

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA v PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROTŘEDÍ
KATEDRA PROSTOROVÝCH VĚD



ANALOG MARSU NA ZEMI

Bakalářská práce

Vedoucí práce : Ing. David Moravec, Ph.D.

Vypracovala: Petra Sedláčková

2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Petra Sedláčková

Geografické informační systémy a dálkový průzkum Země v životním prostředí

Název práce

Analog Marsu na Zemi

Název anglicky

Mars Analogues on Earth

Cíle práce

Cílem práce je pomocí optických dat dálkového průzkumu nalézt oblasti na planetě Zemi, které se svou spektrální informací nejlépe shodují s povrchem planety Mars. Navazujícím cílem je pomocí dostupné literatury zjistit oblasti využívané pro testování vesmírných prototypů a jejich porovnání s vlastními výsledky.

Metodika

K dosažení cílů budou použity snímky ze satelitu MRO-CRISM na planetě Mars. Následné získání spektrálních odrazivostí proběhne v programu SNAP. Pro globální analýzu bude vytvořen skript na portále Google Earth Engine do kterého budou vstupovat snímky družice Sentinel-2 a následná vizualizace bude provedena v programu ArcGis Pro.

Bude provedena literární rešerše dané problematiky a aktuálně využívaných oblastí jež budou následně porovnány.

Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran

Klíčová slova

Mars, dálkový průzkum, Google Earth Engine

Doporučené zdroje informací

Andfield, J. L. (2002) 'Global mineral distributions on Mars', *Journal of Geophysical Research E: Planets*, 107(6), pp. 9–1. doi: 10.1029/2001je001510.

MARTIN, Peter E., et al. Studies of a lacustrine-volcanic Mars analog field site with Mars-2020-like instruments. *Earth and Space Science*, 2020, 7.2: e2019EA000720.

Tanaka, K. L., Robbins, S. J., Fortezzo, C. M., Skinner, J. A., & Hare, T. M. (2014). The digital global geologic map of Mars: Chronostratigraphic ages, topographic and crater morphologic characteristics, and updated resurfacing history. *Planetary and Space Science*, 95, 11–24.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2013.03.006>

Volpe, Richard. "Navigation results from desert field tests of the Rocky 7 Mars rover prototype." *The International Journal of Robotics Research* 18.7 (1999): 669-683.

XIAO, Long, et al. A new terrestrial analogue site for Mars research: the Qaidam Basin, Tibetan Plateau (NW China). *Earth-Science Reviews*, 2017, 164: 84-101.

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. David Moravec, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 3. 3. 2023

doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 6. 3. 2023

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 16. 03. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Analog Marsu na Zemi vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědoma, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědoma, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne 30. 3. 2023

.....

Petra Sedláčková

Poděkování

Především bych chtěla poděkovat Ing. Davidu Moravcovi Ph.D. za cenné rady, pomoc a trpělivost při tvorbě této práce. Dále děkuji mé rodině a příteli za podporu během celého studia.

Abstrakt

Znalost planetárních analogů na Zemi je významnou součástí výzkumu cizích planet. Díky těmto oblastem je možné testovat funkčnost vesmírných prototypů dříve, než budou vypraveny do kosmického prostoru. Tento postup je důležitý z důvodu finanční náročnosti vesmírného výzkumu a zároveň se tak celý proces značně urychluje.

V této práci byla za pomoci optických satelitních snímků nalezena místa podobná planetě Mars. Reprezentativní hodnoty spektrálních odrazivostí získaných z hyperspektrálních snímků satelitu Mars Reconnaissance Orbiter z planety Mars byly přepočteny a porovnány s hodnotami odrazivostí naměřenými satelitem Sentinel-2A na planetě Zemi. Takto byly nalezeny oblasti na Zemi, které se nejlépe podobají povrchu planety Mars. Ukázalo se, že mezi tyto oblasti patří téměř celá Austrálie, dále oblast jihozápadní části USA či různá místa v Africe, například oblast Jihoafrické republiky, Súdánu a Etiopie či Maroka.

Srovnáním vlastních výsledků s aktuálně využívanými oblastmi pro testování vesmírných prototypů vyšlo najevo, že metoda porovnávání spektrálních informací je účinná, nicméně je důležité dbát na správné zvolení vstupních dat tak, aby povrch nepokrýval sníh či hustá vegetace.

Pomocí metody porovnávání spektrálních informací lze poměrně snadno a rychle zjistit, které oblasti jsou vhodné jako planetární analogy, a umožňuje zaměřit pozornost na místa určená k bližšímu zkoumání kontaktními metodami.

Klíčová slova:

Mars, dálkový průzkum, Google Earth Engine

Abstract

Knowledge of planetary analogues on Earth is part of research on alien planets. Thanks to these areas, it is possible to test the functionality of space prototypes before they are sent into space. This procedure is important because of the financial demands of space research, and at the same time the whole process is greatly accelerated.

In the work, with the help of optical images, places similar to the planet Mars were found. Representative values of spectral reflectances obtained from hyperspectral images of Mars Reconnaissance Orbiter satellites from the planet Mars were converted and compared with reflectance values measured by Sentinel-2A satellites on planet Earth. This is how the areas on Earth that best resemble the surface of Mars have been found. It is said that these areas include almost all of Australia, the area of the southwestern part of the USA or various places in Africa, for example the area of the Republic of South Africa, Sudan and Ethiopia or Morocco.

Comparison of own results with areas currently used for testing space prototypes revealed that the method of comparing spectral information is effective, however, it is important to pay attention to the correct selection of input data so that the surface is not covered by snow or dense vegetation.

Using the method of comparing spectral information, it is relatively easy and quick to find out which areas are suitable as planetary analogues and allows to focus attention on the places designated for closer examination of contact methods.

Key words:

Mars, Remote Sensing, Google Earth Engine,

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Cíle práce.....	2
3. Literární rešerše.....	3
3.1 Dálkový průzkum Země neboli Remote Sensing	3
3.1.1 Stručná historie DPZ	3
3.1.2 Dálkový průzkum Země v geologii.....	4
3.1.3 Využití vlnových délek, hyperspektrální senzory	4
3.2 Mars	6
3.2.1 (Dálkový) průzkum Marsu	6
3.2.2 Geologie na Marsu	7
3.3 Analogická místa pro testování prototypů.....	9
4. Metodika.....	15
4.1 Preprocessing a příprava dat.....	15
4.1.1 Rozdělení do oblastí	15
4.1.2 Vstupní data.....	15
4.1.3 Zisk spektrální informace	16
4.1.4 Přepočet na data Sentinel-2A	17
4.2 Google Earth Engine.....	19
4.2.1 Výpočet RMSE – globální analýza	19
4.2.2 Mechanismus skriptu.....	20
5. Výsledky.....	23
5.1 Oblasti spektrální odrazivosti nejpodobnější povrchu Marsu.....	23
5.2 Porovnání spektrálních odrazivosti v oblastech využívaných pro testování prototypů.....	27
6. Diskuse.....	28
7. Závěr.....	30
8. Seznam literatury.....	31

1. Úvod

Díky technologickému vývoji posledních desetiletí se vesmírný průmysl dostal do popředí zájmu a v dnešní době už považujeme za samozřejmost, že se na Zemské orbitě nachází tisíce umělých družic. Rakety s cílem probádat další část vesmírného prostoru startují čím dál častěji a rovery či jiné přístroje zanechávají svoji stopu i na povrchu planet, které byly člověkem do té doby nedotčené.

Jedním z významných kosmických cílů je aktuálně planeta Mars. Na jeho oběžných drahách dnes obíhají desítky družic, které zachycují nové neprobádané objekty. I na jeho povrch již byla dopravena řada roverů a dalších nástrojů, které neustále sbírají nová data a informace, které by mohly poodhalit další tajemství tzv. červené planety.

Bohužel ne vždy končí mise úspěchem, jako tomu bylo například u nástroje In-Sight HP3, přezdívaného jednoduše „krtek“. Ten byl v roce 2018 dopraven na své místo bez komplikací, když však začal konat svou práci, nastal problém. Jeho cílem bylo vytvořit 5 metrů hluboký vrt, do kterého měla být umístěna čidla tepelných senzorů. Naneštěstí se po krátké době ukázalo, že tohoto cíle nebude konstrukčně schopen. Po dlouhých dvou letech snažení, kdy se podařilo dosáhnout pouze hloubky 40 centimetrů, byl projekt zrušen. (Spohn et al., 2022) Je zjevné, že finanční ztráty jsou v těchto případech extrémní.

Také z těchto důvodů je důležité znát na Zemi analogická místa, která geomorfologicky připomínají povrch Marsu a kde je možné prototypy řádně otestovat a ušetřit tak drahocenný čas i finanční prostředky. Jednou z možností, jak takové oblasti relativně jednoduše najít v globálním měřítku, je využít data dálkového průzkumu a porovnat spektrální informace povrchů obou planet.

2. Cíle práce

Hlavním cílem je dle dostupných optických dat dálkového průzkumu porovnat spektrální odrazivosti povrchu planety Mars s odrazivostmi povrchu Země. Z těchto informací bude možné určit potenciálně vhodná, Marsu analogická místa na Zemi, která mohou sloužit k výzkumu či testování prototypů přístrojů pro budoucí mise.

Navazujícím cílem je pomocí dostupné literatury zjistit, která místa jsou pro výzkum aktuálně využívána a porovnat je s vlastními výsledky.

3. Literární rešerše

3.1 Dálkový průzkum Země neboli Remote Sensing

Dle Waghmare & Suryawanshi (2017) „*dálkový průzkum doslova znamená získávání informace o objektu, oblasti nebo jevu, aniž by s ním přišli do přímého kontaktu.*“ Je to spíše obecná definice, která se novodobému vnímání dálkového průzkumu jako metody získávání obrazových informací o povrchu Země či jiných těles za pomoci letadel, satelitů či jiných nosičů blíží jen okrajově. Technologicky by se dálkový průzkum dal v nejširším smyslu označit jako metoda detekce a záznamu elektromagnetického záření. Toto záření může pocházet přímo ze zdrojové oblasti, být složkou energie z jiného zdroje, či zdroje samotného senzoru, který tuto energii snímá. (Waghmare & Suryawanshi, 2017)

3.1.1 Stručná historie DPZ

Když byla v roce 1858 ve Francii pořízena první fotografie z horkovzdušného balónu, jen málokdo mohl předpovídat, co se na poli dálkového průzkumu Země v následujícím století odehraje. O 50 let později, v roce 1909, vznikla první fotografie pořízená z letadla. Obě světové války pochopitelně tomuto pokroku velmi přispěly. (Waghmare & Suryawanshi, 2017) Markantně se zvýšila technologická a konstrukční schopnost senzorů i nosných strojů, čímž došlo ke zkvalitnění obrazových výstupů, které se postupem času dostaly od černobílých skvrn k reálnému odrazu reality s uspokojivým obrazovým rozlišením.

Meziválečná léta přinesla nové znalosti týkající se elektromagnetického spektra, respektive vlnových délek. Vynalezení senzorů, které dokázaly zachytit záření ve vzdálené viditelné části spektra a techniky, jež dokázaly ukrytý potenciál naplno využít, posunulo dálkový průzkum od čistě mapovacích aktivit k využití v různorodých vědních oblastech. (Campbell J. B. & Wynne R. H., 2011)

Po pouhých sto letech od pořízení první fotografie zemského povrchu z výšky v řádu desítek metrů byla po několika neúspěšných pokusech v roce 1960 ve Spojených státech amerických vyvinuta a na oběžnou dráhu vypuštěna první průzkumná družice. Ta měla za úkol soustavně mapovat nepřátelské území během studené války. V této době byl také prvně použit termín „remote sensing“, v českém jazyce (možná trochu nešikovně vzhledem k dnešním technologickým možnostem, co se planetárních věd týče) označení „Dálkový průzkum Země“. (Campbell J. B. & Wynne R. H., 2011; Kropáček et al., 2020)

Od této chvíle získala celá oblast dálkového průzkumu úplně novou podobu. Rakety se satelity startovaly stále častěji a po roce 1965 se vydala na svou cestu družice Mariner 4, která měla za cíl prozkoumat planetu Mars. Do dnešní doby se markantně zvedl nejen počet družic na oběžných drahách naší i sousedních planet, ale také kvalita získaných dat. (Rodriguez Sanchez-Vahamonde et al., 2010)

Dálkový průzkum je aktuálně hojně využívanou metodou získávání informací v různých vědních oborech, ať už jde o kvalitu životního prostředí, mapování zalesnění, změny v ledovcových pokryvech, rozložení vodní masy ale třeba i pokryv (nejen) zemského povrchu a jeho geologická skladba.

3.1.2 Dálkový průzkum Země v geologii

Slovo geologie v doslovném překladu z řečtiny znamená studium planety Země. Oxfordský slovník věd o Zemi tuto vědu popisuje jako „*studium kompozice, struktur a historie planety Země*“. (Allaby, 2008)

Bishop a kol. (2018) označují geologický dálkový průzkum Země jako „*studium, vzhledem k rozsahu práce v planetární vědě, nejen Zemských geologických rysů, povrchů a jejich interakcí s elektromagnetickým spektrem pomocí technologií které nejsou v přímém kontaktu s prvky zájmu*“. Jedná se tedy o použití různých vlnových délek elektromagnetického spektra tak, aby bylo možné rozlišit drobné nuance v odrazivosti jednotlivých materiálů nacházejících se na zemském povrchu. Je zjevné, že má tato metoda velmi vysoké uplatnění ve zkoumání rozsáhlých oblastí, potažmo i celých planet jež jsou jinými kontaktními metodami téměř nedosažitelné.

Tato metoda výzkumu se ukazuje jako nejspolehlivější v aridních a semiaridních oblastech bez vegetace, která by bránila pohledu senzoru přímo na povrch terénu. (Sedlák P, 2007)

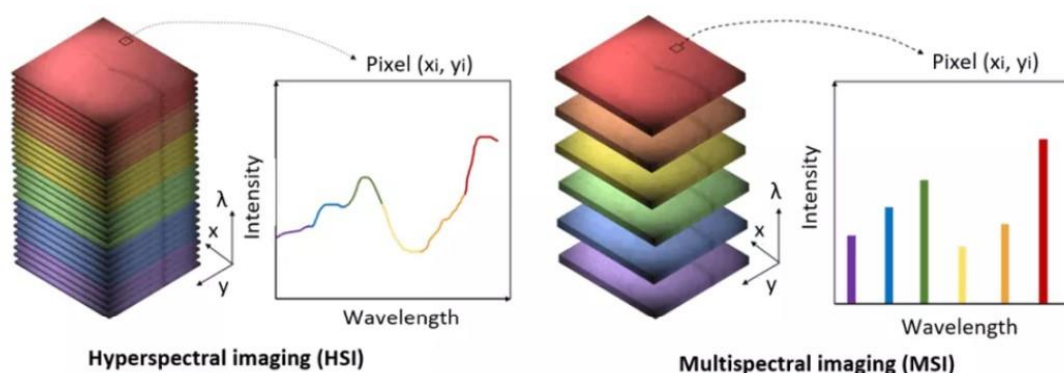
3.1.3 Využití vlnových délek, hyperspektrální senzory

Každá hornina je složena z několika minerálů. Každý minerál ale zároveň obsahuje větší množství prvků v různých poměrech. Různé prvky reagují odlišně na různé vlnové délky, proto lze odlišit jednotlivé materiály mezi sebou a pokročilou analýzou zjistit také zastoupení jednotlivých minerálů v hornině. (Sedlák P, 2007)

Pro rozlišení drobných rozdílů mezi odrazivostmi je zapotřebí použít senzor, který snímá ve více pásmech. Multispektrální senzory využívají nižší desítky pásem. Všechny tyto senzory sice zabírají zhruba stejný rozsah vlnových délek daný spektrální propustností atmosféry (tedy od viditelné části spektra, přes blízké infračervené až do oblastí krátkovlnného infračerveného záření), ale šířka spektrálních pásů je v rozsahu desítek a výjimečně až stovek nanometrů. Podle citlivostí senzoru

na vlnové délky, které dané pásmo pokrývá je vypočtena jedna souhrnná hodnota odrazivosti. Z tohoto důvodu nejsou multispektrální senzory schopné rozlišit drobné změny na úrovni desítek nanometrů. Na druhou stranu hyperspektrální senzory jsou charakteristické vysokým počtem pásem. Jejich minimální počet je 200, využívají se však i senzory s vyšším počtem pásem. Každé pásmo přitom snímá rozsah jen kolem 10 nanometrů a změny se ve výsledných hodnotách projeví markantněji. (Campbell J. B. & Wynne R. H., 2011)

Srovnání hyperspektrálních a multispektrálních dat je vyobrazeno na obrázku č. 1.

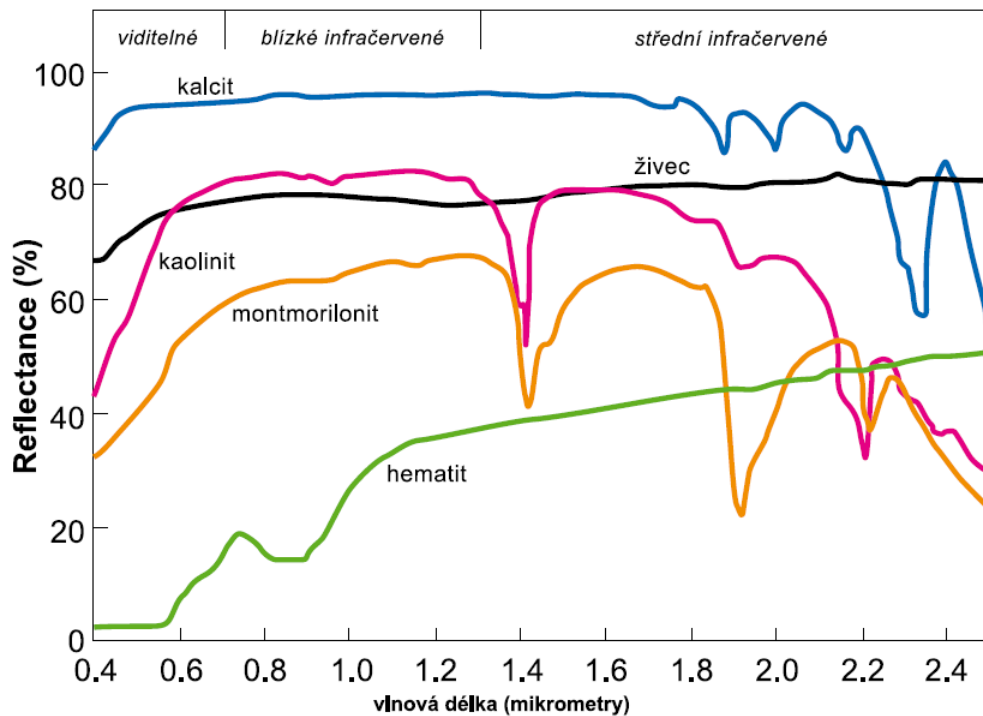


Obr. 1 - Porovnání hyperspektrálních a multispektrálních dat. (Pyrostech,2023)

Díky těmto vlastnostem hyperspektrálních senzorů geologové využívají spektrální knihovny. Jsou to často otevřené databáze vládních agentur či jiných organizací, které obsahují vzorky spektrálních odrazivostí různých materiálů, opatřených o metadata např. kde byl daný vzorek získán, kdy, za jakých podmínek a další určující informace. Porovnáním se satelitními snímky určité oblasti lze získat informaci o přítomnosti daného materiálu. (Campbell J. B. & Wynne R. H., 2011)

Geologický dálkový průzkum Země se nejčastěji používá pro mapování výskytu minerálů, a jejich kvantifikaci na zemském povrchu. Odrazivost geologického materiálu ve viditelné části spektra a blízkých infračervených vlnových délkách závisí především na přítomnosti iontů přechodných kovů (např. železo, nikl, kobalt a další), kdy se ukazují rozdílné absorpční vlastnosti v důsledku elektromagnetických procesů. Na druhou stranu přítomnost či nepřítomnost vody, hydroxylů, uhličitánů či síranů se více projevuje v krátkovlnných infračervených částech spektra. (van der Meer et al., 2012)

Ilustrace odrazivostí různých minerálů je přiblížena na následujícím obrázku č. 2.



Obr. 2 - Ilustrace rozdílných odrazivostí minerálů. (Sedlák P, 2007)

3.2 Mars

Mars je čtvrtá planeta naší sluneční soustavy, velikostí přibližně poloviční planetě Zemi. Stejně jako naše domovská planeta je i tato mírně zploštělá na pólech a má podobný sklon osy otáčení. Má pevné jádro a je považována za jednodeskovou planetu, což znamená, že nevykazuje známky deskové tektoniky. Průměrné teploty se zde pohybují hluboko pod bodem mrazu. Gravitace je zde asi třetinová oproti gravitaci na Zemi a obal celé planety tvoří jen velmi tenká vrstva atmosféry. Na celé planetě jsou markantní výškové rozdíly. Nejnižší místo se nachází v pánvi Hellas Planitia a je mu udávána hodnota -7 550 m. Nejvyšším bodem planety je sopka Olympus Mons se svou výškou 22 640 m. (Rodriguez Sanchez-Vahamonde et al., 2010)

3.2.1 (Dálkový) průzkum Marsu

Zvýšené pozornosti se Marsu začalo dostávat v sedmdesátých letech minulého století. Jako první podnikla cestu k této planetě americká družice Mariner 4 v roce 1965 a přinesla prvních 22 obrázků povrchu. V jejích stopách se vypravilo ještě několik družic Mariner. Ta s pořadovým číslem 9 se stala prvním umělým satelitem, a to o pouhý týden dříve než sovětský satelit Mars 2. Mariner 9 pořídila 7 300 snímků povrchu a nabídla tak nové detailní pohledy na vulkány, krátery a jiné povrchové jevy na Marsu. Později doplnily práci tohoto satelitu další dva, Viking 1 a 2. Mars Global Surveyor vynesl na oběžnou dráhu laserový altimetr MOLA, díky kterému dnes známe přesný model povrchu. V roce 2004 dosedly na jeho povrch dva rovery NASA. První,

vozítka Spirit, operovalo v oblasti Gusev Crater, druhé, Opportunity, na Meridiani Planum. O dva roky později se na oběžnou dráhu připojila čtveřice satelitů Mars Reconnaissance Orbiter s hyperspektrálními snímači i radarem. (Rodriguez Sanchez-Vahamonde et al., 2010)

3.2.2 Geologie na Marsu

Nejvýznamnější roli ve formování planety zastala vulkanická činnost, která byla poměrně aktivní až do doby před několika desítkami milionů let. Ta by se dala mnohým přirovnat k té, kterou známe ze Země ale z důvodu nižší gravitace a tlaku vzduchu jsou zdejší lávové proudy rozsáhlejší a samotné sopky vyšší. Další významnou roli měly četné dopady meteoritů a jiných kosmických těles. Morfologie povrchu tak jak ji známe dnes je hojně ovlivněná dřívějšími říčními, ledovcovými i větrnými činnostmi. (Rodriguez Sanchez-Vahamonde et al., 2010)

Tak jako na planetě Zemi se ani zde žádný minerál nevyskytuje samostatně, ale vždy jako skupina ve formě horniny a tím, že je celá planeta převážně vulkanického původu, tak zde dominují především magmatické minerály. (Bandfield, 2002) Horniny jsou zde převážně čedičové či andezitové. Stejně jako na povrchu ostatních pevných planet zde mají velké zastoupení křemičitany např. olivíny či plagioklasy. Hojně se zde vyskytují také silikáty a jíly. Přítomnost oxidů železa zde byla v minulosti předpokládána už z důvodu barvy povrchu. Tato domněnka se s nasbíranými vzorky z roverů potvrdila. Pozorovány byly různé vzorky hematitu či goetitu. Mezi další významně zastoupené minerály se řadí síra a sírany. (Chevrier & Mathé, 2007)

Hlavní historická období

Historie planety se dělí na tři základní období. Období označované jako Noachian se datuje od doby před 4,65 – 3,7 miliardami let. Hesperian před 3,7 - 3 miliardami let a nejmladší období Amazonian trvá do přítomnosti. (Rodriguez Sanchez-Vahamonde et al., 2010) V některých případech je možné se setkat rozdělením období na brzké, střední a pozdní pro přesnější určení. (Tanaka et al., 2014)

Noachian

Toto období je charakteristické četnými dopady meteoritů. Zároveň byla planeta Mars v této době velmi vulkanicky aktivní, a to převážně v oblasti Tharsis, (viz obrázek 3.), kde se mimo jiné vytvořila sopka Olympus Mons, a také v dalších vrchovinových oblastech. Silný vliv měly také fluvialní procesy na tvorbu údolní sítě. Během raného období Noachian byly vytvořeny pánve Hellas a Isidis a ukazuje se, že se v této době formovaly jílové materiály, které vznikají pouze pokud je k dispozici

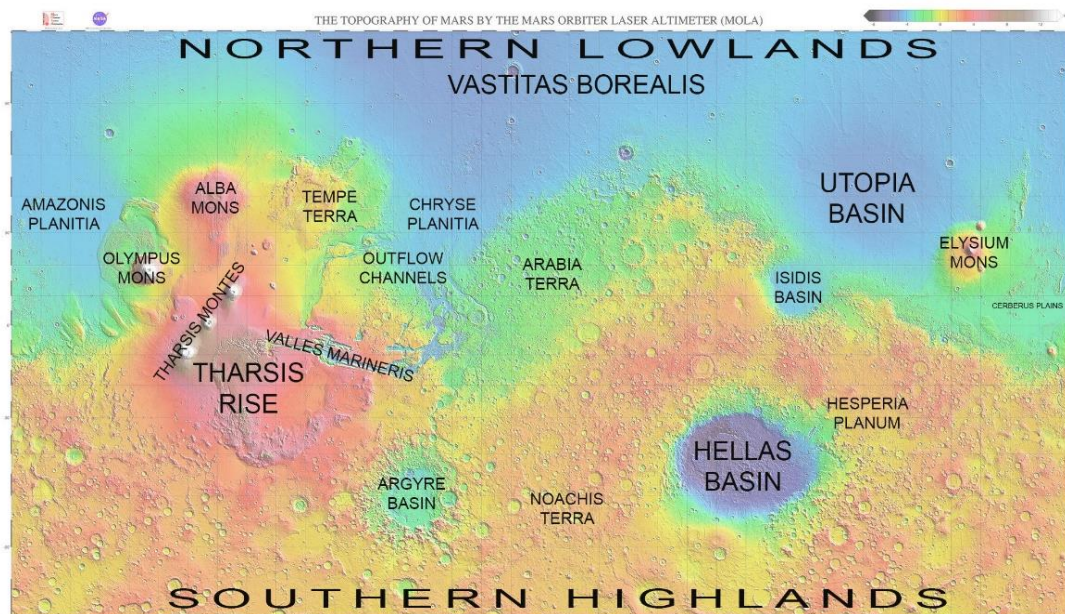
velké množství vody. (Chevrier & Mathé, 2007; Rodriguez Sanchez-Vahamonde et al., 2010)

Hesperian

Charakteristické pro tuto dobu je menší množství těles dopadajících na povrch Marsu a také nižší intenzita fluviální aktivity. Vulkanismus se rozmohl převážně v nižších oblastech. Předpokládá se, že v této době zmizela povrchová voda, která je nyní pravděpodobně uložena v zemi jako permafrost. Ještě před tím byl však nejspíše za pomoci vody vytvořen poměrně chaotický terén Valles Marineris. Z tohoto období podle posledních výzkumů pocházejí četná sulfátová ložiska, která se nachází především právě v oblasti Valles Marineris. (Rodriguez Sanchez-Vahamonde et al., 2010)

Amazonian

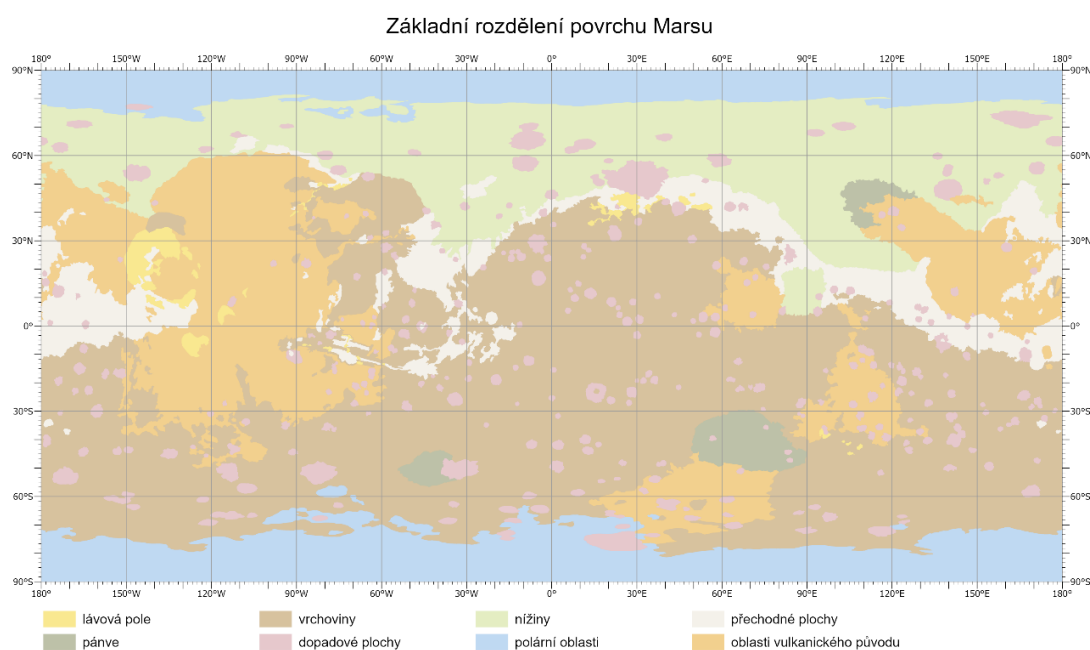
Nejnovější a zároveň nejdelší období je významné svými projevy v severní, nížinové části planety a je charakteristické rozsáhlou povrchovou obnovou. Pozdní vulkanismus se neprojevoval v tak významné míře jako v předchozích obdobích, nicméně spolu s eolickými procesy vymazal spoustu dřívějších útvarů. Nové útvary vznikaly převážně glaciálními procesy. Nastala také významná povrchová změna tvorbou bezvodých oxidů železa, jež mají za následek červené zbarvení povrchu, tak jak je dnes pro Mars charakteristické. (Rodriguez Sanchez-Vahamonde et al., 2010)



Obr. 3 - Topografie povrchu Marsu. (The Planetary Society, 2023)

Hlavní rozdělení povrchu

Povrch Marsu se dá zjednodušeně rozdělit na osm základních typů znázorněných na obrázku č. 4. Celou jižní polokouli pokrývají vrchoviny, které se tvořily nejdříve v období Noachian. Severní polokoule je nížinatá a předpokládá se, že se její povrch formoval v době Hesperian. V okolí rovníku se nachází dvě hlavní oblasti vulkanického původu, na něž navazují lávová pole. Na pólech se v době Amazonian vytvořily polární oblasti a celá planeta je doslova poseta krátery dopadových ploch z různých období historie planety. Zásadní jsou také tři pánve, z nichž dvě se nachází v jižní vrchovinové části. Posledním typem jsou oblasti přechodné. (Tanaka et al., 2014)



Obr. 4 - Základní rozdělení povrchu Marsu.

3.3 Analogická místa pro testování prototypů

Analogická místa na Zemi slouží především k pochopení geologických procesů, jež na Marsu fungují. Zároveň však významně přispívají k technologickému pokroku a vylepšování techniky, která je v těchto místech testována pro budoucí využití právě na této planetě. (Rodriguez Sanchez-Vahamonde et al., 2010) Zde je výčet některých z nich, přičemž jejich geografické umístění je znázorněno na obrázku číslo 5.



Obr. 5 - Umístění oblastí aktuálně využívaných k testování prototypů.

Mohavská poušť, Kalifornie

V roce 1999 byl v této poušti testován prototyp Mars roveru Rocky 7 společnosti NASA. Rocky 7 byl navržen na zkoumání povrchu a v této oblasti byly testovány především jeho navigační schopnosti na větších vzdálenostech. Test proběhl v místech bývalých lávových proudů Lavic Lake na základně Twenty nine Palms Marine Corps. (Volpe, 1999)

O téměř dvacet let později byl také v Mohavské poušti testován Mars 2020 rover. Konkrétně zde byla testována funkčnost dvou nástrojů dálkového průzkumu Mastcam-Z a SuperCam, a dva přístroje na mikroskopická pozorování SHERLOC a PIXL. Jako konkrétní oblast byla vybrána pánev Tecopa (ilustrovaná na obrázku č. 6) která svým geologickým složením vytváří relevantní analogické místo pro oblast zvolenou k přistání, kterou se mělo stát jezero Crater. (Martin et al., 2020)



Obr. 6 – Pánev Tecopa, Kalifornie , USA. (Expedia, 2023)

Cchajdamská pánev, Tibetská náhorní plošina, Čína

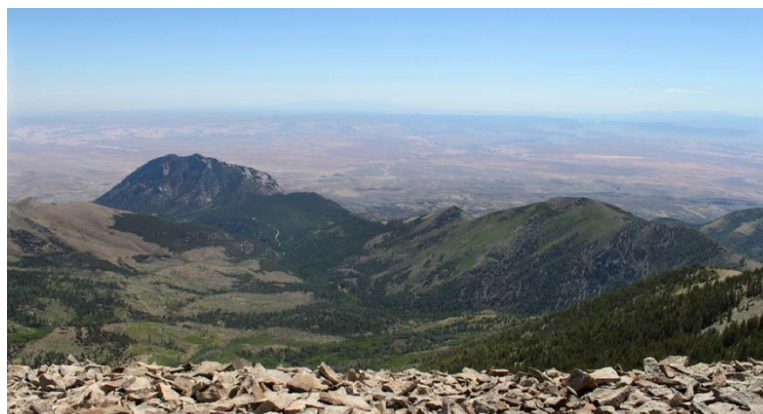
Dle Xiao a kol. (2017) je Tibetská náhorní plošina konkrétně v místě pánve Cchajdam ideálním analogickým místem hned z několika důvodů. Je to nejvyšší a jedna z nejsušších a největších pouští na Zemi. Jelikož se nachází ve vysoké nadmořské výšce (okolo 2 800 m n. m.), panují zde velmi nízké teploty a UV záření je zde velmi silné. Jedná se o potřebné faktory pro nasimulování podmínek na Marsu. Vzhledem ke své minulosti, kdy byla oblast pod vlivem vodních procesů a nyníšším velmi suchým podmínkám, kdy oblast ovlivňují silné eolické děje se lze domnívat, že je oblast jednou z nejlepších analogických oblastí na Zemi. Lokalitu ilustruje obrázek č. 7.



Obr. 7 - Cchajdamská pánev. (OneEarth, 2023)

Henry Mountains Basin, Hanksville, Utah

V letech 2015 a 2016 zde byly testovány dva prototypy. První, rover MESR kanadské vesmírné agentury, byl zkoumán při simulovaném přistání. Druhý, prototyp ExoMars 2020, tentokrát britské vesmírné agentury, byl podroben zkouškám přístrojů zkoumajících povrch. Toto místo je hojně využíváno pro jeho suché a chladné klima, povrch bez vegetace a vhodné podloží, které je tvořeno minerály vyskytujícími se na povrchu Marsu. Celá oblast je navíc jen málo ovlivněná lidskou činností. (Tornabene et al., 2019) Oblast přibližuje obrázek č.8.



Obr. 8 – Oblast Henry Mountains v Utahu. (Capitol reef, 2023)

Haughtonův kráter, ostrov Devon, Severní Kanada

Ve zdejších arktických podmínkách byla v roce 2013 testována vrtací soustava LITA společnosti NASA. Byla zde zjišťována schopnost prototypu získávat vzorky půdy z větších hloubek pod povrchem v terénu, který je zmrzlý stejně tak, jako se očekává od povrchu Marsu. (Glass et al., 2015) Geomorfologii tohoto místa přibližuje obrázek č. 9.



Obr. 9 – Haughtonův kráter na ostrově Devon. (Dazed, 2023)

Rio Tinto, Jižní Španělsko

Oblast řeky Rio Tinto je extrémně bohatá na železo a síru, což způsobuje její nezvyklé zbarvení (viz obrázek č. 10). Je to oblast s extrémně nízkým pH. Byla zde prokázána přítomnost jarositu a příbuzných sulfátů které identifikoval rover Opportunity při své práci na Marsu v oblasti Meridiani Planum. Toto místo se na seznam analogických oblastí dostalo z důvodu snahy o porozumění chování organismů a jejich možnosti přežití v tak extrémních podmínkách, kterými řeka disponuje. (Edwards et al., 2007)



Obr. 10 – Řeka Rio Tinto v jižním Španělsku. (Rove.me, 2023)

Region Arkaroola, jižní Austrálie

Austrálie jako analogická oblast pro planetu Mars vyvstane na mysl pravděpodobně jako první téměř každému. Díky hojnosti oxidovaných železitých materiálů v půdě má povrch obdobně načervenalou barvu. Zároveň je zde viditelná přítomnost podobných procesů a terénních útvarů, které podobnost podporují. Jedním takovým místem je region Arkaroola (přiblížen na obrázku č. 11). Tato oblast je velmi rozlehlá, s rozdílnými typy terénu. Lze tu najít pouště a duny, ale i rovné planiny. Toto místo bylo vybráno například pro testování obleku MarsSkin v roce 2004. Zkoumány byly vlastnosti obleku a jeho chování při simulovaných činnostech sběru materiálů, i při běžném pohybu. (West et al., 2010)



Obr. 11 – Oblast regionu Arkaroola. (look AND see, 2023)

Region Pilbara, severozápadní Austrálie

Tato oblast je dalším zástupcem z australských analogů. Region Pilbara se považuje za jeden z nejstarších na naší planetě s velmi dobře zachovanými útvary po sedimentačních a vulkanických procesech. Opět je to oblast dobře dostupná, rozlehlá a téměř bez pokryvu vegetací. V minulosti zde bylo testováno již několik prototypů různých přístrojů určených pro výzkum na Marsu. (West et al., 2010)

Mc. Murdo Dry Valleys, Antarktida

Na západním pobřeží Rossova moře v Antarktadě se rozkládá oblast údolí, kde se podle dostupných informací na jako jediném místě na světě vyskytuje suchý permafrost. V této polární poušti v cca 1500 m n. m. klesají teploty hluboko pod bod mrazu a jen málokdy se pohybují v blízkosti nuly. Zdejší geologický materiál je vystaven extrémním podmínkám, a proto je toto místo vyhledáváno pro zkoumání vlivů a jejich dopadů na zdejší horniny. Zároveň průzkumy z roveru Mars Phoenix,

který na Marsu operoval v polární oblasti, potvrzují shodu se zdejšími geomorfologickými jevy. (Heldmann et al., 2013) Oblast přibližuje obrázek č. 12.



Obr. 12 -Údolní oblast Mc. Murdo na Antarktidě. (Allurning world, 2023)

Ojos del Salado, Altiplano, poušť Atacama, Chile

Tato vysokohorská oblast v jižní Americe je dalším ze zástupců extrémních stanovišť na Zemi. Ojos del Salado (viz obrázek č. 13) je nyní neaktivní sopka dosahující výšky 6893 m n.m., což ji činí nejvyšší na světě. V této výšce je silné UV záření. Převládá zde poušť bez vegetace a zeminy, skalnaté plochy, občasně se vyskytují slaná jezera a ve vyšších polohách lze nalézt permafrost a místy i zbytky ledovce. Ve výšce nad 6500 m n. m. se vyskytuje sněhová pokrývka téměř celoročně. Je to převážně suchá oblast, nicméně v důsledku uvolnění vulkanického tepla může dojít k roztátí sněhu a zaplavení.

V minulosti bylo na tomto Marsu analogickém místě testováno již několik prototypů, například přístroje SAM sloužící k analýze vzorků na roveru Curiosity nebo instrument TEGA přistávacího modulu Phoenix. (Kereszturi et al., 2022)



Obr. 13 - Sopka Ojos del Salado. (Andescontact, 2023)

4. Metodika

Metodická část popisuje postup analýzy porovnávání spektrálních odrazivostí obou planet a nalezení míst na Zemi, jež se svou spektrální informací nejlépe podobají té na Marsu.

4.1 Preprocessing a příprava dat

Pro zachování relativně nízké datové náročnosti a zároveň plného pokryvu planety Mars bylo vybráno 7 geografických oblastí. Z každé této oblasti bylo staženo 10 snímků a z každého snímku vybráno deset náhodných bodů. Z těchto bodů byly vytaženy spektrální křivky, které byly zaneseny do souhrnné tabulky a následně zpracovávány.

4.1.1 Rozdělení do oblastí

Povrch Marsu se dělí na osm základních oblastí. V okolí pólů se nacházejí polární oblasti, téměř celou jižní polokouli pokrývá vrchovina a nachází se zde také tři pánve. Na severní polokouli dominují nížiny, zároveň je zde mnohem více oblastí sopečného původu a v jejich okolí oblasti lávových polí. Po celé ploše planety se objevují krátery dopadových ploch a oblasti přechodné mezi jednotlivými oblastmi. (Tanaka et al., 2014)

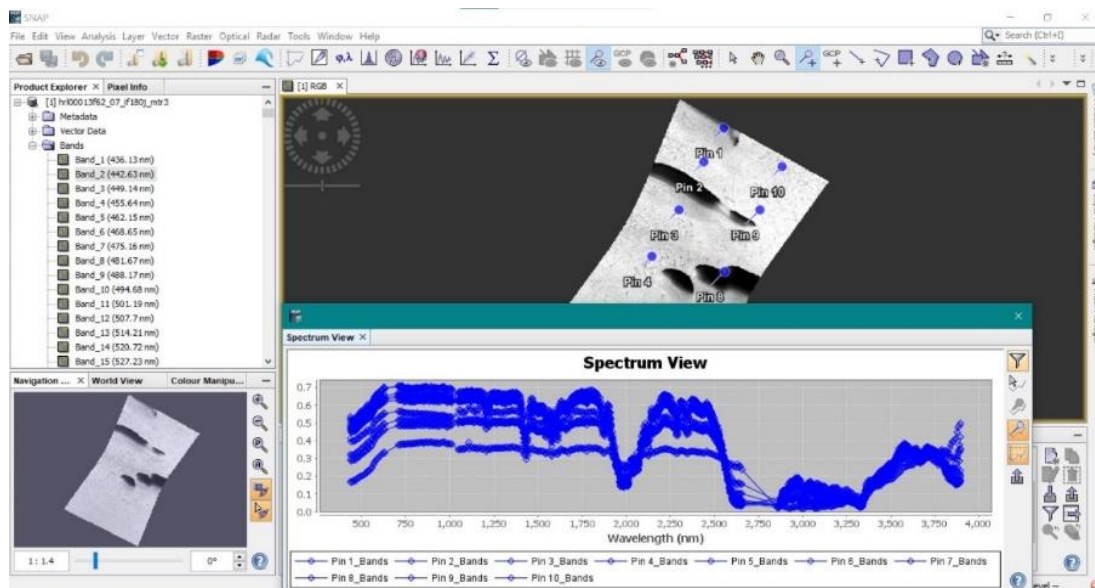
4.1.2 Vstupní data

Pro každou uvedenou oblast (viz příloha 1) kromě přechodných ploch bylo staženo 10 snímků. Všechny snímky z planety Mars byly získány z portálu Mars Orbital Data Explorer. Snímky získala zatím poslední mise NASA, Mars Reconnaissance Orbiter a to konkrétně Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (MRO-CRISM).

CRISM je obrazový spektrometr který pokrývá vlnové délky od 383 nm do 3960 nm. S šířkou pásma 6,6 nm jde o hyperspektrální senzor vhodný k pozorování mineralogického pokryvu povrchu Marsu. Systém byl zaveden pro výzkum geologie, ale i klimatu a prostředí povrchu Marsu. (Murchie et al., 2004)

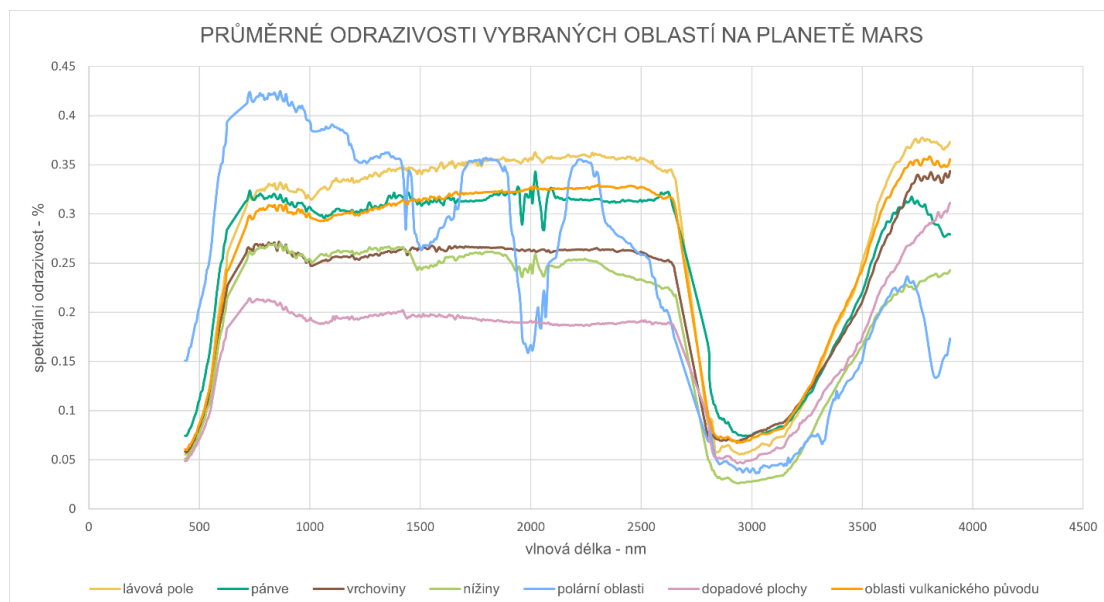
4.1.3 Získ spektrální informace

V programu SNAP (viz obrázek č. 14) bylo z každého snímku vybráno 10 rovnoměrně rozmístěných bodů, ze kterých byly získány křivky spektrální informace.



Obr. 14 - Náhled získávání spektrální informace v programu SNAP.

Tyto spektrální křivky byly zaneseny do tabulky, kde byly následně odstraněny všechny chybové hodnoty, tj. hodnoty mimo rozsah 0-1. Ze zbylých hodnot vznikla použitím mediánu výsledná křivka reprezentativní odrazivosti pro každou geografickou oblast na planetě Mars zobrazená v grafu č.1.



Graf 1 - Výsledné odrazivosti základních oblastí na Marsu.

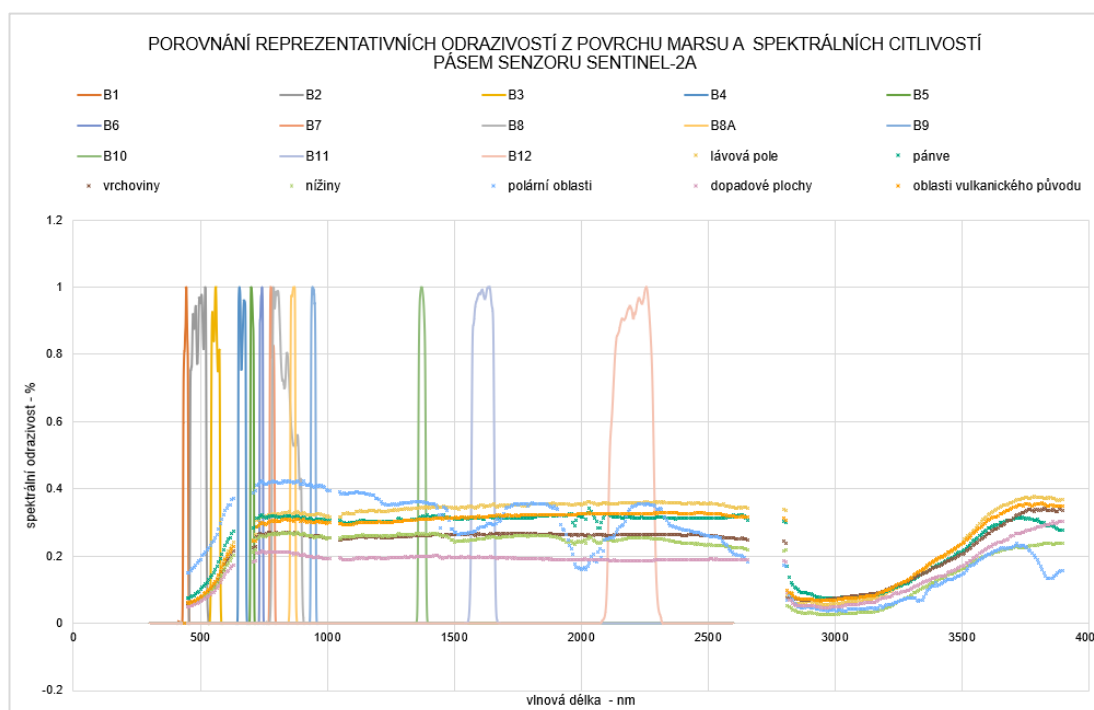
Při výpočtu reprezentativních odrazivostí byly navíc spočítány směrodatné odchylky, které poukazují na rozdíly v datech. Z těchto odchylek je vidět, že největší diverzita v odrazivostech panuje v polárních oblastech. Na druhou stranu odrazivosti v oblastech vrchoviny ukazují nejbližší shodu. (viz tabulka č. 1)

oblast	průměrné směrodatné odchylky
vrchoviny	0.047744
pánve	0.051557
lávová pole	0.065001
nížiny	0.065723
dopadové plochy	0.067840
vulkanické oblasti	0.078871
polární oblasti	0.100898

Tabulka 1 - Směrodatné odchylky z dat spektrálních odrazivostí pro jednotlivé oblasti.

4.1.4 Přepočítání na data Sentinel-2A

Aby mohly být hodnoty reprezentativních odrazivostí z Marsu porovnány s odrazivostmi z povrchu planety Země, museli být nejprve přepočítány. Na oběžné dráze naší domovské planety byla vybrána družice Sentinel-2A z několika důvodů. Má globální pokrytí, jež je požadováno pro zjištění globální informace, data jsou volně dostupná a má více pásem než druhá volba družice ze skupiny Landsat. Porovnání rozsahů pásem a jejich spektrálních citlivostí s vlastními daty je zobrazeno v grafu č. 2. Vlnové délky pásem z dat Sentinel potom shrnuje tabulka č. 2.



Graf 2 - Porovnání vlastních dat se spektrální citlivostí senzoru Sentinel-2A.

Band	Pixel Size	Wavelength	Description
B1	60 m	443.9nm (S2A)	Aerosols
B2	10 m	496.6nm (S2A)	Blue
B3	10 m	560nm (S2A)	Green
B4	10 m	664.5nm (S2A)	Red
B5	20 m	703.9nm (S2A)	Red Edge 1
B6	20 m	740.2nm (S2A)	Red Edge 2
B7	20 m	782.5nm (S2A)	Red Edge 3
B8	10 m	835.1nm (S2A)	NIR
B8A	20 m	864.8nm (S2A)	Red Edge 4
B9	60 m	945nm (S2A)	Water vapor
B11	20 m	1613.7nm (S2A)	SWIR 1
B12	20 m	2202.4nm (S2A)	SWIR 2

Tabulka 2 - Spektrální pásma satelitu Sentinel-2A. (Google Earth Engine, 2023)

Jediné pásmo, které nemá v datech překryv je B4, které snímá v červené části spektra. Tyto vlnové délky budou v pozdějším porovnání ignorovány.

Ze vstupních dat byly zvoleny takové vlnové délky, jež se spektrálně překrývají jak v datech posbíraných z Marsu, tak ve spektrálních rozsazích satelitu Sentinel – 2A. Naměřené spektrální křivky povrchu Marsu byly následně převedeny na zjednodušené spektrální křivky tak, jak by je naměřil satelit Sentinel-2A. K tomu byly využity hodnoty spektrální citlivosti satelitu Sentinel-2 (viz graf 2). Výpočet byl proveden pro každé pásmo váženým průměrem podle následujícího vzorce:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n MO_i \cdot SR_i}{\sum_{i=1}^n SR_i}$$

Citlivost satelitu Sentinel-2A... SR

Spektrální odrazivost povrchu na Marsu... MO

Spektrální pásmo... B

Počet hodnot vstupujících do výpočtu... n

Výsledné vlnové délky pro všech sedm vybraných oblastí jsou uvedeny v následující tabulce č. 3.

rozsahy vlnových délek	B1 [nm]	B2 [nm]	B3 [nm]	B4 [nm]	B5 [nm]	B6 [nm]	B7 [nm]	B8 [nm]	B8A [nm]	B9 [nm]	B10 [nm]	B11 [nm]	B12 [nm]
lávová pole	0.05638	0.07876	0.14682	x	0.30582	0.31503	0.32476	0.34707	0.32991	0.32423	0.34471	0.34933	0.35877
pánve	0.07549	0.10537	0.18302	x	0.31255	0.31603	0.31897	0.33534	0.31685	0.30982	0.31801	0.31365	0.31488
vrchoviny	0.05840	0.07714	0.13301	x	0.25916	0.26340	0.26858	0.28359	0.26867	0.25914	0.26144	0.26437	0.26348
nížiny	0.05222	0.07358	0.12592	x	0.25075	0.25900	0.26617	0.28267	0.26771	0.25723	0.26490	0.25336	0.25190
polární oblasti	0.15280	0.19697	0.28146	x	0.41145	0.41539	0.42136	0.44448	0.42127	0.40686	0.35831	0.29025	0.33072
dopadové plochy	0.04967	0.06795	0.11317	x	0.20852	0.21045	0.21247	0.22193	0.20779	0.19651	0.19917	0.19594	0.18703
vulkanické oblasti	0.06103	0.08227	0.14385	x	0.28665	0.29518	0.30519	0.32468	0.30830	0.30325	0.30969	0.31764	0.32625

Tabulka 3 - Výsledné přepočítané odrazivosti povrchu planety Mars.

4.2 Google Earth Engine

Google Earth Engine je volně přístupná a bezplatná výpočetní platforma společnosti Google. Jejím hlavním přínosem je možnost tvorby geoprostorových analýz velkých oblastí, a to až na úroveň celé planety. Takto náročné operace lze provést díky skutečnosti, že celá platforma běží na serverech společnosti Google, a uživatel tak není limitován výkonem vlastního počítače. Veškeré analýzy se zadávají pomocí skriptů. Platforma podporuje programovací jazyky Python a JavaScript. (Tamiminia et al., 2020)

Tato platforma byla vybrána právě z důvodu možnosti vytvořit globální analýzu, kterou by nebylo na klasickém počítači možné provést.

4.2.1 Výpočet RMSE – globální analýza

V již zmiňovaném prostředí Google Earth Engine byl vytvořen skript pro výpočet směrodatných odchylek každého pixelu na planetě Zemi z družice Sentinel-2A a odrazivostí vybraných oblastí z planety Mars, které byli popsány výše. Z těchto odchylek byly následně vytvořeny rastry a mapy znázorňující oblasti spektrálně nejpodobnější planetě Mars.

4.2.2 Mechanismus skriptu

Funkce maskování mraků

Hned v prvním kroku byla použita funkce pro získání čistých snímků zemského povrchu, tj. nezatížených mraky. Toho bylo možné docílit díky tomu, že všechny snímky ze satelitu sentinel–2 úrovně 2A mají ve svých metadatech klasifikované pixely mimo jiné i na mraky a oblačnost.

Náhled skriptu:

```
function maskS2clouds(image) {  
  var qa = image.select('QA60');  
  var cloudBitMask = 1 << 10;  
  var cirrusBitMask = 1 << 11;  
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudBitMask).eq(0)  
    .and(qa.bitwiseAnd(cirrusBitMask).eq(0));  
  return image.updateMask(mask).divide(10000);  
}
```

Vstupní data

Pro vstupní snímky byl použit už několikrát zmiňovaný satelit Sentinel–2 úrovně 2A. Tyto snímky mají již vyhotovené atmosférické korekce. Do analýzy vstupují snímky z let 2021 a 2022. Byla na ně použita funkce pro odmaskování mraků a následně vytvořen mediánový kompozit z toho důvodu, aby bylo zaručeno, že výsledný ortofoto snímek pro celou planetu nebude obsahovat oblačnost a nebudou v něm velké oblasti s chybějícími pixely. I toto se v jednotkách případů stalo, nicméně jsou to oblasti okrajové a na výsledek nemají vliv. Celý rastr byl oříznut podle vrstvy kontinentů.

```
var dataset = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR')  
  .filterDate('2021-01-01', '2022-12-31')  
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE',20))  
  .map(maskS2clouds);  
  
var composite = dataset.median();  
var continents = composite.clip(geometry);
```

Výpočet RMSE

Pro potřeby výpočtu byla z mediánového kompozitu určena spektrální pásma, která mají do výpočtu vstupovat. Z výpočtu bylo vyjmuta spektrální pásmo B4, které

nefiguruje v datech z planety Mars, a pásmo B10 (obsahující informace o oblačnosti) bylo odstraněno při atmosférických korekcích. Výpočet poté proběhl pro každou z vybraných oblastí na planetě Mars následujícím způsobem:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (B_i - MB_i)^2}{n}}$$

Hodnoty odrazivosti pásem Sentinel-2A... B_i

Vypočítané hodnoty odrazivosti Marsu přepočtené na pásma dat Sentinel-2A... M_i

```

var bands = continents.select(['B1', 'B2', 'B3', 'B5', 'B6', 'B7', 'B8', 'B8A', 'B9', 'B11', 'B12'],
                             ['B1', 'B2', 'B3', 'B5', 'B6', 'B7', 'B8', 'B8A', 'B9', 'B11', 'B12']);

var RMSE = bands.expression(
  '(((B1-0.061029399)**2+(B2-0.082265302)**2+(B3-0.143849053)**2+(B5-0.286651090)**2+(B6-
0.295182216)**2+(B7-0.305194400)**2+(B8-0.324679789)**2+(B8A-0.308303951)**2+(B9-
0.303251925)**2+(B11-0.317639193)**2+(B12-0.326252785)**2)/11)**0.5',
  {'B1': bands.select('B1'),
   'B2': bands.select('B2'),
   'B3': bands.select('B3'),
   'B5': bands.select('B5'),
   'B6': bands.select('B6'),
   'B7': bands.select('B7'),
   'B8': bands.select('B8'),
   'B8A': bands.select('B8A'),
   'B9': bands.select('B9'),
   'B11': bands.select('B11'),
   'B12': bands.select('B12')},
  {});

```

Export a vizualizace

V posledním kroku byl celý rastr exportován. Je nutné zdůraznit že výsledné globální rastry mají rozlišení pouze 10×10 kilometrů na pixel. Hlavním důvodem je extrémní datová náročnost, kvůli které nebylo možné docílit vyššího rozlišení v globálním měřítku.

```

var visualization = {
  min: 0.0,
  max: 0.3,
  bands: ['B4', 'B3', 'B2'],
};

Map.setCenter(14.40,50.05, 5);
Map.addLayer(continents, visualization, 'RGB');

Map.addLayer(RMSE, {min: 0, max: 0.1, palette: ['ff810c','909090','000000'], opacity:0.95}, 'rmse');

Export.image.toDrive({
  image: RMSE,
  folder: 'BP',
  description: 'volcanic_2y',
  scale: 10000,
  crs: 'EPSG:4326',
});

```

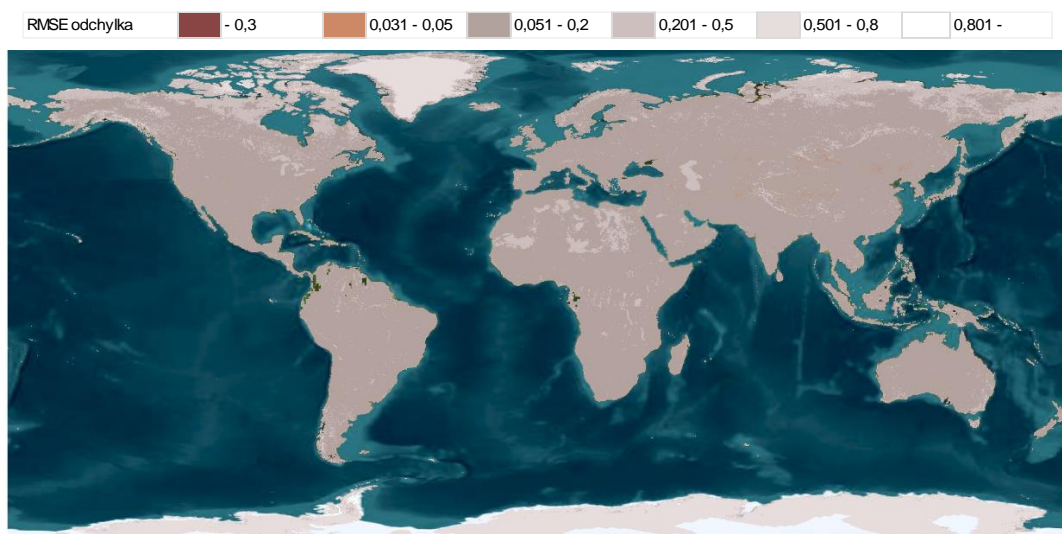
Následná vizualizace a mapové výstupy byly vytvořeny v softwaru ArcGIS Pro verze 3.0.3. Zde byly za pomoci funkce raster calculator sečteny snímky všech oblastí do jednoho. Vznikla tak souhrnná mapa oblastí, které se svou spektrální odrazivostí nejlépe podobají povrchu planety Mars, a také mapy s vyznačenými spektrálně nejpodobnějšími místy pro každou z geologických oblastí na Marsu. Čím nižší je výsledná hodnota odchylky RMSE, tím větší je podobnost povrchů obou planet. U globálních rastrů je velikost pixelu 10 ×10 kilometrů.

Pro místa z kapitoly 3.3 *Analogické oblasti využívané k testování prototypů* byly opět pomocí funkce raster calculator sečteny snímky ze všech typů oblastí na Marsu. Tímto způsobem byly vytvořeny rastry odchylek s velikostmi pixelů 500×500 metrů.

5. Výsledky

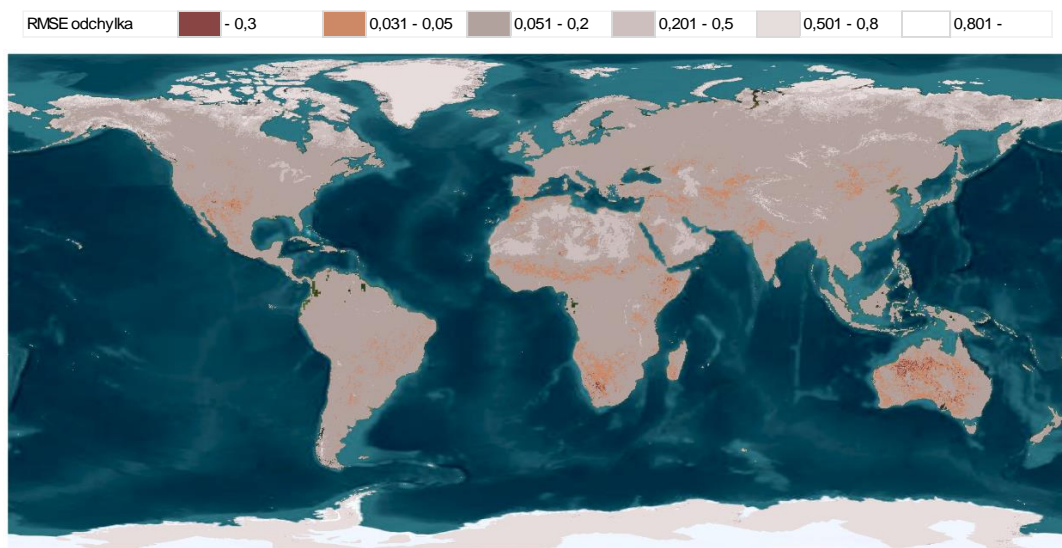
5.1 Oblasti spektrální odrazivosti nejpodobnější povrchu Marsu

Ukázalo se, že výsledné nalezené oblasti jsou téměř pro všechny oblasti relativně podobné, jediné srovnání naší planety s polárními oblastmi Marsu ukazuje dramaticky odlišné výsledky. Právě pro polární oblasti se ukazuje pouze lehká podobnost s povrchem v oblastech Mongolska a severu Číny, jak je vidět z obrázku č. 15 (podrobněji viz příloha 2A).



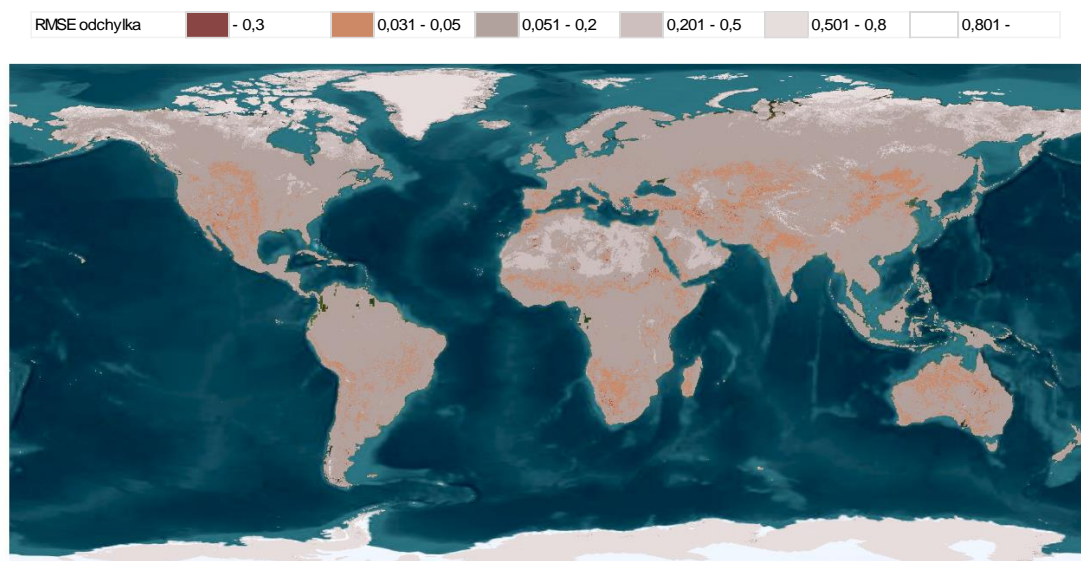
Obr. 15 - Podobnost povrchu s polárními oblastmi na Marsu.

Lávová pole mají nízké odchylky v severozápadní Austrálii, dále v jižní Africe na hranici Namibie a Jihoafrické Republiky a také v Novém Mexiku v USA (viz obrázek č. 16 a příloha 2B).



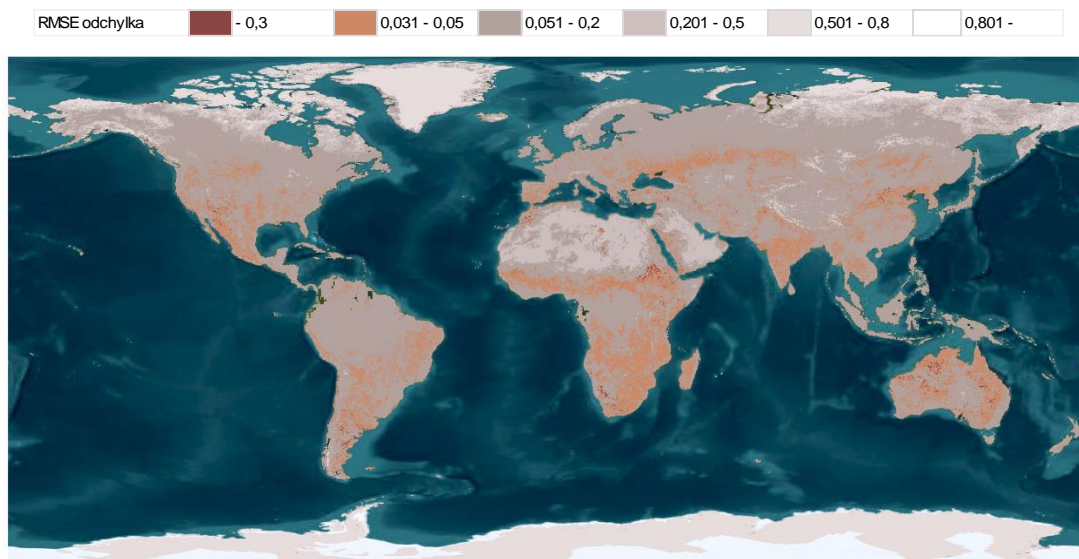
Obr. 16 - Podobnost povrchu s oblastmi lávových polí na Marsu.

Pro oblasti pánví je viditelná podobnost v Maroku a v oblasti Turecka a Íránu. Celkově se však podoba neproказuje tak silně (viz obrázek č. 17 a příloha 2C).



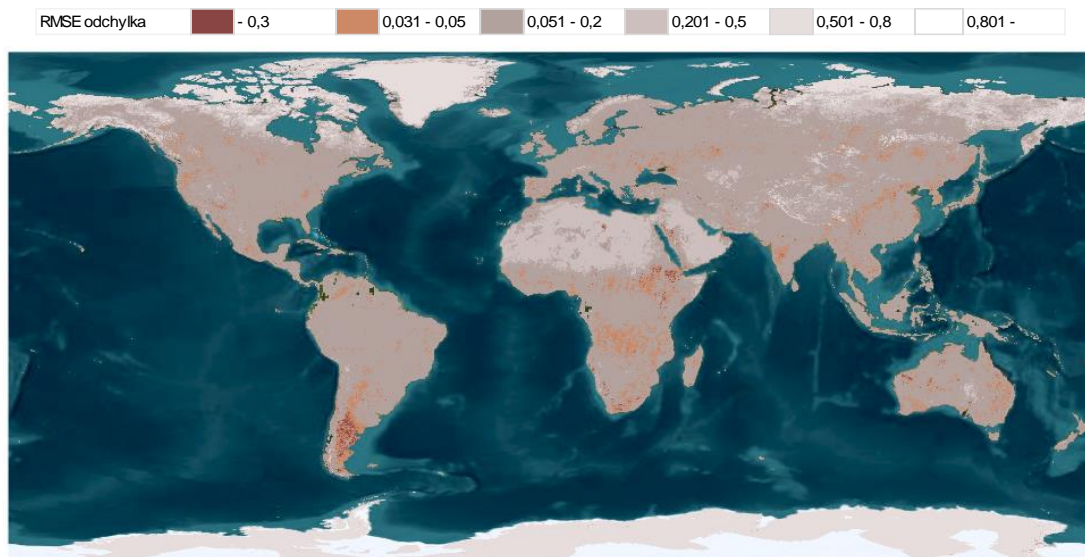
Obr. 17 - Podobnost povrchu s oblastmi pánví na Marsu.

S oblastmi vrchovin je opět viditelná silná podobnost v Austrálii, jižní Africe a na hranici Arizony a nového Mexika v USA. Dále je podobnost znatelná v jižní Argentíně a v Súdánu na hranici s Etiopií (viz obrázek č. 18 a příloha 2D).



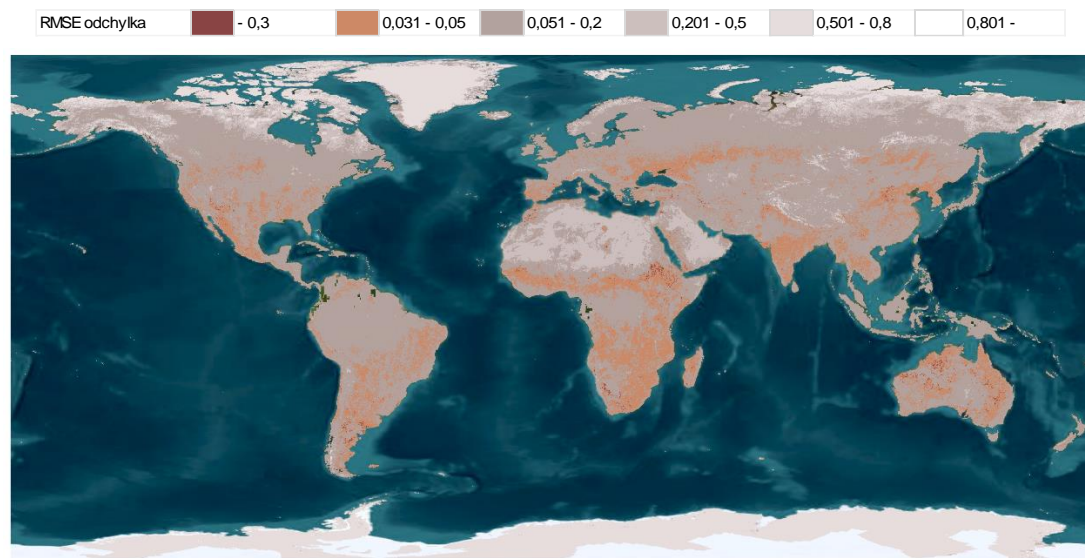
Obr. 18 - Podobnost povrchu s oblastmi vrchovin na Marsu.

Dopadové plochy nemají proti předchozím oblastem tak silné podobnosti v Austrálii, jsou zde viditelná pouze menší lokální místa. Dále se podobnost projevuje v Etiopii, ve střední části Libye a silně v jižní části Argentiny, což zobrazuje obrázek č. 11 (viz obrázek č. 19 a příloha 2E).



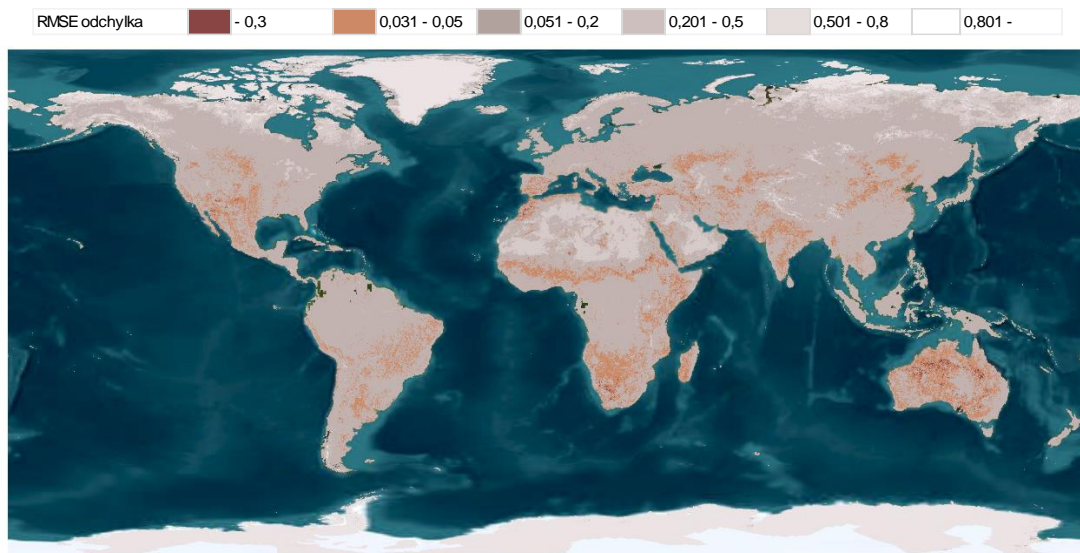
Obr. 19 - Podobnost povrchu s oblastmi dopadových ploch na Marsu.

Pro oblasti nížin se podobnost se Zemí neprojevuje tak silně, nicméně lehká podobnost je viditelná v jižní Africe, jižní části Argentiny, v Súdánu a opět také v severozápadní části Austrálie (viz obrázek č. 20 a příloha 2F).



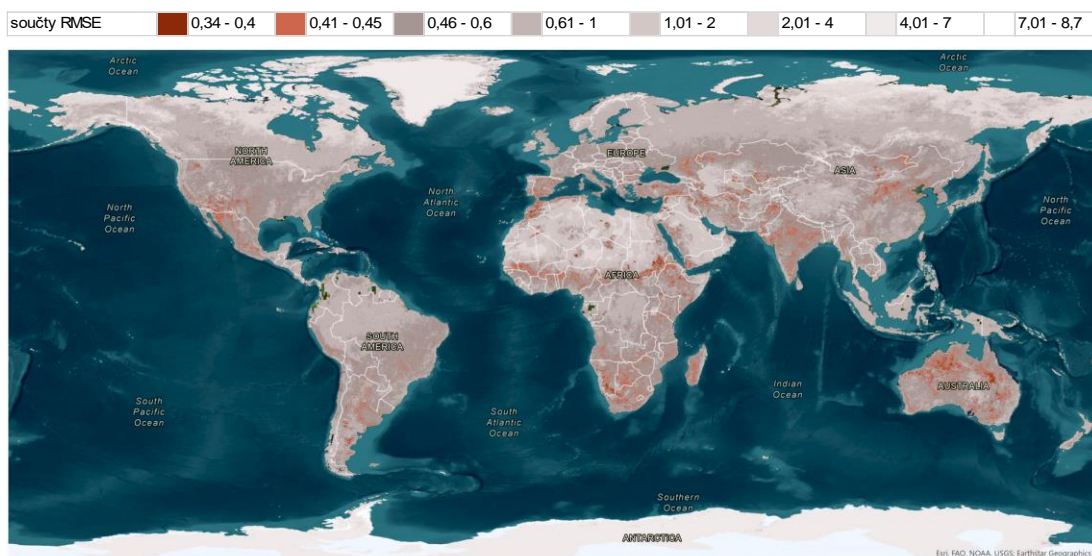
Obr. 20 - Podobnost povrchu s oblastmi nížin na Marsu.

Poslední, vulkanické oblasti mají silnou podobu v Maroku, na jihu Afriky a na téměř celé ploše Austrálie (viz obrázek č. 21 a příloha 2G).



Obr. 21 - Podobnost povrchu s vulkanickými oblastmi na Marsu.

Sečtením všech dílčích rastrů vznikla souhrnná mapa oblastí s nejlepšími podobnostmi. Marsu spektrálně nejpodobnější oblasti na planetě Zemi jsou v severní Austrálii, v Súdánu ale také v celé oblasti přechodu pouště do savany v Africe. Dále je to oblast hranic mezi Jihoafrickou republikou a Namibií, poté Maroko a lokálně Libye a Čad. O něco slabší podobnost lze pozorovat v Argentině a v oblasti západních hranic USA s Mexikem. V Evropě dominuje Španělsko. Podobnost je dále viditelná také na blízkém východě, v Indii a na východě Číny a Mongolska (viz obrázek č. 22 a příloha 3).



Obr. 22 - Oblasti nejpodobnější planetě Mars (viz příloha 3).

Při pohledu na satelitní snímky uvedených oblastí lze souhlasit s tvrzením, že se jedná o oblasti spíše suché, kde se nevyskytuje vegetace, sníh, led či jiný pokryv. Terén je většinou kamenitý či ho tvoří suchá, holá půda.

5.2 Porovnání spektrálních odrazivostí v oblastech využívaných pro testování prototypů

Pro vybrané testovací oblasti dle kapitoly 3.3 *Analogické oblasti využívané k testování prototypů* se ukázaly nejmenší odchylky RMSE (tj. největší podobnosti odrazivostí mezi Marsem a Zemí) v obou Australských oblastech (region Pilbara na obrázku č. 23) a vysokou podobnost ukazuje také oblast řeky Rio Tinto v jižním Španělsku.



Obr. 23 - Region Pilbara-jedna z oblastí na Zemi nejpodobnějších Marsu. (Australia's North West, 2023)

Menší podobnost lze potom pozorovat ve sledovaných oblastech ve Spojených státech amerických a v oblasti Mc.Murdo Valleys na Antarktidě.

Největší rozdíly se projevují ve vysokohorských oblastech v Chile, na Tibetské náhorní plošině, a také na kanadském ostrově Devon (viz příloha 4 a 5).

V následující tabulce č 4. jsou uvedené mediánové hodnoty RMSE pro každou oblast a zároveň také její minimální a maximální hodnoty.

oblast	medián hodnot RMSE	minimální hodnota RMSE	maximální hodnota RMSE
Region Pilbara, Austrálie	0,46263	0,341543	1,13363
Rio Tinto, Španělsko	0,5286	0,382169	1,66684
Region Arkaroola, Austrálie	0,57291	0,333694	1,71472
Pánev Tecopa, Mohavská poušť, Kalifornie	0,64348	0,480735	1,37616
Henry Mountains, Utah	0,82361	0,530519	1,15673
Mc. Murdo Dry Valleys, Antarktida	0,88929	0,399038	6,83084
Lavic Lake, Mohavská poušť, Kalifornie	0,95654	0,414359	1,65778
Cchjdamská pánev, Tibetská náhorní plošina, Čína	1,19235	0,534992	1,82646
Ojos del Salado, Altiplano, Chile	1,38909	0,917508	3,45148
Haughtonův kráter, ostrov Devon, Kanada	3,77893	2,51651	4,25289

Tabulka 4 - Mediánové hodnoty RMSE pro oblasti využívané k testování prototypů.

6. Diskuse

Je pravdou, na Zemi neexistuje místo, které by svým složením půdy, morfologickými jevy nebo celkovými podmínkami kopírovalo určitou oblast na Marsu. Každá planeta má za sebou jinou minulost a jiné vnější podmínky jež je ovlivňují. Z výsledků je ale patrné, že se určité oblasti na Zemi analogu Marsu velmi blíží.

Dle očekávání se podobnost nejvíce projevuje v rozlehlých, suchých oblastech bez vegetace. Z výsledků je však patrné silné ovlivnění analýzy sněhovým a ledovým pokryvem. To se projevuje vysokými hodnotami odchylek v polárních, vysokohorských a dalších oblastech, kde část roku pokrývá povrch sníh, který dramaticky proměňuje hodnoty odrazivosti. Časový rámec všech dvanácti měsíců v roce byl však zvolen z důvodu dostačeného množství vstupních dat do mediánového kompozitu, který není ovlivněný oblačností. Při kratším časovém rozsahu byly v rastru viditelné poměrně velké oblasti bez informace s prázdnými pixely. Řešením tohoto problému by mohlo být rozčlenění planety na menší oblasti, ve kterých by analýza probíhala zvláště v různých ročních dobách podle místních klimatických poměrů. Tímto přístupem by bylo možné získat relevantnější data na úkor zvýšení časové i datové náročnosti celé analýzy.

Při pohledu na výsledné rastry porovnání s jednotlivými geologickými oblastmi z Marsu je viditelná rozdílnost. Nejvíce překvapivé jsou výsledky z polárních oblastí, které prokazují jen velmi malou podobnost, a to navíc v místech, která se v jiných porovnáních nevyskytují. To je nejspíše způsobeno větším zaledněním v polárních oblastech na Marsu, které způsobuje vyšší hodnoty odraženého záření v NIR vlnových délkách než v oblastech bez ledového pokryvu.

Ve výsledném rastru všech oblastí vyšla najevo místa očekávaná a v literatuře často zmiňovaná, jako je například Austrálie (Farr, 2004; Hipkin et al., 2013; West et al., 2010) nebo oblasti na jihozápadě USA. (Hipkin et al., 2013; Tornabene et al., 2019; Volpe, 1999) Výsledný rastr navíc poměrně přesně kopíruje oblasti, které využívá společnost NASA jako své testovací plochy. (Hipkin et al., 2013) Podobnost s těmito plochami je vysoká od rovníku do oblastí mírného pásma, blíže k pólům jsou výsledky ovlivněny sněhovou pokrývkou a jsou méně relevantní.

Překvapivých hodnot však dosáhly oblasti Súdánu a Etiopie v Africe, o jejichž podobnosti s povrchem Marsu v literatuře zmínky téměř nenajdeme.

Oblasti, aktuálně využívané k testování prototypů se ve většině případů ukázaly jako blízké povrchu planety Mars i svou spektrální informací. Tři oblasti, které mají průměrné odchylky poměrně vysoké, jsou právě lokality, ve kterých se většinu roku nachází sníh, tudíž je jejich spektrální informace tímto jevem značně ovlivněná.

7. Závěr

Z výsledků provedených analýz vyplývá, že metodou porovnání spektrálních odrazivostí planet lze získat velmi dobré výsledky podobností. Je však důležité dbát na to, aby v porovnávaných oblastech nic nebránilo pohledu senzoru přímo na terén, tedy aby povrch nebyl pokryt sněhem či hustou vegetací.

Metoda je velmi dobře využitelná pro rámcové zkoumání velkých oblastí. Zároveň ji lze také použít pro lokalizaci menších ploch, které mohou být následně testovány dalšími podrobnějšími metodami, které jsou závislé na kontaktním sběru informací. Velkým přínosem této metody je její časová, finanční i výpočetní nenáročnost.

V práci se podařilo splnit stanovené cíle. Pomocí porovnání spektrálních odrazivostí byly nalezeny oblasti na planetě Zemi, které se podobají povrchu planety Mars a mohou tak tvořit jeho analogy. Byly také zjištěny oblasti, které se k testování využívají a byly porovnány s vlastními výsledky.

8. Seznam literatury

- Allaby, Michael. (2008). *A dictionary of earth sciences*.
- Bandfield, J. L. (2002). Global mineral distributions on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 107(6).
<https://doi.org/10.1029/2001je001510>
- Bishop, C., Rivard, B., de Souza Filho, C., & van der Meer, F. (2018). Geological remote sensing. In *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* (Vol. 64, pp. 267–274). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.005>
- Campbell J. B., & Wynne R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing*.
www.GISman.ir
- Chevrier, V., & Mathé, P. E. (2007). Mineralogy and evolution of the surface of Mars: A review. *Planetary and Space Science*, 55(3), 289–314.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2006.05.039>
- Edwards, H. G. M., Vandenabeele, P., Jorge-Villar, S. E., Carter, E. A., Perez, F. R., & Hargreaves, M. D. (2007). The Rio Tinto Mars Analogue site: An extremophilic Raman spectroscopic study. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 68(4), 1133–1137.
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2006.12.080>
- Farr, T. G. (2004). Terrestrial analogs to Mars: The NRC community decadal report. *Planetary and Space Science*, 52(1–3), 3–10.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2003.08.004>
- Glass, B., Wang, A., Huffman, S., Zacny, K., & Lee, P. (2015). *Testing of a Mars-Prototype Drill at an Analog Site*.
- Heldmann, J. L., Pollard, W., McKay, C. P., Marinova, M. M., Davila, A., Williams, K. E., Lacelle, D., & Andersen, D. T. (2013). The high elevation Dry Valleys in Antarctica as analog sites for subsurface ice on Mars. *Planetary and Space Science*, 85, 53–58.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2013.05.019>
- Hipkin, V. J., Voytek, M. A., Meyer, M. A., Léveillé, R., & Domagal-Goldman, S. D. (2013). Analogue sites for Mars missions: NASA's Mars Science Laboratory and beyond - Overview of an International workshop held at The Woodlands, Texas, on March 5-6, 2011. In *Icarus* (Vol. 224, Issue 2, pp. 261–267). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.02.021>

- Kereszturi, A., Aszalos, J. M., Zs, H., Ignezi, Zs, K., Cs, K., Sz, L. O., Szalai, Z., Zs, N., Pal, B., Skulteti, A., & Nagy, B. (2022). Wind-snow interactions at the Ojos del Salado region as a potential Mars analogue site in the Altiplano - Atacama desert region. *Icarus*, 378. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.114941>
- Kropáček, J., Moravec, D., & Komárek, J. (2020). *Česká zemědělská univerzita v Praze Fakulta životního prostředí Dálkový průzkum-I skriptum*.
- Martin, P. E., Ehlmann, B. L., Thomas, N. H., Wiens, R. C., Hollis, J. J. R., Beegle, L. W., Bhartia, R., Clegg, S. M., & Blaney, D. L. (2020). Studies of a Lacustrine-Volcanic Mars Analog Field Site With Mars-2020-Like Instruments. *Earth and Space Science*, 7(2). <https://doi.org/10.1029/2019EA000720>
- Murchie, S. L., Arvidson, R. E., Bedini, P., Beisser, K., Bibring, J.-P., Bishop, J., Boldt, J. D., Choo, T. H., Clancy, R. T., Darlington, E. H., des Marais, D., Espiritu, R., Fasold, M. J., Fort, D., Green, R. N., Guinness, E., Hayes, J. R., Hash, C., Heffernan, K. J., ... Tossman, B. E. (2004). CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) on MRO (Mars Reconnaissance Orbiter). *Instruments, Science, and Methods for Geospace and Planetary Remote Sensing*, 5660, 66. <https://doi.org/10.1117/12.578976>
- Rodriguez Sanchez-Vahamonde, C., Neish -, C., Luo, Y.-W., Li, F., Yan, J.-G., - , al, Wang, M., Xie, L., Lee, L. C., Pio Rossi, A., & van Gasselt, S. (2010). Geology of Mars after the first 40 years of exploration. In *Astron. Astrophys* (Vol. 10, Issue 7). <http://www.raa-journal.org><http://www.iop.org/journals/raa>
- Sedlák P. (2007). Dálkový průzkum Země v geologii. *Geografické Rozhledy*. <https://www.geograficke-rozhledy.cz/archiv/clanek/907>
- Spohn, T., Hudson, T. L., Witte, L., Wippermann, T., Wisniewski, L., Kedziora, B., Vrettos, C., Lorenz, R. D., Golombek, M., Lichtenheldt, R., Grott, M., Knollenberg, J., Krause, C., Fantinati, C., Nagihara, S., & Grygorczuk, J. (2022). The InSight-HP3 mole on Mars: Lessons learned from attempts to penetrate to depth in the Martian soil. *Advances in Space Research*, 69(8), 3140–3163. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.02.009>
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. In *ISPRS Journal of Photogrammetry*

- and Remote Sensing* (Vol. 164, pp. 152–170). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>
- Tanaka, K. L., Robbins, S. J., Fortezzo, C. M., Skinner, J. A., & Hare, T. M. (2014). The digital global geologic map of Mars: Chronostratigraphic ages, topographic and crater morphologic characteristics, and updated resurfacing history. *Planetary and Space Science*, 95, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2013.03.006>
- Tornabene, L. L., Battler, M., Choe, B. H., & Osinski, G. R. (2019). An orbit-based remote sensing geological assessment of the CanMars Mars Sample Return Analogue Deployment (MSRAD) landing site situated in the Henry Mountains Basin, near Hanksville, Utah. *Planetary and Space Science*, 173, 14–34. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.04.006>
- van der Meer, F. D., van der Werff, H. M. A., van Ruitenbeek, F. J. A., Hecker, C. A., Bakker, W. H., Noomen, M. F., van der Meijde, M., Carranza, E. J. M., de Smeth, J. B., & Woldai, T. (2012). Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. In *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* (Vol. 14, Issue 1, pp. 112–128). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.08.002>
- Volpe, R. (1999). *Navigation Results from Desert Field Tests of the Rocky 7 Mars Rover Prototype*. <http://robotics.jpl.nasa.gov/tasks/lrsr/>.
- Waghmare, B., & Suryawanshi, M. (2017). A Review- Remote Sensing. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 07(06), 52–54. <https://doi.org/10.9790/9622-0706025254>
- West, M. D., D.A. Clarke, J., Laing, J. H., Willson, D., Waldie, J. M. A., Murphy, G. M., Thomas, M., & Mann, G. A. (2010). Testing technologies and strategies for exploration in Australian Mars analogues: A review. *Planetary and Space Science*, 58(4), 658–670. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2009.09.022>
- Xiao, L., Wang, J., Dang, Y., Cheng, Z., Huang, T., Zhao, J., Xu, Y., Huang, J., Xiao, Z., & Komatsu, G. (2017). A new terrestrial analogue site for Mars research: The Qaidam Basin, Tibetan Plateau (NW China). In *Earth-Science Reviews* (Vol. 164, pp. 84–101). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.11.003>

8.1 Seznam obrázků

- Obr. 1 - Porovnání hyperspektrálních a multispektrálních dat. (Pyroistech.: Hyperspectra and Multispectral Imaging (online) [cit. 18.02.2023], dostupné z <<https://www.pyroistech.com/hyperspectral-and-multispectral-imaging/>>)..... 5
- Obr. 2 - Ilustrace rozdílných odrazivostí minerálů. (Sedlák P. (2007). Dálkový průzkum Země v geologii. Geografické Rozhledy. <https://www.geograficke-rozhledy.cz/archiv/clanek/907>) 6
- Obr. 3 - Topografie povrchu Marsu. (The Planetary Society.: Map of Mars with main Regions Labeled (online) [cit. 23.02.2023], dostupné z <<https://www.planetary.org/space-images/map-mars-major-features>>)..... 8
- Obr. 4 - Základní rozdělení povrchu Marsu. (Obr. autorky vlastní) 9
- Obr. 5 - Umístění oblastí aktuálně využívaných k testování prototypů. (Obr. autorky vlastní)..... 10
- Obr. 6 – Pánev Tecopa, Kalifornie , USA. (Expedia.: Tecopa, CA (online) [cit. 28.03.2023], dostupné z <<https://www.expedia.com/Tecopa.dx6228768>>) 10
- Obr. 7 - Cchajdamská pánev. (OneEarth.: Qaidam Basin Semi Desert (online) [cit. 05.03.2023], dostupné z <<https://www.oneearth.org/ecoregions/qaidam-basin-semi-desert/>>)..... 11
- Obr. 8 – Oblast Henry Mountains v Utahu. (Capitol reef.: Utahs unique Henry Mountains (online) [cit. 28.03.2023], dostupné z <<https://capitolreef.org/blog/utahs-unique-henry-mountains/>>)..... 11
- Obr. 9 – Haughtonův kráter na ostrově Devon. (Dazed.: Haughton Crater, Most Mars like place on Earth (online) [cit. 28.03.2023], dostupné z <<https://www.dazeddigital.com/artsandculture/article/13304/1/haughton-crater-the-most-mars-like-place-on-earth>>) 12
- Obr. 10 – Řeka Rio Tinto v jižním Španělsku. (Rove.me.: Rio Tinto (online) [cit. 05.03.2023], dostupné z <<https://rove.me/to/spain/rio-tinto>>)..... 12
- Obr. 11 – Oblast regionu Arkaroola. (lookANDsee.: Arkaroola landscape (online) [cit. 28.03.2023], dostupné z <<https://lookandsee.me/2017/10/19/arkaroola-landscape/>>) 13
- Obr. 12 -Údolní oblast Mc. Murdo na Antarktidě. (Aluring World.: MC. Murdo dry Valleys (online) [cit. 28.03.2023], dostupné z <<https://www.alluringworld.com/mcmurdo-dry-valleys/>>)..... 14

<u>Obr. 13 - Sopka Ojos del Salado. (Andescontact.: EL TECHO DE CHILE</u>	
<u>OJOS DEL SALADO (online) [cit.05.03.2023], dostupné z</u>	
<u><https://www.andescontact.com/ojos-del-salado/>)</u>	14
Obr. 14 - Náhled získávání spektrální informace v programu SNAP. (Obr. autorky vlastní).....	16
Obr. 15 - Podobnost povrchu s polárními oblastmi na Marsu. (Obr. autorky vlastní).....	23
Obr. 16 - Podobnost povrchu s oblastmi lávových polí na Marsu. (Obr. autorky vlastní).....	233
Obr. 17 - Podobnost povrchu s oblastmi pánví na Marsu. (Obr. autorky vlastní).....	24
Obr. 18 - Podobnost povrchu s oblastmi vrchovin na Marsu. (Obr. autorky vlastní).....	244
Obr. 19 - Podobnost povrchu s oblastmi dopadových ploch na Marsu. (Obr. autorky vlastní).....	25
Obr. 20 - Podobnost povrchu s oblastmi nížin na Marsu. (Obr. autorky vlastní).....	255
Obr. 21 - Podobnost povrchu s vulkanickými oblastmi na Marsu. (Obr. autorky vlastní).....	26
Obr. 22 - Oblasti nejpodobnější planetě Mars (viz příloha 3). (Obr. autorky vlastní).....	266
Obr. 23 - Region Pilbara-jedna z oblastí na Zemi nejpodobnějších Marsu. (Australia's North West.: Tom Price(online) [20.03.2023] dostupné z< https://www.australiasnorthwest.com/explore/pilbara/tom-price#no-back >).....	277

8.2 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Směrodatné odchylky z dat spektrálních odrazivostí pro jednotlivé oblasti..... 17

Tabulka 2 - Spektrální pásma satelitu Sentinel-2A. ((Google Earth Engine.: Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A (online) [cit.10.02.2023], dostupné z <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR>))..... 18

Tabulka 3 - Výsledné přepočítané odrazivosti povrchu planety Mars..... 19

Tabulka 4 - Mediánové hodnoty RMSE pro oblasti využívané k testování prototypů..... 277

8.3 Seznam grafů

Graf 1 - Výsledné odrazivosti základních oblastí na Marsu. (graf autorky vlastní)..... 16

Graf 2 - Porovnání vlastních dat s rozsahy vlnových délek senzoru Sentinel-2 (graf autorky vlastní) 17

8.4 Seznam příloh

Příloha 1 – Lokalizace míst pro získání spektrální informace z planety Mars

Příloha 2A – RMSE pro polární oblasti

Příloha 2B – RMSE pro oblasti lávových polí

Příloha 2C – RMSE pro oblasti pánví

Příloha 2D – RMSE pro oblasti vrchovin

Příloha 2E – RMSE pro oblasti dopadových ploch

Příloha 2F – RMSE pro oblasti nížin

Příloha 2G – RMSE pro oblasti vulkanického původu

Příloha 3 – Oblasti spektrální odrazivosti blízké povrchu planety Mars

Příloha 4 – Rozmístění testovacích oblastí v kontextu s vypočtenými RMSE odchylkami

Příloha 5 – Znázornění RMSE odchylek v testovacích oblastech

8.5 Použitá data:

Globální geologická mapa Marsu (Tanaka, K.L., Skinner, J.A., Jr., Dohm, J.M., Irwin, R.P., III, Kolb, E.J., Fortezzo, C.M., Platz, T., Michael, G.G., and Hare, T.M., 2014, Geologic map of Mars: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3292, scale 1:20,000,000, pamphlet 43 p., < <https://pubs.usgs.gov/sim/3292/>>)

Satelitní snímky povrchu Marsu (Data MRO-CRISM.: Mars Orbital Data Explorer (online) [cit. 12. 11.2022], dostupné z < <https://ode.rsl.wustl.edu/mars/mapsearch>>)

Spektrální citlivost satelitu Sentinel-2 (Spectral Responses Sentinel-2.: Sentinel Online (online) [cit. 13. 1. 2023], dostupné z < https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/document-library/-/asset_publisher/Wk0TKajiISaR/content/sentinel-2a-spectral-responses>)

Vektorová vrstva kontinentů (Continent Polygons.: Figshare (online) [cit. 10. 11. 2022] dostupné z < https://figshare.com/articles/dataset/Continent_Polygons/12555170/3>)