



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV**
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

PROBLEMATIKA SNIŽOVÁNÍ TEPELNÉ ODRAZIVOSTI ZRCADEL SOLÁRNÍ ELEKTRÁRNY SE STIRLINGOVÝM MOTOREM

DESCRIPTION OF PROBLEMS DECREASING REFLECTIVITY OF STIRLING SOLAR DISH

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JOZEF KMEŤ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ ŠKORPÍK, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jozef Kmeť

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Problematika snižování tepelné odrazivosti zrcadel solární elektrárny se Stirlingovým motorem

v anglickém jazyce:

Description of problems decreasing reflectivity of Stirling solar dish

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Česká společnost strojírna Bohdalice připravuje solární systém se Stirlingovým motorem. Tento systém je primárně určen do slunných ovšem současně venkovních prostředí. Cílem této práce je vyhodnotit dopady venkovních vlivů na odrazivosti zrcadel koncentrátoru slunečních paprsků.

Cíle diplomové práce:

- (1) Popis systému a principu výroby elektřiny ze slunečního záření pomocí Stirlingova motoru. Analýza využití, stav ve světě.
- (2) Analýza předpokládaných problémů v podle lokality a ročního období (především vliv zaprášení zrcadel a námrazy - mechanismus vzniku). Stanovení energetických ztrát plynoucích z těchto problémů. Návrhy řešení pro odstranění těchto problémů.
- (3) Návrh na měření vlivu zaprášení zrcadel na jejich odrazivost (zahrnuje návrh měřicího stanoviště, jeho parametry, způsob měření).
- (4) Pokud se do odevzdání práce stihne uvedené měřicí stanoviště vybudovat a spustit, tak komentář k prvním výsledkům měření.

Seznam odborné literatury:

- [1] GÜNTHER, M. - SHAHBAZFAR, R. Advanced CSP Teaching Materials, Solar Dish Technology. Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt. Dostupné online : <http://www.energy-science.org/bibliotheque/cours/1361468083Chapter%2007%20dish.pdf>
- [2] ŠKORPÍK, Jiří. Stirlingův motor, Transformační technologie, 2009-06, [last updated 2013-03]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/stirlinguv-motor.html>. English version: Stirling engine. Web: http://www.transformacni-technologie.cz/en_stirlinguv-motor.html.
- [3] BRIGNOLI, Vittorio. One year of operation of a SOLO 161 Stirling solar unit in Italy, Proceedings of the 11th International Stirling engine conference, 19.-21. November 2003. Roma: Department of Mechanical and Aeronautical Engineering University of Rome "La Sapienza".

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 16.2.2015

L.S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

Abstrakt

Táto diplomová práca popisuje solárny koncentračný systém využívajúci Stirlingov motor. Problémy, s ktorými sa stretáva pri konštrukcii a prevádzke. Zameriavam sa najmä na problémy znižovania výkonu zaprašovaním a namrzaním. Druhá časť tejto práce je experimentálny návrh meracieho standu s cieľom dlhodobého merania závislosti zaprašovania na odrazivosti zrkadiel a ich degradácie za rôznych podmienok. Je tu uvedené prvé, meranie a odhad dlhodobých výsledkov.

Abstract

This thesis describes a concentrating solar power using a Stirling engine. The problems encountered during construction and operation. I focus mainly on problems derating dusting and icing. The second part of this work is the experimental design of the stand with long-term measurement of dusting depending on the reflectivity of mirrors and their degradation under various conditions. First measurement is stated and estimation of long-term results.

Kľúčové slová

Solárny koncentračný systém, Stirlingov motor, zaprašovanie zrkadiel, namrzanie zrkadiel, parabolické zrkadlo, prijímač slnečného žiarenia, meranie odrazivosti, vlastnosti prachu, merací stand

Keywords

Concentrating solar power, Stirling engine, mirrors dusting, mirror freezing parabolic mirror, sunlight receiver, reflectance measurement, properties of dust, measuring stand

Bibliografická citácia

KMEŘ, J. *Problematika snižování tepelné odrazivosti zrcadel solární elektrárny se Stirlingovým motorem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Škorpík, Ph.D..

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že táto diplomová práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Jiří Škorpík, Ph.D a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 29.5.2015

.....

Jozef Kmet'

PodĎakovanie

PodĎakovanie patrí vedúcemu práce, ktorý zabezpečil spoluprácu so strojárskou firmou Bohdalice. PodĎakovanie ďalej patrí tejto firme, s ktorou sme spolupracovali, ostatným vyučujúcim, Energetickému ústavu, Ústavu fyzikálneho inĝinierstva, na ktorom dochádza k meraniu obrazivosti, rodine a priateľom za tpezlivosť, dôveru a podporu vo chvíľach, keď som to potreboval najviac.

Obsah

Úvod	10
1 Všeobecný prehľad energetických solárnych systémov	11
1.1 Solárny komín.....	11
1.2 Vežová slnečná elektráreň	12
1.3 Parabolické systémy.....	13
2 Solárny systém so Stirlingovým motorom	14
2.1 Parabolické zrkadlo	14
2.1.1 Geometrické parametre parabolického zrkadla	15
2.1.2 Chyby parabolického zrkadla	17
2.1.3 Materiál zrkadla	18
2.1.4 Tepelná bilancia zrkadla	19
2.1.5 Konštrukčné riešenia parabolických zrkadiel	21
2.2 Sledovacie zariadenie.....	24
2.3 Prijímač slnečného žiarenia.....	26
2.3.1 Tepelné straty prijímača.....	28
2.3.2 Hybridizácia	29
2.4 Stirlingov motor v solárnych aplikáciách.....	30
2.4.1 Princíp činnosti Stirlingovho motora.....	30
2.4.2 Konštrukčné vlastnosti Stirlingovho motora	31
3 História vývoja a stav parabolického systému	33
4 Problémy vznikajúce pri parabolických systémoch so StM.....	35
4.1 Problémy spôsobené znečistením	36
4.1.1 Vlastnosti a rozloženie prachu	37
4.2 Problémy spôsobené namrzaním	40
5 Meranie vplyvu zaprašovania zrkadiel	44
5.1 Návrh meracieho standu.....	44
5.2 Realizácia meraní	50
5.2.1 Meranie odrazivosti zrkadiel	51
5.2.2 Výsledky prvého merania	51
5.2.3 Matematický model	56

5.2.4 Predpokladané výsledky	57
Záver	61
Zoznam použitej literatúry a zdrojov	62
Zoznam veličín a symbolov	66

Úvod

V dnešnej dobe sa stále viac kladie dôraz na ekologickú a čistú prevádzku elektrární. Popri tom sa snažíme využívať v maximálnej možnej miere obnoviteľných zdrojov energie. S tým je spojená snaha o inovatívne technológie a vytvorenie vhodnej akumulácie, ktorá je v prípade obnoviteľných zdrojov nevyhnutnosťou. Jednou s menej komerčne známych technológií spracovania slnečnej energie na elektrickú je koncentračný systém využívajúci parabolické zrkadlo a Stirlingov motor. Táto technológia je nasadená a využívaná v niekoľkých slnečných oblastiach. Vlastný vývoj a výrobu takýchto systémov robí aj česká strojárská firma Bohdalice. Jedným s hlavných problémov, s ktorými sa táto technológia stretáva je znižovanie odrazivosti zrkadiel v čase vplyvom časovej degradácie a usadzovania prachu. Tieto závislosti sú hlavnou náplňou merania navrhnutého a prevádzaného v tejto diplomov práci. Jedná sa o dlhodobé meranie v rádoch rokov. Pre predstavu o priebehu a výsledkoch meraní sú súčasťou tejto práce prvé merania. Spracovanie a výsledky ďalších meraní môže byť náplňou inej záverečnej práce. Táto práca zahŕňa popis a úvod do problematiky ako aj návrh a začiatok merania.

1 Všeobecný prehľad energetických solárnych systémov

Slnko je nevyčerpatelný, ekologický a populárny zdroj elektrickej energie. Spôsobov ako transformovať energiu slnečného žiarenia na elektrickú energiu je množstvo. Každý z nich má svoje nevýhody a výhody. Stručný prehľad tých najdôležitejších uvádzam v tejto kapitole. Najväčšiu časť samozrejme venujem systému využívajúceho Stirlingov motor (ďalej len StM).

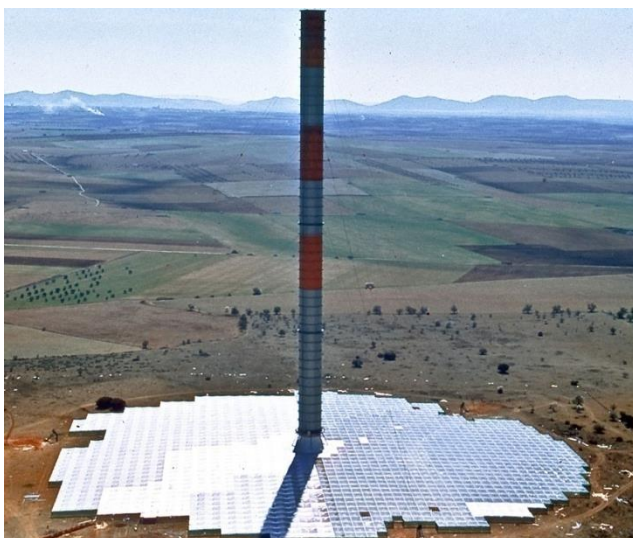
Základným rozdelením systémov premieňajúcich slnečnú energiu na elektrickú sú *priame* a *nepriame* systémy. Rozdiel medzi nimi je v tom, že u nepriamych systémov sa energia transformuje zo slnečnej na tepelnú a až následne na elektrickú. Priame systémy sú bez medzi kroku a slnečná energia sa premieňa priamo na elektrickú využívajúc fotovoltaiický jav. Rozoberať tento jav a priame systémy premeny energie tu ďalej nebudem, pretože táto téma je veľmi rozsiahla a dobre popísaná. [29] No uvádzam tu rozdelenie nepriamych systémov, pretože medzi ne patrí aj systém využívajúci StM.

Najznámejšie druhy nepriamych systémov:

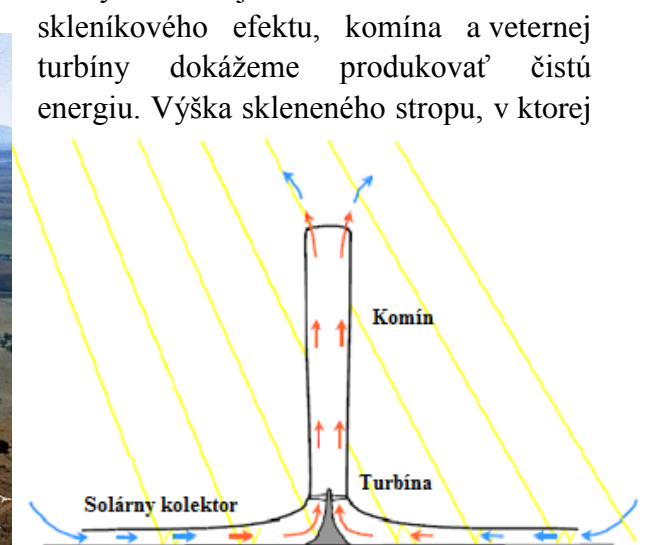
- Solárny komín
- Vežová elektráreň
- Parabolické zrkadlá

1.1 Solárny komín

Solárny komín využíva teplý vzduch, ktorý sa ohrieva v skleníku pod komínom. Tento teplý vzduch stúpa nahor cez komín a vytvára prúd horúceho vzduchu, ktorý otáča turbínou. Elektrárne sa stavajú aj s akumuláciou energie, ktorá umožňuje výrobu el. energie aj počas noci. V skleníku sa dokonca môžu pestovať rastliny. Touto jednoduchou kombináciou



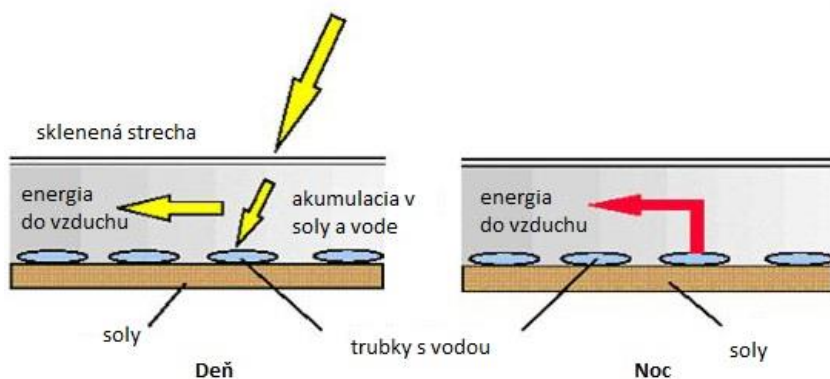
Obrázok 1. Prvá komínová slnečná elektráreň postavená v Španielsku. [1]



Obrázok 2. Princíp komínovej slnečnej elektrárne. [1]

sú umiestnené sklá prijímača sa smerom do stredu zvyšuje, čo napomáha prirodzenej konvekcií. Výkon elektrárne na obrázku 2. je 50 KW (pri rozdiely teplôt 20 °C medzi vstupujúcim chladným vzduchom a vzduchom vstupujúcim do komína). Plocha kolektoru 6000 m² s výškou komína skoro 200 m s polomerom 5m.[1]

Výhodami tohto systému je, že kolektor využíva priame aj difúzne solárne žiarenie (na rozdiel od systémov popisovaných nižšie využívajúcich iba priame žiarenie). Pomocou akumulácie energie dokáže elektráreň pracovať 24 hodín denne. Sú jednoduché a spoľahlivé. Stavajú sa z dostupných materiálov (najmä sklo a betón). Nepotrebnú chladienie.



Obrázok 3. Akumulácia slnečnej energie solárneho komína [1]

Cenou za jednoduchosť a minimálne prevádzkové náklady je robustnosť stavby. Solárne komíny sa musia stavať s veľkými zbernými plochami. Majú malú účinnosť a to do 2%. Oplatia sa stavať len v oblastiach s vysokou intenzitou slnečného žiarenia.

1.2 Vežová slnečná elektráreň

Vežová slnečná elektráreň využíva veľkého počtu zrkadiel, ktoré koncentrujú slnečné lúče do jedného miesta (ohnisko), kde sa teplota môže vyšplhať až nad 1000°C. [2] Tieto zrkadlá sa natáčajú podľa potreby počas celého dňa, čím sa zabezpečí požadovaná efektivita. V ohnisku na vrchu veže sa teplo využíva na ohrev média, ktorého prostredníctvom sa v turbíne tepelná energia transformuje na elektrickú. V prípade elektrárne na obrázku 4. to je maximálne 20MW. [2] Ako u väčšiny nepriamych systémov aj tu sa snažíme o akumuláciu energie čo umožní chod elektrárne aj v noci (využitie tekutých solí).

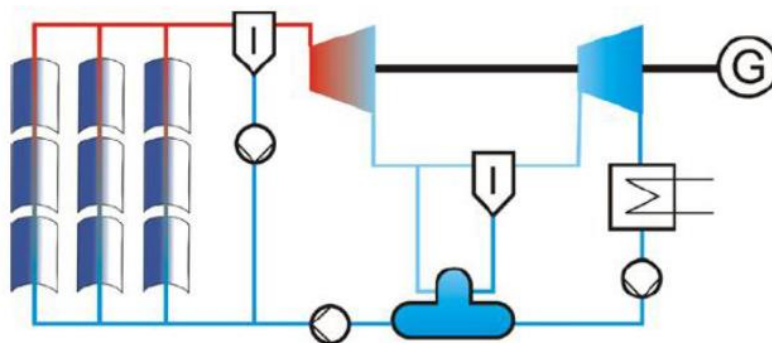


Obrázok 4. Vežová elektráreň v Španielskom mestečku Seville [2]

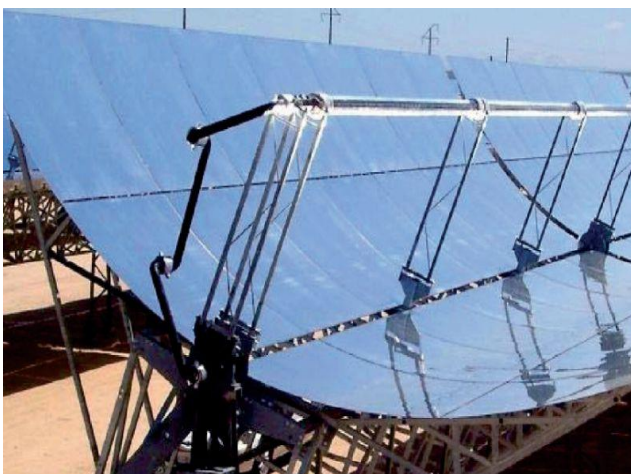
Tento systém je oproti solárnemu komínu podstatne zložitejší. Pracuje iba s priamymi slnečnými lúčmi a jednotlivé zrkadlá sa musia počas dňa natáčať za slnkom. Najčastejšie využíva parnú turbínu, pre ktorú musí mať zabezpečenú dodávku vody. To býva v púštyných oblastiach často problém (alternatívne, bezvodné systémy, elektrárne často príliš predražujú). Na druhú stranu má tento systém účinnosť do 20% (účinnosti dopomáha aj vysoká teplota v ohnisku) a dobré možnosti akumulácie. Pomocou, ktorej pracuje 24 hodín denne.

1.3 Parabolické systémy

Parabolické systémy koncentrujú slnečné lúče do ohniska parabolického zrkadla, kde bývajú umiestnené zariadenia alebo médium na transformáciu tepelnej energie na elektrickú. Najčastejšie sa využíva dvoch konceptov a to buď klasické parabolické zrkadlo (diskový zberač), ktorý má v ohnisku umiestnený StM (viz. ďalšia kapitola). Princíp koncentrácie lúčov je totožný s vežovým prevedením ibaže v menšom. Druhý koncept je systém s lineárnymi parabolickými zrkadlami (žľabový zberač), ktoré majú v ohnisku umiestnené trubky s ohrievaným médiom. Tým sú najčastejšie oleje a soli no používajú sa aj systémy, kde v trubkách prúdi vyparujúca sa voda. Tieto systémy sa musia taktiež otáčať za slnkom pre dosiahnutie čo najvyšších účinností.



Obrázok 5. Princíp fungovania žľabového parabolického systému [3]



Obrázok 6. Žľabový zberač použitý v projekte Nevada Solar One (64MW) [3]



Obrázok 7. Diskový zberač (9kW) umiestnený v Almería, Španielsko [4]

2 Solárny systém so Stirlingovým motorom

Parabolické zrkadlo je v porovnaní s ostatnými vyššie uvedenými nepriamymi systémami zdroj elektrickej energie s najnižším výkonom. U tohto systému sa obyčajne pohybujeme od 5 kWe do 25 kWe. Najčastejšie sa v tejto aplikácii používa StM no môže byť



použitá aj mikro plynová turbína. Vďaka malým rozmerom tohto systému sa najlepšie hodí do decentralizovaných a off grid aplikácií. To však nebráni modulárnemu použitiu vo väčších rozmeroch. Príkladom je 1,5MW Maricopa Solar Plant v Arizone, kde bolo použitých 60 StM systémov o výkone 25kW. Jednalo sa o demonštračnú elektráreň (modelová elektráreň pre väčšie budúce projekty) a od roku 2011 je vyradená (po takmer dvoch rokoch prevádzky).[4]

Obrázok 8. Maricopa Solar Plant v Arizone [4]

Parabolické zrkadlo (zberač) a tepelný motor s prijímačom sú hlavné a charakteristické komponenty tohto systému. K nim patrí generátor, nosná konštrukcia, sledovacie zariadenie (natača zberač za slnkom) a kontrolná jednotka. Tento parabolický systém potrebuje k výrobe el. energie priame slnečné lúče dopadajúce kolmo na zrkadlo. To aby bolo zrkadlo vždy orientované k slnku a dosahovala sa tak maximálna účinnosť je zabezpečené dvoj-osovým sledovacím systémom. Zberač následne koncentruje slnečné lúče do ohniska zrkadla, kde je umiestnený prijímač so StM. Keďže má parabola vysoký koncentračný pomer, v ohnisku sú vysoké teploty dosahujúce až 800°C. Tak vysoká teplota umožňuje transformovať tepelnú energiu na mechanickú z vysokou účinnosťou. Aj preto je tento systém jedným z najúčinnějších s pomedzi solárnych systémov. Počas špičky produkcie el. energie sa pohybujeme na účinnostiach 30%. [4]

2.1 Parabolické zrkadlo

Geometricky je prijímač rotačne symetrická časť paraboloidu s ohniskom, kde sú koncentrované slnečné lúče dopadajúce na zrkadlo rovnobežne s osou paraboly. Teoreticky by malo byť ohnisko jeden bod, no prakticky dochádza k vytvoreniu ohniskovej roviny vplyvom rozptylu zväzku lúčov. V praxi sa snažíme aby bol tento rozptyl čo najmenší, pretože to má vplyv na výkon systému. Ďalšími dôležitými faktormi, o ktorých budeme hovoriť sú okrajový uhol zrkadla, ohnisková vzdialenosť a koncentračný pomer.

2.1.1 Geometrické parametre parabolického zrkadla

Okrajový uhol zrkadla je indikátor zakrivenosti paraboly. Pomocou tohto jediného parametra vieme určiť tvar zrkadla. Preto je to efektívny a rýchly spôsob ako navrhnuť vhodnú časť paraboly. Čím je parabola zakrivenejšia tým má väčší okrajový uhol. Paraboly s vysokým okrajovým uhlom sa používajú napríklad vo svetlách automobilov. Tento uhol môžeme vypočítať z nasledovných rovníc [6]:

$$A = 4\pi f^2 \frac{\sin^2 \psi}{(1 + \cos \psi)^2} \quad (1)$$

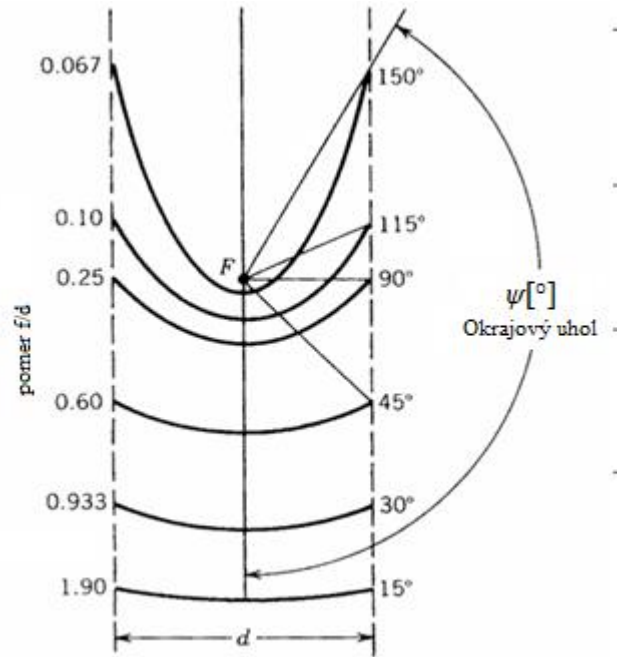
$$\psi = \tan^{-1} \frac{f/d}{2(f/d)^2 - 1/8} \quad (2)$$

Kde f [m] ohnisková vzdialenosť

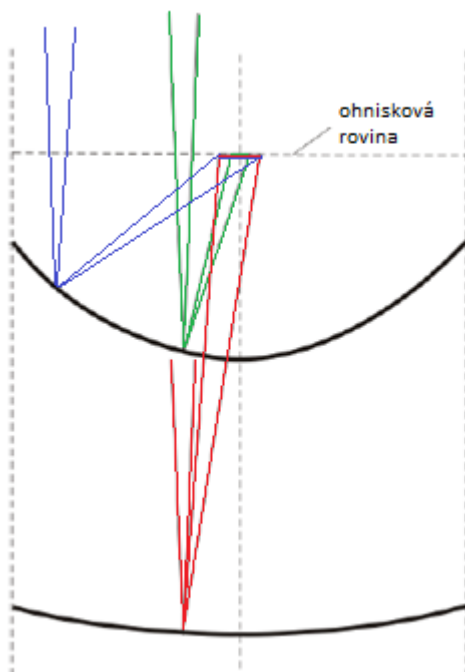
d [m] priemer zrkadla

ψ [rad] okrajový uhol

A [m²] plocha zrkadla



Obrázok 9. Bežné okrajové uhly [6]

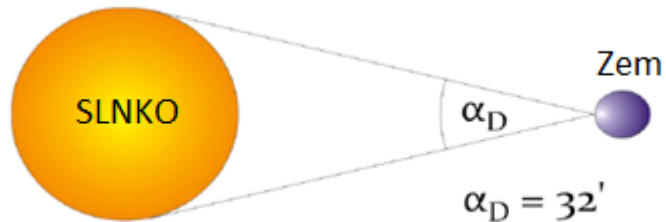


Obrázok 10. Závislosť koncentračného pomeru na okrajovom uhle

Z obrázka 9. je zrejmé, že malé okrajové uhly majú veľké ohniskové vzdialenosti a naopak. Na okrajovom uhle taktiež závisí koncentračný pomer a preto sa snažíme dosiahnuť ideálneho okrajového uhla. Ak je okrajový uhol príliš malý, ohnisková vzdialenosť je veľká a s ňou aj rozptyl zväzku lúčov. To znamená aj veľký obraz Slnka v ohnisku a teda malý koncentračný pomer (obrázok 10, červená čiara). Preto nie sú zrkadla s malým okrajovým uhlom vhodné pre energetické aplikácie. Nadmerný okrajovým uhlom má taktiež negatívny efekt na veľkosť obrazu Slnka v ohnisku. To je spôsobené tým, že lúče dopadajúce na okraj zrkadla majú veľký uhol odrazu (obrázok 10, modrá čiara). Preto nie sú vhodné ani zrkadlá s veľkými okrajovými uhlami. [4]

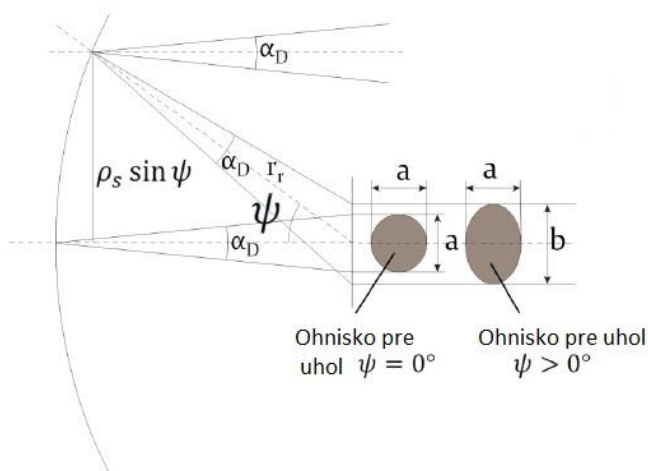
Koncentračný pomer C [-] je definovaný ako pomer medzi radiačným tokom po sústredení slnečných lúčov do ohniska a pred ním. Vo väčšine prípadov sa tento pomer aproximuje na pomer medzi plochou, ktorou lúče vstupujú do systému (zrkadlo) a najmenšou plochou, cez ktorú lúče prechádzajú (v ohniskovej rovine) – absorpčná plocha. Pri určovaní koncentračného pomeru musíme brať do úvahy aj obmedzenú reflexivitu zrkadla, geometrické nedokonalosti, ktoré môžu rozptýliť lúče z ohniska a tieň, ktorý vzniká zo StM a jeho nosnej konštrukcie.

Pri konštrukcii sa samozrejme snažíme o čo najväčší koncentračný pomer. Čím ho máme vyšší tým nám stačí menšie zrkadlo na dosiahnutie rovnakého výkonu a taktiež sa znižujú tepelné straty. Pri normalizovanom slnečnom toku $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ je maximálna možná hodnota koncentračného pomeru 46 200. K tomu potrebujeme dosiahnuť ideálny okrajový uhol, ktorý je 45° . Aby sme si toto tvrdenie mohli dokázať, musíme si najskôr vysvetliť prečo je skutočné ohnisko plocha a nie bod. V ideálnom prípade, keď by slnečné lúče dopadali na zrkadlo kolmo a zároveň by boli na seba rovnobežné, by ohnisko bolo v jednom bode. To však nie je možné ani s dokonalým zrkadlom, pretože slnečné lúče dopadajúce na Zem, nie sú na seba rovnobežné. Príčinou je konečná vzdialenosť medzi Slnkom a Zemou (viz obrázok 11).



Obrázok 11. Vznik uhla dopadajúcich lúčov [7]

Tá spôsobuje uhol zväzku dopadajúcich lúčov α_D [rad], ktorý má hodnotu $\alpha_D = 32' = 0,53^\circ$. Každý bod zrkadla odráža slnečné lúče, ktoré dokopy tvoria obraz Slnka v ohnisku (obrázok 12). Obrazy z jednotlivých bodov majú tvar elipsy a sú závislé na okrajovom uhle ψ [rad] a na krajnej vzdialenosti medzi ohniskom a zrkadlom r_r [m]. Veličiny a a b [m] sú strany elipsy a ρ_s [m] je vzdialenosť bodu odrazu od osy zrkadla. V prípade, že uvažujeme všetky body o vzdialenosti r_r od ohniska obraz Slnka v ohniskovej rovine bude kruh s priemerom b [m]. Všetky ostatné body zrkadla budú mať svoj obraz vo vnútri tohto kruhu a vytvoria celkový obraz Slnka o ploche A_{im} [m²]. [6,7]



Obrázok 12. Ohnisko parabolického zrkadla [7]

$$a = r_r \alpha_D \quad (3)$$

$$b = \frac{r_r \alpha_D}{\cos \psi} \quad (4)$$

$$A_{im} = \frac{\pi r_r^2 \alpha_D^2}{4 \cos^2 \psi} \quad (5)$$

K tomu aby sme mohli vypočítať koncentračný pomer ešte potrebujeme plochu zrkadla $A[\text{m}^2]$, ktorá je tiež funkciou okrajového uhla ψ a maximálnej vzdialenosti ohniska a zrkadla r_r .

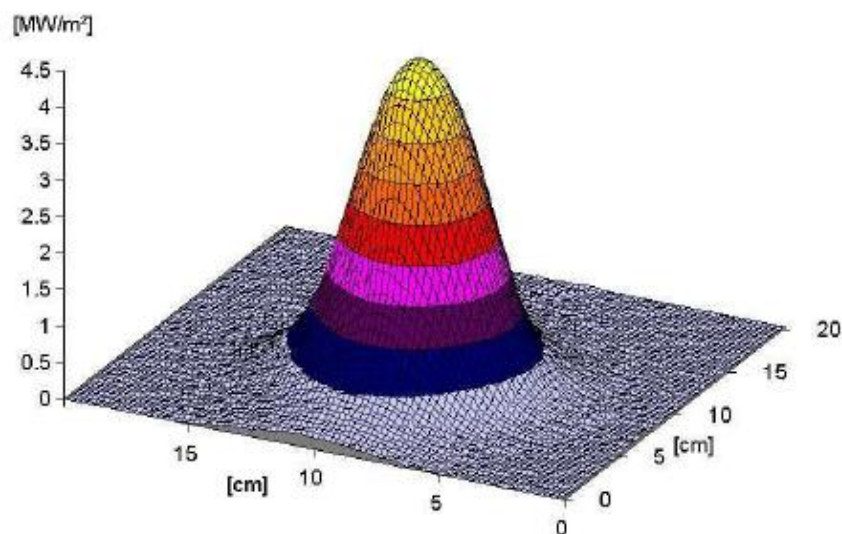
$$A = \pi r_r^2 \sin^2 \psi \quad (6)$$

Potom z definície koncentračného pomeru :

$$C = \frac{A}{A_{im}} = \frac{4}{\alpha_D^2} \sin^2 \psi \cos^2 \psi = 46200 \sin^2 \psi \cos^2 \psi = 11550 \quad (7)$$

Z rovnice (7) môžeme vyvodit' niekoľko záverov. Jedným z nich je výpočet maximálneho koncentračného pomeru, ktorý vyšiel 11550. Jedná sa o priemernú hodnotu celého obrazu Slnka na rozdiel od vyššie spomínaného maxima 46 200, ktoré odkazuje na bodový vrchol v ohnisku. Rovnica ďalej dokazuje, že pri okrajovom uhle 45° vychádza najvyšší možný koncentračný pomer. Je potrebné si pripomenúť, že tieto hodnoty sú počítané pre ideálne zrkadlá, v praxi dosahujeme hodnôt 2000-6000.[7]

Rozloženie ožiarenia v ohnisku nie je homogénne. V prípade parabolickej geometrie je najvyššia žiarivosť v strede ohniska. Žiarenie je v ohnisku rozložené podľa Gaussovho rozdelenia (obrázok 13). Bolo to experimentálne dokázané v DLR (German Aerospace Center).[7]



Obrázok 13. Rozdelenie žiarenia v ohnisku parabolického koncentračného systému [7]

2.1.2 Chyby parabolického zrkadla

Jedným z konštrukčných problémov parabolických zrkadiel je ich náročnosť na výrobu. Tu je výhodné použiť parabolické zrkadlo s veľmi malým okrajovým uhlom, pretože jeho tvar môžeme s pomerne slušnou presnosťou aproximovať na sferický. Čím je okrajový uhol menší tým menší je rozdiel medzi nimi. Toto je dôležitý aspekt pre výrobu parabolického zrkadla. Pretože v energetických aplikáciách potrebujeme vysoké okrajové uhly, zrkadlo sa skladá

z viacerých menších dielov so sférickým tvarom. V konečnom dôsledku má potom zrkadlo približne parabolický tvar.[4]

Straty na parabolickom zrkadle sú výsledkom geometrických nepresností a obmedzenej reflexivity materiálu. Tieto chyby môžeme rozdeliť do troch skupín:

- Geometrické nedokonalosti povrchu zrkadla (*slope error*)

Tým sa rozumejú výchylky od ideálneho parabolického tvaru zrkadla (makroskopické i mikroskopické). Tie vznikajú v rámci tolerancie pri výrobe no môže k nim dochádzať aj pri montáži zrkadla na nosnú konštrukciu alebo vplyvom gravitácie (deformácie častí zrkadla). Tieto chyby sa dajú pomerne jednoducho určiť v každom bode zrkadla a stanoviť celkovú kvalitu geometrie zrkadla.

- Chybné zameranie dielov zrkadla (*facet alignment error*)

Zrkadlá, ktoré sú z viacerých dielov ich majú spojené na jednom ráme. Tu môže dôjsť k nepresnému zostaveniu týchto dielov. V tom prípade odrazené lúče čiastočne alebo úplne minú prijímač.

- Chybné natočenie zrkadla za slnkom (*tracking error*)

K stálemu zachovaniu maximálneho výkonu sú potrebné dve osy otáčania neustále sledujúce Slnko. K chybe dochádza ak tento systém nie je presne zosynchronizovaný z pohybom Slnka.

Medzi nedokonalosťami parabolického zrkadla môžeme započítať aj jeho reflexivitu. Tá musí byť čo najvyššia a v praxi sa pohybuje medzi 0,7 a 0,95. [4]

2.1.3 Materiál zrkadla

Ako je už spomínane vyššie, na materiál sú kladené vysoké nároky s ohľadom na jeho reflexivitu a čo najhladší a najdokonalejší povrch. Používa sa leštená nerezová oceľ no častejšie je to hliník, striebrom potiahnuté sklo či plastové filmy. Materiál musí taktiež odolávať klimatickým podmienkam, v ktorých zamýšľame prístroj použiť. Dôležité je zaistiť dlhotrvajúcu vysokú reflexivitu (na rozdiel od fotovoltaiky, kde musí byť čo najnižšia). Materiál musí odolať UV žiareniu, rýchlim a častým zmenám teploty, piesočným búrкам a inému mechanickému poškodeniu. Faktorom pri výbere materiálu je tiež cena.[4]

Jednoducho dostupnými a ekonomickými materiálmi, ktoré splňajú vyššie uvedené požiadavky sú leštený kov a hliníková či nerezová oceľ. Hlavnou nevýhodou týchto materiálov je malá zrkadlosť a to že reflexivita sa vonkajšími vplyvmi rýchlo znižuje.

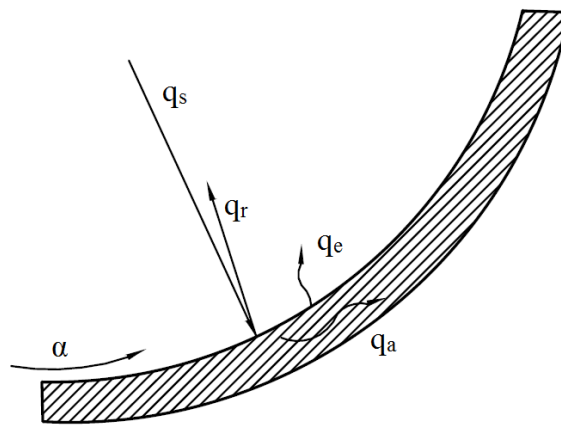
Ďalšou možnosťou je použitie skleneného zrkadla s povlakom najčastejšie hliníka alebo striebra (podobne ako u zrkadiel v domácnosti). Je tu dosiahnutej vysokej obrazivosti, no tá je znížená v závislosti od hrúbky skla. Striebro má pre solárne spektrum najvyššiu reflexivitu zo všetkých kovov (dosahuje až 98%). Celé zrkadlo má reflexivitu nižšiu, pretože lúče musia

dva krát prechádzať sklom zrkadla. Absorpcie v skle sa minimalizujú použitím špeciálneho skla s malým obsahom železa (celková reflexivita potom dosahuje 95%). Hliník dosahuje o trochu nižšie reflexivity. Výhodou tu je dobrá odolnosť na zmeny počasia, patria medzi najtrvácnejšie používané zrkadla. Nevýhodou je veľká váha a malá pružnosť.

Plastový film sa používa ako ochranná vrstva kovových zrkadiel (aj na nosné konštrukcie). Výhodou plastového filmu je nízka váha. Tá uľahčí transport, umožní použitie ľahšej a lacnejšej nosnej konštrukcie ako aj menšiu spotrebu energie potrebnú na pohon sledovacieho zariadenia. Plastový film je dobre ohybný a ľahko prispôsobiteľný do potrebných tvarov zrkadla. Je ľahký a ekonomický. Najčastejšie sa používa spolu s hliníkovým a strieborným povlakom. Hlavnou nevýhodou je nízka odolnosť voči mechanickému namáhaniu (vznikajú praskliny) a rýchle starnutie najmä pri vystavení UV žiareniu.

2.1.4 Tepelná bilancia zrkadla

Energia slnečných lúčov, ktorá dopadá na zrkadlo sa zväčša odrazí no okrem toho dochádza k pohlteniu časti energie v zrkadle (absorpcia). Táto energia je ďalej vyemitovaná alebo odchádza konvenciou či vedením (minimálny vplyv a preto ho môžeme zanedbať). V prípade že sa jedná o zrkadlo bez krycieho skla bilančná rovnica v ustálenom stave je nasledovná:



Obrázok 14. Tepelná bilancia zrkadla bez krycej plochy

$$q_s = q_r + q_a \quad (8)$$

$$q_r = r \cdot q_s \quad (9)$$

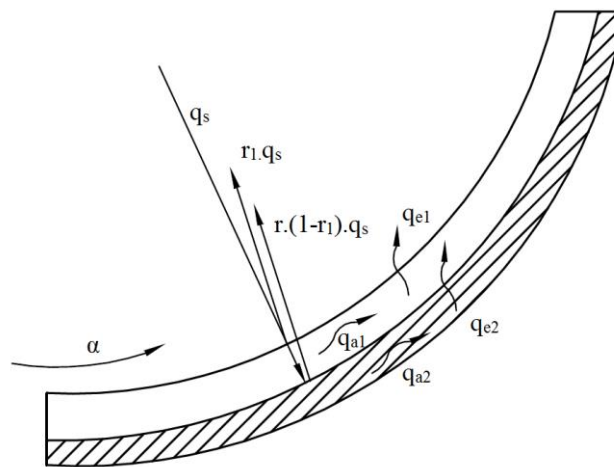
$$q_a = \alpha(T_A - T_v) + q_e = \alpha(T_A - T_v) + \varepsilon\sigma T_A^4 \quad (10)$$

výsledný tepelný tok:

$$q_s = r \cdot q_s + \alpha(T_A - T_v) + \varepsilon\sigma T_A^4 \quad (11)$$

- kde q_s [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] merný tepelný tok dopadajúci žiarením
 q_a [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] merný tepelný tok absorbovaný v zrkadle (2% a viac)
 q_r [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] zrkadlom odrazený merný tepelný tok
 q_e [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] merný tepelný tok vyemitovaný zrkadlom
 r [-] reflexná schopnosť zrkadla
 α [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] súčiniteľ prestupu tepla konvekciou
 T_A [K] stredná teplota zrkadla
 T_v [K] teplota okolného vzduchu
 σ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$] Stefan Boltzmannova konštanta
 ε [-] emisivity zrkadla (0,1)

V prípade, že je použité sklenené zrkadlo (alebo zrkadlo s iným krycím materiálom) do bilančnej rovnice musíme započítať vplyv skla. Sklo má veľmi vysokú priehľadnosť a hoci cez neho slnečné lúče dobre prechádzajú časť je absorbovaná a odrazená. Bilančná rovnica potom vyzerá nasledovne (v obrázku nie sú pri odraze od zrkadla zarátané straty absorpciou):



Obrázok 15. Tepelná bilancia zrkadla s krycím sklom

$$q_s = q_{r1} + q_r + q_{a1} + q_a \quad (12)$$

$$q_{r1} = r_1 \cdot q_s \quad (13)$$

$$q_r = r \cdot (1 - r_1) \cdot q_s \quad (14)$$

$$(1 - r_1)q_s = q_r + q_{a1} + q_a \quad (15)$$

$$q_{a1} + q_a = \alpha(T_B - T_v) + q_{e1} + q_e \quad (16)$$

$$q_{a1} + q_a = \alpha(T_B - T_v) + \varepsilon\sigma T_B^4 + \varepsilon\sigma T_A^4 \quad (17)$$

$$(1 - r_1)q_s = r \cdot (1 - r_1) \cdot q_s + \alpha(T_B - T_v) + \varepsilon\sigma T_A^4 + \varepsilon\sigma T_B^4 \quad (18)$$

$$(1 - r_1 - r - r_1 \cdot r)q_s = \alpha(T_B - T_v) + \varepsilon\sigma T_A^4 + \varepsilon\sigma T_B^4 \quad (19)$$

Kde q_{r1} [W.m⁻²] sklom odrazený merný tepelný tok

q_{a1} [W.m⁻²] merný tepelný tok absorbovaný v odrazovej ploche zrkadla

r_1 [-] reflexná schopnosť skla

T_B [K] stredná teplota skla

q_{e1} [W.m⁻²] merný tepelný tok vyemtováný sklom

Množstvo energie, ktorá dopadá na zrkadlo je závislá na celkovej intenzite žiarenia. Tá je súčtom intezity priameho a difuzneho žiarenia (slnečná konštanta 1000 W/m²). V našich podmienkach je zatiahnutie oblohy časté a vtedy počítame iba s difuzným žiarením. To aký tepelný tok zrkadlo počas dňa dokáže využiť, závisí od doby slnečného svitu. (pre Brno 1810 hodín za rok). Slnečný svit samozrejme závisí od geografických podmienok ako aj na ročnom období. Reflexivita zrkadla je závislá na materiály a u lešteného striebra dosahuje až 98%. Musíme tu však počítať zo stratou v krycom skle, ktorá tvorí zhruba 4% (v závislosti od hrúbky skla, táto strata je takmer celá tvorená odrazivosťou, absorpcia je zanedbateľná). Bežne sa u týchto systémov pohybujú reflexivity od 70% do 95%. [4,16]

2.1.5 Konštrukčné riešenia parabolických zrkadiel

Obecne sú využívané dva konštrukčné prístupy: spojité zrkadlo (môže byť s jedného dielu [obrázok 6] alebo viacerých menších častí [obrázok 16]) a viac segmentové zrkadlo (je z viacerých navzájom nesúvislých dielov [obrázok 17 a 18])

Výhodou viac segmentového zrkadla je že, jednotlivé diely majú svoju vlastnú krivosť, orientáciu a polohu v systéme. Systém ako celok musí mať jednu optickú os čoho sa dosahuje montážou jednotlivých dielov v tvare veľkej paraboly. Ďalšie plus je, že nepotrebujeme vytvoriť jednu veľkú parabolu čo je drahé a technologicky náročné. Namiesto toho sa vyrábajú malé sférické zrkadlá (to umožňuje veľká



Obrázok 16. Spojité zrkadlo z niekoľkých segmentov [4]

ohnisková vzdialenosť). Najčastejšie sa tu používa priestorový rám vystavaný so sklenenými zrkadlami (obrázok 17).



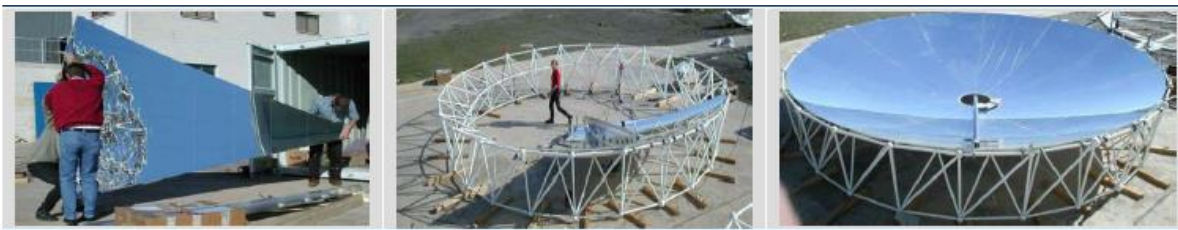
Obrázok 18. Segmentové zrkadlo (membránové zrkadlá) [4]



Obrázok 17. Segmentové zrkadlo (sklenené zrkadlá)[4]

Ako už bolo spomenuté, spojitá konštrukcia zrkadla môže byť z jedného veľkého kusu alebo z viacerých vhodne pospájaných častí (na jednom priestorovom ráme). V energetických aplikáciách sa zrkadlo z jedného kusu nepoužíva (výnimku tvorí membránová konštrukcia), pretože je veľmi drahé a dochádza k problémom pri transporte a obsluhu. Na svete je len niekoľko firiem, ktoré dokážu vyrobiť takéto veľké parabolické zrkadlo. Používajú sa v astronomických aplikáciách, kde sú potrebné perfektné odrazové vlastnosti. Pre energetiku nepotrebujeme také veľké koncentračné pomery a tieto systémy by sa predražili na toľko, že by neboli konkurencie schopné.

S týchto dôvodov sa zrkadla konštruujú z niekoľkých častí. Príkladom je verzia Euro Dish vytvorená v Nemecku. Skladá sa z 12 častí, tie sú vyrábané separátne s veľkosťou vhodnou na transport a na mieste sú zmontované na nosnú konštrukciu.



Obrázok 19. Montáž segmentov na nosnú konštrukciu zrkadla typu Euro Dish [4]

Alternatívnou technológiou pre výrobu zrkadiel je použitie membrány. Tá sa podobne ako koža bubna natiahne na obruč. Z druhej (zadnej) strany obruče sa natiahne tuhšia membrána a pomocou vákuua sa membrána zakrivuje do požadovaného tvaru. Toto umožňuje vytvorenie veľmi ľahkých zrkadiel a v konečnom dôsledku aj celá konštrukcia je ľahšia. Znížia sa tak výrobné aj montážne náklady. Nevýhodou tejto metódy je že pri využití atmosférického tlaku nedokážeme vyrobiť parabolický ale iba sférický tvar. Riešením je použitie doplnkových technológií pri vákuovaní. Môže to byť prídanie vodnej záťaže na pretlakovú stranu. Takýmto navýšením tlaku dosahujeme vyššej geometrickej kvality.

Ďalšou možnosťou je rozdelenie podtlakovej časti membrány na niekoľko súosových častí, v ktorých bude rozdielny tlak podľa požadovanej krivosti. [4,8]

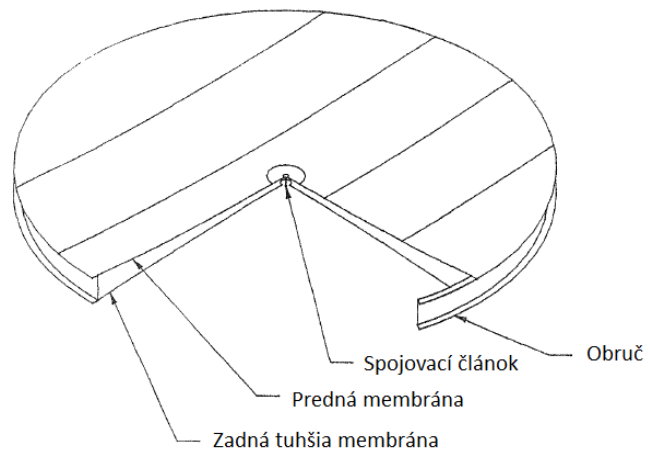
Ďalší spôsob ako zvýšiť množstvo zachyteného svetla (alebo znížiť veľkosť ohniska) je použitie sekundárneho koncentrátora (obrázok 21). To je zužujúca sa trubka z vysoko odrazového materiálu. Týmto spôsobom sa dá zvýšiť výkon parabolického zrkadla. Je užitočný najmä pri redukování negatívneho efektu spôsobeného geometrickými chybami. Keďže je umiestnený v oblasti vysokého slnečného toku musí byť vyrobený z tepelne odolných materiálov a chladený. Na jednej strane vďaka sekundárnemu koncentrátoru nepotrebujeme tak geometricky presné zrkadla (a výkon zostáva zachovaný), no nevýhodou je, že v systéme máme ďalší komponent, ktorý navyše potrebuje chladenie.

Dôležitým konštrukčným parametrom je veľkosť zrkadla A [m^2] (v rovnici 6 počítaná z geometrie zrkadla) o priemere d [m]. Tá je závislá na požadovanom elektrickom výkone P_{el} [W], účinnosti systému η_{sys} [-] a priamej žiarivosti DNI [$W \cdot m^{-2}$] (direct normal irradiance). [4]

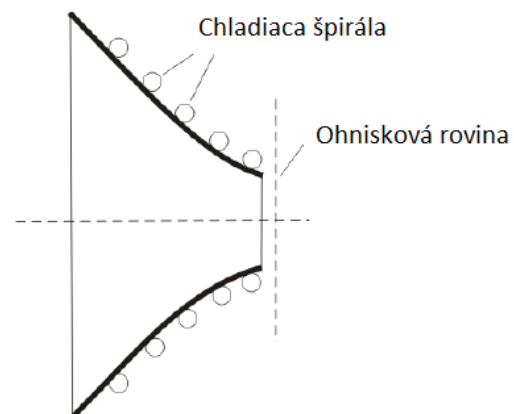
$$A = \frac{P_{el}}{\eta_{sys} \cdot DNI} \quad (20)$$

$$d = 2 \sqrt{\frac{P_{el}}{\pi \cdot \eta_{sys} \cdot DNI}} \quad (21)$$

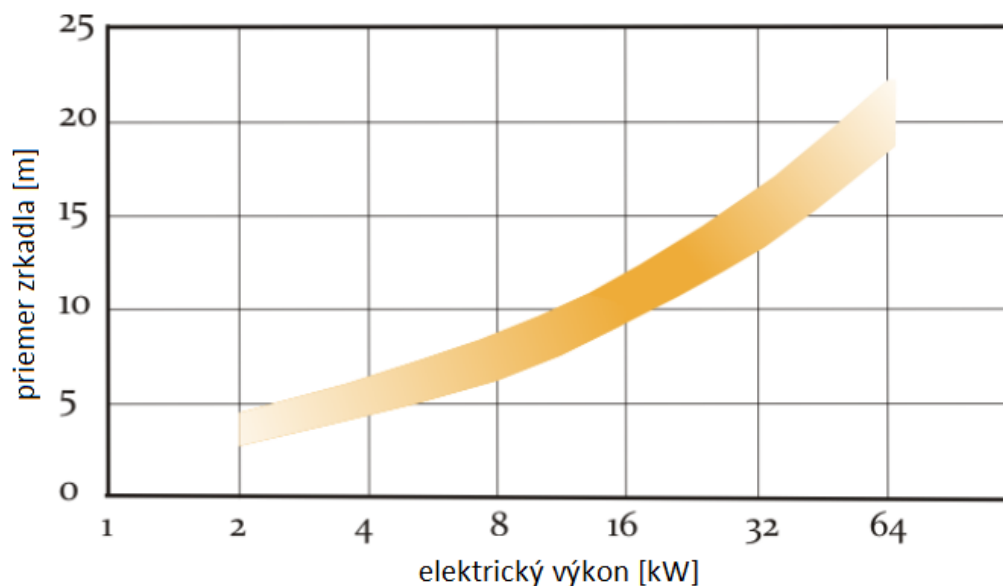
Pomocou rovnice (20) sa počíta plocha zrkadla pre návrhový stav. To je stav, v ktorom má systém najvyššiu účinnosť pre typické klimatické podmienky v lokalite zamýšľaného použitia. Najčastejší návrhový stav je s účinnosťou medzi 15 % a 25 %. Nasledujúci graf (obrázok 22.) je závislosť priemeru zrkadla na elektrickom výkone pri DNI 1000 W/m^2 a účinnosť systému 15% až 25%. [4]



Obrázok 20. Rez membránovým zrkadlom [8]



Obrázok 21. Schéma sekundárneho koncentrátora [4]

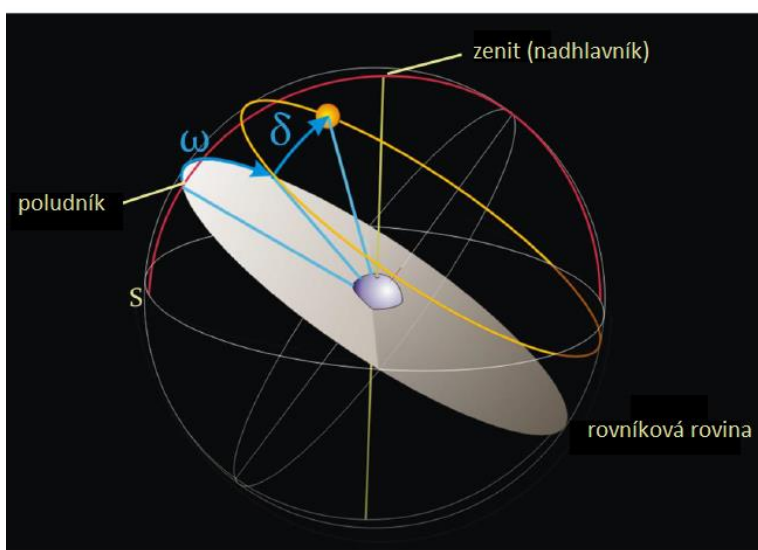


Obrázok 22. Závislosť priemeru zrkadla na elektrickom výkone [4]

2.2 Sledovacie zariadenie

Parabolické zrkadlo so StM je systém, ktorý zlučuje priame slnečné lúče, preto je potrebný dvoj-osí sledovací systém. Ten natáča zrkadlo proti slnku tak aby boli dopadajúce lúče rovnobežné s optickou osou zrkadla. Na to ako určiť polohu zrkadla sú dva spôsoby využívajúce rovníkový alebo horizontálny súradný systém. [4]

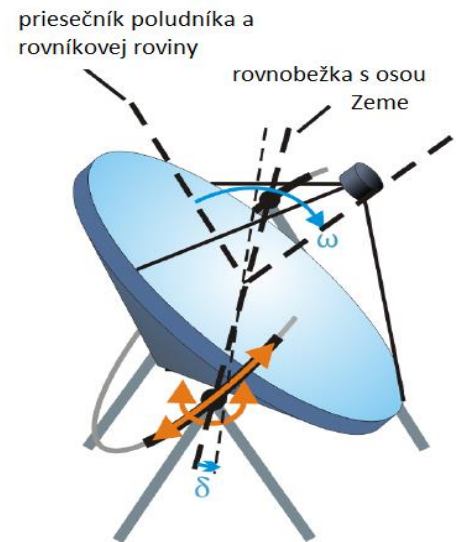
Rovníkový súradný systém uvažuje Zemský rovník ako fundamentálnu rovinu zo súradnicami sklonu δ a hodinovým uhlom ω . Sklon je uhol medzi rovníkovou rovinou a dráhou, ktorú opisuje Slnko. Hodinový uhol reprezentuje posun Slnka z východu na západ na lokálnom poludníku. Obe premenné sú funkciou času, presnejšie sklon je závislý na jednotlivých dňoch v roku a hodinový uhol na čase počas dňa. Pomocou tohto súradného systému sa určí poloha Slnka na oblohe v danej lokalite na základe, ktorej funguje **Polárny sledovací systém** (to ako tento systém vyzerá v praxi je na obr. 24).



Obrázok 23. Rovníkový súradný systém [7]

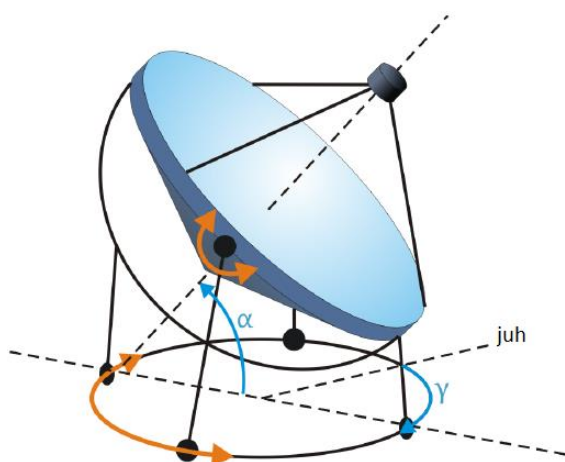


Obrázok 24. Prevedenie polárneho sledovacieho systému v praxi [4]



Obrázok 25. Princíp polárneho sledovacieho systému [4]

Horizontálny súradný systém uvažuje lokálnu horizontálnu rovinu, v ktorej sa práve nachádza pozorovateľ. Tá pracuje z dvoma premennými: solárny výškový uhol α_s (uhol medzi horizontálnou rovinou a dráhou slnka) a solárny azimutálny uhol γ_s (uhlový posun, o ktorý sa z juhu mení projekcia slnečných lúčov v horizontálnej rovine). Výhodou tohto prístupu je, že je popisná z bodu, v ktorom sa človek práve nachádza, pretože Slnko pozorujeme v horizontálnom systéme. Nanešťastie je táto metóda zložitejšia na výpočet a jednotlivé uhly sa prepočítavajú cez iné geografické uhly. Sledovací systém, ktorý využíva tento súradný systém sa nazýva **Výškovno-Azimutálny** (Altitude-azimuthtracking) s jednou horizontálnou a druhou vertikálnou osou. Táto metóda je oproti Polárnej mechanicky a konštrukčne jednoduchšia (reálne prevedenie je na obr. 27). Preto túto metódu využívajú väčšie aplikácie a menšie zrkadlá používajú Polárny systém. [4,7]



Obrázok 26. Výškovno-Azimutálny sledovací systém – princíp [4]



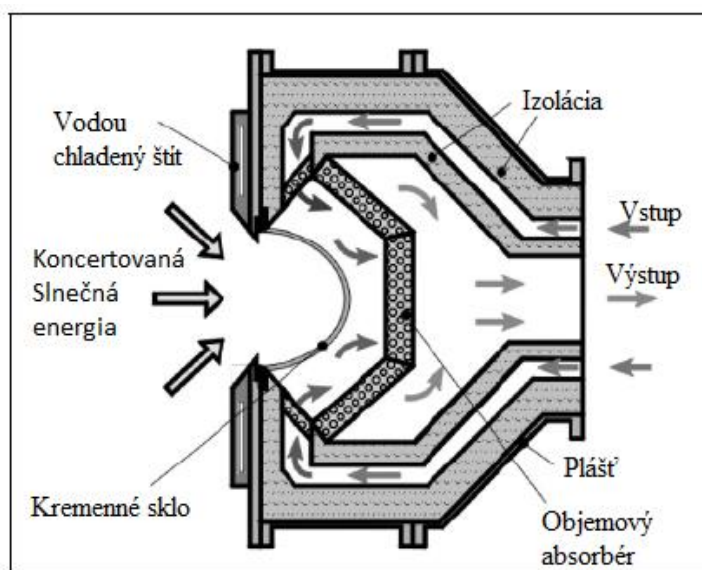
Obrázok 27. Prevedenie výškovno-azimutového sledovacieho systému v praxi [4]

2.3 Prijímač slnečného žiarenia

Prijímač slnečného žiarenia je spojovací článok medzi zberačom a tepelným motorom. Jeho hlavnou úlohou je absorbovať čo najviac odrazených slnečných lúčov a predať absorbovanú tepelnú energiu tepelnému motoru s čo najmenšími stratami. Mimo StM sa na transformáciu energie používa aj plynová mikro turbína (tá má na prijímač rozdielne požiadavky ako StM no princíp zostáva zachovaný.)

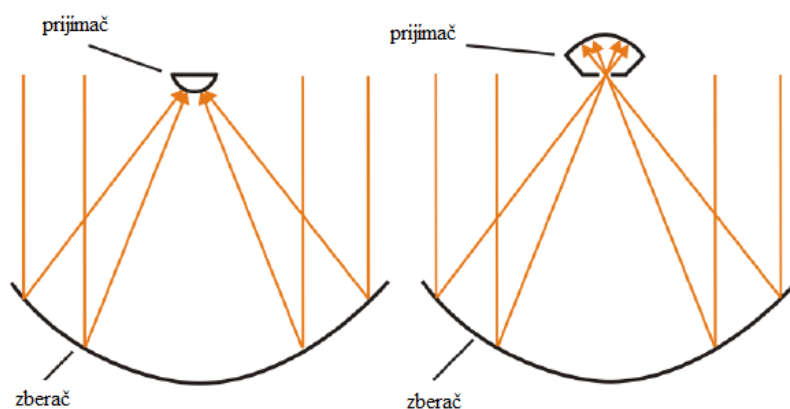
Objemový prijímač sa používa v spojení so StM, no nájdeme ho u plynových mikro turbín (tie majú pri použití tohto prijímača zatiaľ najlepšie výsledky), používa sa aj v hybridných parabolických systémoch a vo vežových systémoch.

Koncentrované lúče vstupujú do objemového prijímača cez kremenné sklo. Vo vnútri je energia absorbovaná do poréznej keramickej peny a ďalej odvádzaná teplotnou látkou. Výhodou tohto systému je, že spoľahlivo pracuje aj pri teplotách vyšších ako 1000°C a má veľké plochy, cez ktoré sa šíri teplo (v malom objeme). V spojení so StM redukuje mŕtve objemy ako aj množstvo potrebných vysoko teplotných zliatin. Nevýhodou je nižšia účinnosť stratou v kremennom skle. [6]



Obrázok 28. Princíp objemového prijímača StM. [6]

Prijímače určené pre StM môžeme rozdeliť na dva typy: dutinový (objemový) a externý. Rozdiel medzi nimi je ten, že u externých dopadajú koncentrované lúče na vonkajšiu plochu prijímača a u dutinového lúče prechádzajú štrbinou do vnútorného priestoru prijímača kde sú absorbované.



Obrázok 29. Externý (ľavý) a dutinový (pravý) prijímač [4]

Externý prijímač absorbuje odrazené lúče z viacerých strán a preto sa používa pri zrkadlách s veľkým okrajovým uhlom. Pri vyšších teplotách tu ale dochádza k vysokej strate radiáciou nakoľko prijímač nemá žiadne tienenie (nízkoteplotné aplikácie). S toho sa dá

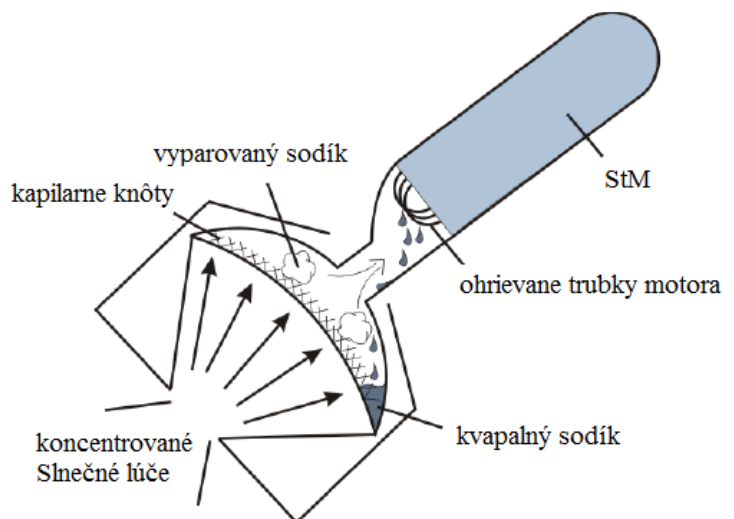
využiť, že oproti dutinovému prevedeniu je strata konvekciou tiež vyššia. Tieto dve straty sú u dutinového prijímača prirodzene menšie vďaka plášťu, ktorý zabraňuje úniku veľkej časti vyemitovaných lúčov a tie zostávajú vo vnútri dutiny. Mínusom je, že zachytáva len rovnobežné, priame lúče, ktoré prejdú otvorom prijímača. Má vyšší absorpčný povrch, pretože absorpčná plocha je až za ohniskom. V ohnisku je otvor, cez ktorý prejdú dovnútra dutiny lúče, kde sa čiastočne rozptýlia a dopadajú na vydutú absorpčnú plochu. Vďaka tomu nie sú materiály tak tepelne preťažované. Kvôli týmto vlastnostiam sa v energetike používa výhradne dutinový prijímač (vysokoteplotné aplikácie). Delí sa na dva druhy: priamy a nepriamy.

Priamy dutinový prijímač predáva koncentrované teplo priamo pracovnému plynu StM. Je konštrukčne jednoduchý, jedná sa o zväzok tenkých rúr a je použitý vo väčšine aplikácií. Typický prijímač môžeme vidieť na obrázku 30. Tento konkrétny prípad je zo 78 rúr, s niklovej zliatiny spojený z motorom a umiestnený 15 cm za ohniskom. Maximálna teplota je 900°C, kontrolovaná pomocou termočlánkov. Plášť dutého prijímača je zo zadnej strany izolovaný a vodou chladený hliník.[4]



Obrázok 30. Priamy prijímač (Direct-illuminationreceiver) [6]

Nepriamy dutinový prijímač ohrieva pracovný plyn nepriamo prostredníctvom prenosnej kvapaliny (Obr. 31). Tá je v prijímači zohrievaná a vyparuje sa. Kondenzuje na trubkách s pracovným plynom a steká späť do prijímača. Prenosná kvapalina je najčastejšie kvapalný sodík. Oproti priamemu prevedeniu má isté výhody. Pracuje pri stálejších teplotách v celej konštrukcii a tak isto lepšie reaguje na výkyvy Slniečného žiarenia (pri priamej metóde dochádza k častým a veľkým teplotným gradientom čo znižuje jej životnosť). Dovoľuje vyššie teplotné prestupy a menšie rozdiely medzi teplotou pracovného plynu v motore a teplotou pracovného médium. Vďaka tomu dosahujeme v motore vyššie účinnosti. Výhodou je aj fakt že prijímač a motor sú dva nezávisle komponenty a ľahšie



Obrázok 31. Nepriamy dutinový prijímač [4]

sa pridáva plynový horák (hybridný systém).

Toto prevedenie má aj svoje nevýhody. Jednou z nich je, že celý prijímač je zložitejšie a komplexnejšie zariadenie. Má kapilárne limity, keď gravitačná a trecia sila prekoná kapilárne sily a kapilárne knôty nedokážu zabezpečiť dostatočné množstvo kvapalného sodíka. Sú tu limity vyparovania kde hrozí zahltenie kapilár bublinkami. Môže dôjsť k zapchatiu kvapaliny vyparujúcim sa sodíkom. Integrita systému môže byť narušená koróziou kapilár či plášťa.

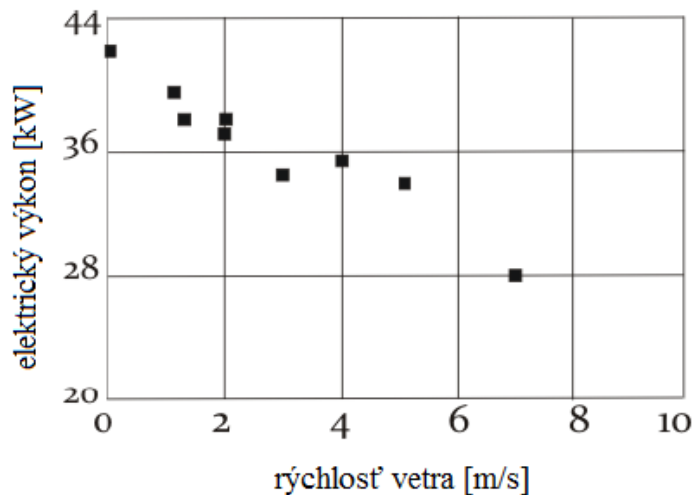
Okrem tohto prevedenia, kde je kvapalný sodík pumpovaný s malého zberného miesta na povrch prijímača pomocou kapilár, existuje ešte ponorný typ. Tu je povrch prijímača vždy ponorený do kvapalného sodíka. Jeho výhodou je pomalšia reakcia na zmeny teploty vďaka väčšiemu množstvu kvapalného sodíka. To zo sebou ale nesie určité bezpečnostné riziká. [4]

2.3.1 Tepelné straty prijímača

Snažíme sa dosiahnuť vysoké prevádzkové teploty, pretože čím je teplota vyššia tým sa zvyšuje aj efektívnosť motora. Sme tu ale limitovaný teplotnou toleranciou materiálu prijímača. Najčastejšie sa v parabolických StM systémoch pohybujeme medzi 700°C a 800°C, normálne nepresahujeme teplotu 900°C. Takéto vysoké teploty síce zvyšujú účinnosť StM, na druhej strane dochádza k vyšším tepelným stratám na prijímači, čím klesá účinnosť celého systému. Dochádza tu k stratám radiáciou, konvekciou a vedením. [4]

Najvýznamnejšou stratou pri takto vysokoteplotných aplikáciách je **strata radiáciou**. Tá rastie so štvrtou mocninou teploty, kde naproti tomu u konvekcie a vedenia je nárast lineárny. Preto sa túto stratu snažíme znížiť na minimum. Ako už bolo spomenuté, dobrým spôsobom je použitie dutinového prijímača, ktorý vďaka svojmu tvaru redukuje stratu znovu zachytením vyemitovaného žiarenia do plášťa dutiny. Stratu zníži aj zväčšenie dutiny, pridanie krytia na vstupe alebo znížením priemeru vstupu do kavity. Povrch prijímača býva natrený na čierne. Na nízko a stredne teplotné aplikácie sa používa selektívny náter (má vysokú absorpciu a nízku emisivitu). U vysokoteplotných aplikácií sa však nepoužíva, pretože pri vysokej teplote rýchlo degraduje, nemá takú účinnosť ako pri nízkych teplotách a pri použití v dutinovom prijímači jej použitie stráca význam vďaka jeho optickým vlastnostiam (má podobné optické vlastnosti ako čierne teleso).

V poradí druhou najvyššou stratou je **strata konvekciou**. Tu rozlišujeme prirodzenú a nútenú konvekciu, obe závisia na orientácii a tvare prijímača. Prirodzená konvekcia je najnižšia, keď je dutina prijímača vo vertikálnej polohe s otvorom orientovaným dolu (na poludnie, ráno a večer je strata väčšia). S toho vyplýva, že táto strata sa v závislosti na ročnom období geografickej polohe mení. Strata nútenou konvekciou môže byť v závislosti na rýchlosti vetra omnoho vyššia (asi štvornásobne pri rýchlosti vetra 4,5m/s). Táto strata je najvyššia, práve keď je otvor dutiny orientovaný v smere vetra. Záleží aj na rýchlosti vetra, teplote a geometrii prijímača a efektívnosti proti veternej ochrane (ak je použitá). Najzávažnejší faktor, ktorý ovplyvňuje túto stratu je práve rýchlosť vetra (obz. 32).

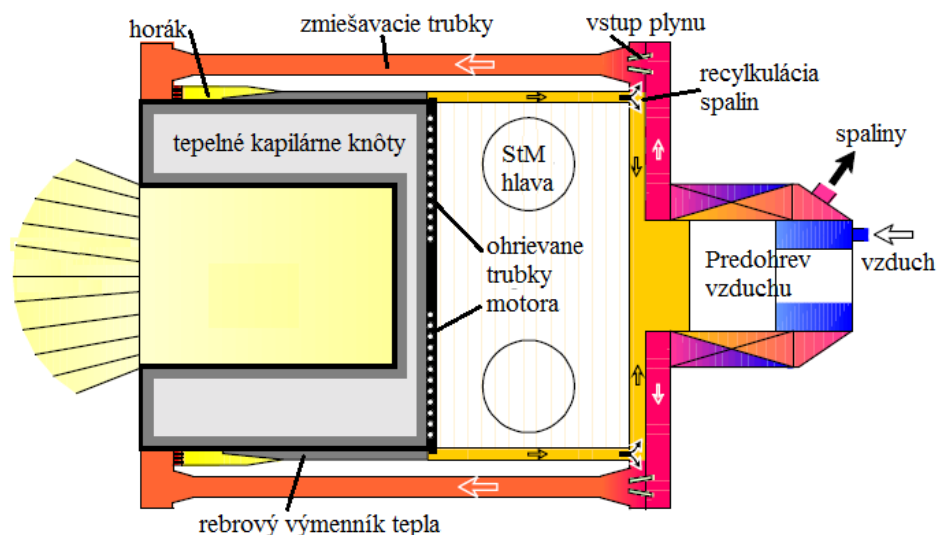


Obrázok 32. Výsledky z merania účinnosti 50kW systému na rýchlosti vetra, pre otvor dutiny orientovaný v jeho smere vetra[4]

Straty vedením cez plášť prijímača sú najnižšie a oproti prvým dvom stratám takmer zanedbateľné a môžu byť efektívne kontrolované zmenou hrúbky izolácie.

2.3.2 Hybridizácia

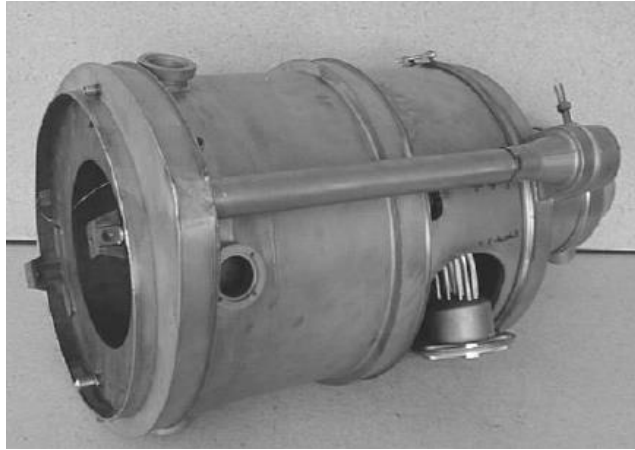
Tento systém, využívajúci tepelný motor je možné spojiť s prevádzkou na fosilné palivo. Zvýši sa tak prevádzky schopnosť nakoľko pre tento systém nie je využívaná akumulácia energie. Výhodou StM je kompatibilita s prakticky akýmkoľvek zdrojom tepla. Pre túto aplikáciu sa používa nepriamo dutinový (objemový) prijímač. Vďaka jeho konštrukcii umožňuje oddelený ohrev teplotnej látky, pričom jednotlivé komponenty sú na sebe nezávislé.



Obrázok 33. Schéma hybridného Solárneho StM systému [5]

Koncentrované Solárne lúče zohrievajú kapilárnu štruktúru, v ktorej sa vyparuje sodík podobne ako v prípade klasickej konštrukcie. V plášti kapilárnej štruktúry je umiestnený rebový tepelný výmenník. Ten horením plynu taktiež predáva teplo kvapalnému sodíku.

Oboje teplotné zóny (solárna a plynová) sú od seba oddelené a sú separované aj od výparného prostredia sodíka. Systém dokáže pracovať nezávisle s oboma zdrojmi tepla alebo súčasnou kombináciou oboch zdrojov tepla. To je značnou výhodou u systému, kde dochádza k veľkým a pomerne častým výkyvom Slnačného žiarenia.



Obrázok 34. Hybridný prijímač [4]

2.4 Stirlingov motor v solárnych aplikáciách

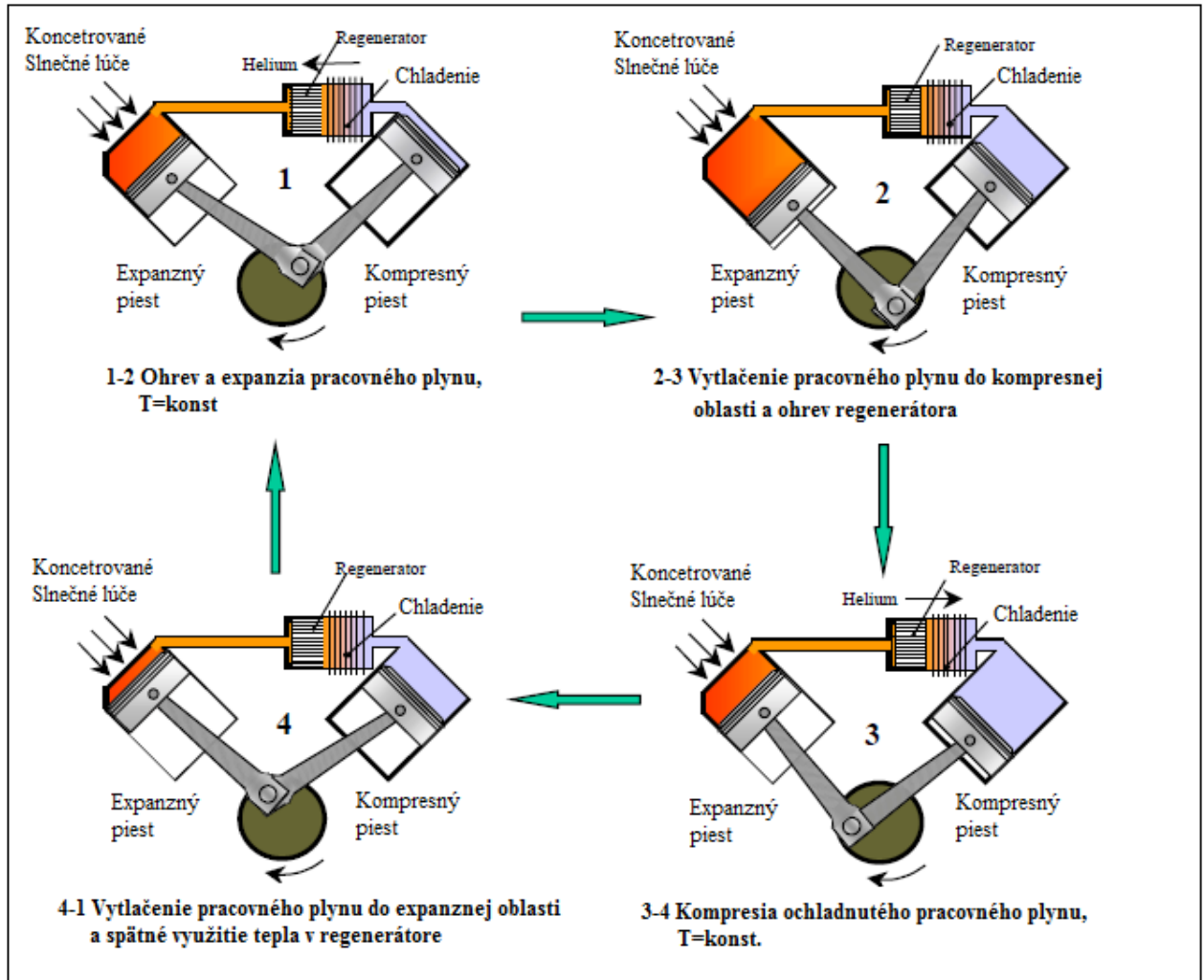
Parabolické solárne systémy môžu pracovať s viacerými termodynamickými cyklami. Rankinov cyklus nebol nikdy použitý v praxi no Braytnov sa v niekoľkých aplikáciách používa. Braytnov cyklus je použitý napríklad v Arizone, s využitím akumulácie energie v podobe stlačeného vzduchu, ktorý je potom k dispozícii počas špičky. Drvivá väčšina parabolických systémov využíva StM.

So súčasných solárnych systémov premeny energie sa do týchto aplikácií najviac hodí StM vďaka svojim vlastnostiam. Je nezávislý na druhu paliva (pracuje na základe teplotného rozdielu). Preto sa používa v solárnych aplikáciách a taktiež je vhodný pri použití hybridného systému. Vhodný rozsah výkonov (v solárnych aplikáciách 5kW až 50kW) pri decentralizovanom použití. Pracovná látka cirkuluje v motore a pri správnom utesnení uniká len minimálne. Na rozdiel od vežových a žľabových systémov, kde cirkuluje veľké množstvo pracovnej látky poháňanej turbínou. Jednotlivé StM sú na seba v rámci elektrárne nezávislé. Pri odstávkach a revízií systému so StM sa s ekonomického hľadiska oplatí pracovať s modulmi postupne a nemusíme odstavovať celú elektrárňu (ako u ostatných solárnych systémoch). Nevýhodou je problematické utesnenie pracovného média a pomalé odozvy na zmeny teploty.

2.4.1 Princíp činnosti Stirlingovho motora

StM pozostáva z dvoch piestov v uzavretom systéme (expanzného a kompresného) spojených na spoločnej hriadeľi a pracovného plynu. Keď zohrievame pracovný plyn v expanznej časti (napríklad koncentrovanými Slnačnými lúčmi) dochádza tam k expanzii plynu: piest je silou plynu tlačný dolu (1-2). Časť energie s expanziou sa uplatňuje na transport horúceho plynu z expanznej do kompresnej časti motora (2-3). Pracovný plyn počas tohto bodu prechádza regenerátorom, kde je uložená väčšina tepla a na druhej strane chlad z kompresného priestoru (vodou chladený). Kompresný piest sa do svojej pôvodnej polohy vracia zotrvačnosťou a expanzný piest medzi tým stláča vyexpandovaný a schladený

plyn (3-4). Stláčáním plynu v kompresnom priestore sa schladený pracovný plyn tlačí cez regenerátor späť do expanznej časti (4-1). Celková energia vyprodukovaná pri expanzii horúceho plynu je dostatočujúca na kompresiu pracovného plynu v kompresnej časti motora a na pohon generátora pripievnenom ku kompresnej časti.



Obrázok 35. Princíp funkcie StM [5]

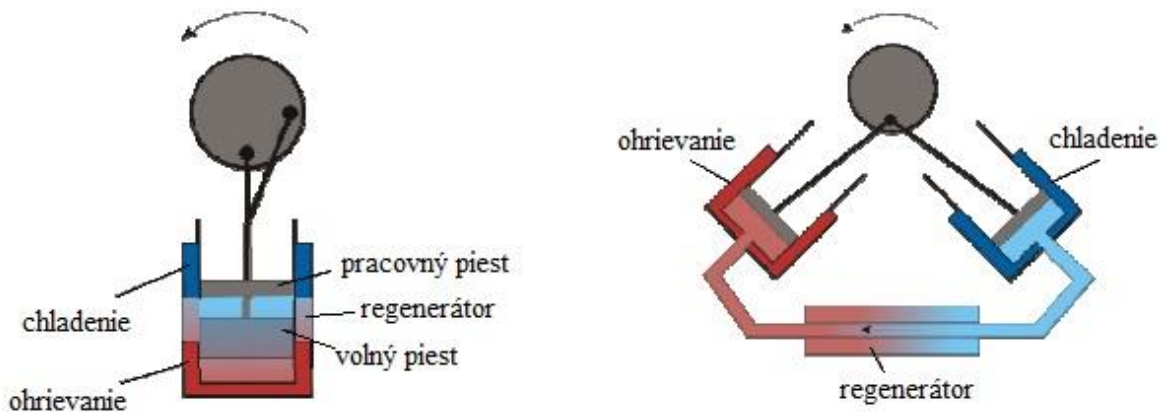
Cyklický dej, ktorý takto StM koná je tvorený izotermickou expanziou (dej počas ktorého sa koná práca, 1-2), izochorickým ochladzovaním pracovného plynu (2-3), izotermickou kompresiou (3-4) a izochorickým ohrevom (4-1).

2.4.2 Konštrukčné vlastnosti Stirlingovho motora

Dva najčastejšie používané druhy StM na výrobu el. energie sú kinetický motor (alfa modifikácia) a motor s voľným piestom (beta modifikácia). Alfa verzia má expanzný aj kompresný piest na spoločnom hriadeľi. Expanzný a kompresný objem sú od seba oddelené (spojené iba regenerátorom). V Solárnych aplikáciách je toto prevedenie používané drvivou

väčšinou výrobcov. Beta modifikácia naproti tomu nemá hriadeľ a je len z jedného valca, v ktorom sa pohybujú oba piesty na spoločnej pružine (mechanická alebo plynová). Na výrobu energie sa používa lineárny alternátor. Výhodou tohto prevedenia je väčšia spoľahlivosť, no pri vyšších výkonoch má horšie výsledky.

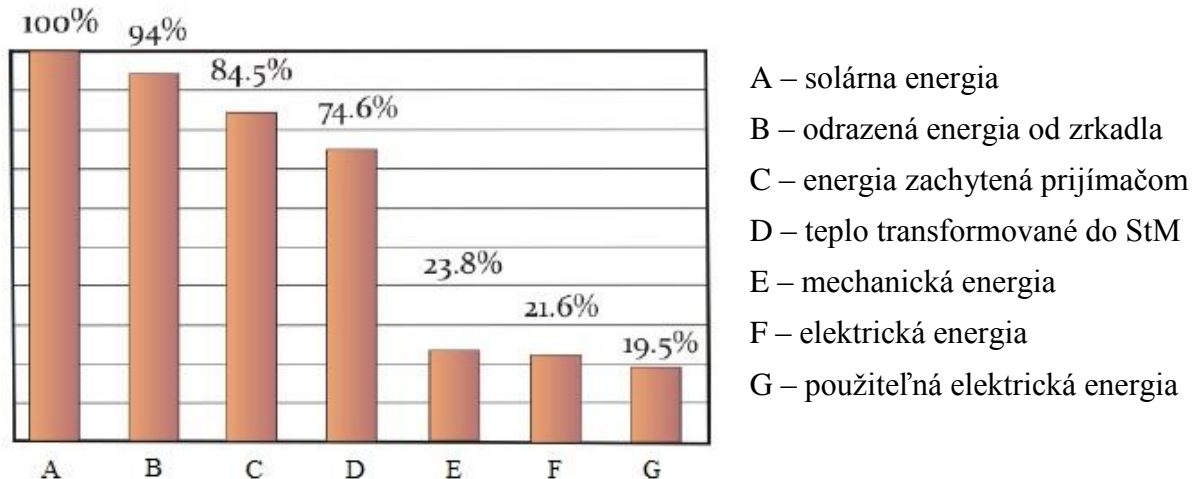
Regenerátor má v oboch prípadoch rovnakú úlohu (zvýšiť účinnosť akumuláciou tepla), a preto musí mať vysokú tepelnú kapacitu, malú tepelnú vodivosť v smere toku pracovného plynu a malý objem. Dobrú kombináciu týchto vlastností je dosiahnutých použitím siete neusporiadaných kovových drôtov s malou pórovitosťou (pre zníženie mŕtveho objemu).



Obrázok 36. Konštrukčný rozdiel medzi Beta (vľavo) a Alfa (vpravo) modifikáciou StM [9]

Vlastnosti pracovnej látky musia tiež spĺňať náročné požiadavky. Veľmi dôležitá je nízka tepelná kapacita aby malé množstvo pracovného plynu dokázalo dostatočne zvýšiť tlak. Nízka viskozita napomáha hladkej prevádzke s malými stratami v trení a veľká tepelná vodivosť pomôže zrýchliť prenos tepla. Tieto vlastnosti najlepšie spĺňa vodík a preto je v tejto súvislosti často používaný. Jeho nevýhodami je ľahký a rýchly únik niektorými materiálmi, preto musia byť materiály plášťa starostlivo vybrané a celé teleso hermeticky uzatvorené. Je dôležité zvážiť aj to, že vodík dokáže unikať cez kovy a je výbušný. Hélium je ďalšou možnosťou. Jeho vlastnosti a účinnosť sú blízke vodíku (o čosi nižšie), no na druhej strane nemá jeho nevýhody. Je ale drahší. Používa sa aj vzduch a dusík, tie majú väčšiu hustotu ale sú lacné a odpadá problém zo skladovaním.

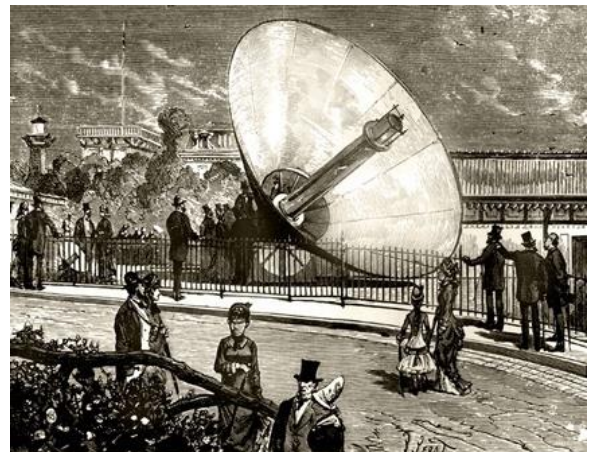
Ako už bolo spomínané vyššie, účinnosť StM narastá so zvyšujúcou sa teplotou. Tým narastá aj rozdiel medzi maximálnou a minimálnou teplotou systému a teda rastie aj Carnotova účinnosť. Na zvyšovaní hornej teploty záleží, aj pretože spodná teplota je stabilná v závislosti na okolitom prostredí (teplota chladiaceho média). Vyššie teplotné rozdiely umožňujú vyššie výmeny energie v rámci motora. Typická teplota pre parabolický Stirling systém je 650°C až 800°C. Ďalším dôležitým parametrom je kompresný pomer (býva medzi 2 až 3) a množstvo pracovného plynu. Na množstve pracovného plynu sú závislé pracovné tlaky v motore (tie bývajú medzi 5 až 20 MPa). Termodynamická účinnosť StM sa u špičkových zdrojov pohybuje medzi 30 a 40 %. Reálne účinnosti sú 20-30%. Priemerná cena za kWh elektrickej energie u koncentračných solárnych systémov bola v roku 2014 približne 0,5 až 0,6 centov (USD). So spomínaných systémov patria parabolické zrkadla so StM medzi najdrahšie (je to spôsobené aj tým že sú ešte stále vo vývoji). [9,30]



Obrázok 37. Namerané energetické straty (transformácia energie) pre 9kW SBP StM solárny systém [4]

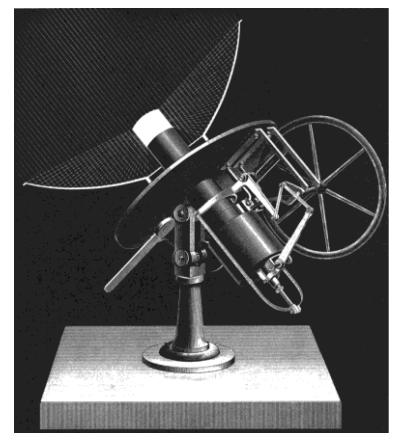
3 História vývoja a stav parabolického systému

Tento systém nie je žiadnou novinkou a jeho prvé použitie sa datuje už v 7. storočí pred Kristom. Zrkadlá, ktoré koncentrovali Slnčné lúče slúžili na zapalovanie ohňa a pochodní. Najznámejšou historkou s využitím tejto technológie je Archimedove zapálenie nepriateľskej flotily drevených lodí obliehajúcich Syrakúzy. Následne zaznamenala táto technológia veľký skok vpred v 19. storočí. V 60-tých rokoch vyrobil August Mouchet prvý solárny koncentrátor, ktorý poháňal parný motor. V jeho práci pokračoval asistent Abel Pifre, ktorý demonštroval vynález a napájal ním



Obrázok 38. Mouchetov solárny koncentrátor [12]

tlačiarenské lisy. V rovnakom období pracoval John Ericsson na podobnom systéme. Ten ale nevyužíva parný stroj ale tepelný motor. Na začiatku 19. storočia bol vynájdený StM, ktorý tu ale našiel uplatnenie až o zhruba sto rokov neskôr. Koncom tohto storočia sa začali stavať systémy na ohrev úžitkovej vody. Tie sa používali komerčne najmä v južných štátoch, kde je cez deň dost' slnečného žiarenia. Technológia to bola jednoduchá využívajúca len nádrž s vodou, ktorá ale cez noc chladla a preto sa v 20. storočí vyvíjajú sofistikovanejšie akumulácie tepla vo vode. Postupne sa s parabolickou technológiou experimentovalo stále viac a začala sa používať vo viacerých aplikáciách ako napríklad solárna pec vo Francúzku dosahujúca teplotu až 3 500°C (využíva sa na testy materiálov, výrobu nanotechnológií,



Obrázok 39. Ericssonov solárny koncentrátor [12]

 Problematika snižování tepelné odrazivosti zrcadel solární elektrárny se Stirlingovým motorem

vodíka ...). Táto technológia sa na komerčnú výrobu el. energie používa od druhej polovice 20. storočia, kedy bola spustená Solar One (10 MW), prvá vežová elektráreň. O pár rokov neskôr je do prevádzky spustená elektráreň využívajúca žľabový koncentrátor.[11]

Na prelome 70. a 80. rokov bol za spoločného úsilia United Stirling AB, Advanco Corporation, McDonnell Douglas Aerospace Corporation (MDA), NASA a DOE vyvinutý moderný StM spojený s priamym prijímačom. Tento systém bol pôvodne navrhnutý ako



Obrázok 40. Prototyp Advanco Vanguard [13]

letecký pohon a po pár rokov bol použitý na pozemné aplikácie. Bol postavený prototyp Advanco Vanguard s výkonom 25kW a účinnosťou 29,4%, testovací čas dosiahol takmer 2000 hodín. MDA sa následne pokúsila celý systém komercializovať za použitia pôvodného StM ale nových, vylepšených parabolických zrkadiel. Vytvorili až osem prototypov a dosiahli dobré výsledky. Projektu sa však zriekli a pokračovala v ňom Southern California Edison Company. Začiatkom 90. rokov boli pokusy o aplikáciu beta modifikácie StM do tohto systému. Bol to program, ktorý začal v 1991 vytvorením

5kW až 10 kW jednotky a následne v 1993 25 kW (pre komerčné použitie). V roku 1996 bol

program zastavený, pretože spoločnosti presmerovali svoj záujem na dieslove motory. Iné spoločnosti (Science Applications International Corporation a Stirling Thermal Motors) podpísali v 1993 kontrakt a taktiež sa pokúšali vyvinúť aplikáciu pre verejné účely. To sa im podarilo a úspešne demonštrovali 20 kW jednotku. Za tým nasledovalo vytvorenie ďalších piatich prototypov, ďalšej generácie hardvéru, tretej generácie motora, hybridný prijímač a zníženie nákladov (do roku 1998). Vo výskume pokračovali iné spoločnosti ako Stirling Energy Systems, ktorá odkúpila práva od MDA a vylepšila systém (účinnosť na 31%). Na začiatku 21. storočia nemecká spoločnosť (Schlaich Bergermann und Partner) vytvorila a v Španielsku nainštalovala systém Enviro Dish. Ďalším príkladom je INFINIA 3,2 kW solárny StM systém, ktorý zaznamenal v rokoch 2006 až 2010 úspech so sto inštalovanými jednotkami po celom svete (na základe tohto projektu začala Infinia vývoj 30kW systému). Infinia dostala v roku 2012 zákazku na dve veľké elektrárne: 75MW *Maximus* projekt v Grécku a 50MW *HeliosPower* projekt na Cypre. Firma stojí za použitím beta modifikácie StM. V auguste 2013 dostala firma ďalšiu zákazku na 1,5MW elektráreň v Utahu a USA. Skúma aj ďalšie možnosti v Čile, Indii, Taliansku a Mexiku. Ďalšou dôležitou firmou je aj Švédsky Ripasso Energy, ktorý v Júlí 2013 dosiahol nový rekord (32% účinnosť na 30kW jednotke). [13,15]

Tento systém má stále čo ponúknuť a má potenciál. Je to najúčinnější koncentračná technológia (dosahuje až 32% oproti žľabovým systémom, ktoré majú 16%). Každá parabola má svoj motor vďaka čomu je to silne modulárny systém a investor nemusí stavať veľké elektrárne aby sa mu investícia začala vracat'. Veľkou nevýhodou tohto systému je zlá akumulácia (systém pracuje s priamym slnkom) no na druhej strane je možné využiť

hybridného pohonu. Napriek svojim výhodám tento systém momentálne bojuje so solárnymi panelmi, ktoré taktiež nedokážu akumulovať energiu ale sú lacnejšie. Projekt je dotovaný DOE v snahe znížiť cenu na 7-10 c\$/kWh do roku 2015 a do roku 2020 na 5-7 c\$/kWh. Ceny tohto systému sú veľmi citlivé na to koľko ich výrobca vyrobí a nainštaluje, preto je ťažké odhadnúť ich pohyb a prenikanie na trh. Ekonomická životnosť elektrárne využívajúcej parabolický koncentračný systém so StM je 30 rokov. V rokoch 2020 až 2030 sa odhaduje ročne vyrobiť 50 000 až 60 000 modulov so vylepšenými zrkadlami, prijímačmi a motormi. [13,14]

4 Problémy vznikajúce pri parabolických systémoch so StM

Problémy pri prevádzke tohto systému môžu vznikáť v dôsledku zlyhania alebo nesprávnej činnosti jednotlivých komponentov. Sem patrí poškodenie parabolického koncentrátoru, to môže byť zapríčinené mechanicky, nesprávnou konštrukciou alebo chybami pri výrobe (viz. kapitola 2.1.2 Chyby parabolického zrkadla). Ďalším zdrojom problémov býva sledovací systém. Chyba mechaniky a riadiacej jednotky môže zapríčiniť, že koncentrátor nebude počas dňa v správnej polohe a celý systém stratí na účinnosti (je potrebné mať na pamäti, že pre rôzne miesta na Zemi má sledovací systém iné nastavenia). Prijímač, ak je prevádzkovaný správne, by nemal byť zdrojom problémov, nakoľko je to výmenník tepla bez pohyblivých častí. V prípade StM záleží na modifikácii. Beta verzia je spoľahlivejšia no v tejto aplikácii sa moc nepoužíva. Zdrojom problémov u StM býva utesnenie a úniky pracovného plynu. Ak dôjde k jeho úniku nastáva pokles účinnosti StM a následná údržba. Je to problém najmä tam kde sa používajú vodík a hélium. Vodík má síce najlepšie pracovné vlastnosti, ale uniká aj cez kovy, a preto ho nie je možné dokonale utesniť v pracovnom objeme.

Druhým zdrojom problémov sú klimatické podmienky, ktorým môže byť systém vystavený. Tie znižujú účinnosť celého zariadenia a môžu mechanicky poškodiť zrkadlá. Najčastejším dôvodom zníženia účinnosti je oblačnosť. Keďže zrkadlo koncentruje priame slnečné lúče, ktoré sú v atmosfére blokové, v súvislosti s lokalitou použitia môže byť toto pomerne veľký problém. Je preto potrebné na to myslieť pri návrhoch a je to aj dôvod prečo sa komerčné elektrárne využívajúce tento systém, stavajú na miestach, kde je jasno a horúco počas väčšiny roka.

Problémy spôsobuje aj silný vietor. Mimo mechanického poškodenia vznikajú aj piesočné búrky. Počas nich sa nie lenže nevyrába elektrina, ale na zrkadlo sa môže naniesť vrstva piesku čo zníži reflexivitu a ostrosť obrazu. Počas búrky sa zrkadlá natáčajú po vetre čím sa znižuje negatívny dopad a množstvo piesku na zrkadle no väčšinou to nestačí. Podobne ako piesok ohrozuje povrch zrkadla aj sneh, ktorý sa nahromadí na zrkadle a to nemôže správne fungovať. Postupné usádzanie prachu na zrkadle je ďalším problémom, pretože znižuje reflexivitu. Nevýhodou tohto systému je, že nemáme metódu, ktorá by počas prevádzky merala reflexivitu. Jediným merateľným parametrom je výkon, ktorý vyprodukuje. Tým pádom mimo poklesu výkonu, neexistuje spôsob ako upozorniť operátora na zníženie reflexivity. Zrkadlo môže pri nízkych teplotách taktiež namrzáť, v extrémnom prípade môže na zrkadle namrznúť aj piesok. Keď sa toto stane systém sa musí

musí rozmraziť čím sa marí energia.

Riešením niektorých s týchto problémov sa budem zaoberať podrobnejšie v ďalších kapitolách. Sčasti tu môže pomôcť manuálne čistenie, rôzne nástroje, prístroje a chemické substráty. Ideálne by bolo použitie a ošetrovanie povrchu zrkadla prípravkom na odpudzovanie prachu, piesku, snehu a námrazy a tým minimalizovať čistenie. Nemrznúca tekutina pre lietadla, prípravky do aut a rôzne iné látky boli testované bez pozitívneho výsledku.

4.1 Problémy spôsobené znečistením

Tento problém sa spočiatku začal objavovať a bol skúmaný v spojení so satelitnými parabolickými anténami. Zistilo sa, že hrubšia vrstva prachu (1 mm) spôsobovala problémy so signálom. Bol to problém najmä v piesočných oblastiach s minimálnym množstvom zrážok. Na väčšine planéty našťastie pôsobí ako prirodzený čistiaci mechanizmus dážď. Ten vrstvu prachu zmije. U parabolických zrkadiel je tento problém markantnejší a nedá sa spoľahnúť na prirodzené čistenie. Solárne žiarenie má nižšiu frekvenciu ako rádiové vlny a preto tu hrajú úlohu mikrometre vrstvy prachu. U takto citlivých systémov hovoríme o strate v desiatkach percent na účinnosti (v závislosti na lokalite to môže byť 1% až 25% týždenne). S toho dôvodu je čistenie zrkadiel nevyhnutnosťou. [18]

Znečistenie zrkadiel spôsobuje čokoľvek čo sa usádza na zrkadlo. Najčastejšie sa hovorí o prachu a piesku ale patria sem aj iné častice ako kryštály solí, biologické znečistenie (peľ rastlín, riasy, lišajníky, vtáčí trus atď.). Rôzne znečisťujúce častice majú rôzne vlastnosti, čo sa do veľkosti a zloženia týka. Prachové častice, dopadajúce slnečné lúče rozptyľujú a tie potom mŕňajú prijímač. Časť energie je absorbovaná v nečistotách čo môže o niekoľko stupňov zvýšiť teplotu na povrchu zrkadla (v závislosti na hrúbke znečisťujúcej vrstvy až o 20°C). Rozloženie prachu v rámci zrkadla nie je homogénne, tak ako nie je homogénne ani v rámci celého komplexu elektrárne (zrkadlá na kraji bývajú znečisťované intenzívnejšie ako tie v jeho strede). Ďalším faktorom je vlhkosť prostredia, ktorá môže spôsobiť naliepanie čiastočiek na povrch zrkadla. No na druhej strane môže rosa za istých podmienok prirodzene čistiť zrkadlo (podobne ako dážď, u ktorého tak isto závisí na jeho intenzite). Naopak vietor nemá žiadne prirodzené čistiace schopnosti.

Tento problém je dlhodobo známi a prešiel už radami výskumov a testov. Zistilo sa, že faktor zaprašovania je extrémne zložitá funkcia závislá na lokálnych meteorologických podmienkach. Najčastejšie je však spojované s púštnymi a suchými oblasťami, ktoré sú pre tieto systémy vhodné (z hľadiska slnečného svitu). Tu dochádza vplyvom prachu k poklesu výkonu o 0,2 až 0,6% denne (v určitých častiach roka je to až 1,3%). 1,5 g/m² prachu znižuje výkon o takmer 60%. Pri tak veľkom poklese výkonu musí byť zabezpečený vhodný čistiaci systém. Avšak pri častom čistení je jeho cena extrémne vysoká a pri zriedkavom čistení dochádza k veľkým tepelným stratám. Preto sa hľadá vhodný interval čistenia. Ten býva v závislosti na lokalite medzi 20-45 dnami. [17]

Na maximálne vyčistenie zrkadla sa používa vysokotlaká mydlová a deionizovaná voda. To je ale veľmi nákladné a preto sa v praxi neuplatňuje (v praxi je čistenie zrkadiel na 90% až

95% celkovej čistoty). Najčastejšie sa na zrkadlo strieka tlaková voda, poprípade sa zrkadlo kefuje (spotrebuje sa menšie množstvo vody no trvá omnoho dlhšie). Tlaková voda odstraňuje len prach (piesok) kdežto kefovanie odstraňuje aj príľnavý povlak nečistôt. Na čistenie zrkadiel sa môže použiť aj striedavé napätie privedené na zrkadlo. To vyvolá Coulombovu silu a nabité častice sú odpudzované mimo zrkadla (energeticky náročné).

Najvhodnejšie je zabrániť zaprašovaniu hneď na začiatku. Napríklad v noci natáčať zrkadla čo najnižšie, použiť veterné bariéry, obal zrkadla s odpudivým účinkom na prachové častice, postavenie elektrárne do lokality s nízkym obsahom prachových častíc v atmosfére ...



Obrázok 41. Čistenie kefovým systémom [18]



Obrázok 42. Čistenie zrkadiel tlakovou vodou [18]

4.1.1 Vlastnosti a rozloženie prachu

Prach je podľa Medzinárodnej Štandardizačnej Organizácie (ISO 4225 - ISO, 1994) definovaný nasledovne: „Malé pevné častice s priemerom pod $75\mu\text{m}$, ktoré sa vplyvom vlastnej váhy usadia ale môžu zostať vo vznose na určitý čas.“ [21] Podobných definícií je viac a líšia sa prevažne vo veľkosti priemeru prachových častíc (až do $200\mu\text{m}$). Prachové častice nemajú kruhový tvar a priemer prachovej častice je zjednodušujúci pojem. Je to priemer, ktorý by mala skutočná častica pri zachovaní svojich fyzikálnych vlastností vo vznose. Prach má aj ďalšie definície veľkosti v závislosti na iných ako aerodynamických vlastnostiach (difúzne či elektrické sily). Na aerodynamickom priemere závisí ako dlho zostane častica vo vznose. Čím má častica menší priemer tým dlhšie v ňom zostáva a preto je aj ich koncentrácia v atmosfére väčšinová. Najväčšiu koncentráciu majú častice menšie ako $0,1\mu\text{m}$ (majú úlohu v atmosférických procesoch - formovanie oblačnosti).

Častica	Priemer [μm]	Sedimentácia [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
Hrubé	500-50	300-15
Stredné	50-10	15-0,6
Jemné	10-0,5	$0,6-2 \cdot 10^{-2}$
Veľmi jemné	0,5-0,1	$2 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-4}$

Tabuľka 1. Rýchlosť sedimentácie prachových častíc [26]

V súčasnosti, sú najviac sledované prachové častice pod $10\mu\text{m}$, v spojení so zdravotnými problémami, ktoré spôsobujú (vdychovaním do pľúc). Označujú sa skratkou PM_x (particulate matter). Prachové častice sú pevné alebo tekuté a môžu mať antropogenný (spaľovacie procesy, priemysel, doprava ...) alebo prírodný pôvod (sopečné erupcie, erózia pôdy, púštne oblasti ...). Formu aerosólu majú častice v stabilnom vznose a môžu s nich vznikajú hmla, výpary a dym. Hodnoty aerosólu v atmosfére sú $2\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pre polárnu oblasť, $10\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ v neobývaných, oblastiach, $30\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ vo vidieckych oblastiach, $170\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ v mestských oblastiach a $100\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ v piesočnej búrke. Hoci uvažujeme aerodynamický tvar častíc ako guľový, skutočný tvar častíc je značne premenlivý. Častice môžeme podľa tvaru rozdeliť do troch skupín [26]:

- Izometrické častice – majú približne zhodné rozmery os v trojrozmernom systéme
- Ploché častice – majú sploštený tvar (šupinky, lamely ...)
- Vlákňité častice – jeden rozmer v trojrozmernom systéme je výrazne väčší ako ostatné

V našom prípade nás mimo veľkostí a koncentrácie prachových častíc zaujíma príľnavosť a zloženie prachu. To má vplyv na rýchlosť zanášania, degradačné účinky a priamo ovplyvňuje obrazivosť zrkadla. Degeneračné účinky rozdeľujeme na abrazívne (pri vetre - extrémom je piesočná búrka) a chemické (v závislosti od zloženia prachu – rozrušovanie povrchu zrkadla, korózia kovových častí, prach ako živina pre mikroorganizmy).

Prach sedimentuje na povrchu zrkadla vplyvom vetra, gravitačnej a adhéznej sily. Adhézných síl, ktoré spôsobujú naliepanie prachu na zrkadlo je množstvo (závislé od charakteru prachovej častice a povrchu) [23]:

- Van der Waalove sily
- Elektrostatické a magnetické sily
- Vodíkové spojenie adsorbovanej vrstvy skondenzovanej vody
- Kapilárny tlak a povrchové napätie nízko viskózných vlhkých častíc
- Viskózne sily vysoko viskózných vlhkých častíc
- Rekryštalizáciou vlhkých častíc (soli)
- Tuhnutie koloidného roztoku (hlina)
- Namrzanie
- Chemické reakcie adsorbovaných vrstiev (hydratácia cementu vodou)
- Spekaním častíc vplyvom teploty
- Viazanie častíc v nedokonalostiach povrchu

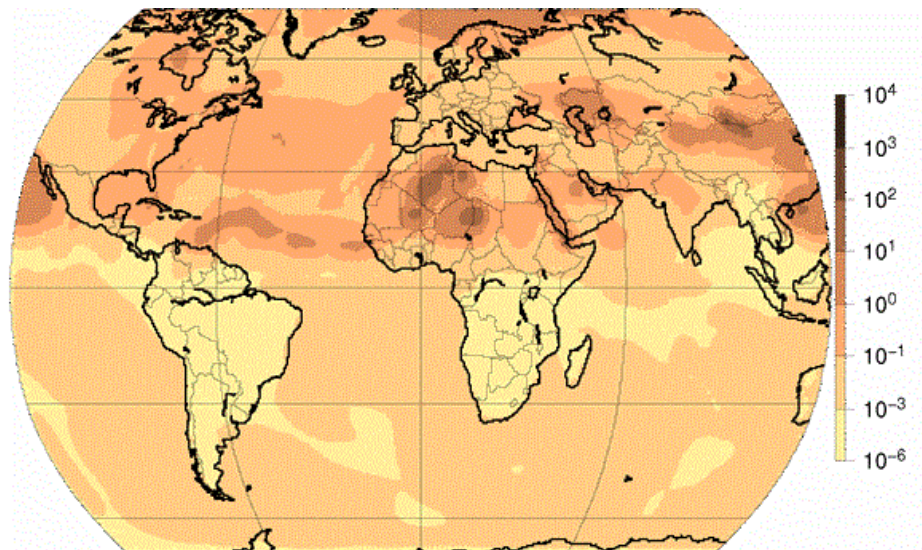
V závislosti od veľkosti adhézných síl F_A [MPa] rozdeľujeme prach do týchto skupín [26] :

- Neadhézny prach ($F_A < 0,06$)
- Málo adhézny prach ($0,06 < F_A < 0,3$)
- Stredne adhézny prach ($0,3 < F_A < 0,6$)
- Veľmi adhézny prach ($0,6 < F_A$)

Vzhľadom k solárnym systémom je najdôležitejšia fyzikálna vlastnosť, už spomínaný, rozptyl a čiastočne pohltenie slnečných lúčov. To do akej miery prach ovplyvňuje slnečné lúče závisí od koncentrácie prachu v atmosfére (a od jeho typu). Tá je závislá na globálnych ako aj lokálnych zdrojoch prachu a smere ich šírenia vplyvom klimatických podmienok.

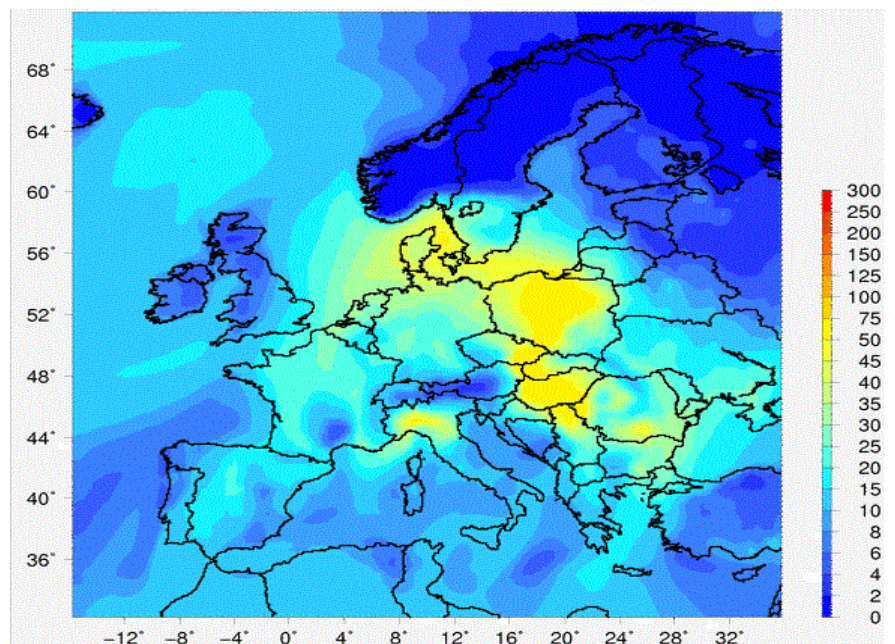
Najväčšími globálnymi zdrojmi prachu sú púšte a prašné oblasti. Preto je v ich okolí zvýšená rýchlosť zaprašovania solárnych systémov. No tento prach sa vplyvom klimatických podmienok šíri do celého sveta (každý rok nastáva individuálna situácia, na obr. 43 je príklad rozloženia

pre 31. októbra 2014). Nesmieme ale zabúdať na lokálne zdroje, ktoré môžu mať veľký dopad (frekvencované a prašné cesty, kameňolomy, stavby, demolácie...)



Obrázok 43. Rozloženie púštneho prachu vo svete [$\mu\text{g.m}^{-3}$] [24]

Naproti tomu môžeme pozorovať, že rozloženie koncentrácie častíc PM_{10} (obr. 44) sú v porovnaní s púštnym prachom veľmi odlišné. Ich koncentrácie sú zvýšené v priemyselných oblastiach (v oblastiach okolo púšte sú znížené). Rýchlosť zaprašovania celkovo vychádza v okolí veľkých globálnych zdrojov prachu horšie (napríklad severná Afrika oproti strednej Európe). Ako som už spomínal môže to byť individuálne v závislosti od lokálneho zdroja prachových častíc. Preto je vhodné, pred inštaláciou koncentračných systémov, zistiť hodnoty a zloženie prachu v atmosfére (priemerné hodnoty – dlhodobé meranie).



Obrázok 44. Koncentrácia častíc PM_{10} v Európe [$\mu\text{g.m}^{-3}$] [24]

4.2 Problémy spôsobené namrzaním

Pri nízkych teplotách pod bodom mrazu dochádza na povrchu zrkadla k namrznaniu prachu a vlhkosti. Námraza na zrkadle spôsobuje rozptyl slnečných lúčov. To je problém, pretože na rozmrazenie zrkadla potrebujeme určité množstvo energie. Táto energia je stratová a kým sa zrkadlo nerozmrazí motor nevyrába el. energiu. Toto rieši napríklad Švédská firma vyrábajúca menšie jednotky, ktorá podala inzerát na riešenie tohto problému. [25] Nejedná sa len o problém severských štátov nakoľko záporné teploty sa objavujú aj v niektorých púštnych oblastiach.

Na zrkadle môže vzniknúť niekoľko druhou námrazy. Tým najčastejším je inovatka. Tá vzniká zamrzaním skondenzovanej vodnej pary na zrkadle. Jej hrúbka závisí od klimatických podmienok (silné mrazy a vysoká vlhkosť vzduchu - hmla). Ďalším druhom námrazy je ľad vznikajúci s dažďových kvapiek, mokrého či topiaceho sa snehu (hrúbka taktiež závisí od teploty).

Tento problém je analogický s namrzaním okien automobilov. Povrch skla (zrkadla) je chladnejší ako okolie a môže sa stať že aj pri teplote okolia niekoľko studňou nad nulou, bude mať povrch zápornú teplotu. Takto sa môžeme rýchlo dostať pod rosný bod a na skle nám začne kondenzovať voda (v zime je tento jav patrnejší aj kvôli zvýšenej vlhkosti vzduchu). To, že je teplota skla nižšia ako teplota vzduchu je spôsobené chladením prostredníctvom žiarenia. Tento efekt je najsilnejší počas jasných nocí, kde dochádza k radiačnému chladeniu s atmosféry. Na druhú stranu pri zamračenom počasí je pokles teploty skla miernejší. Je to spôsobené najmä vodnými parami (efekt majú aj iné plyny ako napríklad CO₂ a O₃), ktoré v atmosfére zadržiavajú teplo a preto je chladenie radiáciou nižšie. Vplyv tu má aj členitosť terénu (v členitom teréne a v mestách s vysokými budovami nie je radiačné chladenie také vysoké). Súhrn týchto vplyvov je aj dôsledok veľkých teplotných výkyvov v púštnych oblastiach. To koľko energie je potrebné na rozmrazenie zrkadla je závislé od množstva námrazy, resp. klimatických podmienok (teplota, vlhkosť a hustota vzduchu, jasná/zamračená obloha). Čím sú teploty nižšie a vlhkosť vyššia potrebná energia sa zvyšuje.

Pri bilancovaní nám s dostatočnou presnosťou stačí uvažovať konvekciu a radiáciu. Základom radiačného prestupu tepla je Stefan-Boltzmannov zákon:

$$P_t = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (22)$$

Kde P_t [W] energia ktorú predáva zrkadlo do okolia

A [m²] plocha zrkadla

ε [-] emisivita

σ [W.m⁻².K⁻⁴]Stefan-Boltzmannova konštanta

T [K] teplota vyžarujúceho telesa

Toto je všeobecne platný zákon, ktorý neuvažuje atmosférické a klimatické parametre, ktoré znepresňujú tento výpočet. Na základe toho boli pomocou meraní vytvorené empirické vzťahy popisujúce radiačné chladenie z atmosféry. Zohľadňuje vlhkosť vzduchu a oblačnosť. [27]

$$P_a = (1 + K \cdot C_o^2) \cdot 8,78^{-13} \cdot T_{sky}^{5,852} \cdot RH^{0,07195} \quad (23)$$

Kde P_a [W] energia, ktorú prijíma zrkadlo od oblohy

C_o [-] oblačnosť (0 pre čistú oblohu a 1 pre úplne zatiahnutú)

K [-] konštanta závislá na výške, v ktorej sa oblaky nachádzajú

T_{sky} [K] teplota oblohy

RH [%] relatívna vlhkosť vzduchu

Pri ustálenom stave musí platiť rovnováha medzi konvekciou a radiáciou a môžeme napísať:

$$\alpha \cdot (T_{ok} - T) = (1 + K \cdot C_o^2) \cdot 8,78^{-13} \cdot T_{sky}^{5,852} \cdot RH^{0,07195} - \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (24)$$

Kde α [W.m⁻².K⁻¹] koeficient prestupu tepla

T_{ok} [K] teplota okolitého vzduchu



Obrázok 45. Schéma tepelnej bilancie radiačným chladením

Z tejto tepelnej bilancie (24) môžeme interačným spôsobom stanoviť teplotu povrchu zrkadla za predpokladu, že poznáme okolité podmienky. Ilustračne predpokladajme nasledujúce parametre:

- Jasná obloha $C_o = 0$, ϵ_{clouds} (emisivita oblakov)
- Teplota vzduchu na začiatku noci $T_{ok1} = 0^\circ\text{C}$ a minimálna teplota $T_{ok2} = -5^\circ\text{C}$
- Vlhkosť vzduchu $RH = 75\%$ (uvažujeme konštantnú počas celej noci)
- Slabý vánok $\alpha = 15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
- Teplotu oblohy stanovím so Swinbankovho modelu [28]:

$$T_{sky}^4 = 9,365574 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - C_o) \cdot T_{ok}^4 + T_{ok}^4 \cdot C_o \cdot \epsilon_{clouds} \quad (25)$$

kde ϵ_{clouds} [-] emisivita oblakov

S týchto nepriaznivých podmienok (vysoká vlhkosť, jasná obloha, malé α , teplota pri ktorej je takmer okamžite podkročený rosný bod a voda namŕza) vypočítam s rovnice (24) teplotu povrchu zrkadla pre krajné teploty:

$$T_1 = -4,5 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (pre } T_{A1} = 0 \text{ }^\circ\text{C a } T_{sky1} = -23,5 \text{ }^\circ\text{C)}$$

$$T_2 = -8,6 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (pre } T_{A2} = -5 \text{ }^\circ\text{C a } T_{sky2} = -30,3 \text{ }^\circ\text{C)}$$

Je potrebné si uvedomiť, že zrkadlo má na začiatku merania približne rovnakú teplotu ako je teplota vzduchu (0°C). Radičné ochladzovanie teda počítame od tohto bodu no komplikuje nám to súčasný, nerovnomerný pokles teploty okolitého vzduchu (ten má na začiatku noci vysoký gradient a postupne sa znižuje až do minima, ktoré býva spravidla nadránom). S nasledujúcej rovnice môžeme spočítať ako dlho by trvalo poklesnutie teploty $t_{cooling}$ [s] z 0°C na $-4,5 \text{ }^\circ\text{C}$ [27]:

$$t_{cooling} = \frac{m \cdot N_A \cdot k}{2 \cdot M \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot A} \left[\frac{1}{T_{final}^3} - \frac{1}{T_{initial}^3} \right] \quad (26)$$

Kde m [kg] hmotnosť zrkadla

N_A [-] Avogadrova konštanta ($6,02 \cdot 10^{23}$)

k [$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] Boltzmannova konštanta ($1,38 \cdot 10^{-23}$)

M [kg] molárna hmotnosť

$T_{initial}$ [K] počiatočná teplota (v našom prípade 0°C)

T_{final} [K] koncová teplota (v našom prípade $-4,5 \text{ }^\circ\text{C}$)

Materiál uvažujeme sklenenú dosku (pre jednoduchosť SiO_2) o rozmeroch $1 \times 0,5 \text{ m}$ a hrúbky 2 mm . Molárna hmotnosť s chemických tabuliek $0,06 \text{ kg}$, hmotnosť $2,5 \text{ kg}$ (z objemu a hustoty $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$) a emisivita $0,2$. Takto vypočítaný čas uvažuje len s odchádzajúcou radiáciou z atmosféry a preto ho musíme ešte vynásobiť:

$$t = t_{cooling} \cdot \frac{P_{a,sky}}{P_{a,sky} - P_{t,sky}} \quad (27)$$

kde index a,sky značí radiáciu atmosféry vypočítanú s rovnice (23) a t,sky radiáciu s rovnice (22). Takto vypočítaný čas vychádza zhruba 20 minút. No v praxi sa za tento čas už zmení teplota okolia a výpočet by musel zahrňovať rozsiahle meteorologické meranie a numerické metódy. S tohto dôvodu uvažujeme zjednodušenia ako konštantnú teplotu okolia a zrkadla po celú dobu predpokladaného namŕzania.

Z rovníc (22,23,24) vyplýva, že množstvo energie, ktoré ochladzuje zrkadlo je

$$P = P_a - P_t \quad (28)$$

vyčíslené na 68 W/m^2 . V tom najnepriaznivejšom prípade, keď by bola celá energia spotrebovaná na tvorbu ľadu v priebehu napríklad 12 hodín by sme dostali 816 Wh/m^2 . Taká istá energia by bola následne potrebná na ohrev a rozpustenie ľadu. V strednej Európe (na

povrchu pod uhlom 30°) je priemerná hodnota energie dopadajúcej slnečným svetom $1,7 \text{ KWh/m}^2$ za deň (počas mesiacov december a január). Prirodzenou cestou by sa zrkadlo rozmrazovalo skoro polovicu dňa (len s využitím energie slnečných lúčov – v praxi hrá veľkú úlohu aj zmena podmienok okolitého vzduchu). Výkon topného telesa a s toho vyplývajúca strata by bola priamo úmerná ploche zrkadla (s plochou rastie aj energetická strata).

Problém namŕzania nie je vo väčšine energetických aplikáciách markantný, pretože sú umiestnené v suchých a teplých oblastiach. Aj keď tu klesne teplota pod bod mrazu, malá vlhkosť vzduchu zabráni rozsiahlej kondenzácii a namŕzaniu. V severných a horských oblastiach, kde je tento problém sa nasadzujú menšie jednotky (malé elektrárne alebo ostrovná prevádzka).

Možnosti ako predísť namŕzaniu je chemická úprava povrchu (prostriedky používané na odmŕzanie skiel na autách a lietadlách). Ďalšou možnosťou je mechanická ochrana, ktorá by počas noci zabránila styku zrkadla s vonkajším prostredím (alebo mechanické odstraňovanie namrznutej vrstvy). Tieto chemické a mechanické metódy odstraňovania námrazy zatiaľ nedosiahli uspokojivé výsledky. Zníženie námrazy by sa mohlo dosiahnuť jednoduchým natočením zrkadla smerom k zemi. Tak aby naň nepôsobilo radiačne ochladzovanie oblohy. Riešenie problému by sme dosiahli keby dokážeme predísť kondenzácii a namŕzaniu. Napríklad zohrievaním povrchu aby nedošlo k podkročeniu rosného bodu (energeticky náročne) alebo vytvorením povrchu zrkadla odpudzujúceho vlhkosť a vodu.

5 Meranie vplyvu zaprašovania zrkadiel

Cieľmi merania je zistiť závislosť odrazivosti na množstve prachu usadenom na zrkadle a jeho vplyv na výkon. Dlhodobým meraním (v rádoch rokov) je cieľom zdokumentovať správanie zrkadiel v čase (degradácia, zhoršenie odrazivosti ...) Zrkadlá poskytla Strojírna Bohdalice, ktorá vyvíja vlastný koncentračný systém so 8KW StM a plánuje ho použiť v severnej Afrike a na Blízkom východe. S tohto dôvodu by bolo toto meranie najobjektívnejšie v lokálnych podmienkach plánovaného použitia (zvýšená koncentrácia piesku vplyvom blízkych púštnych oblastí), rôzne výkyvy teplôt v rámci dňa ako aj v rámci roka, rôzna vlhkosť vzduchu, intenzita zrážok a veterné podmienky). Na dlhodobé meranie v takto odľahlej lokalite od sídla firmy zatiaľ nie je dôvod. Kompromisom je meranie v areály školy Vysokého učení Technického v Brne, Strojní fakulty. Získané dáta nám dajú predstavu o spôsobe zaprašovania a vplyvu prachu na zrkadla. Výsledky sa pomocou podobnosti môžu aplikovať širokospektrálne.

5.1 Návrh meracieho standu

Meranie sa uskutočňuje na niekoľkých standoch vystavených rôznym podmienkam. Meracie stanovište tak môžeme rozdeliť do troch skupín podľa požiadaviek na vystavenie zrkadiel:

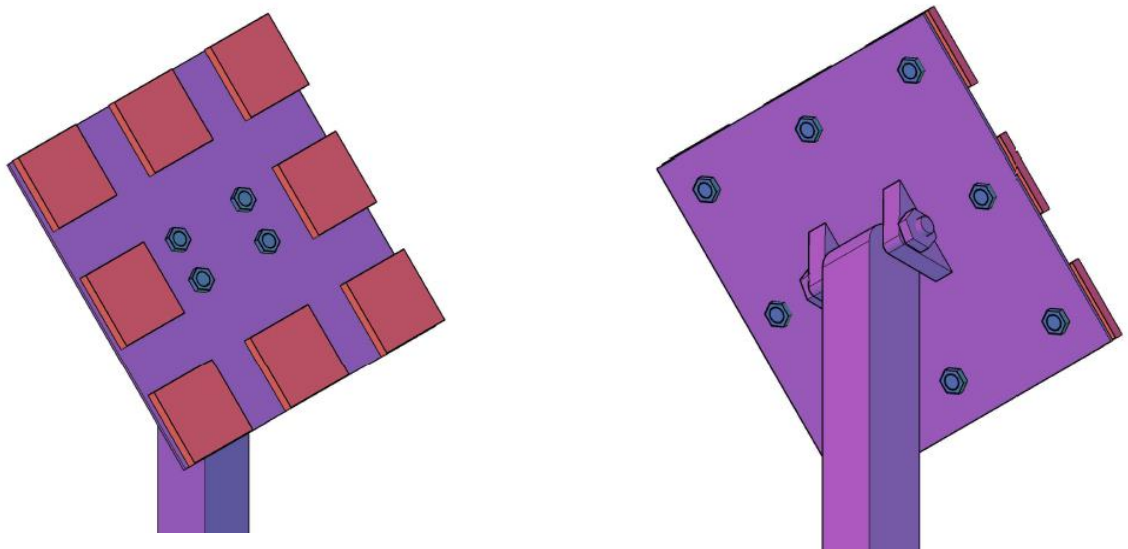
1. Umiestnenie standu v interiéri (tu dochádza k dlhodobému zaprašovaniu bez vplyvu poveternostných podmienok a čistenia)
2. Umiestnenie standu v exteriéri *bez* zastrešenia (toto meranie je ovplyvnené všetkými klimatickými vplyvmi)
3. Umiestnenie standu v exteriéri *zo* zastrešením (obmedzený vplyv niektorých faktorov ako zmývanie vrstvy prachu zo zrkadiel – dažďom či snehom, zároveň sú zrkadlá vystavené slnečnému žiareniu a poveternostným podmienkam)

Návrh stojana zrkadiel je priamo ovplyvnený množstvom meraní (ako aj meracím zariadením). Výhodou merania odrazivosti (podrobnejšie v kapitole 5.1.1 Meranie odrazivosti zrkadiel) je v našom prípade nedeštruktívna metóda, ktorá neovplyvňuje vrstvu usadeného prachu. Preto je možné použiť jeden vzorek (zrkadlo 30x30 mm² a hrúbke 4 mm) stále dookola. Na standoch je umiestnených niekoľko vzorkou v prípade, že by došlo k náhodnému porušeniu vrstvy prachu (alebo inému poškodeniu) na niektorom z nich.

Výkresová dokumentácia stojana [**príloha**]

Noha stojana je uchytená s doskou (na ktorej sú umiestnené zrkadlá) cez otočný medzikus. To nám dáva možnosť nastavovať uhol sklonu zrkadiel. Spôsob uchytenia zrkadiel na stande je pomocou šrobu a matice. Matica je cez medzikus (pliešok aby pri silnom zatiahnutí nedošlo k poškodeniu zrkadla) prilepená k zrkadlu zo spodnej strany (toto umožnila konštrukcia meracieho prístroja, ktorý je aj pre hrubšie materiály, vďaka čomu je za zrkadlom priestor niekoľko centimetrov). Toto je jednoduchý a efektívny spôsob. Prvotný návrh

uvažoval každé zrkadlo vo vlastnom žľabovom uchytení. Návrh bol bez nalepenej matice na spodnej strane, no bol výrobné a konštrukčne zložitý.



Obrázok 46. Model stojanu zrkadiel

Tretie meranie zrkadiel v exteriéry zo zastrešením vyžaduje návrh prístrešku zo špecifickými požiadavkami:

1. Umožniť dopadaniu slnečných lúčov na zrkadlá počas celého roka
2. Zamedzenie vplyvu prístrešku na zaprašovanie zrkadla
3. Zabránenie zmývaniu prachu dažďom a snehom

Prvý bod vyžaduje výpočet maximálneho uhla, pod ktorým dopadajú slnečné lúče na Zem. To je závislosť miesta merania (Brno), konkrétne rovnobežky na ktorej leží.

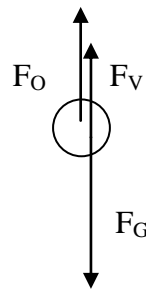
$$(90 - x_r) + 23,5 = \gamma \quad (29)$$

kde x_r [°] rovnobežka (pre Brno 49°)

γ [°] maximálny uhol dopadajúcich lúčov

Výsledný uhol, pre ktorý navrhujeme prístrešok je potom 64,5°.

Návrh prístrešku pri uvažovaní bodov 2. a 3. je na základe pádovej rýchlosti prachových častíc a dažďových kvapiek. Výsledný vektor rýchlosti je následne stanovený s pádovej rýchlosti a rýchlosti vetra (uvažujúc horizontálny smer vetra). Postup výpočtu pádovej rýchlosti:



$$F_G = \frac{1}{6} \pi \cdot d_p^3 \cdot \rho_\xi \cdot g \quad (30)$$

$$F_O = \frac{1}{8} \pi \cdot d_p^2 \cdot \rho_{vz} \cdot v_p^2 \cdot \xi \quad (31)$$

$$F_V = \frac{1}{6} \pi \cdot d_p^3 \cdot \rho_{vz} \cdot g \quad (32)$$

Kde F_G [N] gravitačná sila, F_O [N] odporová sila, F_V [N] vztlaková sila,
 ξ [-] koeficient obtekania, d_p [m] priemer padajúcej častice,
 g [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] gravitačné zrýchlenie, ρ_ξ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] hustota padajúcej častice,
 ρ_{vz} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] hustota vzduchu, v_p [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] pádová rýchlosť.

Spojením týchto rovníc (30, 31, 32) odvodíme pádovú rýchlosť:

$$v_p^2 = \frac{4 d_p \cdot (\rho_\xi - \rho_{vz}) \cdot g}{3 \rho_{vz} \cdot \xi} \quad (33)$$

Rovnica 33 je obecným vyjadrením závislým na spôsobe obtekania častice (Reynoldsovom čísle - Re). V laminárnej oblasti pre $Re < 0,1$ a teda priemer častice $d < 0,05$ mm je rovnica nasledovná [31]:

$$v_p = \frac{1}{18} \frac{d_p^2 \cdot (\rho_\xi - \rho_{vz}) \cdot g}{\rho_{vz} \cdot \nu_{vz}} \quad (34)$$

kde ν_{vz} [Pa.s] dynamická viskozita vzduchu

V turbulentnej oblasti pre $Re > 500$ a teda priemer častice > 2 mm je rovnica pre pádovú rýchlosť [31]:

$$v_p = 1,73 \sqrt{\frac{(\rho_\xi - \rho_{vz}) \cdot g \cdot d_p}{\rho_{vz}}} \quad (35)$$

Hodnoty dosadzovaných parametrov:

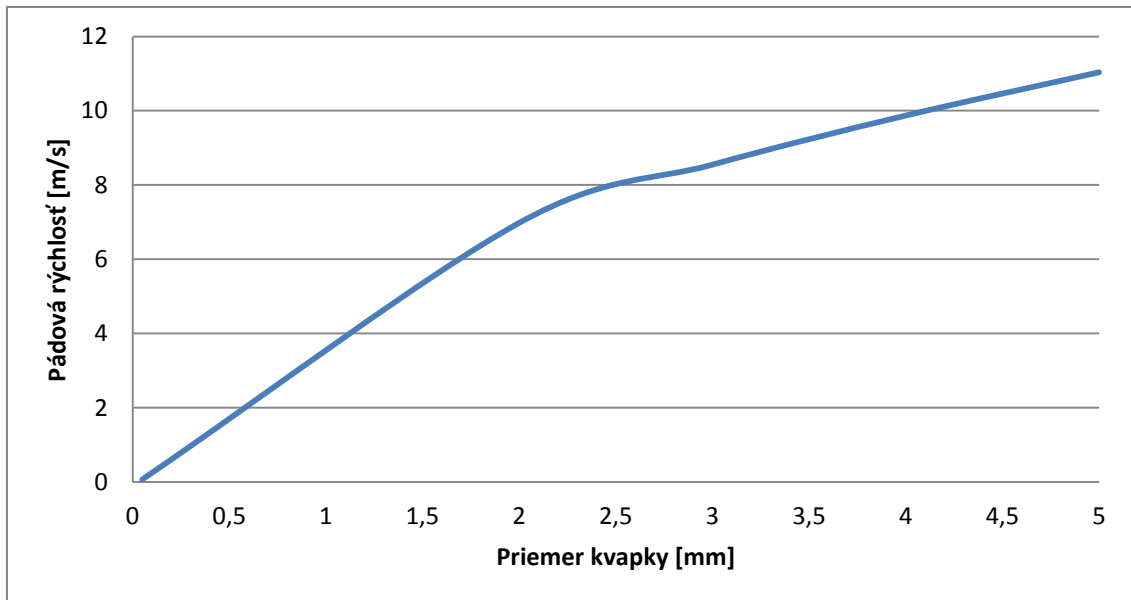
$\rho_{\xi,t} = 2500$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] (hustota prachovej častice)

$\rho_{\xi,v} = 1000$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] (hustota padajúcej kvapky – uvažujeme guľový tvar)

$$\rho_{vz} = 1,204 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]} \text{ (pre teplotu } 20^{\circ}\text{C)}$$

$$\nu_{vz} = 1,983 \times 10^{-5} \text{ [Pa.s]}$$

$$g = 9,81 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$$

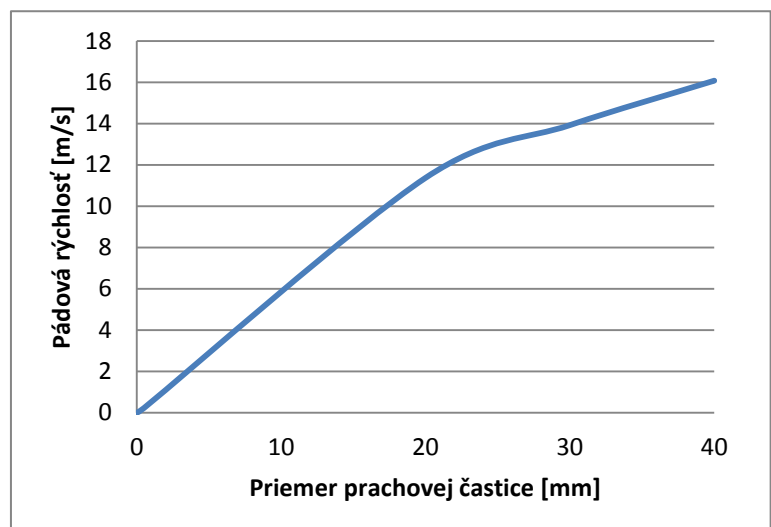


Obrázok 47. Závislosť pádovej rýchlosti na priemere dažďovej kvapky

Priemer častíc d [m] nie je konštantný a dosadzujeme niekoľko hodnôt (najmä okrajové hodnoty – medzi nimi sa nachádza prechodová oblasť [31]). Na základe nich stanovíme závislosť a výsledný uhol dopadu častíc.

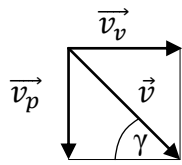
Veľkosti dažďových kvapiek sú v závislosti na charaktere dažďa rôzne. Minimálny priemer kvapky je stanovený na 0,5 mm (graf začína od nuly aby bolo možné vykresliť prechodovú oblasť, tá končí na 2 mm). Typické veľkosti kvapiek sú 1-2 mm. Maximálne veľkosti sú 5-10 mm.

Závislosť pádovej rýchlosti na priemere častice je podobná ako v prípade dažďových kvapiek. Jej rýchlosti sú samozrejme rozdielne a to platí aj pre priemery prachových častíc. Tie uvažujeme od 0,5 do 300 μm . Väčšie častice nemá zmysel uvažovať, pretože nezostávajú vo vznose dlho a ich výskyt je malý.



Obrázok 48. Závislosť pádovej rýchlosti na priemere prachových častíc

Na základe týchto rýchlostí vieme pomocou vektorov spočítať výslednú rýchlosť a uhol, pod ktorým častica dopadá na Zem.



$$\vec{v} = \vec{v}_v + \vec{v}_p \quad (36)$$

$$v = \sqrt{v_v^2 + v_p^2} \quad (37)$$

Kde v_v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] rýchlosť vetra (z historicky nameraných údajov pre Brno používam maximálnu hodnotu rýchlosti vetra 6,2 – táto hodnota bola prekročená len párkrát do roka)

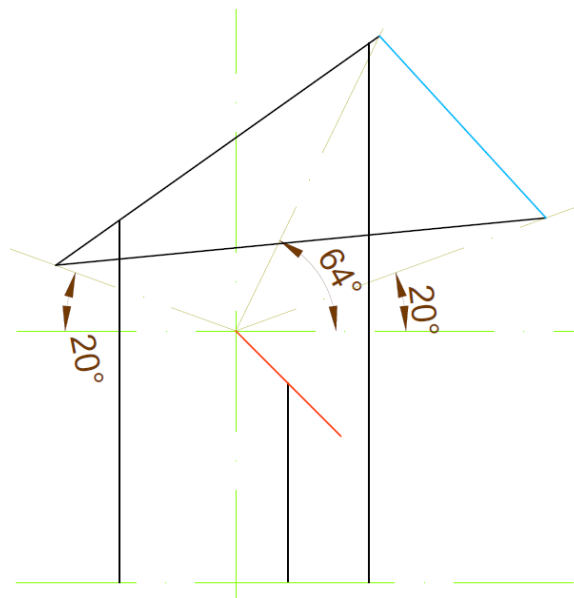
Čo umožňuje zjednodušený návrh, je že minimálny priemer kvapky je stále väčší ako maximálna veľkosť uvažovaných častíc (takmer dvojnásobne). Preto sú aj pri rozdielnej hustote stále priaznivé uhly dopadu častíc (prach má nižšie uhly). Pre najnepriaznivejšie podmienky (maximálna rýchlosť vetra a minimálny priemer kvapky) je tento uhol približne 18° (presnosť výpočtu je ovplyvnená prechodovou oblasťou a neuvažovaním balistickej krivky - preto je len orientačný). Prípade pre prachovú časticu je opačný a v najhoršom prípade uvažujeme maximálnu veľkosť častice ($300 \mu\text{m}$), kde uhol vyšiel približne 45° (platia tu rovnaké nepresnosti ako v prípade s kvapkou). Tieto orientačné hodnoty následne používam pri návrhu prístrešku.

Návrhy na konštrukciu prístrešku zostavujem dva (na základe požiadaviek strojárni Bohdalice):

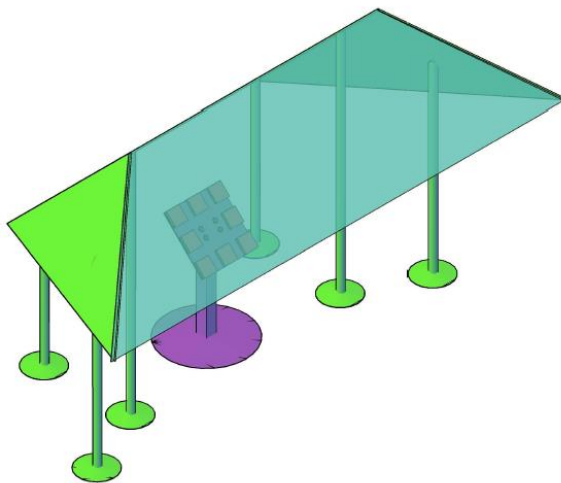
1. Jednoduchý bez mechanických častí
2. S pohyblivou clonou proti dažďu

Koncept číslo jedna uvažuje prístrešok s pevne pripevnenou priehľadnou clonou. Výhoda tohto konceptu je jednoduchosť, spoľahlivosť a bezúdržbovosť. Nevýhodou je strata časti spektra dopadajúcich lúčov a čiastočné ovplyvnenie zaprašovania. Pri uvažovaní rovnakých predpokladov vo výpočte by boli nepriaznivo ovplyvnené častice od 200 do $300 \mu\text{m}$ (rýchlosť vetra $6,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Výhodou je, že častice nepadajú kolmo na Zem a väčšinou sú rozvírené zo zeme a teda vplyv prístrešku nebude taký markantný. Skutočný pohyb častíc je nanešťastie extrémne komplikovaný až

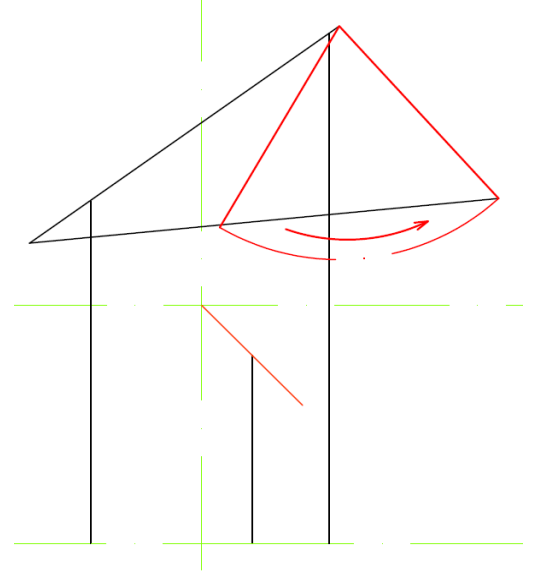
náhodný (Browmov pohyb). Preto bez merania v konkrétnom mieste, nie je možné stanoviť spôsob akým sa budú pohybovať častice vo vznose, miera zaprašovania a vplyv prístrešku.



Obrázok 49. Náčrt 1. Konceptu (A)



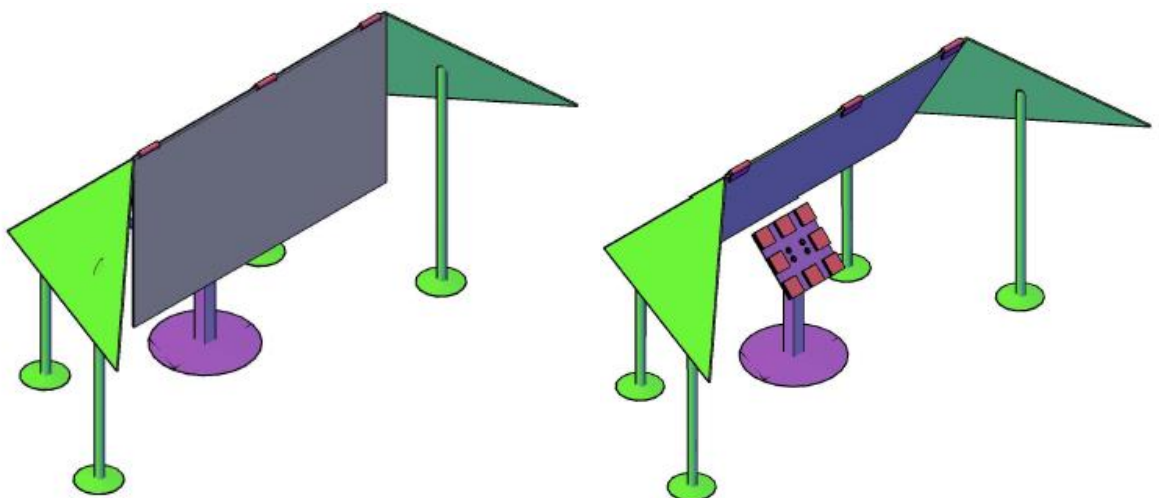
Obrázok 50. Model návrhu 1. (A)



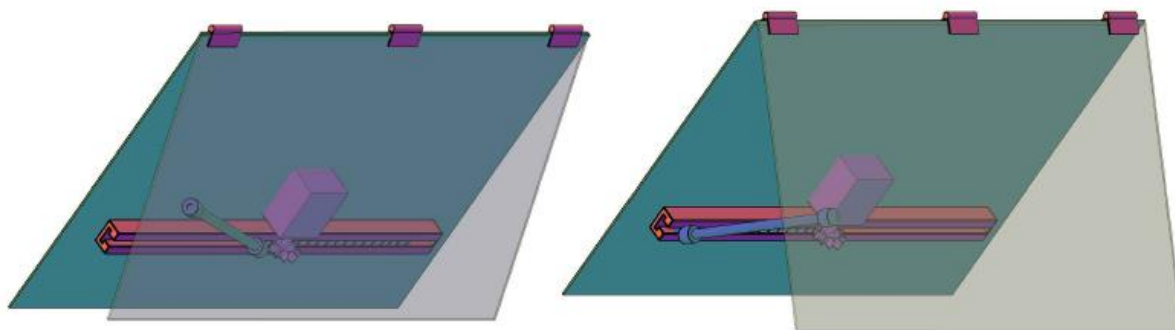
Obrázok 51. Náčrt 2. Konceptu (B)

Koncept číslo dva (obr. 51.) uvažuje prístrešok s pohyblivou clonou. Výhodou je zníženie vplyvu zaprašovania na merané zrkadlá. Tento vplyv odhadujem na 15-20%. Nevýhodou je prítomnosť elektrických súčiastok (elektromotor, senzor dažďa) a mechanických častí.

Pohyblivá časť je riešená nasledovne (obr. 53): Elektromotor otáča cez pastorok koľajničku zo zubami umiestnenú v žľabe. Na konci tejto ozubenej koľajničky je kĺb, cez ktorý je pomocou tyče spojený s clonou. Clona je s tyčou opäť spojená cez kĺb. Pri zopnutí spínača sa motor začne otáčať a cez pastorok tak posúvať koľajničkou v žľabe. Tak isto sa posúva aj tyč a vďaka kĺbom sa zväčšuje uhol medzi tyčou a clonou. Takto sa clona vysunie a zostane v danej polohe aj v prípade nepriaznivých poveternostných podmienok. Rovnaká konštrukcia sa môže uplatniť aj s využitím pružiny, ktorej silu by motor prekonal a dostal clonu do vysunutej polohy. Po odznení nepriaznivých klimatických podmienok by sa clona vrátila do pôvodnej polohy silou pružiny a nie reverzným chodom motora.



Obrázok 52. Model návrhu 2. (B) so zopínacím mechanizmom clony



Obrázok 53. Model B. Vpravo: mechanizmus zopnutý a clona bráni kvapkám dostať sa na zrkadlo
Vľavo: clona v hornej polohe nebráni dopadaniu slnečných lúčov

5.2 Realizácia meraní

Výkresová dokumentácia a návrh stanov boli strojárňou Bohdalice schválené. No v období dokončovania tejto práce ešte nie sú zrealizované. Prvé meranie sa však už uskutočnilo (jeho výsledky sú v kapitole 5.1.2 Výsledky prvého merania). Nasledovať budú dlhodobé merania odrazivosti v pravidelných intervaloch (raz až dva krát za mesiac). Na vyššie uvedených troch meracích stanovištiach sa budú prevádzať štyri merania. Prvým je **meranie referenčného zrkadla** v interiéri. V tomto prípade budeme pozorovať vplyv časovej degradácie bez pôsobenia klimatických podmienok, ktorým budú zrkadlá bežne čeliť. Druhým je **meranie zrkadiel pod prístreškom**. Tie vystavujeme dlhodobému zaprašovaniu bez zmývania dažďom a bez čistenia. Pozorujeme pokles odrazivosti v závislosti na prachovej vrstve. Prakticky bude toto meracie stanovište s pevnou nepohyblivou clonou. V budúcnosti je plánovaná výmena tejto pevnej clony za mechanickú, pohyblivú.

Posledné dve merania sú na jednom stanovišti umiestnenom v exteriéri bez prístrešku. Jedná sa o **meranie zrkadiel pod vplyvom klimatických podmienok** s tým že časť vzorkou sa pred meraním vyčistí a umyje – tak meriame degradáciu vzorkou uvažujúc vonkajšie prostredie. Druhá časť je meranie „zašpinených“ zrkadiel kde sa sleduje vplyv zmien klimatických podmienok a počasia na odrazivosť.

Namerané údaje budú vo forme máp odrazivosti sklíčok ukladané a v dlhších intervaloch vyhodnocované. Predpokladaná dĺžka meranie je do 20-25 rokov (súvisí zo životnosťou elektrárne). Samozrejme môže dôjsť k prerušeniu merania napríklad použitím iných odrazových materiálov v parabole, čím by meranie stratilo na význame.

5.2.1 Meranie odrazivosti zrkadiel

Metóda použitá pri meraní odrazivosti zrkadiel je zobrazovacia spektroskopická reflektometria. Spektroskopický reflektometer bol vyvinutý a je prevádzkovaný na Ústave fyzikálneho inžinierstva Fakulty strojného inžinierstva v Brne. Základným detektorom v prístroji je čip CCD kamery. Tá rozdelí meraný vzorek na malé časti (na základe pixelov kamery). Jednotlivé časti zrkadla sú potom možné vyhodnocovať zvlášť pre rôzne vlnové dĺžky. Kolimátor vytvára rovnobežný zväzok lúčov, ktoré osvetľujú celú plochu meraného vzorku. Výstupom s kamery je séria obrázkov v 12 bitových odtieňoch šedi.

Pred samotným meraním vplyvu klimatických podmienok a zaprašovania je potrebné referenčné meranie. Následne úroveň jasů jednotlivých bodov na zrkadle odpovedá odrazivosti. S toho získame závislosť relatívnej odrazivosti vzorku na vlnovej dĺžke svetla. [32]

Pre opakované meranie bol na meracom pracovisku upravený stolček vzorku s cieľom zvýšenia presnosti vkladania vzorkou na vždy rovnaké miesto. Plocha vzorku premeraná na relatívnu obrazivosť voči referenčnému zrkadlu bola $4,5 \times 8,7 \text{ mm}^2$. Dáta sú následne prepočítané na absolútnu odrazivosť podľa meraní zmieneného referenčného zrkadla na Ústave prístrojové techniky Akadémie vied ČR.

5.2.2 Výsledky prvého merania

Pre prvé meranie boli použité štyri zrkadlá. V tabulke 2. sú priemerné hodnoty odrazivosti použitých zrkadiel v meranej ploche (132x235 pixelov) v uvedenom rozsahu vlnových dĺžok:

Odrazivosť	Zrkadlo 1	σ	Zrkadlo 2	σ	Zrkadlo 3	σ	Zrkadlo 4	σ
350 – 800 nm	0,960	0,026	0,958	0,018	0,961	0,027	0,951	0,024
400 – 800 nm	0,972	0,026	0,971	0,018	0,973	0,028	0,962	0,024

Tabuľka 2. Priemerné odrazivosti použitých zrkadiel

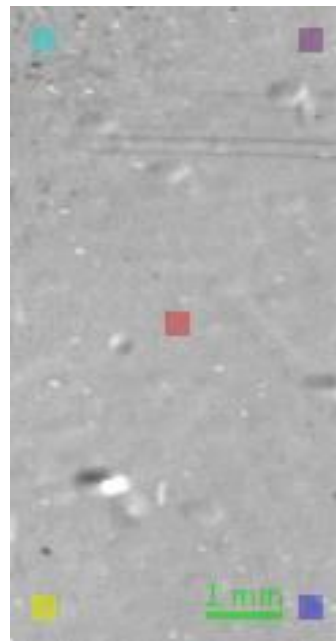
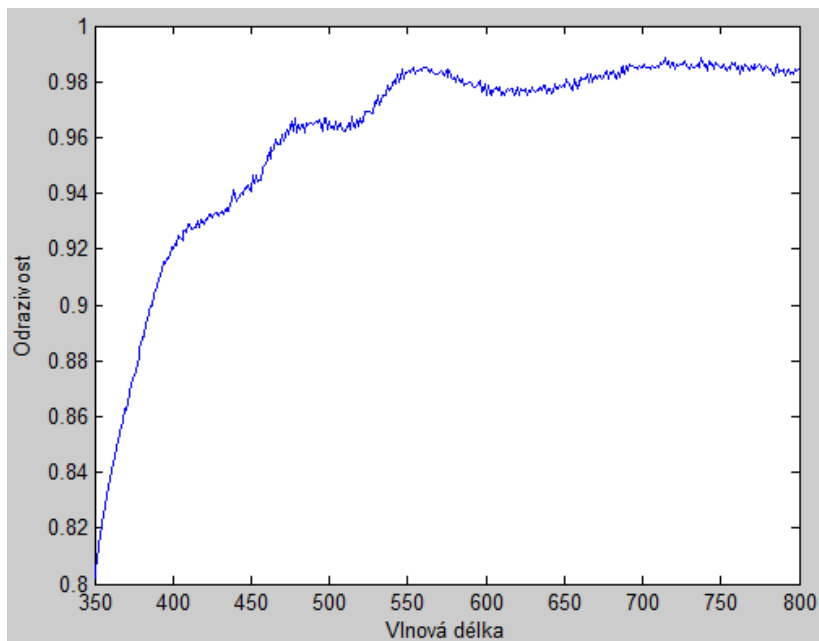
Smerodajné odchýlky σ sú priemerom smerodajných odchýliek aritmetického priemeru odrazivosti zrkadiel na meranej ploche pre jednotlivé merané vlnové dĺžky. Pre získanie realistickejších údajov boli pre každú vlnovú dĺžku vybraných 500 pixelov s najväčšou odrazivosťou a 500 pixelov a najmenšou odrazivosťou (takto sa čiastočne eliminuje vplyv nečistôt a porúch v zobrazovacej sústave reflektometra a meraných vzorkou). Výsledkom je tabuľka 3. kde si môžeme všimnúť, že smerodajná odchýlka klesla približne na polovicu:

Odrazivosť	Zrkadlo 1	σ	Zrkadlo 2	σ	Zrkadlo 3	σ	Zrkadlo 4	σ
350 – 800 nm	0,960	0,015	0,959	0,012	0,962	0,011	0,951	0,015

Tabuľka 3. Priemerné obrazivosti po odstránení najvyšších a najnižších hodnôt

Vyhodnotenie vzorkou sa skladá s priemernej odrazivosti na celej ploche v závislosti na vlnovej dĺžke (obr. 54). S vyobrazenia absolútnej odrazivosti pre vlnovú dĺžku 350 nm (tu je vždy vybraných 5 plôch 9x9 pixelov, s ktorých sa následne robia separátne výpočty odrazivosti). S vybraných plôch sú (v tabuľke 4.) vypočítané priemerné hodnoty odrazivosti a vyobrazené priebehy závislostí odrazivosti na vlnovej dĺžke.

Zrkadlo 1

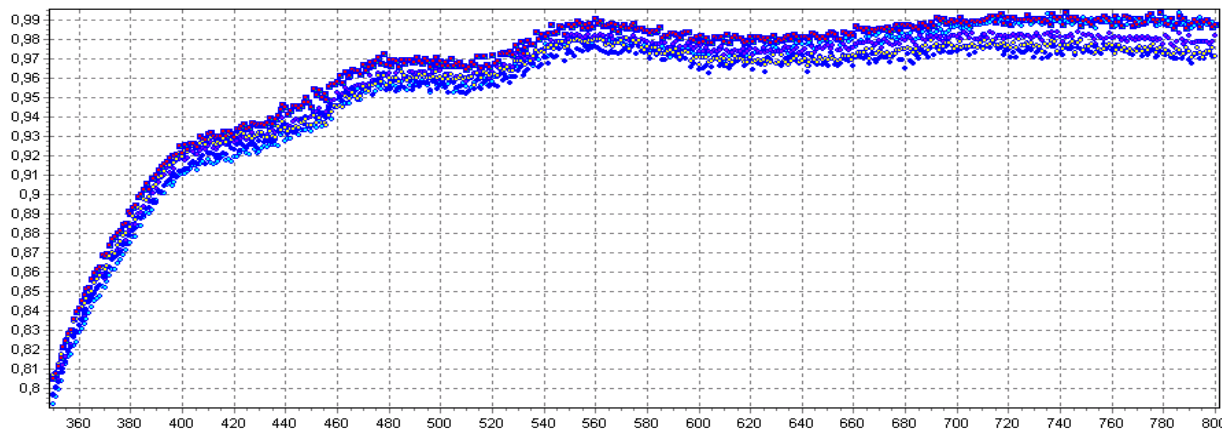


Obrázok 54. Priemerné odrazivosti na celej nameranej ploche v závislosti na vlnovej dĺžke (Zrkadlo 1)

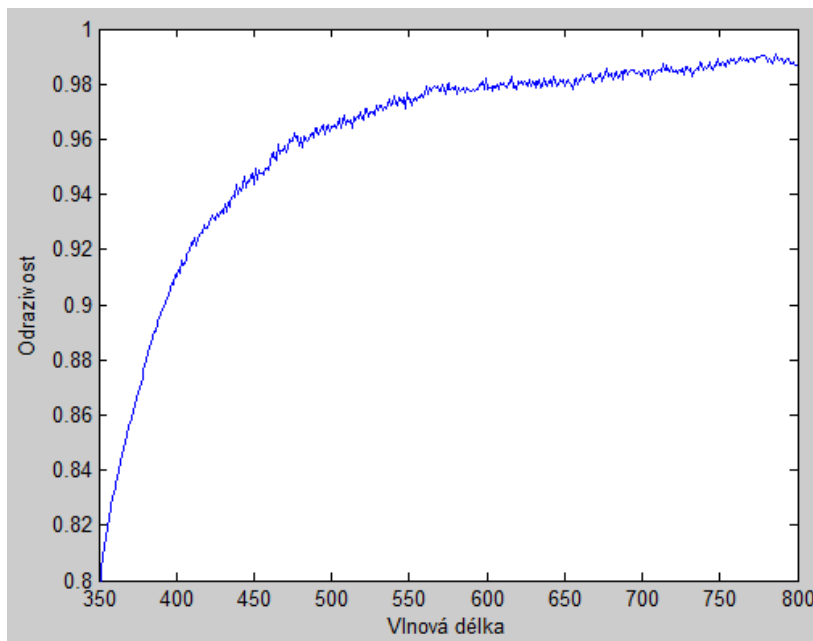
Obrázok 55. Odrazivosť vzorkou pre 350nm, vyznačené vybrané plochy (Zrkadlo 1)

Farba	Azurová	Fialová	Modrá	Žltá	Červená
Odrazivosť	0,9566	0,9571	0,9516	0,9547	0,9644

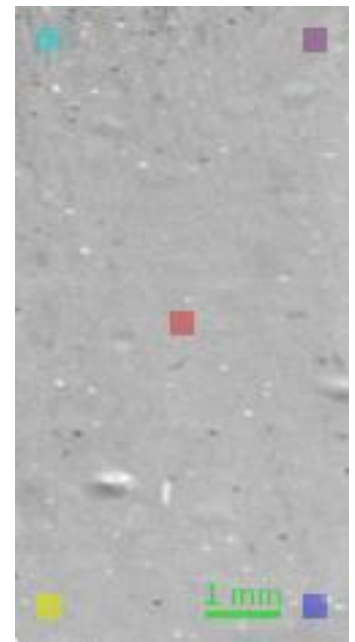
Tabuľka 4. Priemerné odrazivosti vybraných plôch (pre rozsah vlnových dĺžok 250-800 nm)



Obrázok 56. Priemerné odrazivosti [-] (zvislá osa) v závislosti na vlnovej dĺžke [-] (vodorovná osa) na vybraných plochách (Zrkadlo 1)

Zrkadlo 2

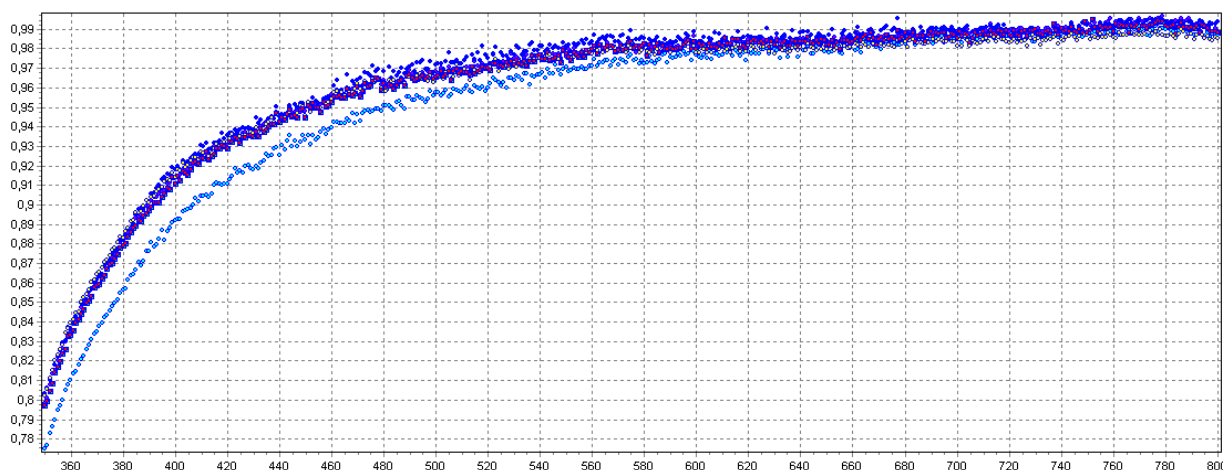
Obrázok 57. Priemerné odrazivosti na celej nameranej ploche v závislosti na vlnovej dĺžke (Zrkadlo 2)



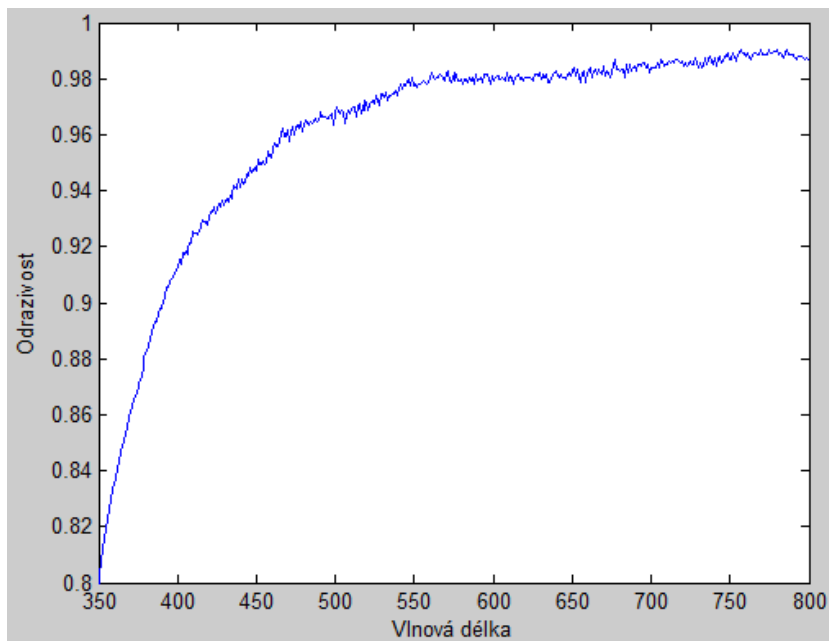
Obrázok 58. Odrazivost' vzorkou pre 350nm, vyznačené vybrané plochy (Zrkadlo 2)

Farba	Azurová	Fialová	Modrá	Žltá	Červená
Odrazivost'	0,9667	0,9605	0,9621	0,9592	0,9612

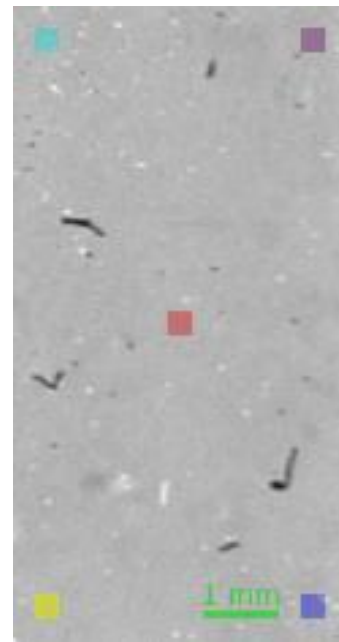
Tabuľka 5. Priemerné odrazivosti vybraných plôch (pre rozsah vlnových dĺžok 250-800 nm)



Obrázok 59. Priemerné odrazivosti [-] (zvislá osa) v závislosti na vlnovej dĺžke [-] (vodorovná osa) na vybraných plochách (Zrkadlo 2)

Zrkadlo 3

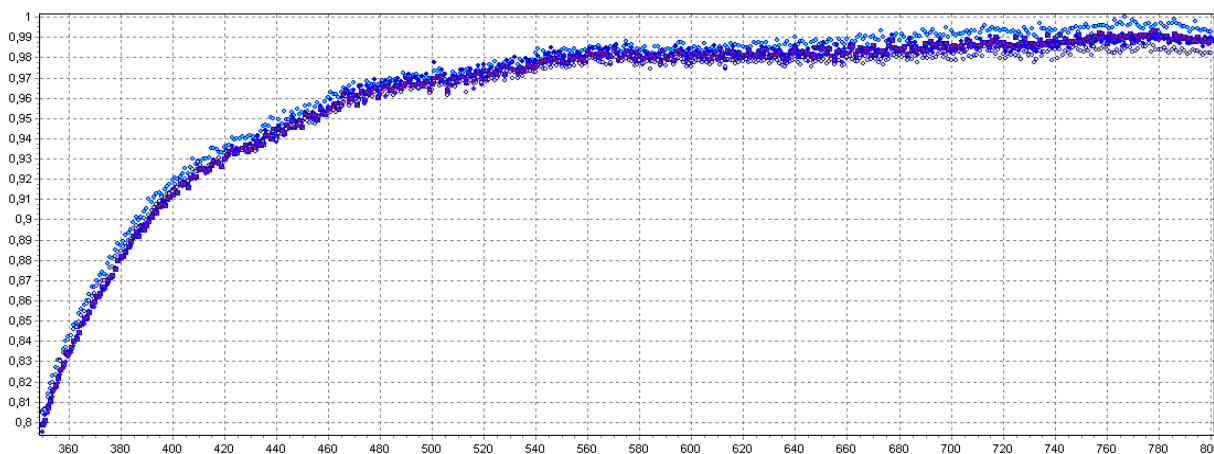
Obrázok 60. Priemerné odrazivosti na celej nameranej ploche v závislosti na vlnovej dĺžke (Zrkadlo 3)



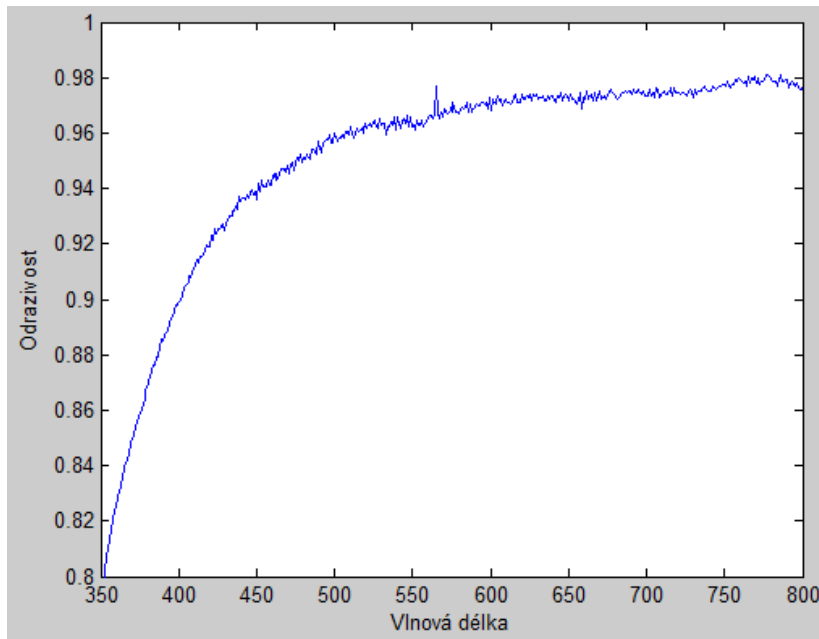
Obrázok 61. Odrazivosť vzorkou pre 350nm, vyznačené vybrané plochy (Zrkadlo 3)

Barva	Azurová	Fialová	Modrá	Žltá	Červená
Odrazivost	0,9680	0,9597	0,9525	0,9593	0,9607

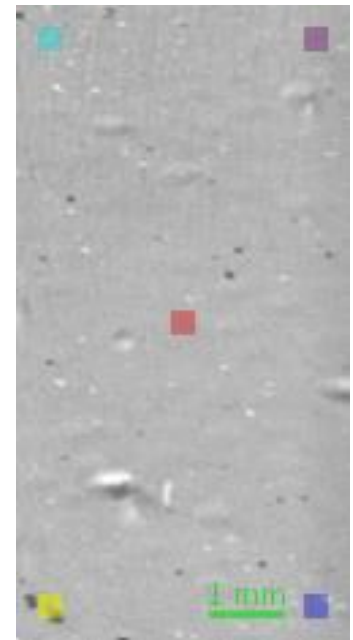
Tabuľka 6. Priemerné odrazivosti vybraných plôch (pre rozsah vlnových dĺžok 250-800 nm)



Obrázok 62. Priemerné odrazivosti [-] (zvislá osa) v závislosti na vlnovej dĺžke [-] (vodorovná osa) na vybraných plochách (Zrkadlo 3)

Zrkadlo 4

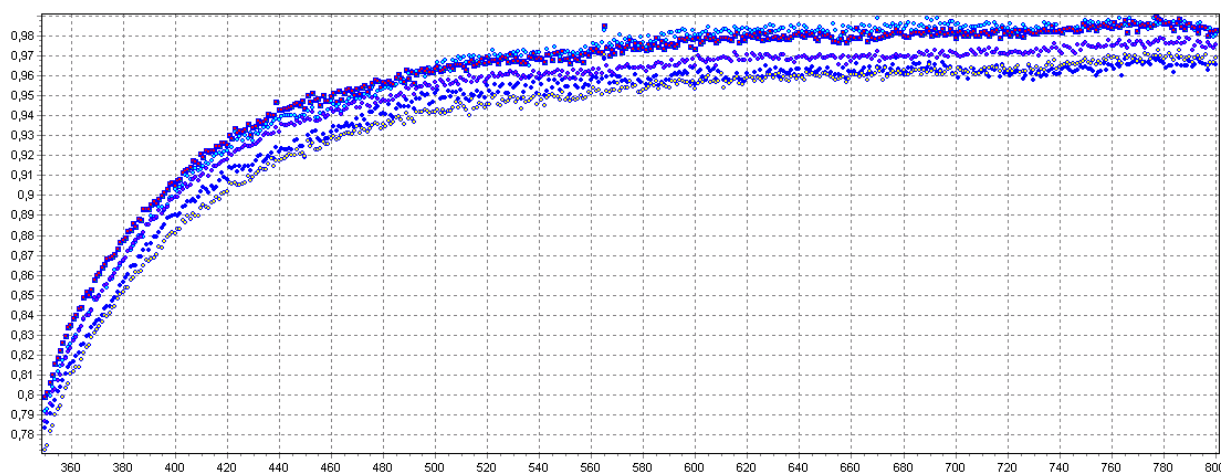
Obrázok 63. Priemerné odrazivosti na celej nameranej ploche v závislosti na vlnovej dĺžke (Zrkadlo 4)



Obrázok 64. Odrazivost' vzorkou pre 350nm, vyznačené vybrané plochy (Zrkadlo 4)

Farba	Azurová	Fialová	Modrá	Žltá	Červená
Odrazivost'	0,9570	0,9478	0,9395	0,9363	0,9546

Tabuľka 7. Priemerné obrazivosti vybraných plôch (pre rozsah vlnových dĺžok 250-800 nm)



Obrázok 65. Priemerné odrazivosti [-] (zvislá osa) v závislosti na vlnovej dĺžke [-] (vodorovná osa) na vybraných plochách (Zrkadlo 4)

Merania uskutočnil Ing. Jiří Vodák

5.2.3 Matematický model

Touto problematikou sa vo svete zaoberalo už niekoľko výskumných pracovísk. To nám poskytuje predpoklady o tom akým výsledkom sa v našom meraní odrazivosti dopracujeme. Na základe experimentálnych meraní sa v priebehu rokov vytvoril **matematický model** zaprašovania zrkadiel určených pre solárne systémy. Základy tohto modelu položili Hottel a Woertz [33], ktorý skúmali tepelný výkon zaprašovaných zrkadiel. Na nich naviazali a matematický model rozšírili Dudley a Workhoven [34]. Ich rozšírením vznikol jeden s aktuálnych modelov (Deffenbaugh model) popisujúcich tepelnú účinnosť η [-] v závislosti na zaprášení [17,35]:

$$\eta = C_1 \cdot K_e \cdot K_0 \cdot F_d^\alpha - C_2 \cdot \Delta T_M - C_3 \cdot \Delta T_M / I - C_4 \cdot \Delta T_M^2 / I \quad (38)$$

kde C_1, C_2, C_3, C_4 [podľa umiestnenia v rovnici] empirické koeficienty

ΔT_M [°C] rozdiel teploty v ohnisku a okolí

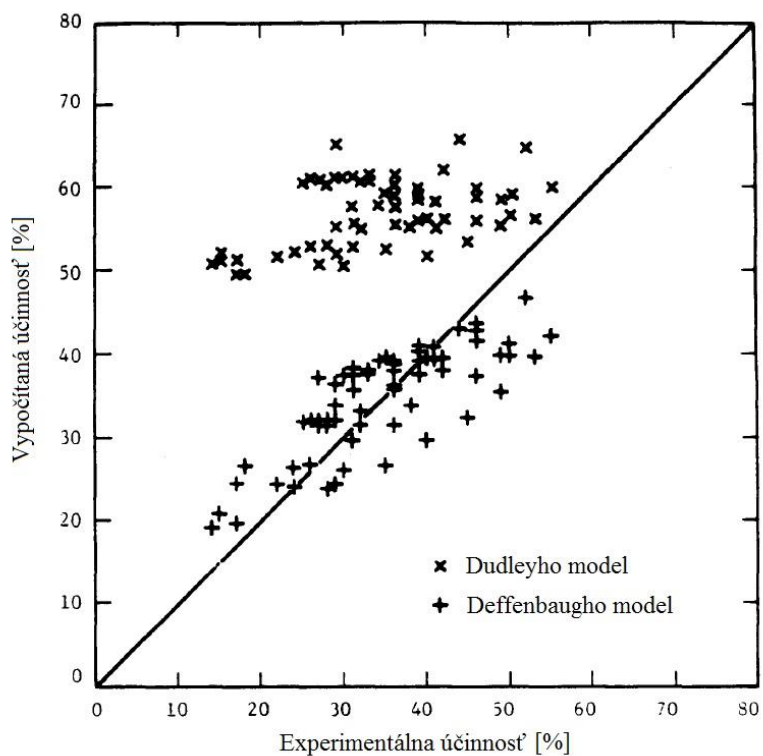
I [$W \cdot m^{-2}$] dopadajúca solárna radiácia

K_e [-] faktor vlnovej dĺžky dopadajúceho žiarenia

K_0 [-] korekčný faktor uhlu dopadajúcich slnečných lúčov

F_d^α [-] faktor akumulácie prachu

Tento matematický model je komplexný a zahŕňa vlastnosti zrkadla i prostredia (prostredníctvom jednotlivých členov rovnice - faktorov). Presnosť matematického modelu je závislá na počte meraných zrkadiel a množstve meraní v čase, s ktorých tieto modely vznikli. Preto je model podľa Deffenbauga presnejší (presný pre laboratórne podmienky no v praxi málo aplikovateľný). S týchto dôvodov matematický model v predpokladoch nevyužijeme a budeme čerpať hlavne s experimentálnych údajov, ktoré nazbierali a uverejnili rôzne výskumné inštitúcie.



Obrázok 66. Porovnanie vypočítanej a experimentálnej účinnosti [17]

5.2.4 Predpokladané výsledky

Prvou fázou pri experimentálnom stanovení závislosti zaprašovania na odrazivosti môže byť určenie zloženia prachu a koncentrácie jednotlivých zložiek. Tento krok nijako neovplyvní samotné meranie no dá nám určitú predstavu o tom ako reaguje slnečné žiarenie na rôzne zloženia prachu. Dáta, ktoré by nám umožnili predpovedať správanie dopadajúcich slnečných lúčov na zrkadlo pokryté prachom o rôznom zložení nie sú k dispozícii. Je omnoho jednoduchšie premerať odrazivosť pre dané lokálne podmienky. Navyše v našom prípade nemá zloženie na pokles odrazivosti taký markantný vplyv ako rýchlosť sedimentácie prachu na povrchu zrkadla.

Experimentálne údaje, s ktorých budeme čerpať boli namerané na strojárskvej univerzite v Iráne (Mechanical Engineering School, Shiraz University, Iran) [36]. Meranie je zamerané na pokles reflexivity v závislosti na množstve prachu (g/m^2) a hrúbke prachovej vrstvy (μm). Jedná sa o štúdie tepelného výkonu troch žľabových kolektorov, ktoré sú súčasťou solárnej elektrárne. Meranie bolo stanovené pre rôzne čistiace podmienky po dobu 45 dní. Na začiatku merania boli dva vzorky vyčistené (kolektory A a B) a jeden nevyčistený 22 dní pred experimentom (C). Kolektor A (referenčný) bol čistený každý deň a kolektor B spolu s kolektorom C boli podobu celého merania bez čistenia (meranie množstva usadeného prachu boli na týchto kolektoroch robené každý deň).

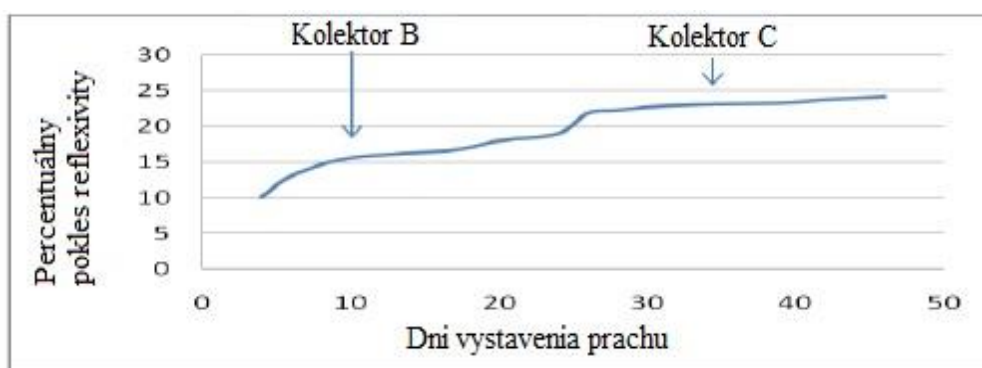


Obrázok 67. Rada kolektorov využitá pre meranie [36]

Množstvo prachu	g/m^2		μm	
	Kolektor B	Kolektor C	Kolektor B	Kolektor C
8-Nov	-	-		
10-Nov	-	0.978		0.466
14-Nov	0.550	1.071	0.262	0.510
21-Nov	0.761	1.299	0.362	0.619
24-Nov	0.971	1.537	0.462	0.732
28-Nov	1.076	1.769	0.513	0.842
1-Dec	1.163	1.868	0.554	0.889

Tabuľka 8. Množstvo prachu pre rôzne dni experimentu [36]

Porovnávaním výkonov referenčného kolektoru s kolektormi zaprašovanými (B a C) môžeme určiť ich pokles výkonu (prípadne reflexivity). Ten sa menil každým dnom. Vypočítaval sa s tepla, ktoré bolo predané kolektorom do oleja v krátkych časových intervaloch (každé 2 sekundy). Graf na obrázku 68. zobrazuje pokles reflexivity v čase. Ten mohli zaznamenať na začiatku s údajov kolektoru B, ktorý bol vyčistený o 22 dní neskôr ako kolektor C, ten preto mohol v grafe naviazať na krivku poklesu reflexivity.



Obrázok 68. Pokles reflexivity za periodu 46 dní [36]

Výkon je funkciou reflexivity a má logaritmický tvar čo vyplýva z obrázka 68. Priebeh závislosti množstva prachu na reflexivite pre naše meranie bude mať podobný priebeh. Hlavným rozdielom bude v našom prípade rýchlosť zaprašovania, ktorá bude s istotou iná ako pre podmienky spomínaného experimentu. Jeho záverom je empirická rovnica poklesu výkonu v závislosti na množstve prachu na zrkadle [36]:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = 0,071 \cdot e^{9,0659 \cdot dl} \quad (39)$$

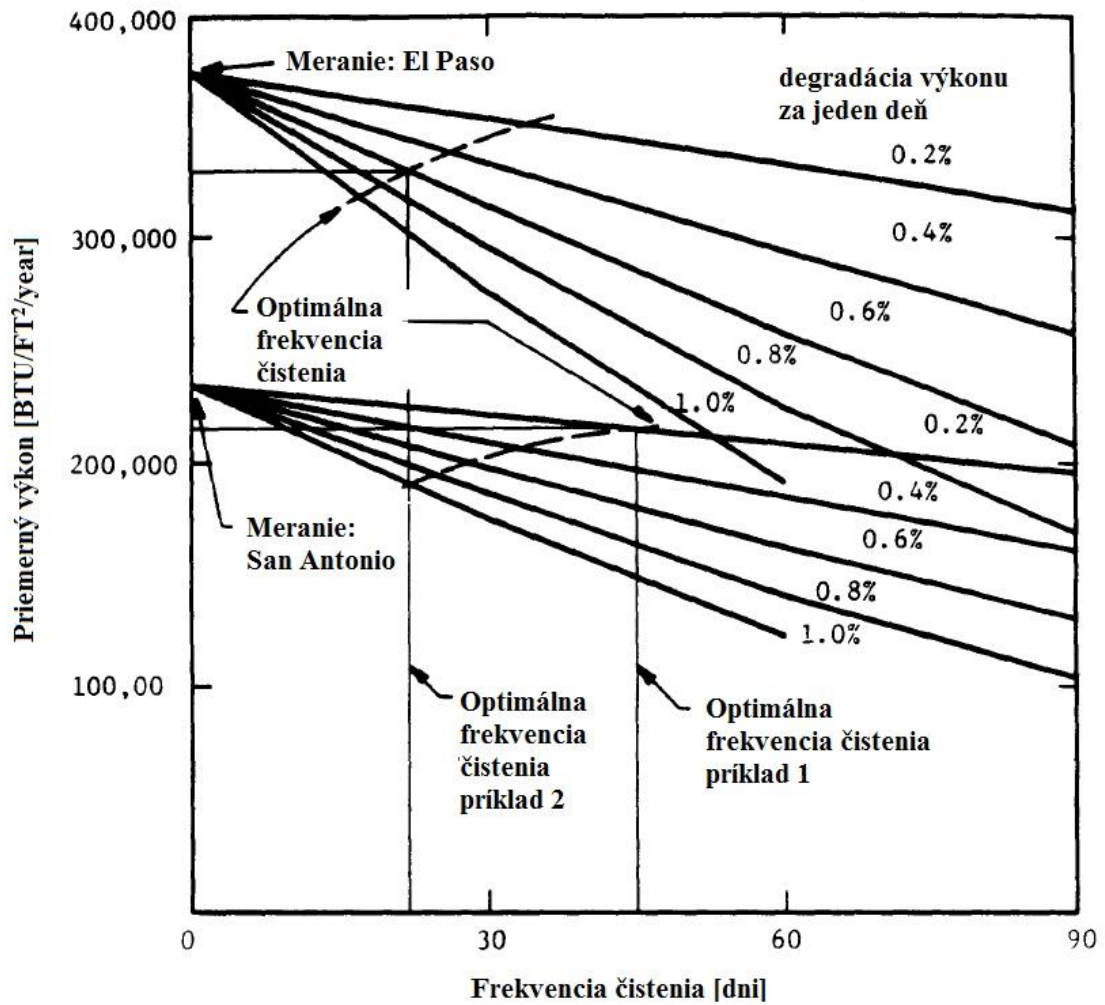
kde ΔQ [kJ.s⁻¹] pokles energie odrazenej zaprašným zrkadlom

Q [kJ.s⁻¹] energia odrazená čistým kolektorom

dl [-] koeficient normalizujúci slnečné žiarenie

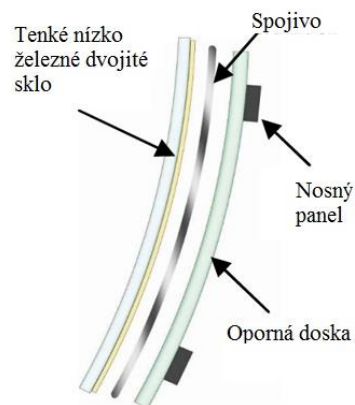
$$dl = \frac{\text{lúč odrazený s čistého zrkadla} - \text{lúč odrazený so zaprašného zrkadla}}{\text{lúč odrazený s čistého zrkadla}}$$

Tieto závislosti sú kľúčové pri návrhu periódy čistenia. Je potrebné nájsť najekonomickejší interval, pri ktorom by výkon klesol natoľko, že spôsobená strata by nahradila náklady na čistenie. Príkladom výpočtu takejto závislosti je graf na obrázku 69. Priemerná degradácia výkonu spôsobená zaprašovaním je v závislosti od ročného obdobia, lokality a klimatických podmienok približne od 0,2% (pre bežne obývané prostredie) až do 1% (pre púštne oblasti). Priemerná perióda čistenia sa na základe tohto údaje pohybuje medzi 20 až 45 dňami.

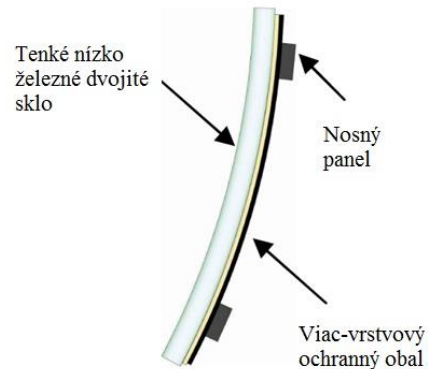


Obrázok 69. Závislosť výkonu na perióde čistenia [17]

S dlhodobého hľadiska by vplyvom prostredia nemalo dochádzať k výraznej degradácii. Čo potvrdzujú nasledovné štúdie [37]. Tie testujú dlhodobu laminátové zrkadlá. Boli



Obrázok 70. Laminátové zrkadlo [37]



Obrázok 71. Monolitické zrkadlo [37]

Problematika snižování tepelné odrazivosti zrcadel solární elektrárny se Stirlingovým motorem

vystavené UV žiareníu počas 33 rokov pričom nebolo zistené výrazné odvrstvenie alebo poškodenie zrkadla. Testu vlhkosti a vystaveniu solí po dobu 3500 hodín. Zmenám teplôt medzi -35°C a 85°C po dobu 120 dní. Pri všetkých týchto testoch dochádzalo iba k malej korózii na okrajoch zrkadla. Je potrebné poukázať na odlišný typ zrkadla použitého v tomto meraní a pri našom meraní kde používame monolitické zrkadlá. Predpokladáme, že monolitické zrkadlá budú na klimatické podmienky reagovať nepriaznivejšie ako laminátové. Monolitické zrkadlá majú taktiež hrubšiu vrstvu skla a preto majú horšiu reflexivitu. Sú náchylnejšie k mechanickému poškodeniu, pri ktorom sa zrkadlo stáva nepoužiteľné.

Záver

V tejto diplomovej práci som zhrnul koncentračné solárne systémy a podrobne popísal solárnu elektráreň so StM. Osobitne som sa zameril na každú časť tohto systému, jej funkcionality, rozdelenie, výhody a nevýhody, prípadné problémy. Pri porovnaní s ostatnými koncentračnými systémami sa viac hodí ako decentralizovaný zdroj a ponúka možnosť modulárneho použitia. Zložitou sa podobá ostatným systémom. Nevýhodou je cena, ktorá je s pomedzi nich najvyššia. Problémy, s ktorými sa pri prevádzke najčastejšie stretáme je zaprašovanie a namrzanie (v závislosti od lokality). Proti namrzaniu musíme bojovať dostupnými prostriedkami (tie sú v tejto fáze vývoja neuspokojivé), pretože by dochádzalo k veľkým energetickým stratám. Problematika zaprašovania je popísaná podrobnejšie aj s dôvodu, že sa s ňou stretávame pri všetkých prevádzkach a má na výrobu energie veľký vplyv počas celého roka. Zaprašovanie je funkciou lokálneho zloženia ovzdušia v čase. Rýchlosť zaprašovania musí byť premeraná aby jej elektráreň mohla prispôbiť interval čistenia zrkadiel. Tento interval je extrémne dôležitý, pretože v nepriaznivých, púštnych oblastiach dochádza k poklesu výkonu cez jedno percento (1,3%) za deň. Pri takomto intervale zaprašovania by bola elektráreň v priebehu mesiaca skoro nepoužiteľná.

Zrkadlo je jedným s hlavných komponentov tohto systému a jeho kľúčovou vlastnosťou je odrazivosť. Tá sa v čase mení vplyvom zaprašovania a degradácii. Návrh merania týchto elementov bol iniciovaný strojárskou firmou Bohdalice, ktorá vyvíja tento systém. Na základe dohody a požiadaviek firmy som navrhol a zdokumentoval merací stand. Ten je rozdelený na tri časti: referenčne meranie v interiéri, meranie v exteriéri pod vplyvom klimatických podmienok a meranie v exteriéri pod prístreškom (bez vplyvu dažďa a snehu). Prístrešok je navrhnutý tak aby naň dopadali slnečné lúče počas celého roka a zároveň aby čo najmenej ovplyvňoval zaprašovanie a clonil pred dažďom. Clona je navrhovaná ako priehľadná nehybná sklenená doska s možnosťou náhrady za pohyblivú clonu (čím chce strojárka Bohdalice v budúcnosti znížiť negatívny vplyv prístrešku na zaprašovanie a stratu spektra slnečných lúčov).

Súčasťou tejto práce je prvé meranie odrazivosti uskutočnené na referenčných zrkadlách. Jej výsledkom sú priemerné hodnoty odrazivosti v závislosti na vlnovej dĺžke. Na zrkadle je vybraných niekoľko plôch, s ktorých sú odrazivosti počítané separátne za účelom zvýšenia presnosti a eliminácii chýb merania. Priemerné odrazivosti boli s ohľadom na type použitých zrkadiel v očakávaných hodnotách 0,95 až 0,96. Počas merania predpokladáme minimálny pokles odrazivosti vplyvom degradácie (ročne do jedného percenta). Naopak pokles odrazivosti vplyvom prachu bude markantný (desiatky percent v priebehu mesiacov).

Zoznam požitej literatúry a zdrojov

- [1] DHAHRI, Amel a Ahmed OMRI. A Review of solar Chimney Power Generation Technology. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)* [online]. 2013. roč. 2, č. 3, s. 1–17. [cit. 2014-09-25]. ISSN: 2249 – 8958. Dostupné z : <<http://www.ijeat.org/attachments/File/v2i3/B0938112212.pdf>>
- [2] WIMBERLEY, James. Power from the midnight sun [online]. September 2, 2011. [cit. 2014-09-25]. Dostupné z : <<http://www.samefacts.com/2011/09/everything-else/power-from-the-midnight-sun/>>.
- [3] GÜNTHER, Matthias, Michael JOEMANN a Simon CSAMBOR. Advanced CSP Teaching Materials. *Chapter 5 Parabolic Trough Technology*. Deutsches Zentrum fur Luft- und Raumfahrt, Helmholtz-Gemeinschaft. 2011.
- [4] GÜNTHER, Matthias a Reza SHAHBAZFAR. Advanced CSP Teaching Materials. *Chapter 7 Solar Dish Technology*. Deutsches Zentrum fur Luft- und Raumfahrt, Helmholtz-Gemeinschaft. 2011.
- [5] SCHLAICH BERGERMANN & PARTNER GBR. EuroDish - Stirling System Description [online]. Stuttgart, June, 2001. [cit. 2014-09-25]. Dostupné z : <<http://pointfocus.com/images/pdfs/eurodish.pdf>>.
- [6] FRASER, R. Paul. Stirling Dish System Performance Prediction Model [online]. University of Wisconsin-Madison: Mechanical Engineering, 2008. Ing. Thesis. Dostupné z : <https://www.nrel.gov/analysis/sam/pdfs/thesis_fraser08.pdf>.
- [7] GÜNTHER, Matthias. Advanced CSP Teaching Materials. *Chapter 2 Solar Radiation*. Deutsches Zentrum fur Luft- und Raumfahrt, Helmholtz-Gemeinschaft. 2011.
- [8] SCHERTZ, P. T., D. C. BROWN a A. Konnerth III. Facet Development for a Faceted Stretched-Membrane Dish by Solar Kinetics [online]. Contractor Report: July, 1991. [cit. 2014-10-13]. Dostupné z : <<http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/5526862/>>.
- [9] ECKSTEIN, Julian, Matthias GÜNTHER, Daniel NORTON, Johannes SATTLER a Michael JOEMANN. 2011. Advanced CSP Teaching Materials. *Chapter 4 Thermal Power Plants*. Deutsches Zentrum fur Luft- und Raumfahrt, Helmholtz-Gemeinschaft. 2011.
- [10] KMEŤ, J. Stirlingov motor jako součást energetických zdroju kosmických sond a mimozemských základen. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, 2013. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.
- [11] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. The history of solar. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [online]. roč. 93, s. 1461–1470. ISSN 09270248. [cit. 2014-10-13]. Dostupné z : <https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf>.

- [12] LANDARTGENERATOR. *The 19th Century Solar Engines of Augustin Mouchot, Abel Pifre, and John Ericsson* [online]. February 29, 2012. [cit. 2014-12-13]. Dostupné z :<<http://landartgenerator.org/blagi/archives/2004>>.
- [13] SAYMA, Abdalnaser. Optimised Microturbine Solar Power System [online]. London, July 2013. Techno-Economic analysis. [cit. 2014-12-13]. Dostupné z :<<https://omsop.serverdata.net/SiteAssets/Pages/Publications%20and%20Reports/D3.4%200%20Report%20on%20state-of-the-art%20dish-engine%20applications.pdf>>.
- [14] DEIGN, Jason. The trouble with dish Stirling CSP [online]. © CSP Today, London. September 14, 2012. [cit. 2014-12-13]. Dostupné z :<<http://social.csptoday.com/technology/trouble-dish-stirling-csp>>.
- [15] DEIGN, Jason. Dish Stirling Fights Back [online]. © CSP Today, London. February 15, 2013. [cit. 2014-12-13]. Dostupné z :<<http://social.csptoday.com/technology/dish-stirling-fights-back>>.
- [16] CIHELKA J., Solární tepelná technika, 1. vydání, Praha 1994: Česká typografie, a.s., 208s., ISBN 80-900759-5-9
- [17] DEFFENBAUGH, Danny M., Steve T. GREEN a Steve J. SVEDEMAN. Solar Energy. *The effect of dust accumulation on line-focus parabolic trough solar collector performance*. [online]. Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, 1986. roč. 36, č. 2, s. 139–146. ISSN 0038092X. Dostupné z: :<<http://diyhpl.us/~bryan/papers2/paperbot/The%20effect%20of%20dust%20accumulation%20on%20line-focus%20parabolic%20trough%20solar%20collector%20performance.pdf>>.
- [18] WOLFERTSTETTER, Fabian. Reflector Soiling and Cleaning Methods [online]. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Helmholtz-Gemeinschaft. SFERA Summer School Hornberg, May 15-16, 2013. [cit. 2014-12-13]. Dostupné z :<http://sfera.sollab.eu/downloads/Schools/Reflector_Soiling_Fabian_Wolfertstetter_SFERA2013.pdf>.
- [19] PROSPERO, Joseph M. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. *Assessing the Impact of Advected African Dust on Air Quality and Health in the Eastern United States*. [online]. University of Miami 1999. roč. 5, č. 3, s. 471–479. ISSN 1080-7039. [cit. 2014-12-13]. Dostupné z:<https://www.rsmas.miami.edu/users/jprospero/Publications/Prospero_dust-health_HERA99_NEW.pdf>.
- [20] ČHMÚ. ZNEČIŠTĚNÍ OVZDUŠÍ NA ÚZEMÍ ČESKÉ REPUBLIKY V ROCE 2012 [online]. Praha, 2013 [cit. 01. 13. 2015]. Dostupné z: <<http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/groc/gr12cz/obsah.html>>.
- [21] WORLD HEALTH ORGANIZATION. Hazard Prevention and Control in the Work Environment: Airborne Dust. 1999. s. 1–96.

- [22] BUEKENS, A. Pollution control technologies. *Dust-Particle Formation and Characteristics* [online]. roč. I. Vrije Universiteit Brussel, Belgium. ©Encyclopedia of Life Support systems (EOLSS). [cit. 01. 13. 2015]. Dostupné z: <<http://www.eolss.net/sample-chapters/c09/E4-14-01-04.pdf>>.
- [23] RIMAI, D.S., L.P. DEMEJO a R.C. BOWEN. Journal of Adhesion Science and Technology. *Mechanics of particle adhesion*. [online]. 1994. roč. 8, s. 1333–1355. ISSN 0169-4243. [cit. 01. 13. 2015] Dostupné z: <http://141.44.1.20/ivt/mvt/englisch/Vorlesung/Lecture_SFPS/Mechanics_Particle_Adhesion_full.pdf>.
- [24] PREV' AIR. Forecast Desert dust [online]. [cit. 01. 13. 2015] Dostupné z: <http://www.prevair.org/en/prevision_pous_desert.php>.
- [25] Industry SME. Cleaning and de-icing of highly reflective mirrors [online]. [cit. 01. 13. 2015] Dostupné z: <<http://een.ec.europa.eu/tools/services/PRO/Profile/Detail/d15fd957-69ef-47e5-98eb-b77566e16408?shid=32db25cb-726f-43b0-8b5f-7742d0935799>>.
- [26] ZAHRADNÍK, Ivan. Posouzení metod měření emisí prachu v živočišné výrobě. České Budějovice: Jihočeská Univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta, 2013. 50s. Vedoucí práce: doc. Ing. Antonín Jelínek, CSc.
- [27] LUCIUK, Mike. Night Radiative Cooling - The effect of clouds and relative humidity [online]. s. 1–5. [cit. 01. 13. 2015]. Dostupné z: <<http://www.asterism.org/tutorials/tut37%20Radiative%20Cooling.pdf>>.
- [28] WEINLADER, H., K. POTTNER, A. BECK a J. FRICKE. Angular-dependent measurements of the thermal radiation of the sky. *High Temperatures - High Pressures* [online] 34(2) 185 – 192. 2002. [cit. 02. 13. 2015]. Dostupné z: <<http://www.hthpweb.com/abstract.cgi?id=htwu286>>.
- [29] MCEVOY, Augustin, Tom MARKVART a Luis CASTANER. Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications [ebook]. Academic Press; 2 edition, 3 Octoberm, 2011. 1268s. ISBN: 978-0-12-385934-1
- [30] INTELLIG, Business. CSP Today Sevilla 2014. *Could CSP become cost- competitive by 2020 ?* [online]. 8th International Concentrated Solar Thermal Power Summit, 12-13 November, Seville, Spain. [cit. 02. 13. 2015]. Dostupné z: <<http://www.nurenergie.com/uploads/Cost-competitive-CSP-EN.pdf>>.
- [31] INTERMEZZO, I. Settling Velocity of Solid Particle in a Liquid [online]. s. 1–12. [cit. 02. 13. 2015]. Dostupné z: <http://ocw.tudelft.nl/fileadmin/ocw/courses/DredgePumpsandSlurryTransport/res00038/embedded/C_oe4625_IntermezzoI.pdf>.
- [32] VODÁK, J. Optimalizace zobrazovacího spektrofotometru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 63 s. Vedoucí doc. RNDr. Miloslav Ohlidal, CSc.

- [33] HOTTEL H. a B. WOERTZ. The Performance of Flat-Plate Solar-Heat Collectors. *ASME Trans.* 64, 91 (1942)
- [34] DUDLEY, Vernon a Robert WORKHOVEN. Performance Testing of Solar Kinetics T-700A Solar Collector. *SAND 81-0984*. 1982
- [35] LEWANDOWSKI, A., R. GEE a K. MAY. Industrial process heat data analysis and evaluation. Technical report, Solar Energy Research Institute. 1984. 121s.
- [36] YAGHOUBI, M., I. NIKNIA, P. KANAN a A.R. MAHMOODPUR. Experimental study od fust deposition effect on the performances of parabolic trough solar collector. Mechanical Engineering School, Shiraz University, Shiraz, Iran. 8 s.
- [37] WANG, Mimi, Rob VANDAL a Acott THOMSEN [online]. Durable Concentrating Solar Power (CSP) Mirrors. Guardian Industries Corp., Science and technology Center USA. [cit. 05. 13. 2015]. Dostupné z:<
https://www.guardian.com/cs/groups/guardiandotcom/documents/native/gi_014227.pdf>.

Zoznam veličín a symbolov

Značka	Význam	Jednotka
A	Plocha parabolického zrkadla	m^2
f	Ohnisková vzdialenosť parabolického zrkadla	m
ψ	Okrajový uhol parabolického zrkadla	rad
d	Priemer zrkadla kolmého priemetu zrkadla	m
C	Koncentračný pomer	-
α_D	Uhol zväzku dopadajúcich lúčov	rad
r_r	Okrajová vzdialenosť ohniska a zrkadla	m
a,b	Veľkosti strán elipsy	m
ρ_s	Vzdialenosť bodu odrazu od osy zrkadla	m
A_{im}	Plocha odrazených lúčov v ohniskovej vzdialenosti	m^2
q_s	Merný tepelný tok dopadajúci žiarením	$W.m^{-2}$
q_a	Merný tepelný tok absorbovaný v zrkadle	$W.m^{-2}$
q_r	Zrkadlom odrazený merný tepelný tok	$W.m^{-2}$
q_e	Merný tepelný tok vyemtováný zrkadlom	$W.m^{-2}$
r	Reflexná schopnosť zrkadla	-
α	Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou	$W.m^{-2}.K^{-1}$
T_A	Stredná teplota zrkadla	K
T_V	Teplota okolného vzduchu	K
σ	Stefan Boltzmannova konštanta	$W.m^{-2}K^{-4}$
ε	emisivity zrkadla	-
q_{a1}	merný tepelný tok absorbovaný v odrazovej ploche zrkadla	$W.m^{-2}$
q_{a2}	merný tepelný tok absorbovaný v skle zrkadla	$W.m^{-2}$
r_1	reflexná schopnosť skla	-
T_B	stredná teplota skla	K

q_{e1}	Uhl'ový rozdiel polohy Merný tepelný tok vyemtovany sklom strane	$W.m^{-2}$
q_{e2}	Merný tepelný tok vyemtovany zrkadlom	$W.m^{-2}$
P_{el}	Elektrický výkon systému	W
η_{sys}	Účinnosť systému	-
DNI	Priama žiarivosť	W/m^2
δ	Uhol sklonu Slnka voči rovníku	rad
ω	Hodinový uhol	rad
α_s	Solárny výškový uhol	rad
γ_s	Solárny azimutálny uhol	rad
F_A	Adhezná sila prachových častíc	Pa
P_t	Energia ktorú predáva zrkadlo do okolia	W
T	Teplota vyžarujúceho telesa	K
P_a	Energia, ktorú prijíma zrkadlo od oblohy	W
C_o	Koeficient oblačnosti	-
K	Konštanta výšky oblakov	-
T_{sky}	Teplota oblohy	K
RH	Relatívna vlhkosť vzduchu	%
T_{ok}	Teplota okolitého vzduchu	K
m	Hmotnosť zrkadla	kg
N_A	Avogadrova konštanta	-
k	Boltzmannova konštanta	$m^2.kg.s^{-2}.K^{-1}$
M	Molárna hmotnosť	kg
t	Čas ochladzovania zrkadla	s
x_r	Ravnobežka Zeme	rad
γ	Maximálny uhol dopadajúcich lúčov	rad

F_G	Gravitačná sila	N
F_O	Odporová sila	N
F_V	Vztlaková sila	N
ξ	Koeficient obtekania	-
d_p	Priemer padajúcej častice	m
g	Gravitačné zrýchlenie	$m.s^{-2}$
$\rho_{\check{c}}$	Hustota padajúcej častice	$kg.m^{-3}$
ρ_{vz}	Hustota vzduchu	$kg.m^{-3}$
v_p	Pádová rýchlosť	$m.s^{-1}$
Re	Reynoldsovo číslo	-
ν_{vz}	Dynamická viskozita vzduchu	Pa.s
v_v	Rýchlosť vetra	$m.s^{-1}$
η	tepelnú účinnosť	-
ΔT_M	rozdiel teploty v ohnisku a okolí	$^{\circ}C$
I	dopadajúca solárna radiácia	$W.m^{-2}$
K_e	faktor vlnovej dĺžky dopadajúceho žiarenia	-
K_0	faktor uhlu dopadajúcich slnečných lúčov	-
F_d^{α}	faktor akumulácie prachu	-
ΔQ	pokles energie odrazenej zaprášeným zrkadlom	$kJ.s^{-1}$
Q	energia odrazená čistým kolektorom	$kJ.s^{-1}$
dl	koeficient normalizujúci slnečné žiarenie	-