůli náročnosti výpočtů podle Mieho používalo zjednodušení v podobě Fraunhoferovy aproximace, která oproti Mieho teorii předpokládá, že se světlo rozptyluje se stejnou účinností nezávisle na velikosti částice, rozdíl indexů lomu částice a okolního prostředí je nekonečně velký, úhel rozptylu je malý a částice nejsou kulovité, ale neprůhledné disky.

Fraunhoferova aproximace se blíží Mieho teorii u kapek o velikosti nad 50  $\mu\text{m}$  a čím jsou větší, tím je přesnější. Naopak pro menší kapky je nevhodná, protože se dopouští příliš velkých chyb [55].

#### 2.4.4. Rayleighova teorie rozptylu světla

Další popis rozptylování nese jméno po Lordu Rayleigh, který popsal rozptyl slunečního světla v molekulách plynu a objasnil, proč je nebe modré [56]. Jeho teorie popisuje rozptyl u částic, které jsou menší než vlnová délka světla, které je osvětluje, čímž se liší od Mieho teorie a doplňuje popis rozptylování pro částice o velikosti v řádech jednotek mikrometru [57]. Plyny v atmosféře Země rozptylují sluneční světlo v úhlu, který se rovná reciproké hodnotě ze čtvrté mocniny vlnové délky monochromatického světla. Jelikož má modré světlo nejkratší vlnovou délku, úhel rozptýlení je tedy větší a proto je viditelné. Díky Maxwellově interpretaci elektromagnetického pole popsal Rayleigh tento rozptyl jako převážně elastický, kdy dochází k elektromagnetickému záření částic [57]. Toto záření je způsobeno polarizováním náboje v částici, které způsobí procházející světlo a spolu s nábojem v částici kmitá se stejnou frekvencí. Částice tak začne sama emitovat záření, které je viditelné [58].



Obrázek 2.13: Rayleighova a Mieho rozptyl světla [59]

Mieho rozptyl lze v porovnání s Rayleighova popsat jako více dopředný, jak je vidět na obrázku 2.13. Tím, že je částice větší než vlnová délka, pohltí více světla a to je rozptýleno více v jednom směru, zatím co při Rayleighova rozptylu dochází k rozptylování do všech směrů přibližně stejně [60].

## 3. Experimentální část

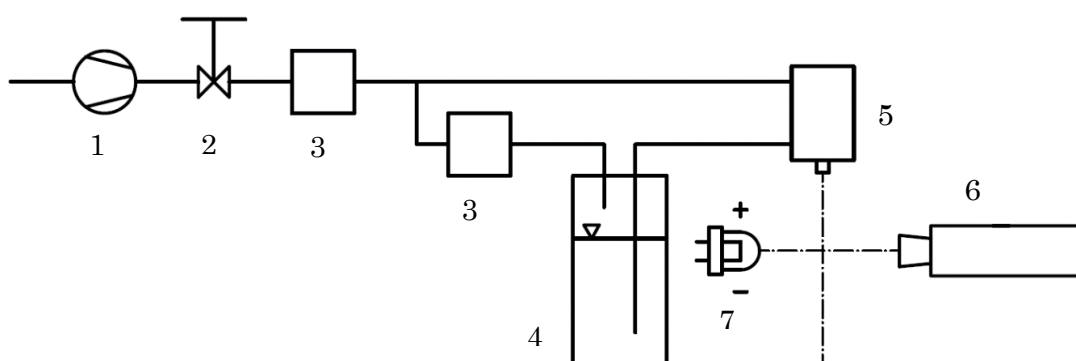
Praktická část bakalářské práce je zaměřena na optické měření rozpadu vodního filmu na modelové lopatce turbíny. Cílem je pozorovat vliv rychlosti na způsob odtékání vodního filmu. Pro měření byla zvolena fotogrammetrická metoda, která pro své správné zpracování a vyhodnocení potřebuje zvolit vhodný segmentační algoritmus. Pro lepší porozumění celého postupu získávání dat a volbu správného algoritmu bylo nejprve provedeno měření na vodní trysce a poté na experimentální dýze Laboratoře Ústavu energetiky Fakulty strojní na Julisce.

### 3.1. Experiment na trysce

Pro pochopení fungování segmentace obrazu a jeho správnou aplikaci při vyhodnocování na dýze se nejprve provedlo zjednodušené měření na trysce. Cílem bylo také osvojit si potřebné seřízení aparatury pro fotogrammetrické měření.

#### 3.1.1. Popis experimentální tratě

Experimentální trať zobrazená na obrázku 3.1 sestává z kompresoru a regulátoru, který tlakuje vzduch a ten proudí přes další regulátor z části do nádoby, kde vytváří přetlak a vytlačuje tak kapalinu trubičkami k trysce. V trysce je kapalina urychlena a vystříknuta zbylým natlakovaným vzduchem. Regulací tlaku vzduchu z kompresoru se dá nastavit požadovaný tlak na trysce.



Obrázek 3.1: Schéma experimentální trati při měření na trysce; 1: kompresor, 2: ventil, 3: regulátory, 4: nádoba s vodou, 5: tryska, 6: kamera, 7: LED dioda

Vystřikovaný proud vody se snímá kamerou se zvětšovací čočkou. Snímaný prostor kamery má velikost zhruba 9 mm<sup>2</sup>. Kamera musí být před

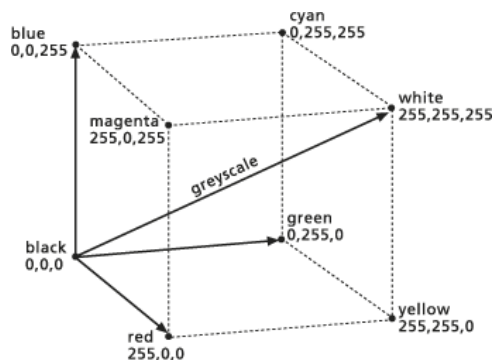
měřením vycentrována tak, že její objektiv je v ose s led diodou, která prosvětluje vystřikovaný proud. Světlo tak svítí proti diodě a kapky vytvoří stín. Kamera je dále zaostřena a pomocí posuvných šroubů posunuta na požadovanou výšku.

Snímky se pořizují pomocí sepínání triggeru, který musí být seřízen s led diodou osvětlující vystřikovaný proud. Správné seřízení má za cíl vytvořit pro co nejkratší expoziční čas co nejlepší světlené podmínky. Ty hrají velkou roli v kvalitě segmentace. Špatně osvětlený snímek, respektive nerovnoměrně osvětlené pozadí může být při segmentaci vyhodnoceno špatně. Pro snížení vlivu špatného osvětlení se snímek musí upravit různými algoritmy. Zároveň je nutné, aby dioda jen problikla a svítila co možná nejkratší okamžik, neboť je připojena na zdroj poměrně velkého napětí, aby byla schopna vytvořit dostatečné osvětlení prostoru kapek.

### 3.1.2. Segmentace obrazu

Segmentace snímků a jeho úpravy se prováděly v prostředí Matlabu. Barevný snímek, zapsaný ve trojrozměrné matici se převedl na černobílý, který se ukládá do dvourozměrné matice, kde představuje každý člen matice pixel s hodnotou stupně šedi. Na snímek byl aplikován vyhlazovací algoritmus, který zjemňuje ostré hrany, zvýšen jas a kontrast a poté se segmentoval podle vybraného segmentačního algoritmu. Po segmentaci, jejímž výsledkem je snímek reprezentovaný dvourozměrnou maticí, kde je každému pixelu přiřazena 1 nebo 0, tedy černá nebo bílá je prohozena hodnota bílé a černé, aby byl segmentovaný předmět bílý. Další úpravou je pospojování oddělených pixelů podle daných pravidel a finální úpravou je vyplnění polí, která mají být segmentována, jsou ohraničena, ale segmentační algoritmus je vyhodnotil jako pozadí. Jedná se zejména o segmentování části, které jsou světlejší, což je u kapek způsobeno odrazem světla, nebo tím, že plocha je příliš velká, rozdíl v hodnotách šedi není výrazný a tak je plocha špatně segmentována.

#### 3.1.2.1. Převod na obrázek ve stupních šedi



Obrázek 3.2: Znárodnění struktury a fungování 3D matice barevné fotografie [61]

Každý pixel byl před úpravou reprezentován třemi údaji. Za potřebí byla trojrozměrná matice, zobrazena na obrázku 3.2, o velikosti počtu pixelů snímku (sloupce a řádky), která přiřazovala každému pixelu hodnotu R, G a B složky, matice tedy měla tři stránky. Kombinace složek R, G a B dává informace nejen o barvě, ale také o jasu a sytosti barvy. Pro vyhodnocení experimentu však barva ani sytost roli nehrají a proto může být obrázek převeden na černobílý, který nese pouze informace o jasu. Pro převod byla použita funkce `im2gray`, která počítá vážený součet hodnot pro složky R, G a B podle rovnice (3.1) [62].

$$jas = 0,2989R + 0,5870G + 0,1140B \quad (3.1)$$



Obrázek 3.3: Snímek pořízený kamerou (vlevo) a jeho upravená verze ve stupních šedi

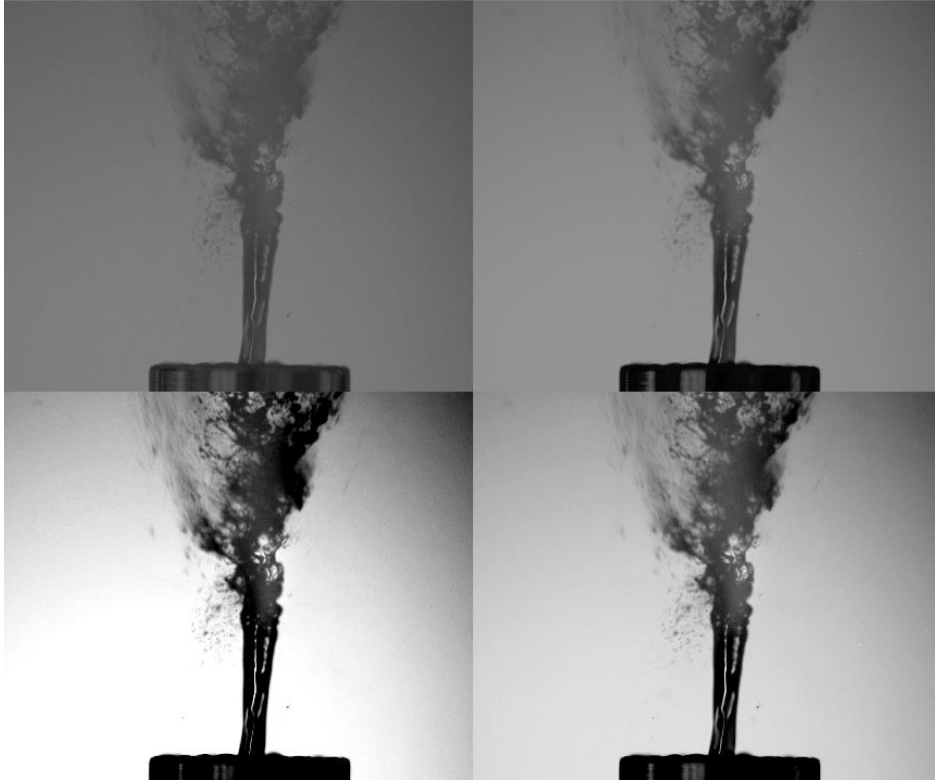
Výpočtem váženého součtu algoritmus zjistí jas potřebný pro reprezentaci pixelu a převede tak trojrozměrnou matici na dvourozměrnou, se kterou se lépe pracuje a pro potřeby vyhodnocení tento krok informace o obrázku nijak výrazně negativně neovlivní. Ukázka převodu barevného snímku proudu tryskajícího z trysky je zobrazena na obrázku 3.3.

### 3.1.2.2. Vyhlazení hran

Pro eliminaci anomálně jasných či tmavých pixelů, které mohly vzniknout už při samotném procesu pořizování snímku a zbavení se příliš ostrých hran na nevhodných místech, které by se mohly chovat při procesu segmentace problematicky, nebo pro obecné očištění snímku se použije algoritmus schopný vyhladit snímek. Pro potřeby této práce byl použit algoritmus anisotropické difuze. Ten na rozdíl od Gaussova rozostření zachová jasně čitelné hrany snímku. Špatně zvolený deviační koeficient by u Gaussovy metody mohl navíc zcela pohltil vyhlazením malé kapky a tím vnést do segmentace zásadní chybu ještě před jejím samotným provedením. Anisotropická difuze volí koeficient sama na základě iterování.

### 3.1.2.3. Zvýšení jasů a kontrastu

Kvalita pozadí hraje při segmentaci zásadní roli. Čím zřetelnější je hranice mezi ním a objektem, tím úspěšnější a efektivnější segmentace bude. Pro vylepšení kvality pozadí je obrázek zesvětlen pomocí funkce `imlocalbrigtness`, která spolu s příkazem `AlphaBlend` zesvětlí obrázek se zachováním maximální možné čitelnosti všech dat. Dá se tedy říci, že obrázku zvýší jas, ale nevymaže z něj žádnou informaci.



Obrázek 3.4: Snímky s různě upraveným kontrastem

Změna kontrastu již do obrázku zasahuje zřetelněji tím, že sice zhorší kvalitu pozadí, ale také může částečně nebo při nesprávném rozvržení parametrů zcela zkreslit obrázek a vymazat tak *de facto* části objektu. To se může u snímků vody stát velmi snadno neboť se na nich často nachází oblasti objektu, které jsou vlivem lomu a odrazu světla příliš světlé. Zásadní je navýšení kontrastu však tehdy, pokud je potřeba zahrnout do vyhodnocení i jinak příliš světlé oblasti objektu. V tomto případě se jedná o aerosol drobných kapiček, či kapek, které jsou mimo zaostřenou oblast kamery. Funkce `imadjust` se dá pomocí příkazu zvolení koeficientu  $n$  upravit. Obrázek 3.4 zobrazuje černobílý snímek, jeho zesvětlení a navýšení kontrastu při koeficientu  $n=2$  a  $n=3$ . Za povšimnutí stojí, že se se snižováním hodnoty koeficientu horší kvalita pozadí (je méně jednolitě) a naopak jsou dobře viditelné jinak příliš světlé oblasti. Úprava kontrastu je velmi problematická a vyžaduje citlivé zacházení, neboť může zásadně ovlivnit výsledek segmentace v negativním i pozitivním slova smyslu. Její celkové pochopení a

aplikace vyžaduje v dané problematice větší pozornost, proto nebyla ve finálním skriptu zahrnuta, aby nezkreslila výsledky.

#### 3.1.2.4. Vyplnění děr a spojení

Při samotném procesu segmentace, jejíž problematice se věnuje následující část, se na dvojbarevný snímek tvořený pouze černou, nebo bílou barvou aplikuje algoritmus schopný vyplnit drobné mezery a průrvy



Obrázek 3.5: Segmentovaný snímek před (vlevo) a po aplikaci vyplňovací funkce

v objektu. Při focení vodních kapek proudů je jeho užití potřebné, neboť vlivem odrazu a odlesků se některé části objektu jeví jako stejně světlé, ba dokonce světlejší než pozadí. Pro vyplnění těchto děr byla použita funkce *imfill*, která umožňuje nastavit požadovanou konektivitu při použití její varianty pro výplň děr. Obrázek 3.5 ukazuje snímek segmentovaný adaptivním prahováním před a po použití vyplňovacího algoritmu. Algoritmus může některé informace zkreslit a zalít tak bílou barvou i místa, která nejsou objektem.

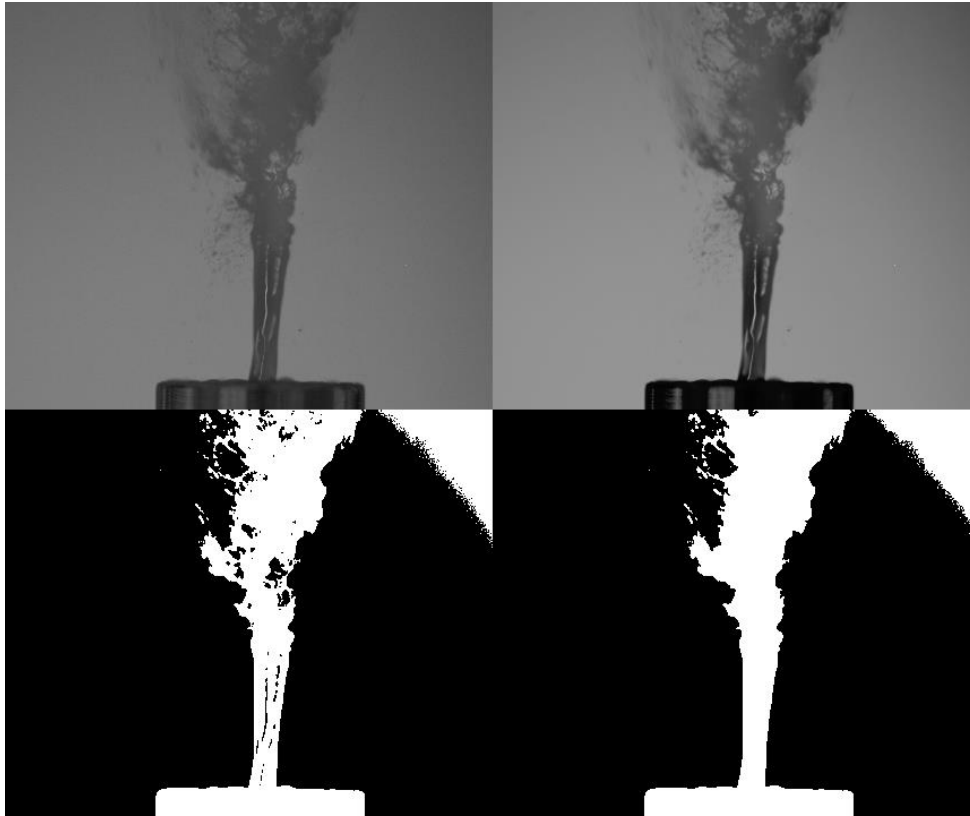
### 3.1.3. Vhodné segmentační metody

Před aplikací segmentačních metod na snímky z dýzy byla vybrána ta nejvhodnější pro snímky z trysky. Vybrané metody jsou postaveny na Otsuově metodě, kterou různými způsoby modifikují.

#### 3.1.3.1. Otsuova metoda

Prostá Otsuova metoda vyžaduje pro své správné fungování kvalitní pozadí, kterého lze v problematice měření na dýze docílit jen velmi těžko. Problematická byla metoda již při vyhodnocování snímků z trysky, kde byly podmínky mnohem přijatelnější. Metoda nesnese změnu kontrastu, které ještě zhorší kvalitu pozadí. Příklad je na obrázku 3.6, kde je patrné, že kvůli vyhodnocování snímku jako celku a nálezu jedné univerzální hodnoty šedi,

kteřá rozhoduje o tom, zda bude pixel přiřazen objektu či pozadí je horní pravý roh brán jako objekt. Metoda je tedy nevyhovující a ještě problematičtější by se chovala u snímků z dýzy. Nese však základní myšlenku, na které pracují následující metody, které lze zahrnout pod pojem adaptivní prahování, jelikož je na rozdíl od Otsuovy metody přizpůsobivé.



Obrázek 3.6: Otsuova metoda; zleva shora: černobílý snímek, snímek s upraveným jasem; zleva dole: segmentovaný snímek, snímek s vyplněnými dírami

### 3.1.3.2. Adaptivní prahování – Gaussův průměr

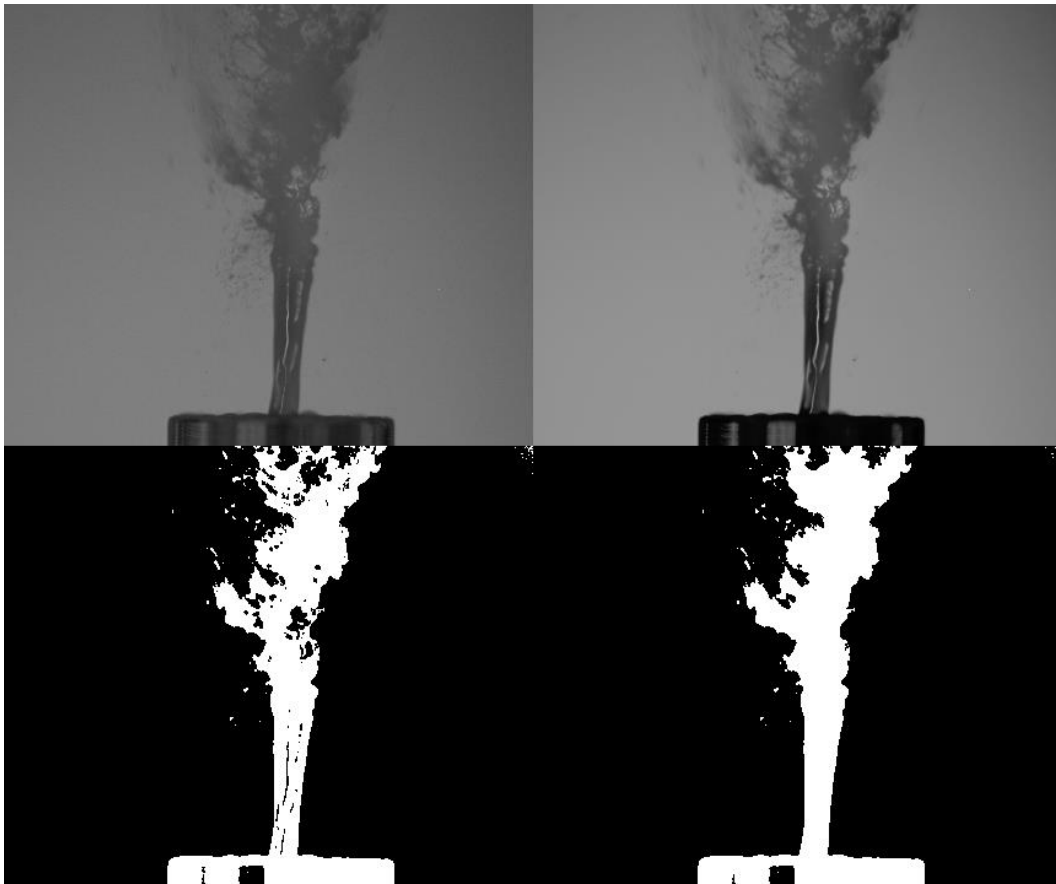
Metoda založená na adaptivním prahování, kdy je o přiřazení hodnoty bílé nebo černé rozhodnuto na základě výpočtu Gaussova váženého průměru v okolí. Velikost okolí pixelu je dána rovnicí (3.2),

$$\frac{1}{2} \varepsilon \doteq \left( \frac{A}{16} \right) + 1 \quad (3.2)$$

kde je  $\varepsilon$  dolů zaokrouhlená hodnota okolí na jednotky a  $A$  je velikost snímku. Metoda je rychlá a při správném zvolení procentuální hodnoty rozhraní, kdy má být daný pixel bílý či černý také poměrně spolehlivá na rozličné snímky. Příklad použití této metody je na obrázku 3.7, kde je vidět, že adaptivní prahování založené na Gaussově váženém průměru nezahrnuje do objektu



velmi drobné kapky, aerosol a kapky mimo zaostřený dosah kamery, což je u dané problematiky žádoucí.



*Obrázek 3.7: Adaptivní prahování – Gaussův vážený průměr; zleva shora: černobílý snímek, snímek s upraveným jase; zleva dole: segmentovaný snímek, snímek s vyplněnými dírami*

Pro zahrnutí aerosolu a drobných kapek do segmentace adaptivním prahováním Gaussovým průměrem je potřeba navýšit kontrast snímku, což však shorší kvalitu pozadí a to je hůře a nečistě segmentováno. Ukázka skriptu, který používá metodu adaptivního prahování je na obrázku 3.8.

```

1   clc
2   clear all
3   m=5;
4   for k=1:m
5       % Načtení jednotlivých obrázků a jejich vyhodnocení
6       FileName = sprintf('%d.tif', k);
7       % Umístění snímků
8       fullFileName = fullfile("umístění snímku",FileName);
9       % Načtení snímku
10      imageData = imread(fullfileName );
11
12      % Převod na černobílý obrázek
13      gray=im2gray(imageData);
14      % Vyhlazení snímku
15      smoothimage=imdiffusefilt(gray);
16      % Zvýšení jasů
17      brght = imlocalbrighten(smoothimage, 'AlphaBlend', true);
18
19      % Adaptivní prahování pomocí Gaussova váženého průměru
20      T= adaptthresh(brght, 0.7, 'Statistic', 'gaussian');
21      BW=imbinarize(brght, T);
22      % 0...1
23
24      % Převod obrázku (prohození 0 a 1)
25      [x y]=size(gray);
26      for i=1:x
27          for j=1:y
28              if BW(i,j)==0
29                  BW(i,j)=1;
30              elseif BW(i,j)==1
31                  BW(i,j)=0;
32              end
33          end
34      end
35
36      % Vyplnění děr
37      filled = imfill(BW, 26, 'holes');
38      % 4..6..8..18..26
39      % Vyhodnocení segmentace
40      CC = bwconncomp(filled);
41      % Zobrazení
42      figure
43      montage({gray, brght, BW, filled})
44
45      end

```

Obrázek 3.8: Algoritmus použití Adaptivního prahování pomocí Gaussovy metody v prostředí Matlabu

### 3.1.3.3. Adaptivní prahování – funkce světlého pozadí

Funkce adaptivního prahování se dá také upravit pomocí příkazu, který určuje, zda je pozadí světlejší či tmavší než objekt. Během psaní skriptu s touto variací funkce však nebylo možné vyladit parametry tak, aby se všechny snímky segmentovali správně. Algoritmus je tedy pro danou aplikaci nevhodný. Příklad použití je na obrázku 3.9, kde je snímek po segmentování pomocí funkce s použitím příkazu `bright`, který určuje, že pozadí je světlejší než objekt. Je vidět, že některé části objektu nebyly vyhodnoceny jako objekt a nezaplňují je ani další použité pomocné algoritmy.

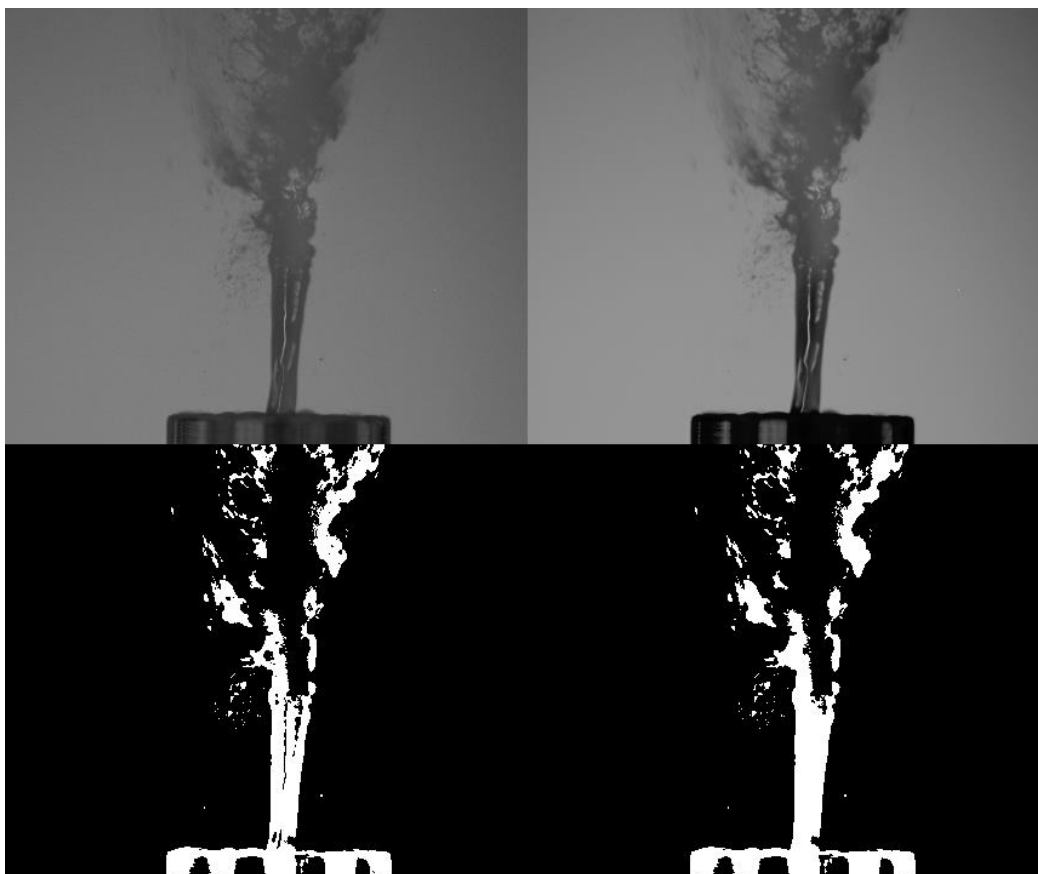


*Obrázek 3.9: Adaptivní prahování – funkce světlého pozadí; zleva shora: černobílý snímek, snímek s upraveným jase; zleva dole: segmentovaný snímek, snímek s vyplněnými dírami*

Algoritmus však umí na rozdíl od Gaussova průměru bez použití zvýšení kontrastu zahrnout do objektu i aerosol a drobné kapky.

#### 3.1.3.4. Adaptivního prahování – medián oblasti

Metoda používá k přiřazení bílé či černé pro pixel výpočet mediánu v daném okolí pixelu. Jeho výpočet je velmi zdoluhavý, takže je i celá segmentace velmi pomalá. Metoda je navíc poměrně citlivá na volbu správného procentuálního rozhraní pro přiřazení pixelu černé či bílé barvy a správné zvolení jeho hodnoty je spolu s velmi pomalým výpočtem



Obrázek 3.10: Adaptivní prahování –medián oblasti; zleva shora: černobílý snímek, snímek s upraveným jasem; zleva dole: segmentovaný snímek, snímek s vyplněnými dírami

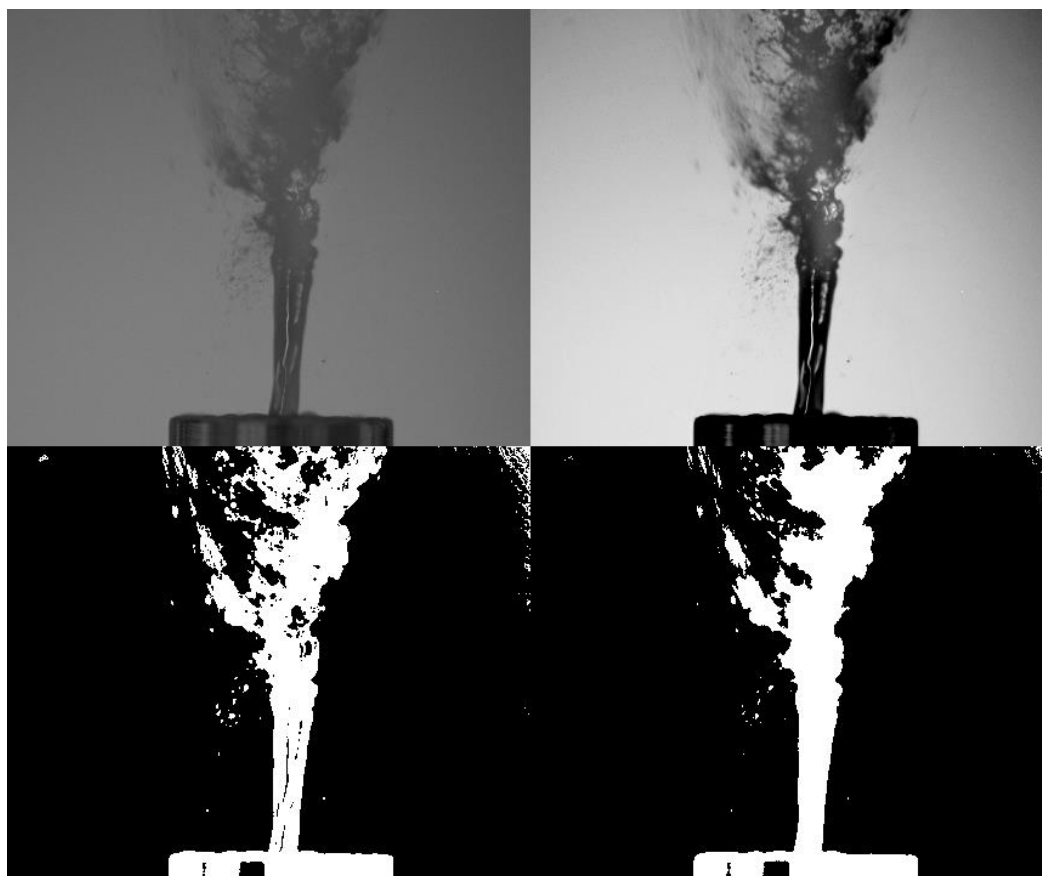
Je vidět, že je metoda schopna segmentovat i malé kapky a vybrat ty části aerosolu nebo kapek mimo zaostřenou část prostoru, které jsou podstatné. Pro svou pomalost je však její použití nevhodné, ba dokonce nemožné, protože je potřeba vyhodnotit poměrně velké množství snímků. Výpočet jediného snímku trvá řádově nižší desítky minut při defaultně zvolené velikosti okolí pixelů. Tato metoda je na obrázku 3.10.

### 3.1.3.5. Bradleyho metoda

Jedná se modifikaci adaptivního prahování, která pracuje de facto s výpočtem průměrné hodnoty šedi na okolí pixelu. Hodnota průměru je porovnána s hodnotou šedi daného pixelu a pokud se liší procentuálně více, než je zvolená hodnota prahu je pixelu přiřazena černá barva. Metoda je velmi účinná, pracuje podobně jako Gaussova modifikace, ale u většiny snímků je přesnější, vykazuje lepší schopnost čtení malých kapek a lépe rozlišuje objekt i ve špatně rozlišitelných oblastech snímku při zachování menšího zkreslení segmentace nedokonalým rozdělením pozadí.

Použitá funkce navíc od ostatních adaptivních prahování umožňuje zvolit velikost okolí a způsob nakládání s okrajovými pixely, jelikož přiřazení

binární hodnoty právě jim může řetězově ovlivnit přiřazování u dalších pixelů. Použití Bradleyho metody je na obrázku 3.10.



Obrázek 3.11: Bradleyho metoda; zleva shora: černobílý snímek, snímek s upraveným jasnem; zleva dole: segmentovaný snímek, snímek s vyplněnými dírami

Ze segmentovaného snímku lze vyčíst, že je algoritmus schopen zobrazit jako objekt i drobnější kapky. Pokud je před samotnou segmentací použito navíc i navýšení kontrastu, jedná se o velmi silnou metodu. Je ze všech nejvíc flexibilní a dá se tak různě variovat, což je její největší výhodou.

### 3.1.4. Závěr

Porovnáním a vyzkoušením různých segmentačních metod založených na Otsuově metodě se došlo k závěru, že pro segmentaci snímků z dýzy se jeví jako nejvhodnější adaptivní metoda používající Gaussův vážený průměr a Bradleyho metoda. Obě jsou spolehlivé pro různé typy snímků a jsou dostatečně flexibilní pro jiné světelné podmínky a kvalitativně horší pozadí, které se u fotografií pořizovaných na dýze objevuje.

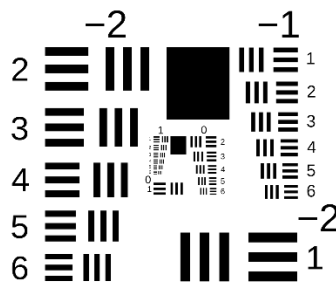
Na jednom ze snímků je znázorněno vyhodnocování šířky proudu vody vytékajícího z trysky. Na určité vyhodnocované výšce v obrázku, která je v matici reprezentována jedním řádkem, je pomocí funkce sum spočten součet všech hodnot pixelů které jsou na tomto řádku. Vzhledem k tomu, že

prvky matice nabývají pouze hodnoty 0 pro černou, nebo 1 pro bílou a dá se předpokládat, že ve vyhodnocovaném úseku se segmentace provedla dokonale, tedy že každý pixel pozadí je vyhodnocen jako černý, dá se zjistit počet pixelů reprezentující ve vyhodnocované hladině pouhým součtem prvků matice v daném řádku, jak ukazuje obrázek 3.12.



Obrázek 3.12: Snímek s vyhodnocovanou hladinou

Kamera, kterou byly snímky pořizovány byla kalibrována pomocí kalibračního štítku USAF-1951, který je zobrazen na obrázku 3.13. Podle kalibrace má jeden pixel velikost  $1,7 \mu\text{m}$ .

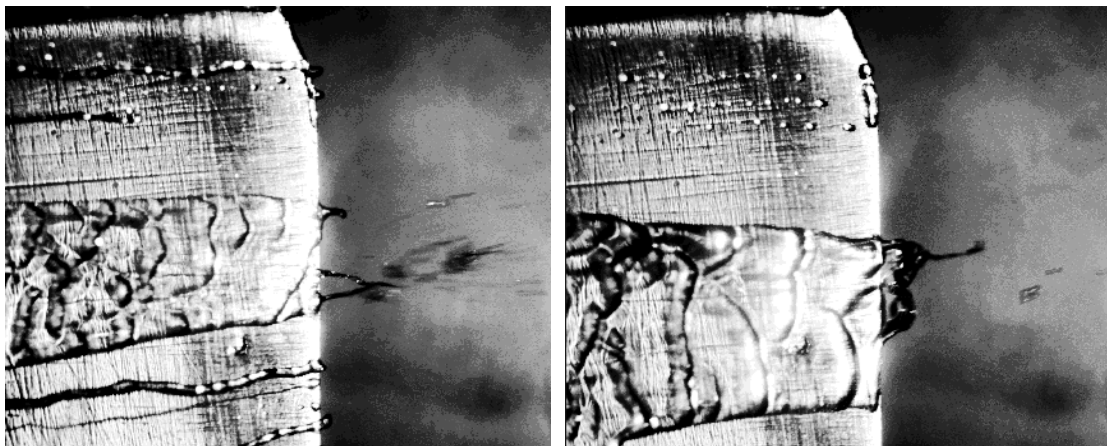


Obrázek 3.13: Kalibrační štítek USAF-1951 [63], upraveno

Pomocí vyhodnocení v Matlabu bylo zjištěno, že ve 1717. pixelové hladině segmentovaného snímku je 119 bílých pixelů. Proud má tedy šířku  $0,202 \text{ mm}$ . Vyhodnocení segmentačním algoritmem se dá při zohlednění zúžení proudu a přesnosti výroby trysky pokládat za platné, protože vrtaný otvor v trysce má mít průměr  $0,3 \text{ mm}$ .

## 3.2. Experimentální dýza

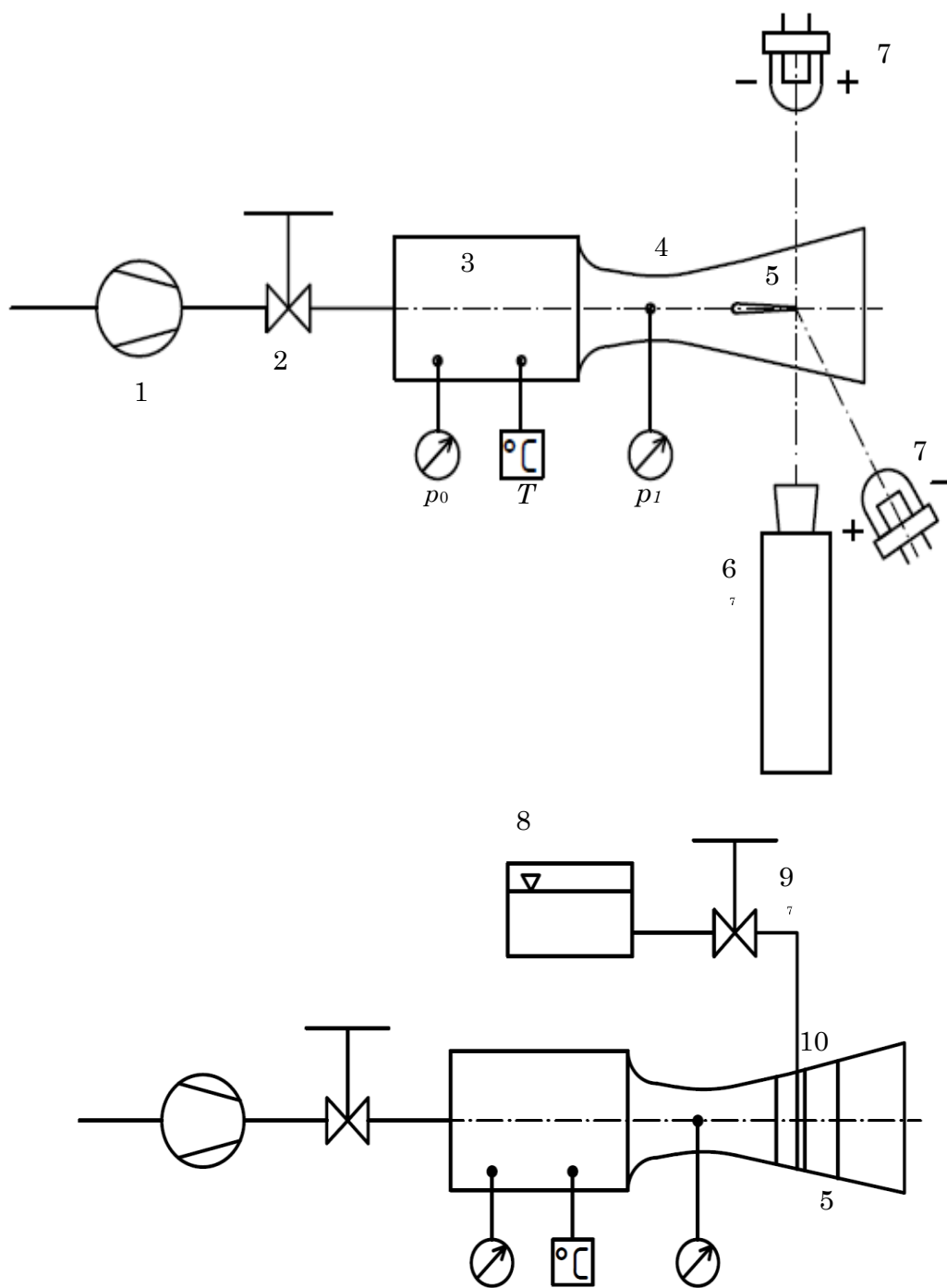
Dosavadní studie zkoumající problematiku eroze turbín popisovali distribuci a velikost kapek a jejich odtrhávání z lopatky, přičemž vliv mechaniky pohybu vody na tvoření kapek u nich nebyl hlouběji popsán. Většina prací se přitom odkazuje zejména na tvoření pramínek, kudy voda po lopatce odtéká až k její hraně. Při pozorování experimentu na dýze bylo však při experimentu zjištěno, že při vyšších rychlostech proudění média, které simuluje tok páry v okruhu tepelných elektráren, se zmíněné pramínky netvoří. Namísto nich se lopatka pokryje souvislým zčeřeným filmem, jak ukazuje obrázek 3.14, což dosavadní studie zkoumající erozi turbín nepopisují a nezohledňují. Práce tak může poskytnout zajímavá data pro další výzkum a nalezení dalších souvislostí mezi rychlostí proudění, velikostí odtržených kapek a tedy i důsledkem, kterým je nežádoucí eroze lopatek. Zároveň zde není kvůli časovým důvodům a mé současné erudici kladen vyšší cíl nalezení jasné souvislosti mezi některými výše zmíněnými skutečnostmi. Experimenty provedené na dýze mají tedy posloužit jako zdroj dat v jasném kontextu pro další výzkum.



Obrázek 3.14: Odtrhávání kapek a tvoření filmu na lopatce

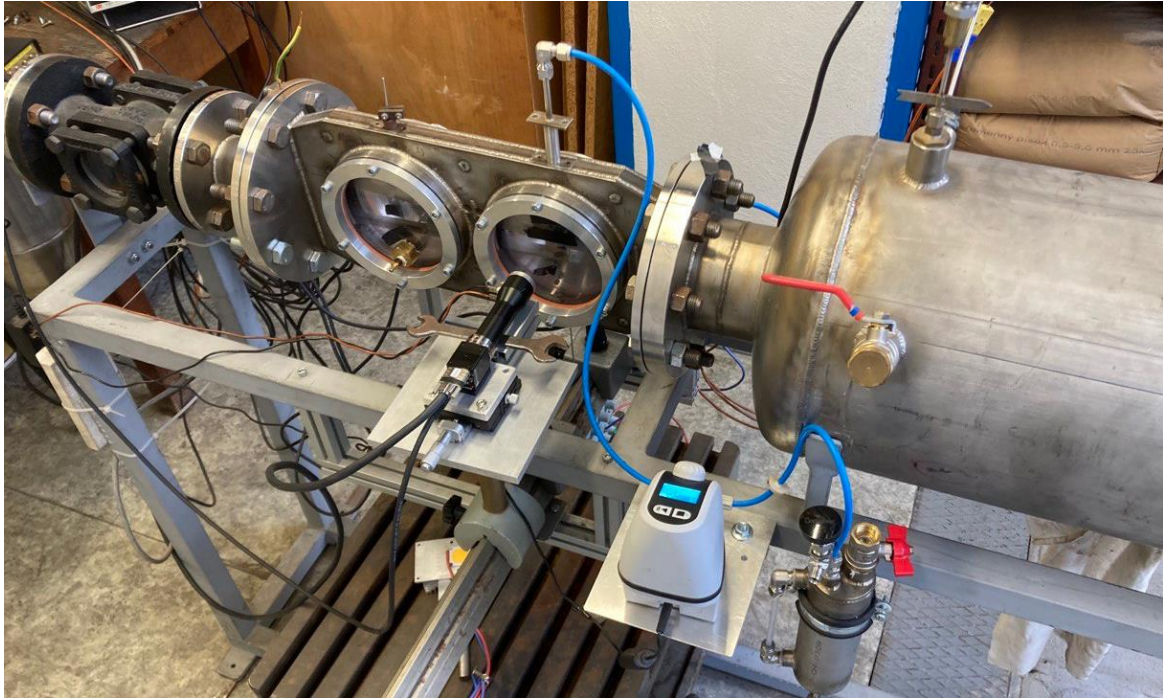
### 3.2.1. Popis experimentální tratě

Experimentální trať popsána na obrázku 3.15 se nachází v Laboratoři turbín a kotlů Ústavu energetiky Fakulty strojní na pražské Julisce. Je využívána k měřením simulující podmínky podobné těm na parních turbínách. Vzduch je tlakován v kompresu (1), který ho vhání přes ventil (2), do ustalovací komory (3). Uzavíráním ventilu se dá regulovat objemový tok a simulovat tak podmínky pro různé rychlosti proudění. Z ustalovací komory vzduch dále proudí dýzou (4). V ní je proud urychlen na rychlost danou kritickým tlakovým poměrem celkového tlaku měřeného v ustalovací komoře a statického tlaku měřeného těsně před kritickým průřezem dýzy. Fotografie experimentální tratě je na obrázku 3.16.



Obrázek 3.15: Schéma experimentální tratě měření na dýze; 1: kompresor, 2: ventil, 3: ustalovací komora, 4: Dýza, 5: modelová lopatka, 6: kamera, 7: LED diody, 8: pumpa s vodou do kanálku lopatky, 9: ventil pro pumpu





Obrázek 3.16: Fotografie experimentální tratě

### 3.2.2. Výpočet rychlosti proudění

Při výpočtech rychlosti je uvažováno, že se proudící médium chová jako stlačitelná tekutina, práce se nekoná a teplo se nesdílí. Vychází se ze zákona zachování energie, který popisuje obyčejná diferenciální rovnice (3.3),

$$\frac{d(c^2)}{2} + dh = 0 \quad (3.3)$$

kde  $c$  je rychlost tekutiny a  $h$  je entalpie. Separací proměnných a následnou integrací se získá energetická rovnice (3.4) v integrálním tvaru,

$$h_0 + \frac{c_0^2}{2} = h + \frac{c^2}{2} \quad (3.4)$$

kde je  $h_0$  klidová entalpie a rychlost z ustalovací komory  $c_0$  je nulová. Následně je z rovnice (3.5) vyjádřena rychlost a za předpokladu, že se vzduch chová jako ideální plyn je za entalpii dosazen součin měrné teplotní kapacity při konstantním tlaku  $c_p$  a termodynamické teploty  $T_0$  v ustalovací komoře a teploty  $T$ .

$$c = \sqrt{2c_p(T_0 - T)} \quad (3.5)$$

Za předpokladu, že proudění je adiabatické, je rovnice (3.5) upravena pro tlaky  $p_1$  v malé vzdálenosti od kritického průměru a  $p_0$  v ustalovací komoře a je vyjádřena měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku podle rovnice (3.6),

$$c_p = \frac{\kappa r}{\kappa - 1} \quad (3.6)$$

kde je  $\kappa$  Poissonova konstanta a  $r$  je plynová konstanta. Rozdíl teplot je upraven za uvažování adiabatického proudění ideálního plynu na tlaky. Podle výsledné Saint-Venantovy-Wantzelovy rovnice (3.7) jsou dopočítány rychlosti za pomoci tabulkového procesoru Excel. Průběh rychlosti v čase je zobrazen na následujících grafech (obrázek 3.18 až 3.26).

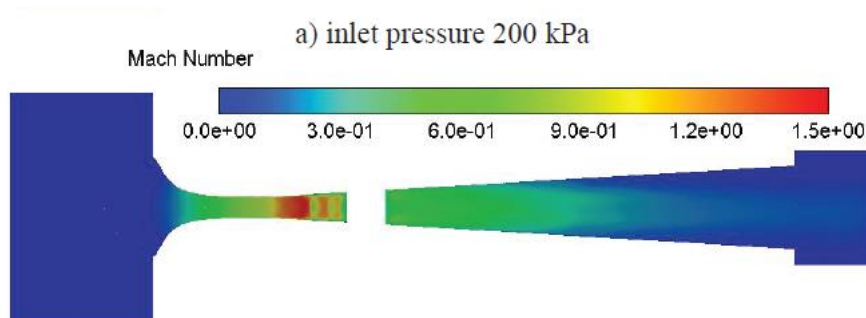
$$c = \sqrt{\frac{2\kappa r}{\kappa - 1} T_0 \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \quad (3.7)$$

Rovnice (3.7) lze však užít jen pro proudění, jehož rychlost nepřesáhla rychlost zvuku, což je maximální rychlost, kterou může při dané teplotě a tlakovém spádu v ustalovací komoře proud vzduchu dosáhnout v kritickém průřezu dýzy. Vzhledem k tomu, že se dá tlak  $p_1$  považovat za velmi blízký kritickému tlaku, výsledná rychlost nesmí teoreticky překročit rychlost zvuku danou rovnicí (3.8).

$$c = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa - 1} r T_0} \quad (3.8)$$

Proudění v dýze je v oblasti kolem lopatky velmi složité, jak ukazuje obrázek 3.17. Rychlosti vypočítané pomocí zvoleného modelu je tedy potřeba brát pouze jako orientační, protože nedokáže popsat komplexnost celého problému. Rychlosti vypočteny pomocí Saint-Venantovy-Wantzelovy rovnice se tedy mohou do těch reálných lišit. Potřeba je také brát v potaz, že se žádná

reálná dýza nechová jako její model. Proto je v nich proudění velmi těžko popsatelné a přesnější výpočty založené na numerických metodách časově náročné.



Obrázek 3.17: Rychlostní profil v experimentální dýze [18]

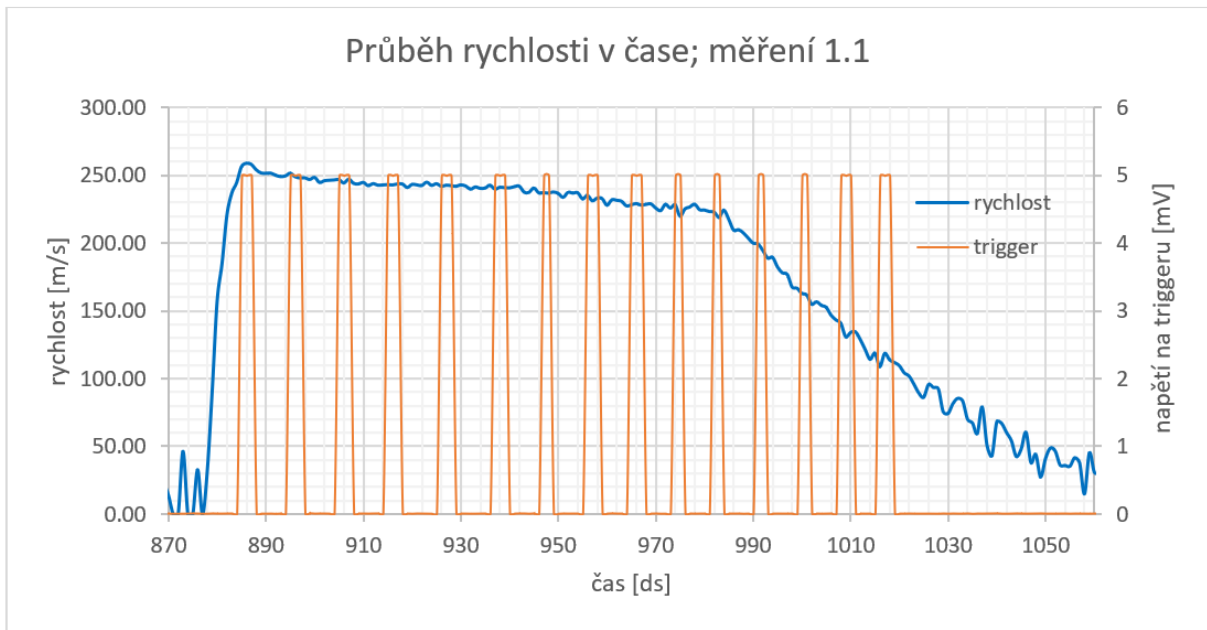
Pro použití v problematice, kterým se zabývá tato bakalářská práce je však Saint-Venant-Wantzelova rovnice postačující, pokud se provede kontrola, že rychlost vypočítaná pomocí ní nepřekračuje rychlost zvuku. Hodnoty rychlostí se použijí dále pro vyhodnocení snímků z dýzy.

### 3.2.3. Vyhodnocení rychlostí

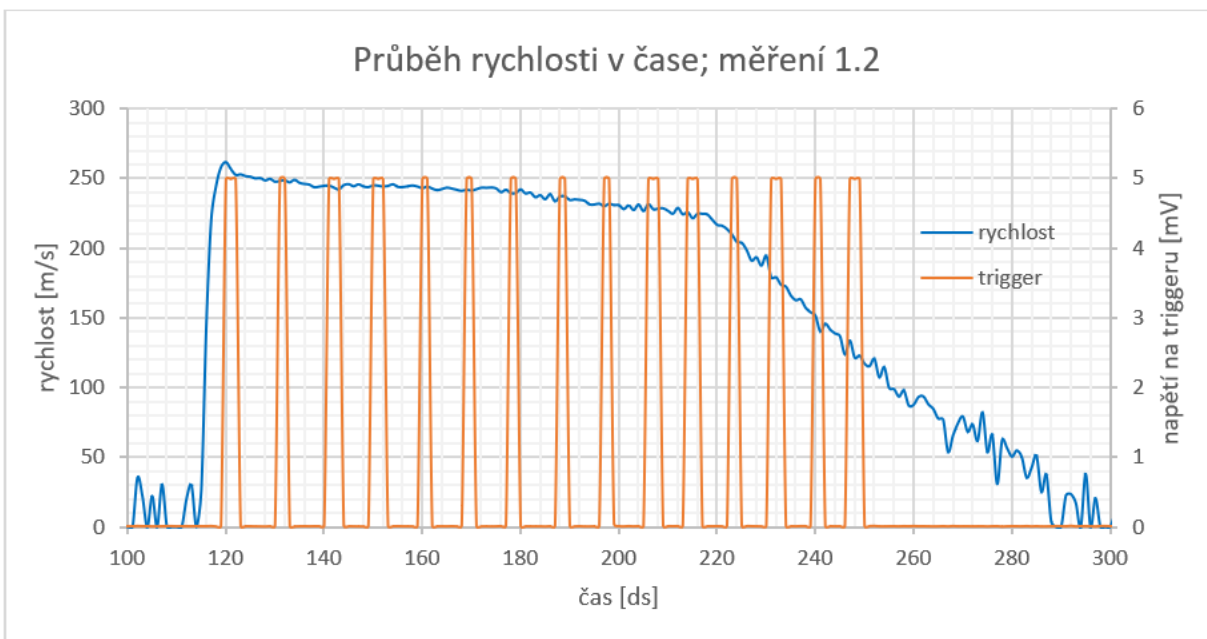
Data z měření se zpracovala v tabulkovém procesoru Excel, kde byly také vytvořeny grafy, na kterých je zobrazen průběh rychlosti v čase a napětí na triggeru. Měření bylo provedeno třemi způsoby, kdy se simulovaly různé režimy proudění.

#### 3.2.3.1. Náhlé otevření ventilu

V prvním se natlakoval kompresor na určitý tlak a následně se otevřel ventil před ustalovací komorou naplno. Důsledkem otevření je snaha vyrovnat hladiny tlaků a vzduch tak začne rychle proudit do ustalovací komory, kde expanduje a poté dál proudí přes dýzu, kde se nejprve stlačuje a po kritickém průřezu opět expanduje, což ho urychluje. Protože je ventil otevřen naplno, a kompresor se před otevřením ventilu vypl při dostatečném natlakování vzduchu v potrubí, poměr tlaků se postupně zmenšuje, což snižuje rychlost proudění. Po otevření nastává prudký nárůst rychlosti a teplota v ustalovací komoře se dvojnásobí. Rychlost se nejprve snižuje rovnoměrně a poté, co se tlakový poměr zvětší, tedy přiblíží jedné (když jsou tlaky stejné, logicky vzduch není nucen proudit), rychlost klesá rychleji. V této fázi teplota velmi pomalu klesá a dá se tak říct, že pokles rychlosti závisí hlavně na rostoucím tlakovém poměru, jehož pokles se ke konci měření zpomaluje, což také zpomaluje pokles rychlosti. Kdyby byla rychlost vykreslena jako hladká spojitá funkce, nebyla by monotónní, což demonstruje komplexnost a komplikovanost proudění v dýze.

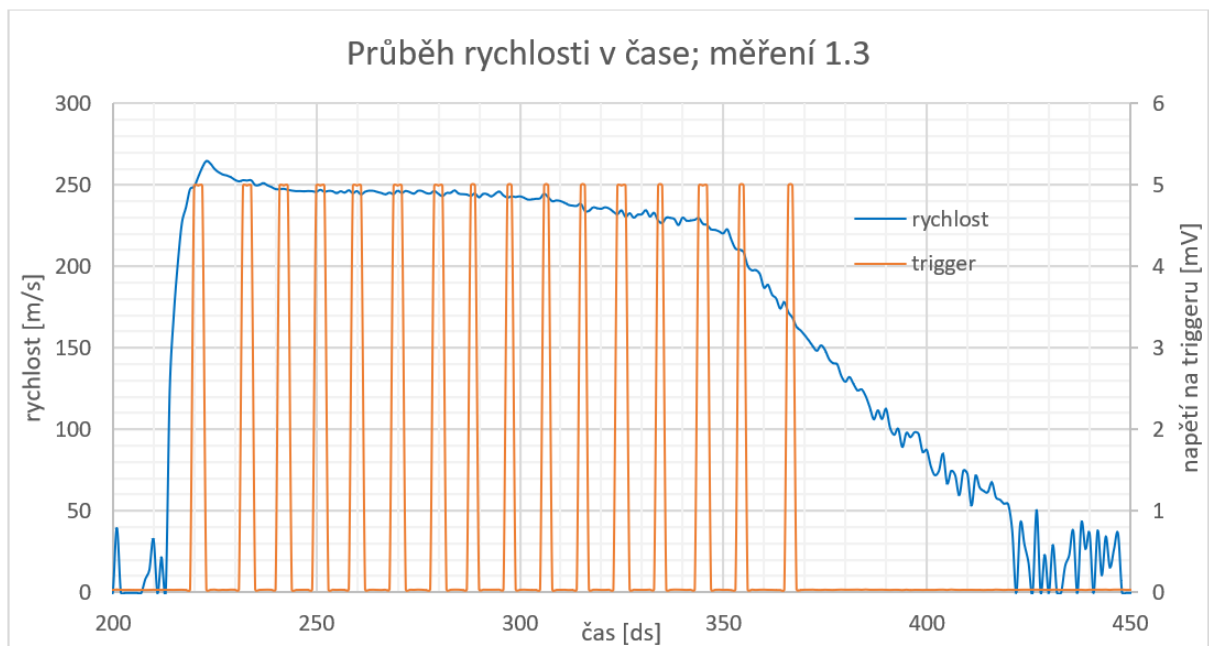


Obrázek 3.18: Graf rychlosti 1.1

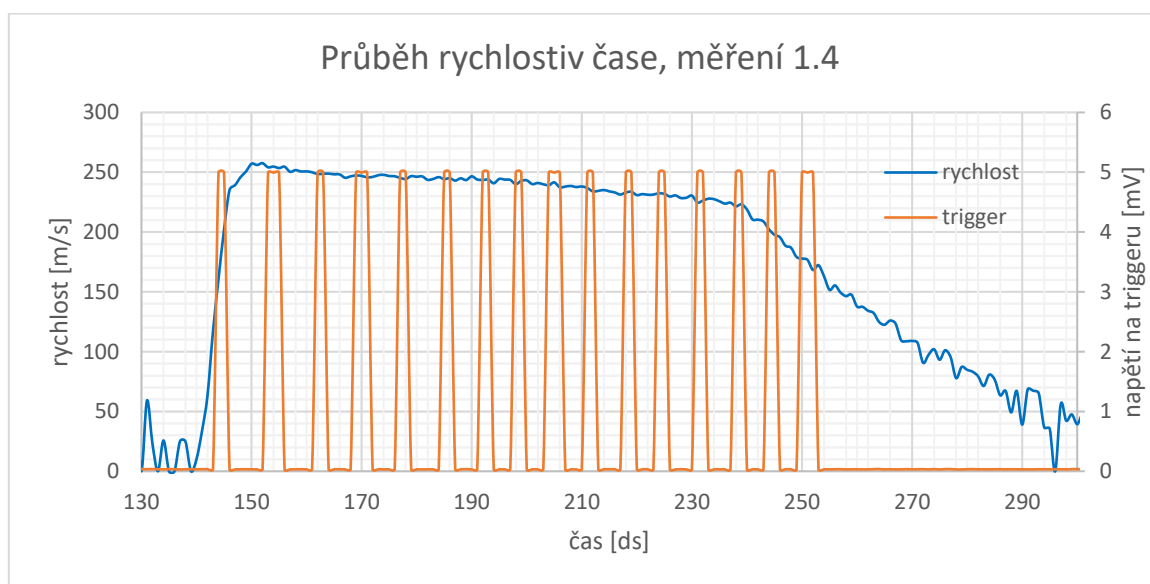


Obrázek 3.19: Graf rychlosti 1.2

U dalšího měření bylo změněno osvětlení na jiné diody o větší intenzitě světelného toku a nastaven jiný expoziční čas. Byla tedy provedena nová synchronizace triggeru spínacího LED diody a spoušť kamery. Postup měření nebyl změněn, takže průběh rychlosti zůstává podobný.

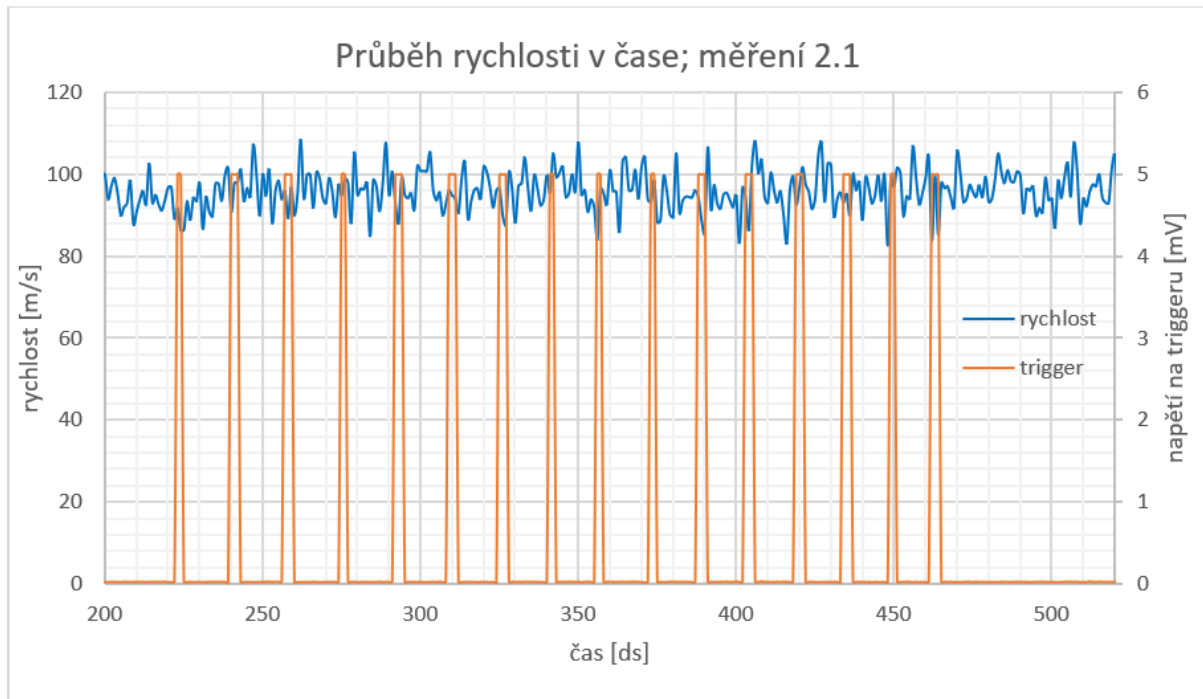


Obrázek 3.20: Graf rychlosti 1.3

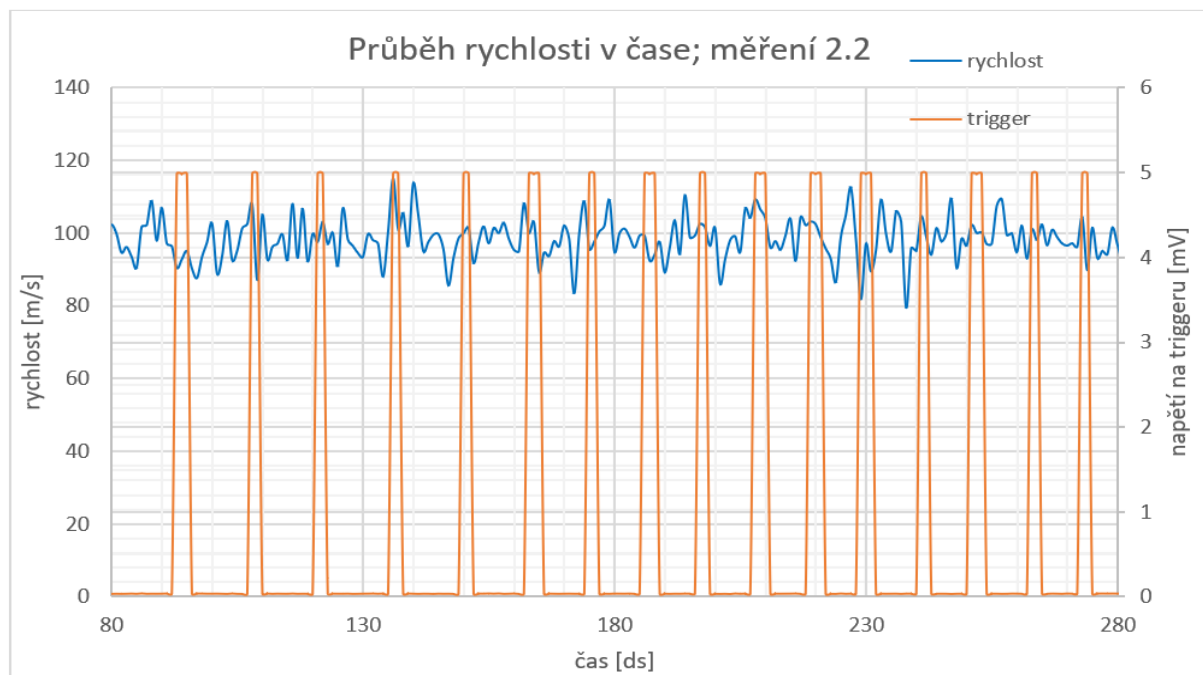


### 3.2.3.2. Konstantní rychlost

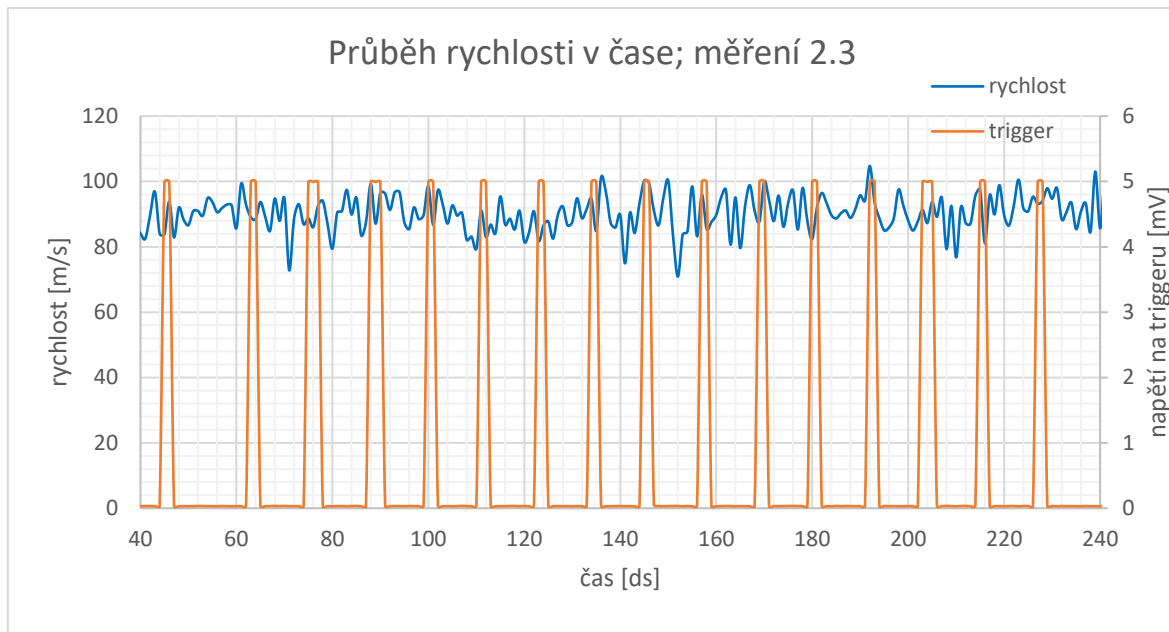
U dalšího způsobu měření se pořizovali snímky při konstantní rychlosti proudění. Té bylo docíleno ponecháním zapnutého kompresoru a neúplným otevření ventilu. Proud byl tak ve ventilu škrcen a nemohl proudit tak rychle, tlakový spád tedy nebyl tak velký, ale byl také konstantní, což dokázal kompresor kompenzovat. Při obou měřeních, přičemž u druhého bylo opětovně změněno osvětlení, bylo dosaženo průměrné rychlosti zhruba 100 m/s.



Obrázek 3.21: Graf rychlosti 2.1



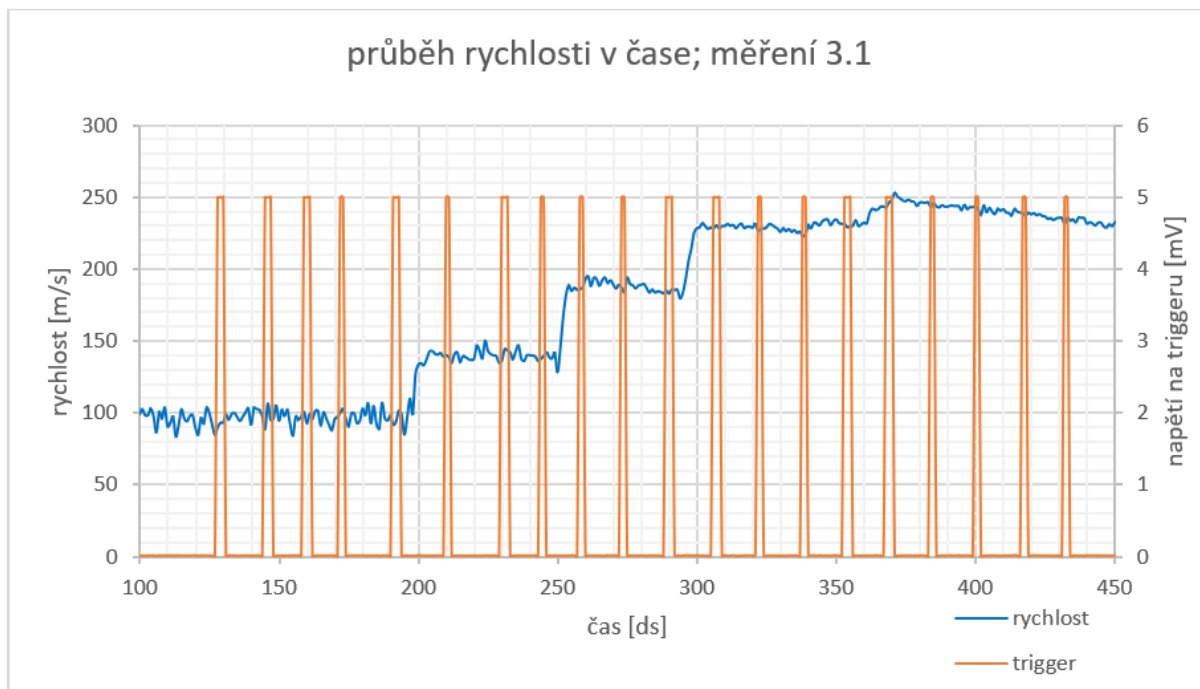
Obrázek 3.22: Graf rychlosti 2.2



Obrázek 3.23: Graf rychlosti 2.3

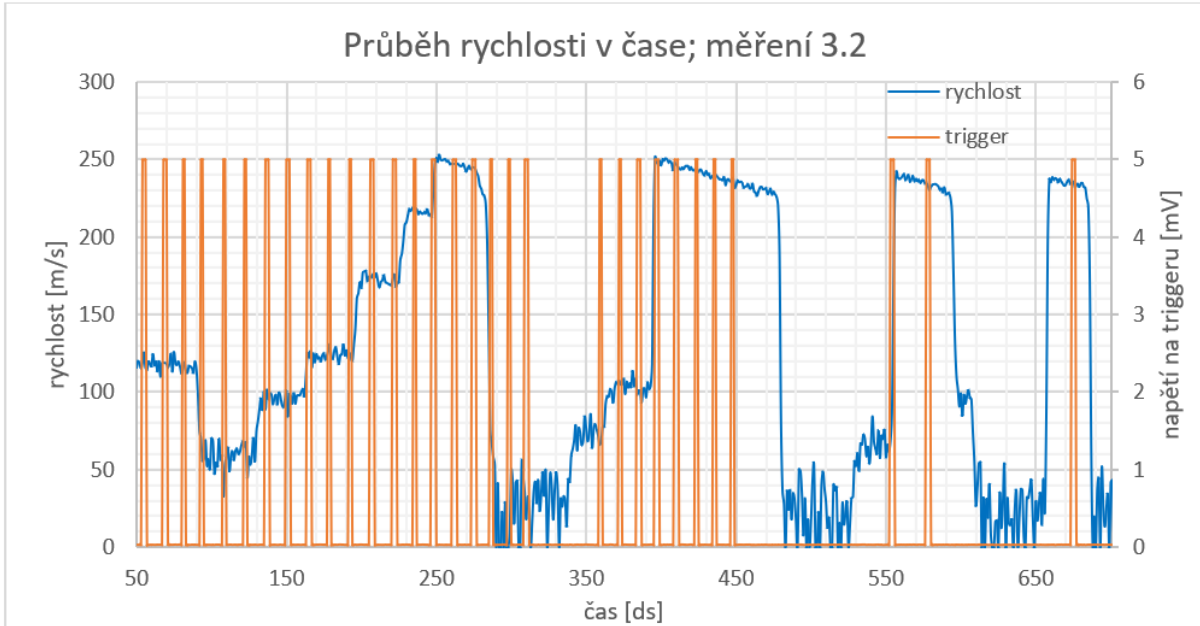
### 3.2.3.3. Skokové otevírání ventilu

Během posledního způsobu měření byl ventil skokově otevírán, takže se i skokově měnila rychlost proudění. Proudění se vždy s otevřením ventilu urychlovalo, protože z potrubí mohlo vytékat více vzduchu. Průběh rychlosti je při otevření na plno podobný jako v 3.3.3.1.

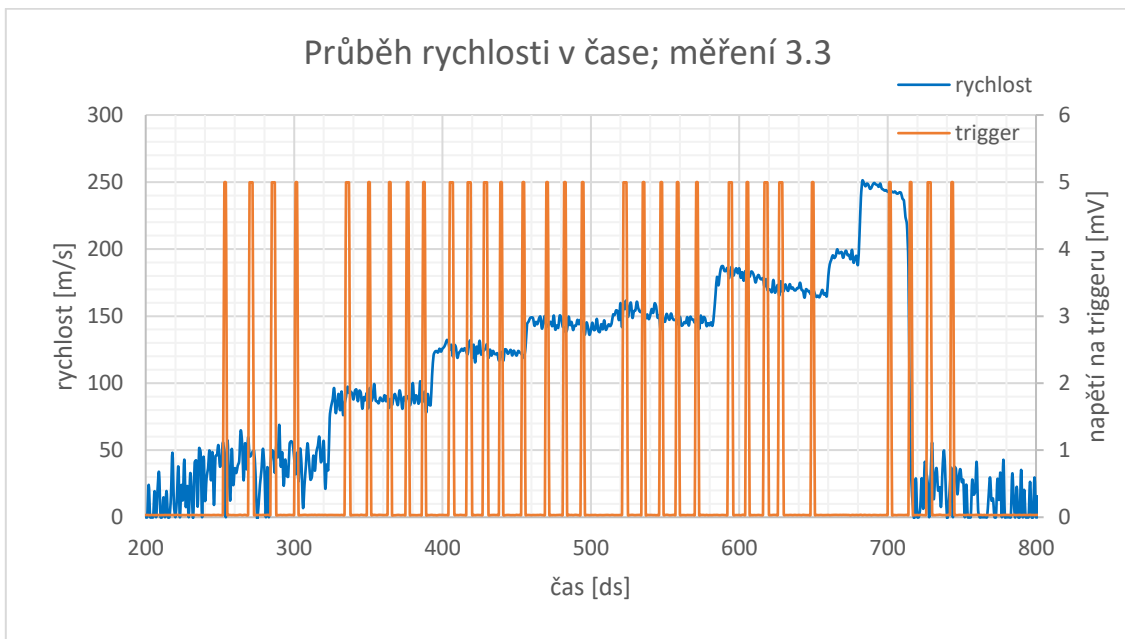


Obrázek 3.24: Graf rychlosti 3.1

U posledního způsobu skokového otevírání byl navíc po skokovém otevírání ventil otvírán a zavírán naplno. Skokové otevření a zavření naplno mělo však za následek zamlžení sledovaného objemu, tudíž vytvořilo nevhodné podmínky pro optické měření. Zamlžení je způsobeno náhlým snížením tlaku.



Obrázek 3.25: Graf rychlosti 3.2



Obrázek 3.26: Graf rychlosti 3.3

### 3.2.4. Segmentace snímků

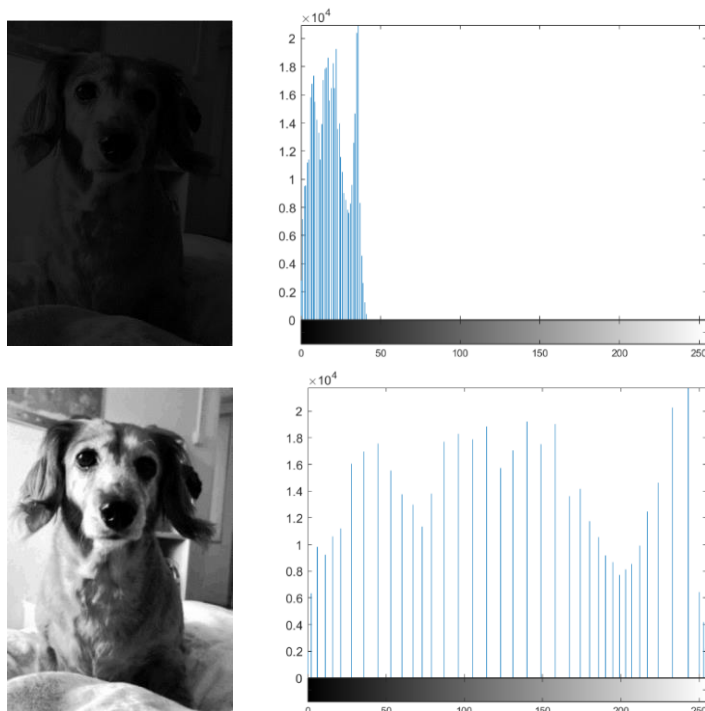
Postup segmentace je velmi podobný jako u snímků z trysky, které sloužily jako prostředek k pochopení jejího fungování.



Pro některé fotografie pořízené na dýze byl nastaven velmi krátký expoziční čas. Jsou proto velmi tmavé a úpravy použité pro snímky na trysce nemusí fotografii dostatečně zesvětlit. Při procesu segmentace bylo zjištěno, že přímé vyhodnocování algoritmem by nebylo přesné. Pro dosažení lepších výsledků by musel být hlouběji upraven skript, na což by byla potřeba delší doba a také prohloubení znalostí o segmentaci sahající mimo bakalářskou práci. Vyhodnocení bude tak v další kapitole prováděno zejména opticky, tedy pouhým pohledem. I tato metoda přináší zajímavé a nové poznatky.

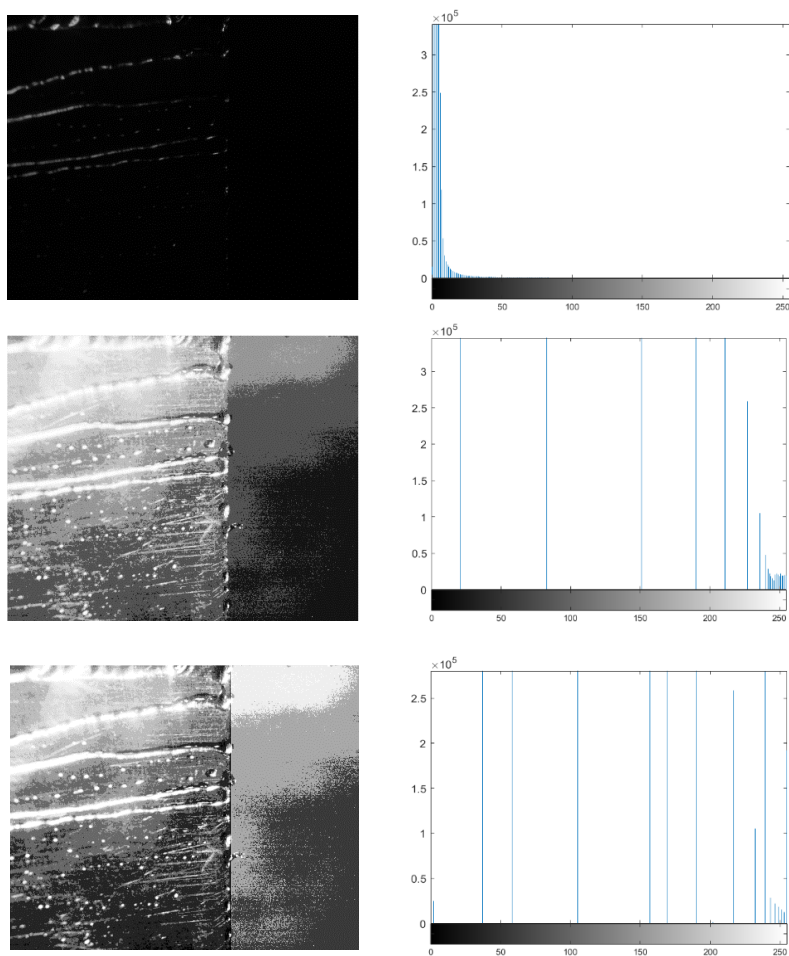
### 3.2.4.1. Ekvalizace histogramu

Pro optické vyhodnocení snímků je potřeba jejich zesvětlení při současném zachování informace o hodnotě šedi. Některé snímky jsou příliš tmavé, což by znemožnilo z nich cokoli vyčíst. Obrázkům je nejprve zvýšen jas stejně jako u snímků z trysky a poté aplikován algoritmus histeq z knihovny MATLABu. Tento příkaz spouští ekvalizaci histogramu na definované oblasti, což je proces, kdy se transformují hodnoty intenzity šedi. Postup si lze představit jako rozšíření palety šedých odstínů, tak že jsou zachovány informace o každém pixelu, jen jsou voleny velké rozestupy mezi jednotlivými stupni, takže jsou drobné změny viditelné okem. Mezery mezi jednotlivými stupni jsou úměrně stejné a vyrovnané, proto jde o ekvalizaci. Nejlépe je tato úprava patrná, když je snímkem reprezentován právě histogramem. Sloupce vyjadřující jednotlivé stupně šedi mají určitou výšku, která vyjadřuje četnost výskytu v obrázku. Ta zůstane zachována za současného rovnoměrného rozprostření podle osy vyjadřující šed, tedy jas. Snímek se špatným osvětlením a expozičním časem před a po provedení ekvalizace je spolu s histogramy zobrazena na obrázku 3.27.



*Obrázek 3.27: Aplikace ekvalizace histogramu na běžný snímek, kde je dobře patrné rovnoměrné rozvrstvení šedi*

Ekvalizace histogramu tedy zvyšuje kontrast snímku, který je příliš tmavý a je ho tak možné vyhodnocovat opticky, pouhým pohledem. Když se však algoritmus histeq aplikoval na snímek z dýzy na obrázku 3.28 jako celek, vytvářel velmi hrubé přechody na pozadí a příliš světlé plochy na lopatce, takže se u některé snímky optiky vyhodnotit stejně nedaly, a navíc se plně nevyužije potenciál tohoto algoritmu. Proto byl snímek na 1559. pixelu zleva rozdělen na část lopatkovou a část s pozadím a u každé z nich byla ekvalizace histogramu provedena samostatně.



Obrázek 3.28: Ekvalizace histogramu snímku z dýzy; shora: snímek před ekvalizací, snímek s ekvalizací přes celý obsah, snímek s rozdělenou ekvalizací

Protože je kvalita některých fotografií velmi špatná, ekvalizace nedává v těchto případech tak dobré výsledky jako u běžné fotky. Snímek je totiž tak moc tmavý, že je jeho pozadí zapsáno pouze ve třech různých hodnotách jasu z 256 celkových. Okem nepostřehnutelná slabá nuance mezi tmavými tóny šedi se vlivem ekvalizace projeví jako hrubé přechody mezi vrstvami. Pro řadu snímků s delším expozičním časem a více dopředným osvětlením, které má za následek zhoršení kvality pozadí, není ekvalizace histogramu potřeba, protože se dají vyhodnotit opticky i bez ní.

### 3.2.4.2. Porovnání postupu se snímky z trysky

U snímků z dýzy se špatnou kvalitou je pro lepší přečtení fotografie použita již zmíněná ekvalizace histogramu. Navíc byly jednotlivé algoritmy na úpravu snímku aplikovány na část lopatky a část pozadí, aby mohly být jejich parametry vhodně upraveny. Algoritmus jako celek je velmi podobný, ale nedosahuje takových výsledků, neboť je celý proces složitější a snímky z dýzy mají horší kvalitu a jsou méně jednotné.

## 4. Výsledky měření

V této kapitole jsou představeny výsledky měření na dýze. Vybrané fotografie jsou v kontextu přiřazeny odpovídajícím rychlostem a výsledky blíže analyzovány s ohledem na dosavadní stav poznání v oblasti eroze nízkotlakých dílů turbín.

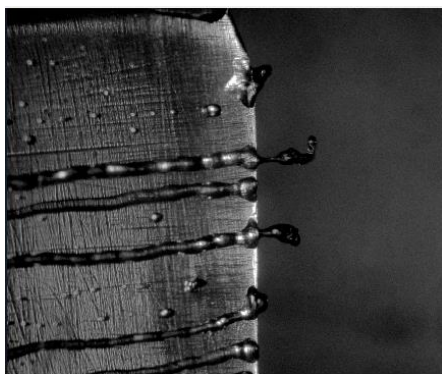
Cílem je najít na fotografiích závislost rychlosti proudění vzduchu v dýze a mechanismu odtrhávání kapek, respektive způsobu odtékání vody po lopatce. Způsob odtékání má totiž podstatný vliv na to, jak velké kapky se tvoří, tudíž determinuje i erozi. Snímky je možné zařadit do třech rychlostních skupin podle toho, jaký způsob odtékání pro dané hodnoty rychlosti převažuje.

Je nutno brát na zřetel, že uváděné rychlosti pouze popisují chování vzduchu před kritickým průřezem, a tedy i před samotnou lopatkou. Proudění za kritickým průřezem a na lopatce je velmi složité a podrobný popis přesahuje bakalářskou práci. Je tak možný výklad, že při vypočtené rychlosti před kritickým průřezem se na lopatce vyskytuje určitý způsob odtékání. Neplatí tedy, že by byla zmíněná rychlost přímo na lopatce a tedy, že pokud má proudění v místě, kde je lopatka určitou rychlost, odtékající voda se nějak blíže určeně chová.

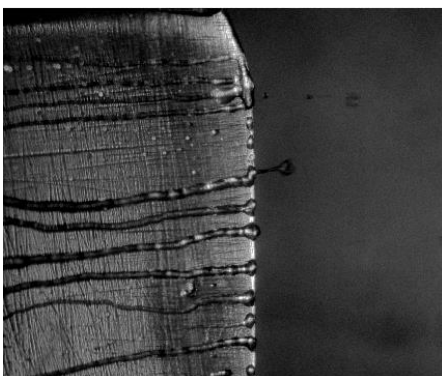
Snímky, které nemusely být ekvalizovány jsou zobrazeny pouze ve své zesvětlené podobě. Ty ekvalizované jsou vždy zobrazeny v páru před a po ekvalizaci obrazu. U některých z nich totiž samotná ekvalizace může čitelnost na první pohled zhoršit. Zobrazení v páru má ulehčit čitelnost nekvalitních snímků.

### 4.1. Nízké rychlosti

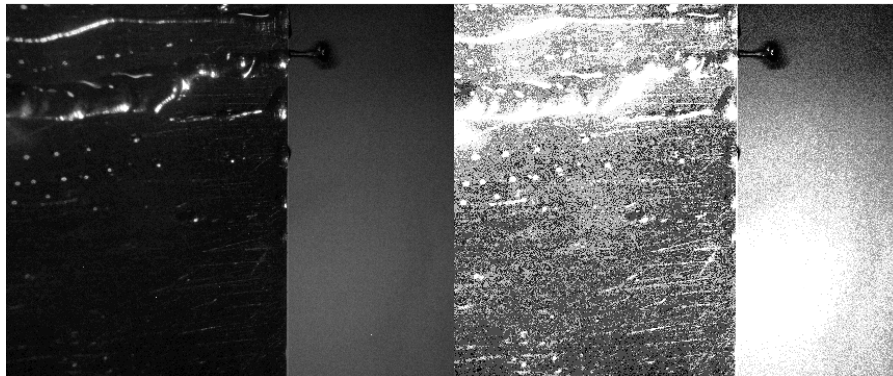
Za rychlosti nízké se dají na experimentální dýze považovat rychlost do 100 m/s. Při takovém proudění se na lopatce tvoří malé pramínky, které se s rostoucí rychlostí zužují. Kapky tvořící se odtržením z těchto pramínek jsou poměrně velké. Proudění není tak rychlé, aby dokázalo vyvolat vazkým třením dostatečně velikou sílu, která by překonala síly povrchového napětí vody. Snímky pořízené při nízkých rychlostech s dobře viditelnými odtrhávajícími se kapkami jsou na obrázcích 4.1 až 4.4



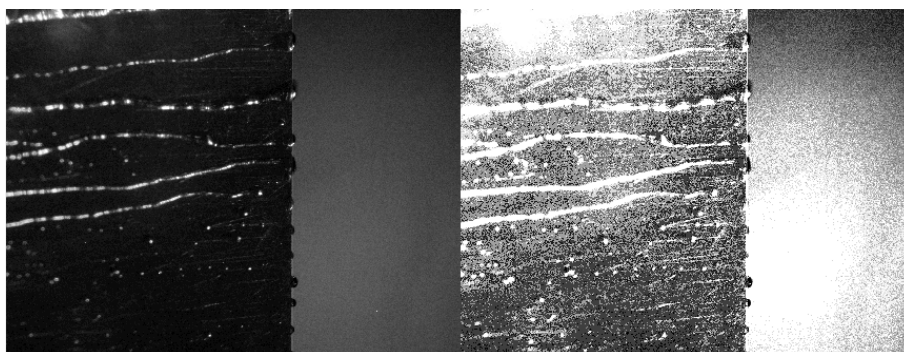
Obrázek 4.1: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 100 m/s



Obrázek 4.2: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 130 m/s



Obrázek 4.3: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 90 m/s



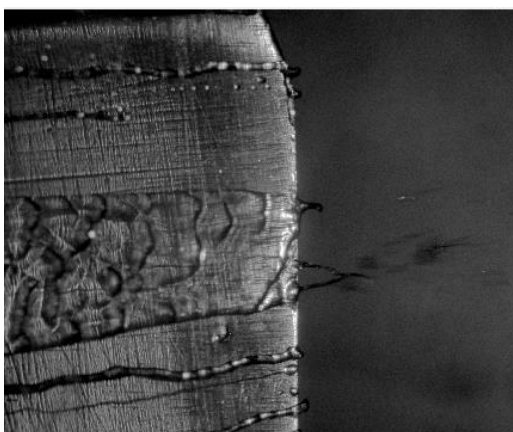
Obrázek 4.4: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 100 m/s

## 4.2. Přejídné rychlosti

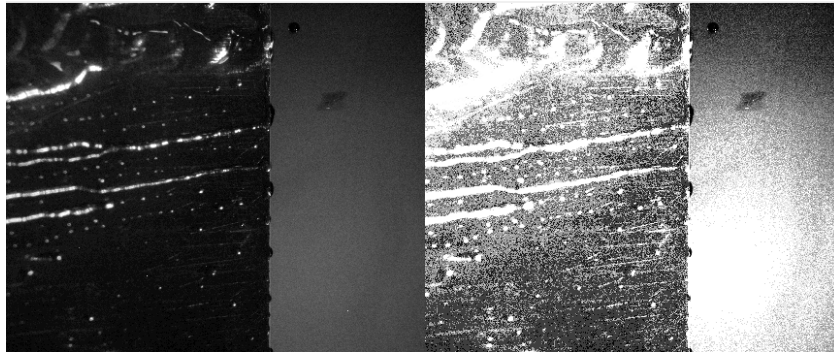
V rozmezí rychlostí 100 až 200 m/s se jednotlivé pramínky stále zužují. Voda se začíná shlukovat a vytvářet nesouvislý vodní film (obrázek 4.5 až 4.9), ze kterého se odtrhávají velké kapky. U přechodových rychlostí je nejlépe hlavně u těch vyšších vidět, že záleží také na době, po jakou je ventil otevřen na danou rychlost. Při delším setrvání na jednom nastavení otevření vykazují snímky vlastnosti, které by měli mít až při vyšších rychlostech. Poukazuje to na komplexnost a obtížnost celého problému. Při změně otevření ventilu je mechanika proudění zjevně velmi složitá, protože se může vytvořit film i při nižší rychlosti.



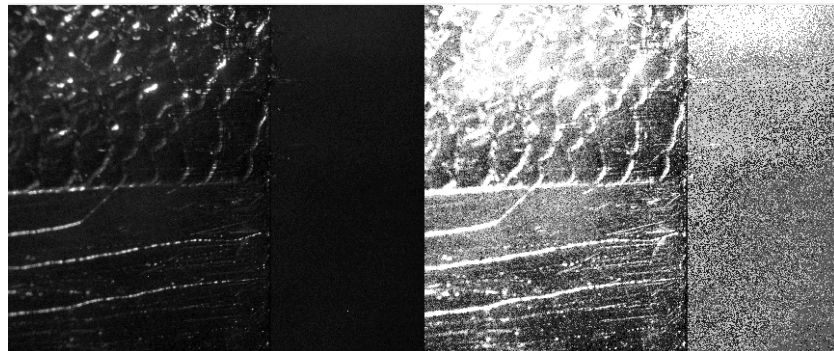
Obrázek 4.5: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 190 m/s



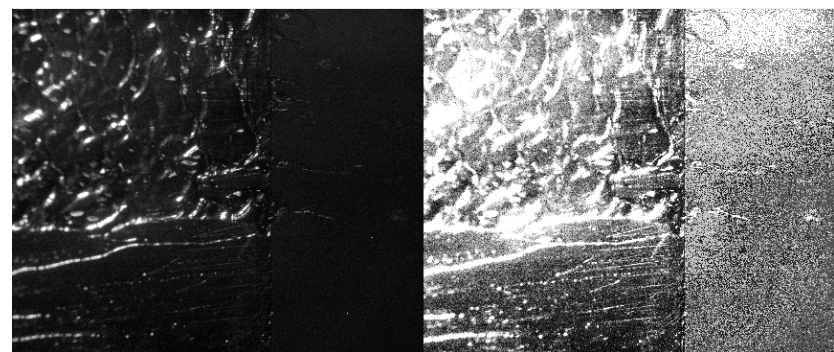
Obrázek 4.6: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 180 m/s



*Obrázek 4.7: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 120 m/s*



*Obrázek 4.8: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 170 m/s*

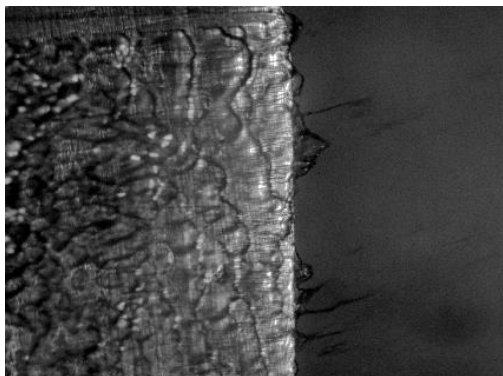


*Obrázek 4.9: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 130 m/s*

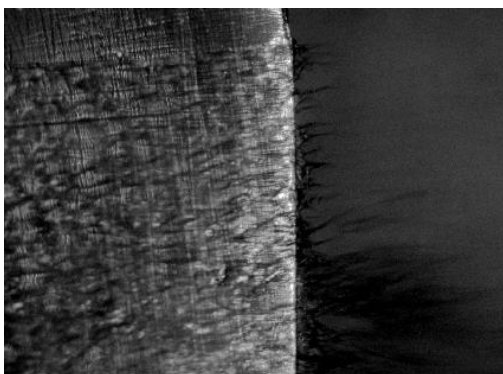
### 4.3. Vysoké rychlosti

Při rychlostech vyšších než 200 m/s se tvoří hlavně zčeřený film, případné pramínky jsou velmi slabé. S rostoucí rychlostí proudění se odtrhávající se kapky zmenšují, protože jsou rychlým vzduchem rozmeteny a zčeření je silněji patrné. Na obrázcích 4.10 až 4.13 jsou kapky většinou zobrazeny jako čáry, jelikož se pohybují tak rychle, že je při nastaveném expozičním čase není možno vyfotografovat jinak. Během krátkého expozičního času se pohnou na větší vzdálenost, a proto jsou vnímané jako čáry. Jde o stejný princip jako u deště při jízdě autem, kdy se lidskému oku jeví jednotlivé kapky jako čáry.

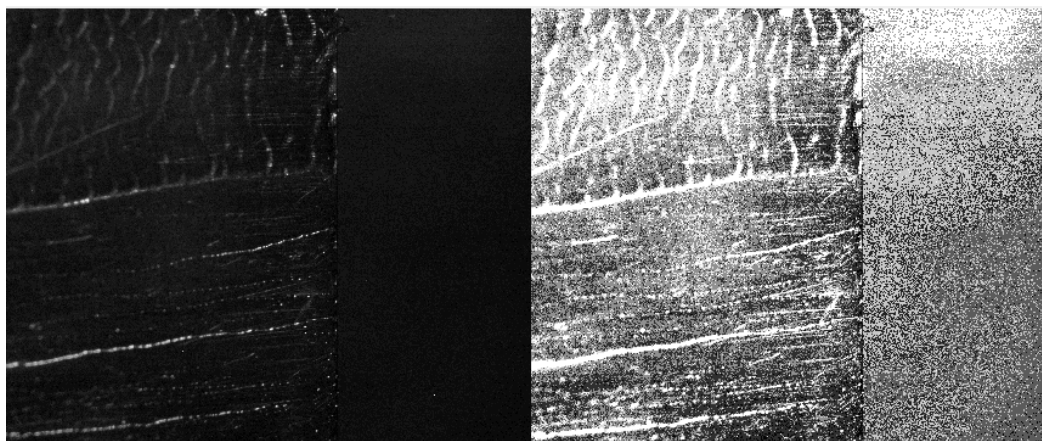
Kapalina se u těch nejvyšších rychlostí chová skokově jinak, což může být způsobeno aerodynamickým ucpáním dýzy. Za rychlost ucpání je brána rychlost 250 m/s před kritickým průřezem, neboť vyšší rychlosti není na dýze ani možno docílit. Vypočtená hodnota maximální rychlosti zvuku při daném talkovém spádu je průměrně 305 m/s. Ze snímků při vyšších rychlostech je také patrná závislost mezi rychlostí proudění a frekvencí vlnek ve filmu.



Obrázek 4.10: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 240 m/s

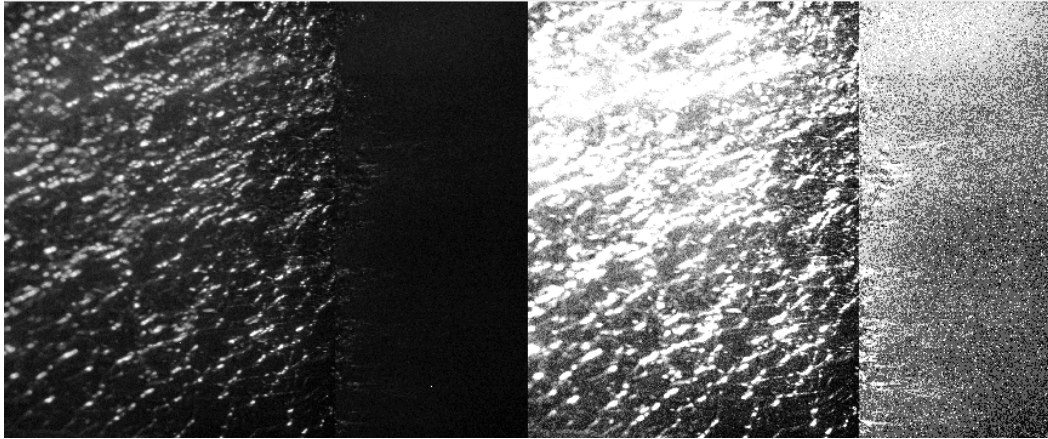


Obrázek 4.11: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 250 m/s



Obrázek 4.12: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 220 m/s





*Obrázek 4.13: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 250 m/s*

## 5. Závěr

Práce se zabývá studiem vzniku hrubé vodní disperze způsobující erozi lopatek parních turbín za použití fotogrammetrických metod. V teoretické části byla provedena rešerše pro pochopení mechanismu eroze lopatek parních turbín způsobené hrubou vodní disperzí, teorie aerodynamických tunelů, principy optických metod a fotogrammetrie a také teorie související se segmentací a zpracování snímků v Matlabu. Hlavním přínosem rešerše je předpoklad, že pokud je eroze závislá na rychlosti kapky i na velikosti kapky a zároveň velikost kapky je závislá na způsobu odtržení, pak by měl být i samotný způsob odtržení a mechanika odtékání kapek z povrchu lopatky závislá na rychlosti kapek, tedy rychlosti proudění.

V prvním experimentu se fotogrammetrickou metodou měřil výtok vody z trysky při různém stavu natlakování. Na tomto experimentu byl osvojen princip fotogrammetrické metody a potřebných znalostí k provedení měření na dýze. Dále se díky přívětivějším světleným podmínkám a obecně snadnějšímu postupu segmentace těchto snímků vybrala potenciálně nejvhodnější segmentační metoda, která byla aplikována i na snímky z dýzy. Během segmentace snímků z trysky se jako nejlepší jevila metoda Bradleyho a také metoda Adaptivního prahování využívající Gaussův vážený průměr. Jejich funkčnost byla ověřena výpočtem šířky proudu vody vytékajícího z trysky.

Hlavním experimentem práce bylo fotogrammetrické měření na experimentální dýze. Cílem bylo pozorovat závislost mechanismu tvoření filmu a odtrhávání kapek na rychlosti proudění, protože z mnoha publikovaných článků, které popisují závislost eroze na rychlosti kapek a velikosti kapek jako je např. [13] a [15] je předpokládáno, že by měl být i samotný mechanismus odtékání kapek a jejich odtrhávání závislý na rychlosti proudění. Rychlost proudění je v tomto případě brána pouze jako parametr, protože přesný popis proudění na lopatce přesahuje rámec bakalářské práce. Rychlost před kritickým průřezem, podle které jsou snímky porovnávány se dopočítala pomocí Saint-Venant-Wantzelovy rovnice, která představuje vhodný model, pokud je proudění podzvukové, což v případě provedeného experimentu je. Protože jsou automatické metody vyhodnocení u snímků z dýzy náročné, přistoupilo se pouze k optickému vyhodnocení. Při vyhodnocování byly zjištěny tři režimy tvoření filmu. U nízkých rychlostí do 100 m/s se tvoří malé pramínky, které se se zvyšující rychlostí zužují. Při vyšších rychlostech od 100 do 200 m/s se začíná tvořit film a pramínky se spojují. S rostoucí rychlostí se stále zeslabují, dokud nezmizí. U rychlostí nad 200 m/s se režim blíží kritickému tlakovému spádu. Vodní film je značně zčeřený a jednotlivé vlnky mají mezi sebou s rostoucí rychlostí menší mezery. Zvyšuje se tedy jejich frekvence. Velikost odtržených kapek je závislá na

odtékání vody z lopatky a samotné odtékání kromě rychlosti také na ustálení proudění.

Cíle práce byly naplněny. Přináší unikátní data a vhled do problematiky vzniku hrubé vodní disperze. Jelikož experimentální pozorování vzniku hrubé vodní disperze je v současnosti disciplínou, která je hojně diskutovaná v technických kruzích a na danou problematiku nebylo provedeno potřebné množství experimentů. Za hlavní přínos práce pokládám právě rozšíření o získaná data a možnou pomoc při hledání směru, kam by měl výzkum pro dosažení cenných závěrů směřovat, jelikož provedené experimenty vytvořily několik dalších otázek. Práce tak dále dává možnost dalším experimentům a zaměření se na správnou segmentaci snímků, ze které by mohla být vyhodnocena distribuce a velikost kapek v závislosti na rychlosti proudění a ustálení proudu. Pozornost by se také měla věnovat souvislostem mezi rychlostí proudění, odtrhávání kapek a frekvenci vlnek tvořících se na vodním filmu lopatky.

## 6. Seznam značek a symbolů

značka	význam	jednotky
$t$	teplota	[°C]
$s$	měrná entropie	[J/kgK]
$\Delta G$	změna Gibbsovy energie	[J]
$r$	poloměr	[m]
$\sigma_K$	povrchové napětí kapaliny	[Pa]
$\rho_K$	hustota kapaliny	[kg/m <sup>3</sup> ]
$T_P$	termodynamická teplota plynu	[K]
$S$	supersaturační konstanta	[-]
$r^*$	kritický poloměr	[m]
$We$	Weberovo číslo	[-]
$\rho$	hustota páry	[kg/m <sup>3</sup> ]
$u$	relativní rychlost	[m/s]
$d$	průměr kapek	[ $\mu$ m]
$p$	tlak <i>water-hammer</i>	[MPa]
$a_L$	rychlost zvuku v lopatce	[m/s]
$a_K$	rychlost zvuku v kapce	[m/s]
$\rho_K$	hustota materiálu lopatky	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_L$	hustota kapky	[kg/m <sup>3</sup> ]
$v$	rychlost srážky	[m/s]
$\sigma_a$	amplituda střídavého cyklu	[MPa]
$\sigma_m$	předpětí	[MPa]
$\sigma$	napětí od dopadu kapky	[MPa]
$Ra$	drsnost	[ $\mu$ m]
$a$	konstanta	[-]
$Ma$	machovo číslo	[-]
$A$	velikost snímku	[-]
$\varepsilon$	zaokrouhlená hodnota okolí jednotky	[-]
$c$	rychlost proudění	[m/s]
$h$	entalpie	[J]
$h_0$	klidová entalpie	[J]
$c_0$	rychlost výtoku z ustalovací komory	[m/s]
$c_p$	tepelná kapacita při konstantním tlaku	[J/K]
$T_0$	termodynamická teplota v ustalovací komoře	[K]
$T$	termodynamická teplota	[K]
$\kappa$	Poissonova konstanta	[-]
$r$	plynová konstanta	[J/K]
$p_0$	tlak v ustalovací komoře	[Pa]
$p_1$	tlak před kritickým průřezem	[Pa]

## 7. Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Rankin-Clausiusův cyklus s přihřevem [8] (upraveno).....	10
Obrázek 2.2: Porovnání odtrhávání kapek z lopatky s tenkou hranou a silnější hranou [22].....	13
Obrázek 2.3: Odtrhávání kapek z hrany lopatky .....	13
Obrázek 2.4: Šíření rázové vlny při nárazu kapky na povrch lopatky [24] .....	14
Obrázek 2.5: Rozplynutí kapky [27] .....	15
Obrázek 2.6: Mechanismus eroze [29] .....	16
Obrázek 2.7: Míjivý cyklus [28] .....	16
Obrázek 2.8: Porovnání způsobů ochrany [36] .....	19
Obrázek 2.9: Otevřený aerodynamický tunel [40] .....	21
Obrázek 2.10: Uzavřený aerodynamický tunel [41] .....	22
Obrázek 2.11: Ideální Lavalova dýza [43] .....	22
Obrázek 2.12: Volba prahu šedi při Otsuově metodě [51].....	24
Obrázek 2.13: Rayleigha a Mieho rozptyl světla [59].....	26
Obrázek 3.1: Schéma experimentální trati při měření na trysce; 1: kompresor, 2: ventil, 3: regulátory, 4: nádoba s vodou, 5: tryska, 6: kamera, 7: LED dioda .....	27
Obrázek 3.2: Znázornění struktury a fungování 3D matice barevné fotografie [61] .....	28
Obrázek 3.3: Snímek pořízený kamerou (vlevo) a jeho upravená verze ve stupních šedi.....	29
Obrázek 3.4: Snímky s různě upraveným kontrastem .....	30
Obrázek 3.5: Segmentovaný snímek před (vlevo) a po aplikaci vyplňovací funkce .....	31
Obrázek 3.6: Otsuova metoda; zleva shora: černobílý snímek, snímek s upraveným jaselem; zleva dole: segmentovaný snímek, snímek s vyplněnými dírami.....	32
Obrázek 3.7: Adaptivní prahování – Gaussův vážený průměr; zleva shora: černobílý snímek, snímek s upraveným jaselem; zleva dole: segmentovaný snímek, snímek s vyplněnými dírami.....	33
Obrázek 3.8: Algoritmus použití Adaptivního prahování pomocí Gaussovy metody v prostředí Matlabu .....	34
Obrázek 3.9: Adaptivní prahování – funkce světlého pozadí; zleva shora: černobílý snímek, snímek s upraveným jaselem; zleva dole: segmentovaný snímek, snímek s vyplněnými dírami.....	35
Obrázek 3.10: : Adaptivní prahování –medián oblasti; zleva shora: černobílý snímek, snímek s upraveným jaselem; zleva dole: segmentovaný snímek, snímek s vyplněnými dírami.....	36
Obrázek 3.11: Bradleyho metoda; zleva shora: černobílý snímek, snímek s upraveným jaselem; zleva dole: segmentovaný snímek, snímek s vyplněnými dírami.....	37
Obrázek 3.12: Snímek s vyhodnocovanou hladinou .....	38
Obrázek 3.13: Kalibrační štítek USAF-1951 [63], upraveno .....	38
Obrázek 3.14: Odtrhávání kapek a tvoření filmu na lopatce.....	39
Obrázek 3.15: Schéma experimentální tratě měření na dýze; 1: kompresor, 2: ventil, 3: ustalovací komora, 4: Dýza, 5: modelová lopatka, 6: kamera, 7: LED diody, 8: pumpa s vodou do kanálku lopatky, 9: ventil pro pumpu .....	40
Obrázek 3.16: Fotografie experimentální tratě.....	41
Obrázek 3.17: Rychlostní profil v experimentální dýze [18] .....	43
Obrázek 3.18: Graf rychlosti 1.1 .....	44
Obrázek 3.19: Graf rychlosti 1.2.....	44
Obrázek 3.20: Graf rychlosti 1.3.....	45

Obrázek 3.21: Graf rychlosti 2.1 .....	46
Obrázek 3.22: Graf rychlosti 2.2 .....	46
Obrázek 3.23: Graf rychlosti 2.3 .....	47
Obrázek 3.24: Graf rychlosti 3.1 .....	47
Obrázek 3.25: Graf rychlosti 3.2 .....	48
Obrázek 3.26: Graf rychlosti 3.3 .....	48
Obrázek 3.27: Aplikace ekvalizace histogramu na běžný snímek, kde je dobře patrné rovnoměrné rozvrstvení šedi .....	49
Obrázek 3.28: Ekvalizace histogramu snímku z dýzy; shora: snímek před ekvalizací, snímek s ekvalizací přes celý obsah, snímek s rozdělenou ekvalizací .....	50
Obrázek 4.1: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 100 m/s .....	53
Obrázek 4.2: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 130 m/s .....	53
Obrázek 4.3: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 90 m/s .....	53
Obrázek 4.4: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 100 m/s .....	53
Obrázek 4.5: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 190 m/s .....	54
Obrázek 4.6: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 180 m/s .....	54
Obrázek 4.7: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 120 m/s .....	55
Obrázek 4.8: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 170 m/s .....	55
Obrázek 4.9: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 130 m/s .....	55
Obrázek 4.10: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 240 m/s .....	56
Obrázek 4.11: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 250 m/s .....	56
Obrázek 4.12: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 220 m/s .....	56
Obrázek 4.13: Odtékání vody z lopatky při rychlosti 250 m/s .....	57

## 8. Použitá literatura

- [1] Total electricity generation. *International Energy Agency: IEA Atlas of Energy* [online]. Paris, c2023 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <http://energyatlas.iea.org/#!/tellmap/-1118783123>
- [2] ZINK, John C. Steam turbines power an industry: a condensed history of steam turbines. *Power Engineering* [online]. Illinois, United States: PennWell Publishing, 1996, Aug. 1996, 100(8) [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://go.gale.com/ps/i.do?id=GALE%7CA18669897&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=abs&issn=00325961&p=AONE&sw=w&userGroupName=anon%7Ee493cb9a>
- [3] WAKELEY, Guy Richard. *The Optimisation of Steam Turbine Design*. Newcastle upon Tyne, 1997. Disertace. University of Newcastle upon Tyne.
- [4] BUDENHOLZER, Roland A. a Fred LANDIS. Steam Turbines: History of steam turbine technology. *Encyclopedia Britannica* [online]. Chicago, 5 Aug. 2022 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/turbine/Steam-turbines>
- [5] Arabelle nuclear steam turbine. *GE Steam Power* [online]. Boston: General Electric, c2022 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://www.ge.com/steam-power/products/steam-turbines/nuclear-arabelle>
- [6] *Advances in Steam Turbines for Modern Power Plants* [online]. Elsevier, 2022 [cit. 2023-02-19]. ISBN 9780128243596. Dostupné z: doi:10.1016/C2020-0-01671-3
- [7] ŠKOPEK, Jan. *Parní turbína: Tepelný a pevnostní výpočet*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2007, 160 s. ISBN 978-80-7043-26-3.
- [8] ČEPL, O. *Optimalizace Rankine-Clausiova parního cyklu*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013, 59 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Štětina, Ph. D..
- [9] MOORE M. J., C. H. SIEVERDING. *Two-Phase Steam Flow in Turbines and Separators*, McGraw-Hill, 1976
- [10] VALHA J. *Proudění mokré páry a její erozivní účinky v průtočné části parní turbíny*. SVUSS, Sborník referátů, 1978
- [11] KIROLS, H. S., MAHDIPOOR, M. S., KEVORKOV, D., UIHLEIN, A., MEDRAJ, M. *Energy based approach for understanding water droplet erosion*. *Materials and Design*, vol 104, pp. 76-86, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.089>.

- [12] ILIEVA, I. G. *Erosion failure mechanisms in turbine stage with twisted rotor blade*. Engineering Failure Analysis, vol 70, pp. 90-104, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.07.008>.
- [13] BARTOŠ, Ondřej, Adam HUNĚK a Pavel ANTOŠ. A study of the coarse droplet formation from the liquid film in steam turbines. *Experimental Fluid Mechanics 2022*. Dvůr Králové nad Labem, 2022.
- [14] KIROLS, H. S., KEVORKOV, D., UIHLEIN, A., MEDRAJ, M. *Water droplet erosion of stainless steel steam turbine blades*. Materials Research Express, vol 4, no 8, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa7c70>
- [15] VLASÁK, Jakub. Erosion protection of last stage blades working in wet steam region. Dvůr Králové nad Labem, 2022, 260-264.
- [16] KOLOVRATNÍK, Michal. *Vznik a vývoj kapalně fáze v parních turbínách* [online]. 2007 [cit. 2023-01-04]. Dostupné z: <https://portal.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/04/HP2005-10.pdf>. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
- [17] BAKHTAR, F, J B YOUNG, A J WHITE a D A SIMPSON. Classical Nucleation Theory and Its Application to Condensing Steam Flow Calculations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* [online]. 2005, 219(12), 1315-1333 [cit. 2023-01-04]. ISSN 0954-4062. Dostupné z: doi:10.1243/095440605X8379
- [18] BARTOŠ, Ondřej, Petr PAVLÍČEK a Lucie MĚŠŤANOVÁ. *An experimental study of the coarse droplets formation* [online]. In: . 2019, 020002- [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: doi:10.1063/1.5138614
- [19] SENGUPTA, Bidesh a Chittatosh BHATTACHAR. Influence of Blade Shape and Water Droplet Size on Fractional Deposition in the Last Stages of Steam Turbine. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineerin* [online]. 2017, 2017, 7(4), 164-172 [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/316823268\\_Influence\\_of\\_Blade\\_Shape\\_and\\_Water\\_Droplet\\_Size\\_on\\_Fractional\\_Deposition\\_in\\_the\\_Last\\_Stage\\_s\\_of\\_Steam\\_Turbine](https://www.researchgate.net/publication/316823268_Influence_of_Blade_Shape_and_Water_Droplet_Size_on_Fractional_Deposition_in_the_Last_Stage_s_of_Steam_Turbine)
- [20] LEE, Byeong-Eun, Kap-Jong RIU, Se-Hyun SHIN a Soon-Bum KWON. Development of a Water Droplet Erosion Model for Large Steam Turbine Blades. *KSME International Journal*, [online]. 2003, 17(1), 114-121 [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF02984292.pdf?pdf=inline%20link>
- [21] MUZIK, Tomas, Pavel ŠAFAŘÍK a Antonín TUCEK. Analysis of the water film behavior and its breakup on profile using experimental and numerical



- methods. *Journal of Thermal Science* [online]. 2014, **23**(4), 325-331 [cit. 2023-01-09]. ISSN 1003-2169. Dostupné z: doi:10.1007/s11630-014-0713-7
- [22] INAMURA, T., N. KATAGATA, H. NISHIKAWA, T. OKABE a K. FUMOTO. Effects of prefilmer edge thickness on spray characteristics in prefilming airblast atomization. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 2019, **121** [cit. 2023-01-09]. ISSN 03019322. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.103117
- [23] HINZE, J. O. Fundamentals of the Hydrodynamic Mechanism of Splitting in Dispersion Processes. *A.I.Ch.E. Journal* [online]. John Wiley & Sons, 1955, **1**(3), 289 - 295 [cit. 2023-01-06]. ISSN 0001-1541. Dostupné z: <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/aic.690010303>
- [24] FIELD, J.E. ELSI conference: invited lecture. *Wear* [online]. 1999, 233-235, 1-12 [cit. 2023-01-08]. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/S0043-1648(99)00189-1
- [25] LESSER, M. B. Analytic solution of liquid-drop impact problems. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences* [online]. 1981, **377**(1770), 289-308 [cit. 2023-01-08]. ISSN 0080-4630. Dostupné z: doi:10.1098/rspa.1981.0125
- [26] SMITH, Cook Stanley. Erosion by water-hammer. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character* [online]. 1928, **119**(783), 481-488 [cit. 2023-01-08]. ISSN 0950-1207. Dostupné z: doi:10.1098/rspa.1928.0107
- [27] KIROLS, Hany S. Water Droplet Erosion: Influencing Parameters, Representation and Comparisons. Montreal, 2015. A Thesis. Vedoucí práce Dr. Mamoun Medraj.
- [28] SPRINGER, George S. *Erosion by liquid impact*. New York: distributed by Halsted Press Division, Wiley, 1976. ISBN 0-470-151080.
- [29] HEYMANN, F. J. Erosion by liquids. *Machine Design* [online]. 1970, (30-F) [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: [http://users.encs.concordia.ca/~tmg/images/8/8b/Erosion\\_by\\_liquids.pdf](http://users.encs.concordia.ca/~tmg/images/8/8b/Erosion_by_liquids.pdf)
- [30] RUMML, Zdeněk a František STRAKA. A new model for steam turbine blade materials erosion. *Wear* [online]. 1995, **186-187**, 421-424 [cit. 2023-02-21]. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/0043-1648(95)07164-4
- [31] KIROLS, H.S., D. KEVORKOV, A. UIHLEIN a M. MEDRAJ. The effect of initial surface roughness on water droplet erosion behaviour. *Wear* [online]. 2015, **342-343**, 198-209 [cit. 2023-02-21]. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2015.08.019

- [32] AHMAD, M., M. SCHATZ a M.V. CASEY. Experimental investigation of droplet size influence on low pressure steam turbine blade erosion. *Wear* [online]. 2013, 303(1-2), 83-86 [cit. 2023-01-09]. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2013.03.013
- [33] MANSOOR, A. Experimental assessment of droplet impact erosion of low-pressure steam turbine blades, Dissertation, Shaker Verlag 2009, ISBN 978-3-8322-8603-3.
- [34] MAHDIPOOR, M.S., H.S. KIROLS, D. KEVORKOV, P. JEDRZEJOWSKI a M. MEDRAJ. Influence of impact speed on water droplet erosion of TiAl compared with Ti6Al4V. *Scientific Reports* [online]. 2015, 5(1) [cit. 2023-02-21]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/srep14182
- [35] YAO, Jianhua, Qunli ZHANG, Fanzhi KONG a Qingming DING. Laser hardening techniques on steam turbine blade and application. *Physics Procedia* [online]. Elsevier B.V., 2010, 5(A), 399-406 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2010.08.161
- [36] VLASÁK, Jakub. Erosion protection of last stage blades working in wet steam region. *Dvůr Králové nad Labem*, 2022, 260-264.
- [37] SAFONOV, Vladimir, Anna ZYKOVA, Alicja KRELLA, Janusz STELLER, Grzegorz GAJOWIEC, Marek SZKODO a Hossein GHAEMI. Cavitation erosion resistance of thick CrC coating deposition by the Arc-PVD method. In: Polish Hydropower Conference RENEXPO Poland 2016. Varšava, 2016, s. 56-58.
- [38] BAALS, Donald D. a Wiliam R. CORLISS. Whirling Arms and the First Wind Tunnels. In: *Wind Tunnels of NASA* [online]. Washington, DC [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/WindTunnel/history.html>
- [39] Open Return Wind Tunnel. *NASA* [online]. [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunoret.html>
- [40] VERMA, Neeraj a Beena D. BALONI. Numerical and experimental investigation of flow in an open-type subsonic wind tunnel. *SN Applied Sciences* [online]. 2019, 1(11) [cit. 2023-02-27]. ISSN 2523-3963. Dostupné z: doi:10.1007/s42452-019-1422-3
- [41] CLOSED CIRCUIT WIND TUNNEL TESTING: DESIGN AND SIZING OF A CLOSED CIRCUIT WIND TUNNEL TESTING. *PresticeEDT* [online]. [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: <https://www.presticebdt.com/the-design-of-a-closed-circuit-wind-tunnel/>
- [42] KHAN, Sher Afghan, Omar Mohamed IBRAHIM a Abdul AABID. CFD analysis of compressible flows in a convergent-divergent nozzle. *Materials*

- Today: Proceedings* [online]. 2021, **46**, 2835-2842 [cit. 2023-02-22]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.03.074
- [43] NOŽIČKA, Jiří. Dynamika plynů. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 8001033007
- [44] ŠKORPÍK, Jiří. Proudění plynů a par tryskami, *Transformační technologie*, 2006-02, [last updated 2021-03-10]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <https://www.transformacni-technologie.cz/40.html>. English version: Flow of gases and steam through nozzles. Web: [https://www.transformacni-technologie.cz/en\\_40.html](https://www.transformacni-technologie.cz/en_40.html).
- [45] TATSUNO, K. a S. NAGAO. Water Droplet Size Measurements in an Experimental Steam Turbine Using an Optical Fiber Droplet Sizer. *Journal of Heat Transfer* [online]. 1986, 108(4), 939-945 [cit. 2023-02-19]. ISSN 0022-1481. Dostupné z: doi:10.1115/1.3247038
- [46] ALEKSEEV, R A, V G GRIBIN, A A TISHCHENKO, I Yu GAVRILOV, V A TISHCHENKO a V V POPOV. Application of PTV method for investigation of polydisperse wet steam flow. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2018, 1128 [cit. 2023-02-20]. ISSN 1742-6588. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1128/1/012093
- [47] BARTOŠ, Ondřej, Xiaoshu CAI, Michal KOLOVRATNÍK, Tomáš VÍT, Petra DANČOVÁ a Petr NOVOTNÝ. A detection of the coarse water droplets in steam turbines. *EPJ Web of Conferences* [online]. 2014, 67 [cit. 2023-02-20]. ISSN 2100-014X. Dostupné z: doi:10.1051/epjconf/20146702005
- [48] OTSU, Nobuyuki. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* [online]. 1979, **9**(1), 62-66 [cit. 2023-02-22]. ISSN 0018-9472. Dostupné z: doi:10.1109/TSMC.1979.4310076
- [49] KASS, Michael, Andrew WITKIN a Demetri TERZOPOULOS. Snakes: Active contour models. *International Journal of Computer Vision* [online]. 1988, **1**(4), 321-331 [cit. 2023-02-22]. ISSN 0920-5691. Dostupné z: doi:10.1007/BF00133570
- [50] HEMALATHA, R.J., T.R. THAMIZHVANI, A. Josephin Arockia DHIVYA, Josline Elsa JOSEPH, Bincy BABU a R. CHANDRASEKARAN. Active Contour Based Segmentation Techniques for Medical Image Analysis. In: KOPROWSKI, Robert, ed. *Medical and Biological Image Analysis* [online]. InTech, 2018, 2018-07-04 [cit. 2023-02-23]. ISBN 978-1-78923-330-8. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.74576
- [51] SIDDIQUE, Md. Abu Bakr, Rezoana Bente ARIF a Mohammad Mahmudur Rahman KHAN. Digital Image Segmentation in Matlab: A Brief Study on OTSU's Image Thresholding. In: *2018 International Conference on Innovation in Engineering and Technology (ICIET)* [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 1-5 [cit.

- 2023-04-13]. ISBN 978-1-5386-5229-9. Dostupné z: doi:10.1109/CIET.2018.8660942
- [52] BRADLEY, Derek a Gerhard ROTH. Adaptive Thresholding using the Integral Image. *Journal of Graphics Tools* [online]. 2011, **12**(2), 13-21 [cit. 2023-03-02]. ISSN 1086-7651. Dostupné z: doi:10.1080/2151237X.2007.10129236
- [53] DAODE, Zhang, Ye XUHUI a Hu XINYU. An Improved Algorithm Based on Wellner's Threshold Segmentation Method. *The Open Cybernetics & Systemics Journal* [online]. 2015, **9**(1), 32-36 [cit. 2023-04-15]. ISSN 1874110X. Dostupné z: doi:10.2174/1874110X01509010032
- [54] MIE, Gustav. Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. *Annalen der Physik* [online]. 1908, 330(3), 377-445 [cit. 2023-02-20]. ISSN 00033804. Dostupné z: doi:10.1002/andp.19083300302
- [55] M. Instruments, *Mie Theory: The first 100 years* [online]. Spectris plc, 2010 [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://www.atascientific.com.au/wp-content/uploads/2017/02/Mie-Theory-the-first-hundred-years-MRK1304-02.pdf>
- [56] LOCKWOOD, David J. Rayleigh and Mie Scattering. In: LUO, Ming Ronnier, ed. *Encyclopedia of Color Science and Technology* [online]. New York, NY: Springer New York, 2016, 2016-7-5, s. 1097-1107 [cit. 2023-02-20]. ISBN 978-1-4419-8070-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4419-8071-7\_218
- [57] RAYLEIGH, Lord. XXXIV. On the transmission of light through an atmosphere containing small particles in suspension, and on the origin of the blue of the sky. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* [online]. 2009, 47(287), 375-384 [cit. 2023-02-20]. ISSN 1941-5982. Dostupné z: doi:10.1080/14786449908621276
- [58] LI, Xingcai, Li XIE a Xiaojing ZHENG. The comparison between the Mie theory and the Rayleigh approximation to calculate the EM scattering by partially charged sand. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* [online]. 2012, 113(3), 251-258 [cit. 2023-02-20]. ISSN 00224073. Dostupné z: doi:10.1016/j.jqsrt.2011.09.020
- [59] JONES, A.R. Light scattering for particle characterization. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 1999, **25**(1), 1-53 [cit. 2023-02-22]. ISSN 03601285. Dostupné z: doi:10.1016/S0360-1285(98)00017-3
- [60] ALKHOLIDI, Abdulsalam Ghalib a Khaleel Saeed ALTOWIJ. Free Space Optical Communications — Theory and Practices. In: KHATIB, Mutamed, ed. *Contemporary Issues in Wireless Communications* [online]. InTech, 2014, 2014-11-26 [cit. 2023-02-22]. ISBN 978-953-51-1732-2. Dostupné z: doi:10.5772/58884

- [61] Color Model Conversion function. *ArcGIS* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.0/help/analysis/raster-functions/color-model-conversion-function.htm>
- [62] Im2gray. *MathWorks* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/im2gray.html>
- [63] BOMAN, Bertho. The US Air force 1951 Resolution Test Target: Printer Line Resolution Test Chart. *VINLAND* [online]. 20 Sep 2002 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <http://www.vinland.com/usaf-1951.html>