

# Kakav je sastav atmosfere Marsa?

---

**Galić, Monika**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:313061>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-24**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
Kemijski odsjek

Monika Galić

Studentica 3. godine Preddiplomskog sveučilišnog studija KEMIJA

# **KAKAV JE SASTAV ATMOSFERE MARSA?**

## **Završni rad**

Rad je izrađen u Zavodu za opću i anorgansku kemiju

Mentor rada i neposredni voditelj: izv. prof. dr. sc. Nenad Judaš

Zagreb, 2021.



Datum predaje prve verzije Završnog rada:

29. srpnja 2021.

Datum ocjenjivanja Završnog rada i polaganja Završnog ispita:

24. rujna 2021.

Mentor rada: izv. prof. dr. sc. Nenad Judaš

Potpis:



## Sadržaj

§ SAŽETAK.....	VII
§ 1. UVOD.....	1
1.1. Mars .....	1
1.1.1. Misije na Marsu.....	2
§ 2. PRIKAZ ODABRANE TEME .....	3
2.1. Atmosferski događaji.....	3
2.1.1. Pješčane oluje .....	3
2.1.2. Nočno svjetlo .....	4
2.2. Atmosfera Marsa.....	6
2.2.1. Utjecaj Sunčevog zračenja .....	6
2.2.2. Sastav .....	8
2.2.3. Proizvodnja plinova fotokemijom .....	12
§ 3. LITERATURNI IZVORI.....	XV



## § Sažetak

Atmosfera Marsa je tanka i vrlo suha. Dominantni plin je CO<sub>2</sub> (95,3 %), iza njega u mnogo manjim količinama slijede N<sub>2</sub> (2,7 %) i Ar (1,6 %), a u tragovima se pronalaze O<sub>2</sub> (0,13 %), H<sub>2</sub>O (0,02 %) i plemeniti plinovi Ne, Xe, Kr. No, osim navedenih plinova, u atmosferi se događaju i brojne kemijske reakcije koje kao rezultat daju razne organske i anorganske spojeve. Fotokemijskim putem nastaju manje molekule poput CO, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, NO. U razdoblju od 2006. do 2010. godine pokušalo se pronaći tragove plinova CH<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>OH, H<sub>2</sub>CO, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, HO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, HCN, HCl, CH<sub>3</sub>Cl. Većinu navedenih spojeva nije bilo moguće detektirati tadašnjim uređajima koji su se nalazili u Marsovoj atmosferi, no infracrveni spektrometri (CRIRES, NIRSPEC, CSHELL)<sup>1</sup>, koji su djelovali s površine Zemlje su to ipak omogućili. Postalo je moguće i utvrditi je li podrijetlo plinova biološko ili geološko. Tijekom četverogodišnjeg istraživanja mijenjali su se razni uvjeti u atmosferi Marsa (temperatura, tlak, pješčane oluje...) te je korištenje različitih uređaja omogućilo sigurno određivanje vrste plinova. Kemijske reakcije do kojih dolazi potaknute su uvjetima u atmosferi. Glavni događaji u atmosferi Marsa u periodu istraživanja su pješčane oluje. Zbog podizanja sitnih čestica pijeska i praha s površine, dolazi do njezinog zagrijavanja radi apsorpcije Sunčevog zračenja. Kao posljedica, oslobađa se više ugljikovog dioksida i vode iz polarnih kapa gdje su zarobljeni u obliku suhog leda.



## § 1. UVOD

### 1.1. Mars

Mars je četvrti po redu planet u Sunčevom sustavu, a udaljen je 227 milijuna kilometara od Sunca. Nalazi se između Zemlje i Jupitera. Spada u skupinu terestričkih planeta koje karakterizira kompaktna i stjenovita površina poput Zemljine. Najslbližiji je Zemlji od svih ostalih planeta zbog čega se istražuju mogućnosti postojanja živih organizama. Stijene koje su nađene na Marsu gotovo su identičnog sastava kao one na Zemlji. Oba planeta imaju atmosferu, koru, plašt i srž. Postoje četiri godišnja doba, izmjenjuju se vremenski uvjeti, a posjeduje i dva mjeseca Phobos i Deimos. Mars je u promjeru gotovo upola manji od Zemlje; otprilike šest puta volumenom. Zbog sličnosti sastava ujedno je i približno deset puta lakši. Prosječna temperatura na Marsu je  $-63\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a prosječni tlak na površini je  $606\text{ Pa}^1$ . Atmosfera je suha i vrlo tanka i uglavnom se sastoji od ugljikovog(IV) oksida. Mars ne posjeduje globalno magnetsko polje što u kombinaciji s tankom atmosfere čini planet metom jakog UV-zračenja, ali i drugog štetnog zračenja iz svemira. Pretpostavlja se da je prijašnji sastav atmosfere bio gušći, ali je zbog jakih solarnih vjetrova došlo do gubitka i prorjeđivanja.

Na površini Marsa mogu se uočiti krateri vulkana raznih promjera i dubina te su zbog svoje veličine dobili titulu najvećih vulkana u Sunčevom sustavu. Južna hemisfera planeta ih ima mnogo više od sjeverne. Površina Marsa, zbog svojih udubljenja, podsjeća na Mjesec i na Merkur. Krateri na Marsu nisu pravilni i nemaju oštre rubove kao oni na Mjesecu, već su više poput izbočina i udubljenja koja podsjećaju na valove. Objašnjenje za takvu pojavu je drugačija podzemna struktura planeta. Ispod površine se prije mogao nalaziti sloj leda koji se zbog siline udarca kiše kometa otapao te je tako nastajala smjesa zemlje i vode koja je ostavila valovite strukture pored kratera. Područje na južnom dijelu planeta na kojem se nalaze četiri vulkana naziva se Tharsis. Taj prostor izdignut je od ostatka tla te podsjeća na kontinent. Vrh najvišeg vulkana Olympus Mons je čak 27 km iznad tankog sloja atmosfere. Atmosferski tlak na samom vrhu vulkana jedva je 5 % tlaka na njegovu dnu. Zbog takve visine vulkana potreban je veliki pritisak da bi magma mogla izaći van. Taj pritisak se može postići, ako se magma nalazi na velikoj dubini. Izračunato je da bi za takav tlak bila potrebna dubina od 160 km. Marsova litosfera deblja je od Zemljine, koja se prostire 100 km u dubinu. Osim kratera i vulkana nema

drugih rovova, grebena niti sličnih reljefnih oblika. Današnja litosfera Marsa nije dovoljno tanka da bi na njoj moglo dolaziti do pomicanja tektonskih ploča kao na Zemlji. Vulkani su imali jako veliki utjecaj na sadržaj tla i sastav atmosfere za vrijeme svoje aktivnosti. Piroklastični tok koji je u sebi sadržavao vrući pepeo, lavu, fragmente stijena i plinova širio se nekoliko stotina kilometara od njihova izvora. Utjecaj takvog oblaka može se proučiti na primjeru vulkana Alba Patera koji je površinom jedan od najvećih u Sunčevu sustavu, a visina mu dostiže 6 km<sup>2</sup>, što nije niti upola visine Olympus Monsa. Njegova širina posljedica je blagog nagiba padine koji iznosi otprilike 0,5°, a koji je nastao upravo zbog piroklastičnog toka nakon erupcije samog vulkana. Vulkani su bili i važan izvor topline za vrijeme nastajanja planeta. Lava je zagrijavala površinu, a unutrašnji dio ostao je hladan. Zbog velikog udjela željeza u Marsovom plaštu došlo je do njegovog otapanja. Visoke temperature su talile i silikatne stijene te su tako tekući materijali putovali površinom i ravnali teren.

### *1.1.1. Misije na Marsu*

Zbog sličnosti sa Zemljom, Mars je postao meta mnogobrojnih istraživanja u proteklih dvadeset godina. Trenutno ima pet aktivnih istraživačkih misija. Glavna zadaća im je otkriti ima li na Marsu života ili tragova prijašnjih bioloških razvoja. Za te ciljeve važno je i poznavanje atmosfere kojoj, osim sastava, može otkriti i podrijetlo i izvor. Ova znanja su nužna želimo li da površinom Marsa jednog dana može hodati čovjek.

## § 2. PRIKAZ ODABRANE TEME

### 2.1. Atmosferski događaji

#### 2.1.1. Pješčane oluje

Satelitske slike Marsa pokazuju tamnocrvenu površinu koja se prostire cijelim planetom. Fotografija koju je na Zemlju 1996. godine poslao rover Pathfinder pokazuje neuobičajeni prizor roze boje neba.<sup>3</sup> Objašnjenje za takvu pojavu pronašalo se u velikom udjelu pijeska i sitne prašine u Marsovoj atmosferi. Sunčeve zrake su elektromagnetsko zračenje koje se sudara s česticama u atmosferi pri čemu se najviše raspršuju fotoni crvenog zračenja u vidljivom dijelu spektra. Taj fenomen se zove Rayleighovo raspršenje.<sup>4</sup> Tlo Marsa i veliki broj stijena načinjen je od željeza i njegovih spojeva koji Marsu daju crvenu boju hrđe.<sup>2</sup> Kada, tijekom godina, dođe do pomicanja i usitnjavanja tih stijena zbog raznih vanjskih utjecaja, željezovi spojevi nađu se u zraku kao sitna prašina.

Naravno, samo željezo ne bi dalo hrđavu boju planeta i neba te mora doći do njegove oksidacije koja se događa s molekulama vode i hidroperoksilnim radikalima,  $\text{HO}_2$ , koji se nalaze u plinovitom stanju u atmosferi pri čemu se akumulira spoj  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .<sup>5</sup> Osim vodom, do oksidacije može doći i usitnjenim kvarcom ( $\text{SiO}_2$ ) koji se nalazi na površini.<sup>4</sup> Sastav tla Marsa približno je jednak na svim mjestima upravo zbog velikih pješčanih oluja. Vjetar čestice željezovog(III) oksida i ostalih spojeva koji sačinjavaju tlo podiže u zrak i raznosi po cijelom planetu. Nakon smirivanja vjetra ponovno se talože na tlo.<sup>2</sup> Lokalne pješčane oluje glavni su događaj u Marsovoj atmosferi tijekom cijele godine, a globalna oluja dogodi se u prosjeku jednom u četiri godine. Tamni oblaci pijeska raznose se atmosferom ovisno o smjeru vjetra, što gledano iz orbite izgleda kao širenje vegetacije po tlu. Takva hipoteza se ubrzo pokazala netočnom.

Pješčane oluje utječu i na promjenu temperature u atmosferi. Ljeta su na južnoj polovici planeta mnogo intenzivnija; duže traju i postižu se veće temperature. U tom razdoblju karakteristično je naglo povišenje temperature zbog čega dolazi do poremećaja u atmosferi. Potaknuti novim tlakom, u atmosferi nastaju vjetrovi koji podižu pijesak koji apsorbira Sunčeve zrake. Apsorbiranjem energije dolazi do dodatnog povišenja temperature zbog čega se tlak još više

povećava što za posljedicu ima još više pijeska i prašine u zraku. Stalno prisustvo pijeska i prašine u zraku čini ga jednom od glavnih komponenata atmosfere. U prosjeku ga se može naći oko 0,02 kg po kubičnom metru, što bi značilo da je potrebno samo 50 m<sup>3</sup> atmosfere da bi se dobio jedan kilogram sirove tvari.<sup>6</sup> Za podizanje tako velike količine materijala u zrak u tankoj atmosferi potrebni su snažni vjetrovi. Za vrijeme jedne od globalnih oluja, The Viking Lander zabilježio je vjetar jačine 113 km/h. Inače su vjetrovi u prosjeku jačine 16 km/h do 32 km/h.<sup>7</sup> Za jednu od najjačih globalnih oluja izračunata je vrijednost brzine vjetra od 180 km/h.<sup>2</sup> Ovako snažni vjetrovi mogu lako uzrokovati tzv. prašinske vragove (pijavice snažnije od zemaljskih tornada), tj. vrtloge sitnog materijala s tla koji mogu narasti i do 8 km u visinu, što nadmašuje visinu takvih pojava na Zemlji. Te pojave ostavljaju na površini Marsa tragove koje mogu biti i do 30 m široki i prostirati se čak 4 km u duljinu<sup>8</sup> te bi se time moglo objasniti puknuća i kanale na površini Marsa.

Jedan dio pijeska nalazi se zarobljen unutar polarnih kapa, a najviše ga ima u sjevernoj polarnoj kapi. Tijekom nastajanja sjeverne polarne kape događaju se najveće pješčane oluje te je za očekivati da će se dio pijeska nalazi zarobljen ispod zamrznutog ugljikovog dioksida i vode na tom području.<sup>6</sup> Polarne kape uočavaju se na satelitskim slikama Marsa kao bijela područja na oba pola, a povećavaju se i smanjuju ovisno o godišnjem dobu. Rast tijekom jeseni i zime događa se zbog nastajanja mraza od atmosferskog ugljikovog dioksida. Ovaj plin koji čini 95,3 % atmosfere pretvara se u suhi led kada se temperature snize do oko -123 °C.<sup>2</sup>

Južna polarna kapa ima dvostruko veći promjer od sjeverne, a debljina njezina leda može biti i do jedan metar. S udaljenošću od pola ledeni sloj se stanjuje te u konačnici postaje mraz. Za razliku od južne, u sjevernoj polarnoj kapi nema CO<sub>2</sub>, već je uglavnom izgrađena od vodenog leda. Iako je na sjeveru ljeto hladnije nego na jugu, ugljikov dioksid se ne može zamrznuti. Razlog ovoj pojavi krije se u pješčanim olujama koje se razvijaju tijekom nastajanja sjeverne kapa zbog koje se Sunčevo zračenje apsorbira te se polarna kapa otapa.

### 2.1.2. Noćno svjetlo

Gornji dio atmosfere uvelike je pod utjecajem interakcija sa Sunčevim zračenjem. O tome nam svjedoči dušikov oksid koji uzrokuje pojavu svjetla na noćnom nebu. Dolazi do reakcije dušika i kisika pri čemu nastaje NO koji se nalazi u pobuđenom energijskom stanju. Prelaskom u osnovno stanje oslobađa energiju u obliku svjetlosti. Reakcija je uzrokovana jakim Sunčevim ultraljubičastim zračenjem pri čemu dolazi do razlaganja (fotodisocijacije) molekula CO<sub>2</sub> i N<sub>2</sub>

i nastajanja molekula NO. Atomi kisika i dušika nošeni vjetrom (cirkulacijom atmosfere) dolaze do polova gdje tonu niže u atmosferu (mezosferu) zbog jako niskih temperatura. Gustoća zraka postaje sve veća pa se se atomi lakše sudare i vežu u molekule NO. Emisija svjetlosti događa se tijekom relaksacije molekula NO (deekscitacija). Količina proizvedene svjetlosti ovisi o količini dostupnih atoma dušika koji se nalaze u mezosferi, jer je kisika mnogo više (zbog veće količine CO<sub>2</sub> u mezosferi). Najintenzivnija emisija uočava se zimi na polovima, a za vrijeme ravnodnevnice dolazi do pojačavanja emisije svjetlosti u području ekvatora. Ovakvu pojavu mogu prouzročiti i neke druge jedinice poput molekula kisika i hidroksidnih iona. Atomi kisika i vodika koji nastaju fotodisocijacijom putuju prema polovima za vrijeme dana. Sve jedinice koje svijetle noću nalaze se u atmosferi na visinama između 40 km i 60 km.<sup>9</sup>

Pojava svjetlosti na noćnom nebu može se uočiti i u Zemljinoj mezosferi. Glavni uzrok je radikal OH koji ima jako veliko vibracijsko uzbuđeno stanje. Takav spoj nastaje reakcijom ozona i protona, ali može nastati i fotolizom vode u vakuumu pod utjecajem ultraljubičastog zračenja. Reakcija u kojoj nastaje radikal OH iz atoma vodika i molekula ozona jako je egzotermna. Elektronski apsorpcijski spektar smješten je u vakuurom UV području, pri valnim duljinama kraćim od 190 nm. Prvo pobuđeno stanje nalazi se u području između 150 nm i 190 nm. Disocijacijom nastaju H i OH radikali od kojih 72 % imaju niska vibracijska stanja.<sup>10</sup> Mnogo intenzivnija i povoljnija vibracijska stanja nalaze se pri nižim valnim duljinama (oko 120 nm) zbog favoriziranja rotacijskih pobuđenih stanja OH radikala. Velika razlika između uvjeta na Zemlji i na Marsu je to što je Zemljina atmosfera obogaćena kisikom iz bioloških izvora, a Marsova ima vrlo malo kisika koji nastaje ne biološkim putem. Postavlja se pitanje uzrokuje li fotoliza molekula vode nastanak OH radikala u obje atmosfere. Fotoliza se u većoj mjeri događa u Marsovoj atmosferi gdje je to i dominantan izvor OH radikala, dok se u Zemljinoj atmosferi događa samo u gornjem dijelu atmosfere.

U Marsovoj atmosferi događa se još jedna pojava uzrokovana zagrijavanjem zraka preko dana, a riječ je o plimi. Atmosfera nije jednako zagrijana u svim svojim područjima zbog različite topografije, toplinske inercije i opterećenja prašinom. Zbog toga dolazi do plime i oscilacija temperature na globalnoj razini. Plima može poremetiti prosječne vrijednosti određenih atmosferskih parametara kao na primjer gustoću, tlak, temperaturu te je zbog toga važan faktor koji regulira cirkulaciju zraka i prijenos energije kroz sve slojeve atmosfere.<sup>9</sup>

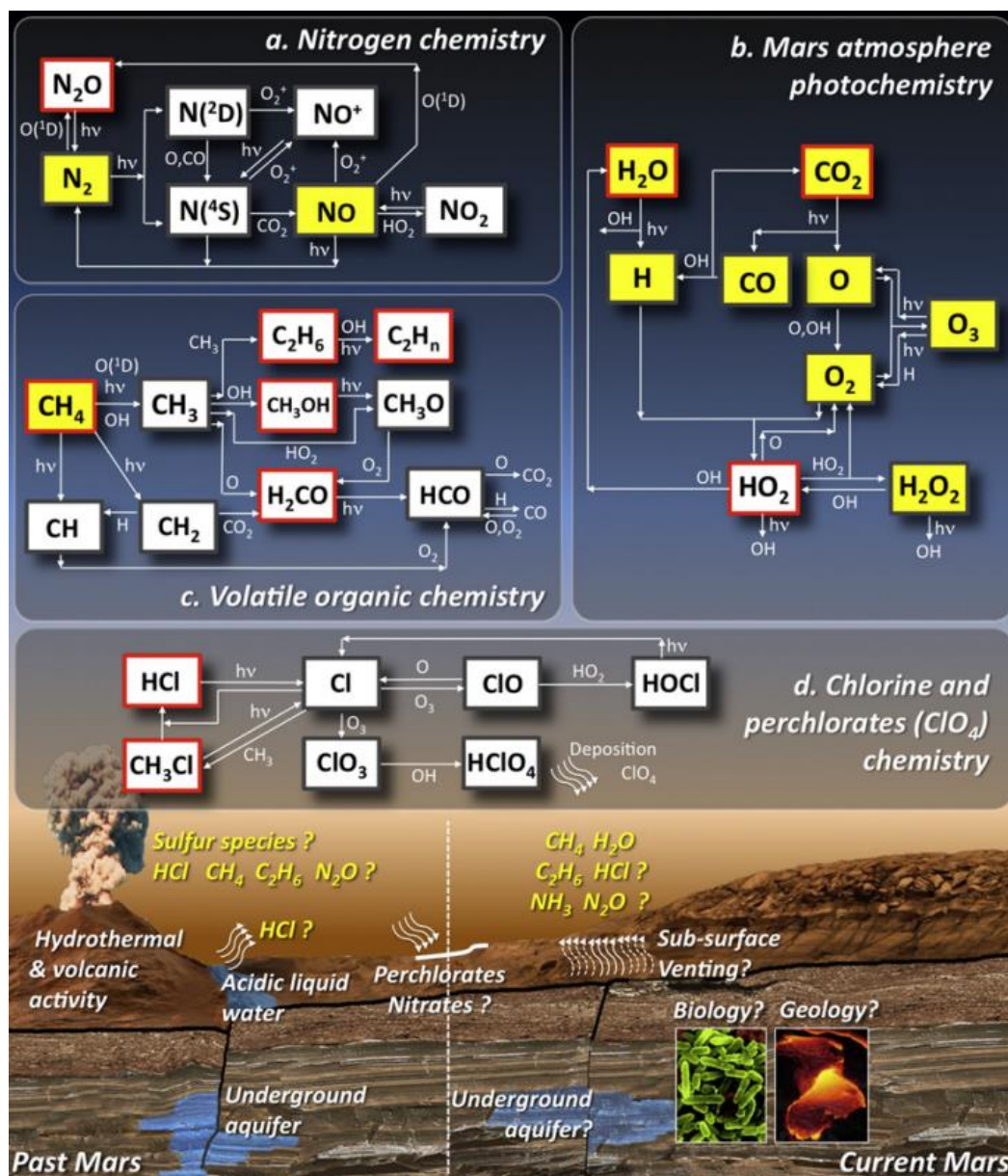
## 2.2. Atmosfera Marsa

Atmosferski tlak na površini planeta iznosi  $650 \text{ N/m}^2$ , što je ekvivalentno tlaku na Zemlji na visini od 35 km. Atmosferski tlak na Marsu poprilično se mijenja tijekom godine. Razlog tomu je otapanje i zamrzavanje polarnih kapa koje se većinskim udjelom sastoje od  $\text{CO}_2$  te zbog toga dolazi do konstantne fluktuacije. Najmanji tlak je tijekom južne zime kada je 25 % atmosferskog  $\text{CO}_2$  kondenzirano kao suhi led u polarnoj kapi. U proljeće se tlak ponovno povećava zbog isparavanja uzrokovanog višim temperaturama. Za kontinuiranost Zemljine atmosfere zaslužna sila koja djeluje suprotno od gravitacijske i čiji se intenzitet smanjuje udaljavanjem od površine. Zemljina atmosfera nema nagli prekid, odnosno granicu sa svemirom. Iz toga proizlazi da se i tlak smanjuje s udaljenošću od Zemljine površine. Brzina kojom tlak opada s visinom ovisi o akceleraciji gravitacije, temperaturi i masi atmosfere.<sup>2</sup>

Marsova gravitacija značajno je slabija od Zemljine, samo 38 % površinske gravitacije. Zbog toga se Marsova atmosfera proteže dalje u svemir te na jednakim visinama ima veću gustoću od Zemljine. Ova informacija izrazito je bitna pri lansiranju letjelica u Marsovu orbitu. Naime, zbog duljeg puta na kojem djeluje Marsova gravitacijska sila, letjelice dobivaju protusilu koja ih zaustavlja prilikom slijetanja, za razliku od Mjeseca koji ne posjeduje atmosferu i kod kojeg se treba primijeniti zaustavljanje motornom silom.

### 2.3.1. Utjecaj Sunčevog zračenja

Zemljina atmosfera apsorbira gotovo sve dolazeće zračenje. X-zrake i gama-zrake apsorbiraju se prije nego dođu do Zemljine površine te zbog toga ne predstavljaju opasnost za živi svijet i ljude. Veći dio infracrvenog i ultraljubičastog dijela zračenja također se apsorbira u atmosferi, no zbog njezinog sve većeg oštećivanja i zagađenja s godinama to zračenje ima sve veći utjecaj na zdravlje ljudi. U Marsovoj atmosferi, s druge strane, većinu zračenja blokira. Ona onemogućuje prolaz zračenju gotovo svih valnih duljina. Molekule ugljikovog dioksida, kojih ima najviše, apsorbiraju infracrveno zračenje.<sup>2</sup> Rendgensko i gama zračenje važni su za fotokemijske reakcije. U takvim reakcijama dolazi do apsorpcije elektromagnetskog zračenja pri čemu je moguća fotoliza potaknuta pobuđivanjem elektrona u viša energijska stanja. Takvim kemijskim reakcijama moguće je nastajanje mnogih plinova u atmosferi Marsa kao što je prikazano na slici 1.

Slika 1. Fotokemijske reakcije koje se mogu događati u atmosferi Marsa <sup>1</sup>

Jačina Sunčevog zračenja opada s većom udaljenošću od Sunca prema formuli u kojoj se solarna konstanta ( $1370 \text{ W/m}^2$ ) dijeli s kvadratom udaljenosti planeta od Sunca. Ta količina zračenja koju bi planet mogao apsorbirati i ponovo emitirati bez refleksije vrijedila bi kada bi se ponašao kao crno tijelo. Za realne sustave uzima se vrijednost albedo ( $A$ ) koja je definirana kao reflektirani dio zračenja koje je dostiglo planet. Tijela s većim albedom su hladnija, jer apsorbiraju manje energije prema formuli za apsorpciju ( $1-A$ ). Za manje planete izračunate vrijednosti temperatura približno se slažu sa stvarnim temperaturama, ali kod većih planeta ne.

Tako je izračunata temperatura za Mars  $-53^{\circ}\text{C}$ , a izmjerena prosječna temperatura  $-63^{\circ}\text{C}$ .<sup>2</sup> Osim što se Sunčevo zračenje odbija zbog prašine u zraku, ono se također ne može apsorbirati zbog tanke atmosfere. Gotovo sva toplina na Marsu dolazi s površine koja je uspjela apsorbirati dio zračenja. Kod Zemlje dio toplina u atmosferu dolazi zbog apsorpcije UV-zračenja u ozonskom omotaču kojeg u atmosferi Marsa ima samo u tragovima. Temperatura se smanjuje s porastom visine atmosfere. Razlika između temperature pri tlu i jedan metar iznad Marsova tla iznosi  $8^{\circ}\text{C}$ . Posljedica je to tanke atmosfere kroz koju se lako protežu struje zraka i vrtlozi nastali od zagrijane površine. Oborina nema ni u koje doba godine, jer nema tekuće vode koja bi uzrokovala kišu. Postoje sezonske i dnevne varijacije u temperaturi. Tijekom jednog dana temperatura se mijenja i do  $60^{\circ}\text{C}$ . Tijekom umjerenog ljetnog dana temperature dosežu i do  $0^{\circ}\text{C}$ , a tijekom blagih zimskih noći temperatura se snizi i po  $100^{\circ}\text{C}$ .<sup>2</sup>

### 2.3.2. Sastav atmosfere Marsa

Rover Curiosity detektirao je 2019. godine iznenađujuće visoke razine metana u atmosferi Marsa. Uobičajeni udio metana je 1 ppb pri površini, uz fluktuacije ovisno o godišnjim dobima. Uočena razina bila je tri puta veća od prijašnje najviše razine te je iznosila 21 ppb. Ovakav nagli rast ne može se objasniti kao posljedica bioloških aktivnosti na Marsu. Na Zemlji se metan proizvodi u mikroorganizmima ili nastaje kao produkt reakcije vode i određenih minerala pri visokom tlaku. Abiološko objašnjenje za pojavu metana bila bi ultraljubičasta degradacija autohtonih organskih spojeva ili spojeva unesenih meteorima, udaranje kometa o površinu, otpuštanje iz podzemnih klatrata ili zbog geotermalnih procesa.<sup>11</sup> Metan je član skupine stakleničkih plinova koji su zaslužni za zadržavanje topline u atmosferi i za zagrijavanje planeta. Tako se može postići klima u kojoj se tekuća voda može zadržavati na površini. Udio metana tijekom godina istraživanja varirao je ovisno o području. Globalni udio izmjeren 1999. godine u prosjeku je iznosio 10 ppbv (*parts per billion per volume*), u ljeto 2003. je u blizini ekvatora izmjereno 45 ppbv, a u zimi 2006. godine 7,8 ppbv. U rasponu od 2004. do 2010. godine izmjeren je novi prosjek udjela metana u atmosferi te je on iznosio 15 ppbv. Istraživanjem je otkriveno da je iznad kratera Gale blizu ekvatora, iznimno mali udio metana; u prosjeku 0,69 ppbv, a u jednom mjerenju je dobiveni iznenađujuće visoki udio od 7,2 ppbv. Ovakve varijacije i iznenadna povišenja udjela metana ne mogu se objasniti čak niti sezonskim



otpuštanjem plinova raspadom površinskih organskih tvari UV-zračenjem. U obzir su stoga uzeti i drugi parametri koji bi mogli korelirati s naglim rastom metana. Uspoređivani su rezultati tlaka, površinske temperature, vlažnost zraka, isparavanje vode s polova. Zabilježene su povišene vrijednosti parametara pri kraju sjevernog ljeta za atmosferski tlak, za intenzitet UV zračenja na površini, za temperaturu površine i obilje argona, no te vrijednosti nisu korelirale s udjelom metana. Kombinacija kondenzacije i sublimacije ugljikovog dioksida u polarnim kapama uzrokuje sezonske promjene tlakova pri površini. Zbog mnogo vulkana i kratera koji su se smjestili na jednoj hemisferi dolazi do dinamičkog ujednačavanja polja vjetra koji mora prijeći prepreke različitih nadmorskih visina. Tlak iznad kratera Gale je pod utjecajem polarne kape te on prosječno iznosi 8,4 mbar. U tom smislu se tražilo i objašnjenje za neuobičajenu razinu metana iznad kratera Gale. Razmatrano je miješanje sublimiranog ugljikovog dioksida i visokog tlaka pri vrlo niskim nadmorskim visinama. Zbog takvih uvjeta i izoliranosti područja kratera postojala bi mogućnost da se ovdje uočavaju drugačiji efekti od onih u susjedstvu. Ispod površine Marsa se nalazi velika količina metana koja je zatočena ispod hladnog sloja tla. Naime, u Marsovoj povijesti atmosferski tlak bio je vrlo nizak, svega nekoliko stotina milibara, zbog čega je moglo doći do nastajanja klatrata – male molekule metana mogu se smještati u šupljine koje gradi nekoliko desetaka molekula vode. Tako se može objasniti korelacija sezonskih porasta udjela metana u atmosferi kada dođe do zagrijavanja površine. Kavezi izgrađeni od molekula vode više nisu u mogućnosti biti domaćini molekulama metana pa se on oslobađa u atmosferu. Korelacija između sezonskih porasta metana i povišenja temperature i isparene vode u atmosferi je dobra.<sup>12</sup>

Organski spojevi pronađeni su na dnu planine Aeolis Mons visoke 5000 metara, a koja se proteže od dna Gale kratera. U podnožju se nalazi udubina stara tri milijarde godina koja podsjeća na jezero. Rover Curiosity tamo je pronašao kamenje nastalo iz blata u kojem su bile zarobljene organske molekule. Kamene gromade izgrađene su od filosilikata, bazalta i željezovog(III) oksida.<sup>13</sup> Tako zarobljeni i skriveni organski spojevi mogli su ostati sačuvani od utjecaja ultraljubičastog zračenja i oksidacijskih čestica iz zraka.<sup>14</sup>

Iako klorovodik nije pronađen u atmosferi Marsa u značajnim koncentracijama kao metan, istraživanja su pokazala kako se njegovo postojanje ne bi trebalo zanemariti. Zbog geografske strukture Marsa u kojoj je mnogo vulkana, vjerojatnost da se HCl oslobađa iz njih je velika. Zemljina atmosfera ima HCl u svome sastavu koji većinskim dijelom potiče iz morskog

aerosola, a važan je za kontrolu oksidacijskih svojstva atmosfere zbog interakcije s ozonom i hidroksidima prisutnim u zraku. Venera, koja je po mnogočemu slična Marsu, također ima HCl u svojoj atmosferi. Glavni je izvor klora koji utječe na stabilnost CO<sub>2</sub> u Venerinoj atmosferi. Napravljena su istraživanja tragova plinova na Marsu 2018. uz Trace Gas Orbiter kojeg je poslala Europska svemirska agencija (*European Space Agency*). Pronađeni su tragovi HCl-a i izotopi H<sup>37</sup>Cl i H<sup>35</sup>Cl za vrijeme južnog ljeta. Na sjevernoj hemisferi pronađeno je 1 do 2 ppbv na visinama od 15 do 25 km. Udio plina smanjuje se približavanjem površini. Na sjevernoj hemisferi pronađeno je 2-3 ppbv na visini između 20 i 30 km. Sastav atmosfere se mijenja ovisno o pješčanim olujama, isparenoj vodi i aerosolima. Kada se oluje umire, pijesak i podignuta prašina talože se na površinu, atmosferski tlak pada zbog čega slijedi hlađenje i smanjenje udjela plinova. Najmanji udio klorovodika je oko 0,1 ppbv. Zaključeno je da je za pojavu klorovodika odgovorna kemija aerosola koja se pojavljuje s prašinom u zraku. Zbog nemogućnosti ispitivanja nekoliko kilometara iznad površine ne može se sa sigurnošću tvrditi da se u tom području ne nalazi velika koncentracija plina. Izvor plina su vulkani i magma koja se iz njih oslobađa. Nakon hlađenja magme i taloženja čestica iz vulkana dolazi do taloženja klorovih spojeva u obliku minerala. Plinovi također mogu biti oslobođeni tijekom potresa i pomicanja tektonskih ploča (što je na Marsu rijetka pojava), pri čemu se mogu oslobađati i spojevi sumpora ili ugljika.

Sljedeće zapažanje je da povezanost udjela HCl-a s globalnim pješčanim olujama. Smatra se da dolazi do kemijskih ili fizičkih reakcija u prašini koja aktivira oslobađanje reaktivnog plinovitog klora. Ukupno ima 1 % klora od ukupne mase prašine. Na površini su pronađeni haliti i perklorati koji se podižu u atmosferu tijekom oluja te tako lako tvore HCl oksidacijskim reakcijama ili oslobađanjem radikala. Nitrati koji se također nalaze u atmosferi reagiraju s tvarima iz prašine pri čemu ne dolazi do nastajanja dušične kiseline, već se soli klora oksidiraju do plinovitog klora koji zatim reagira s hidroperoksilom pri čemu nastaje HCl. Plinoviti klorovodik može se osloboditi i izlaganjem minerala klora UV zrakama. Na visinama od 30 km iznad površine nalazi se veliki udio plinovitog klora. Najveća koncentracija HCl-a zabilježena na Marsu je 4 ppbv te se može usporedit s koncentracijom koja se nalazi na Zemlji u stratosferi i mezosferi.<sup>15</sup>

Voda ne postoji na Marsu u tekućem obliku jer je atmosferski tlak prenizak. Kada bi se doveo bazen vode na Mars istog trena bi se zamrznuo ili ispario, ovisno o godišnjem dobu. Ako je prije postojala, nužni su bili drugačiji uvjeti od današnjih; barem 6 mbar i 0 °C<sup>6</sup>. Pojava oblaka

je iznimno rijetka, a prekrivaju ukupno 1 % ukupne površine Marsa. Najčešće se javljaju blizu otvora vulkana jer je na tim visinama zrak hladniji. U kasnim jutarnjim satima zrak je dovoljno vlažan da se ohladi ispod temperature kondenzacije vode zbog čega nastaju oblaci. U podnožju ponekih kratera i kanala zrak je dovoljno vlažan pa i ondje nastaju oblaci. Jutarnja magla smatra se pokazateljem postojanja zaleđene vode ispod tla, jer kad Sunce zagrije površinu dolazi do oslobađanja malo zaleđene vode koja se kondenzira u maglu.<sup>2</sup> Globalne pješčane oluje događaju se rijetko, ali jako utječu na atmosfersku dinamiku i po nekoliko mjeseci. Razlog tomu je solarno zagrijavanje prašine koja znatno utječe na isparavanje vode koja je važna poveznica klimatskih uvjeta i fotokemijskih reakcija na Marsu. Disocijacijom molekula vode na hidroksilne radikale uz pomoć Sunčeve energije kontrolira se postojanost udjela CO<sub>2</sub> u atmosferi. Osim molekula H<sub>2</sub>O postoji i njihov izotopni analog HDO koji sadrži jedan atom deuterija koji ima dvostruko veću masu od atoma procija. Malu količinu HDO moglo se detektirati za vrijeme pješčane oluje na visinama od 80 km, a kasnije maksimalno do 40 km. Ovakvo ponašanje molekula HDO-a korelirano je sa zaleđenim vodenim nakupinama. Za vrijeme oluja, zbog porasta temperatura, dolazi do sublimacije leda zbog čega se plinoviti H<sub>2</sub>O i HDO mogu penjati do viših visina, a ostatak ledenih oblaka biva potisnut prema niže zbog njihove težine. Ovakve nagle promjene događaju se u nekoliko dana za vrijeme razvijanja oluja što ukazuje na veliki utjecaj koji pješčane oluje imaju na prisutnost vode u atmosferi Marsa.<sup>16</sup> Prelazak vode u više slojeve atmosfere za vrijeme pješčanih oluja može se dovesti u vezu s povećanjem prve kozmičke brzine potrebne za bijeg čestica plina iz Marsove atmosfere kada oluja više ne djeluje. Zanimljivo je da se udio vode u zraku razlikuje na južnoj i sjevernoj hemisferi. Udio vode za vrijeme globalnih oluja povećava se samo na sjevernoj hemisferi. To se događa zato što isparena voda zbog cirkulacije oluja s juga odlazi prema sjeveru.<sup>17</sup> Deuterija u izotopolozima vode ima znatno više na Marsu nego na Zemlji. Smatra se da bi ta činjenica mogla neizravno ukazivati da je Marsova atmosfera prije bila mnogo vlažnija i gušća no što je danas. Veza između udjela isparene vode u zraku s promjenama godišnjih doba na određenom području posljedica je sublimacije i kondenzacije vode koja se u najvećim količinama nalazi u polarnim kapama. Osim različitih izotopa vodika u vodi, nađeni su i različiti izotopi kisika; <sup>18</sup>O, <sup>17</sup>O, <sup>16</sup>O. Izotopi vodika imaju izvor samo iz isparene vode, a izotopi kisika mogu nastati iz vode i iz ugljikovog(IV) oksida koji uglavnom sadrži <sup>18</sup>O izotop. U polarnim kapama se najviše nalaze <sup>18</sup>O i <sup>17</sup>O, što znači da <sup>16</sup>O ostaje većinu vremena u atmosferi. Omjer između D i H izotopa u vodi iznosi između 2,5 i 3 ovisno o području gdje se mjeri. Omjer udjela

$^{18}\text{O}$  i  $^{16}\text{O}$  trebao bi biti manji za faktor 10 od omjera vodika ovisno o temperaturi kondenzacije. Atmosfera obogaćena težim izotopima kisika govori mnogo o povijesti atmosfere Marsa. Vjerojatnost bijega lakših atoma mnogo je veća te zbog toga Marsova atmosfera sadrži manje izotopa  $^{16}\text{O}$ .<sup>18</sup>

### 2.3.3. Proizvodnja plinova fotokemijom

U atmosferi Marsa dominira  $\text{CO}_2$ , a iza njega u mnogo manjim količinama slijede  $\text{N}_2$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ . No, u atmosferi se događaju i brojne kemijske reakcije koje kao rezultat daju razne organske i anorganske spojeve. Fotokemijskim putem nastaju manje molekule poput  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{H}_2\text{CO}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{HO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{CH}_3\text{Cl}$ . Za istraživanje je korišten infracrveni spektrometar (CRIRES, NIRSPEC, CSHELL). Plinovi su traženi pri valnim duljinama između 2,8 i 3,7  $\mu\text{m}$  u NIR spektru, a rezultati su prikazani u tablici 1.

Tablica 1. Količine detektiranih plinova u atmosferi tijekom godina<sup>1</sup>

Molecule	Previous (3- $\sigma$ , ppb)	06 January 2006 $L_5$ 352° MY27	19 August 2009 $L_5$ 324° MY29	20 November 2009 $L_5$ 12° MY30	28 April 2010 $L_5$ 83° MY30
Methane ( $\text{CH}_4$ )	3–50 <sup>a</sup>	<7.8	–	<6.6	<7.2
Ethane ( $\text{C}_2\text{H}_6$ )	<0.2–0.6 <sup>b</sup>	<0.7	<0.6	<0.2	–
Methanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ )	–	<19	<21	<6.9	–
Formaldehyde ( $\text{H}_2\text{CO}$ )	<4.5 <sup>c</sup>	<3.9	–	–	<3.9
Acetylene ( $\text{C}_2\text{H}_2$ )	<3 <sup>d</sup>	<6	–	–	<4.2
Ethylene ( $\text{C}_2\text{H}_4$ )	<750 <sup>d</sup>	<11.2	<9	<4.1	–
Nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ )	100 <sup>d</sup>	<87	–	–	<65
Ammonia ( $\text{NH}_3$ )	<8 <sup>d</sup>	<57	–	–	<45
Hydrogen cyanide ( $\text{HCN}$ )	–	<4.5	–	–	<2.1
Methyl chloride ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ )	–	<14.3	–	–	–
Hydrogen chloride ( $\text{HCl}$ )	<0.3 <sup>e</sup>	<2.1	<1.5	<0.6	–
Hydroperoxy radical ( $\text{HO}_2$ )	–	<198	–	–	<255

Većina ugljikohidrata koji će se promatrati su simetrični i nemaju dipolne momente zbog čega se mogu detektirati samo uz njihovu  $\rho$ -vibracijsku tranziciju u NIR-u. Također, kada se čitaju spektri plinova koji imaju jake apsorpcijske signale u Zemljinoj atmosferi ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ) treba uračunati i Dopplerov efekt.

U Zemljinoj atmosferi postoje organski hlapljivi spojevi koji potječu iz bioloških izvora te se zbog toga smatraju indikatorima života. Radi se o  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{H}_2\text{CO}$ . Tragovi ovih plinova pronađeni su i u atmosferi Marsa, ali su ti plinovi kratkoživeći pa tako signal za  $\text{H}_2\text{CO}$  nestaje nakon par sati, a signali za  $\text{C}_2\text{H}_6$  i  $\text{CH}_3\text{OH}$  nakon nekoliko dana. Zbog ispuštanja manjih

količina u određenim periodima vremena može se odrediti uzrok njihovog nastajanja i predvidjeti buduća otpuštanja. Metan, s druge strane ima dulji period života te svaki izboj metana po sezonama ukazuje na akumulaciju veće količine metana tijekom vremena. Takav duži period života metana posljedica je sporije oksidacije uz OH i O<sup>1</sup>D i zbog UV fotolize metana. Iznad 70 km visine vrijeme raspada metana uzrokovano zračenjem iznosi sedam dana. Nakon fotolitičkog raspada metana na CH, CH<sub>2</sub> i CH<sub>3</sub> dolazi do drugih kemijskih reakcija iz kojih mogu nastati spojevi poput CH<sub>3</sub>OH, H<sub>2</sub>CO i C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>. Etan i viši alkani osim fotokemijom mogu nastati i termogenezom, podzemnim aktivnostima ili bioprocesima. Zbog toga su važna tema kako bi se razumjeli procesi u Marsovoj unutrašnjosti i fotokemijski putevi hlapljivih plinova u atmosferi.

Metan daje dovoljno signala kako bi se smatrao jednim od stalnih komponentama atmosfere. Kao što je spomenuto, njegov se udio mijenja ovisno o izbojima plina iz njegovog izvora, a udio u atmosferi kreće mu se između 3 i 70 ppbv. U jednom istraživanju 2006. godine utvrđeno je 4500 tona metana u rasponu od 27 dana, što bi značilo da se u Marsovu atmosferu svake sekunde oslobodilo 2 kg metana <sup>1</sup>.

Metanol i formaldehid su plinovi koji pripadaju skupni lako hlapljivih plinova u Marsovoj atmosferi. Na Zemlji nastaju biološkim putem, približno  $2,7 \cdot 10^{14}$  g/godinu, što je trećina od ukupnog nastalog metana. Prosječni udio metanola u Zemljinoj atmosferi je 0,6 ppb, a metana 1800 ppb što je poprilično velika razlika. Razlog tomu je što je metanol izvor atmosferskog ugljikovog monoksida i formaldehida. Vrijeme života metanola na Marsu je kraće te iznosi 7,5 sati. Zbog toga je njegov udio nizak i iznosi 10<sup>-6</sup> ppb. Metanol i formaldehid nastaju samo oksidacijom metana. Istraživanja su utvrdila da je udio formaldehida manji od 3,9 ppb, a metanola manji od 7 ppb. Ako se u obzir uzme omjer metana i metanola koji treba biti približno 3 da bi se kao izvor plinova smatrao biološki, može se zaključiti da u slučaju Marsovih plinova to nije tako. Također iz ovog se ispitivanja ne može zaključiti da metanol i formaldehid nastaju samo fotokemijskim putem iz metanola, jer je njihov udio mnogo veći od predviđenog 10<sup>-6</sup> ppb. Alkani su zanimljivi za istraživanja jer mogu imati biološko ili geološko podrijetlo. Na Zemlji termogeni izvori proizvode približno jednake količine etana i metana, dok degradacijom biološkim putem nastaje puno više metana. Osim izravnog izvora alkana, alkena i alkina, može se odrediti i mjesto njihovog nastanka zbog kratkog vremena života. Pronađen je vrlo mali udio etana u atmosferi, manje od 0,6 ppb što je očekivano, ako se u obzir uzme samo fotokemijski nastanak iz metana. Otkriveni su eten i etin, ali s malo većim udjelom od 6 ppb.

U atmosferi Marsa postoji radikal hidroperoksil koji je uz  $O_3$  i  $OH$  zaslužan što u atmosferi dominira  $CO_2$ , a ne  $CO$ . Naime, fotoliza  $CO_2$  pri čemu nastaju  $CO$  i  $O$  mnogo je brža od reakcije u kojoj sudjeluju tri molekule  $CO$ ,  $O$  i  $NO/O_3$  pri čemu nastaje  $CO_2$ . Očekivani rezultat bi bio da će brža reakcija nastajanja  $CO$  prevladavati. No, reakcija nastajanja  $CO_2$  kataliziraju  $O$ ,  $O_3$ ,  $HO$ ,  $H$  i  $HO_2$  radikali i molekule. Spektar za hidroperoksil je složen, jer se njegovi signali protežu na nekoliko valnih duljina. Zbog toga nije sa sigurnošću određen njegov udio u atmosferi, koji se može kretati između 0,1 i 6 ppb<sup>1</sup>.

Dušik je drugi po redu zastupljenosti u atmosferi. Smatra se glavnim izvorom dušika za njegove spojeve iako se ne zna od kuda potječe. Velika količina dušika pohranjena je u regolitu u obliku soli na površini Marsa. Kada bi se sva ta količina dušika ispustila u atmosferu, premašilo bi trenutni udio dušika u atmosferi za faktor od 1000. U doticaju s bilo kojim abiološkim procesom nastaje  $N_2O$  te se zbog toga vrlo jednostavno nalazi izvor njegova ispuštanja. Detektirano je 90 ppb. Prisutnost amonijaka u podzemlju omogućilo bi postojanje tekuće vode pri određenim dubinama. Pronađeno je 60 ppb što pobuđuje znatiželju za istraživanjem Marsove unutrašnjosti u pokušaju pronalaska tekuće vode. Prisutnost  $HCN$ -a ukazuje na plin koji je nastao samostalno među prvim plinovima, jer on ne može nastati u atmosferi ugljikovog dioksida. Detektirano je 5 ppb.

$HCl$  sudjeluje u brojnim reakcijama u kojima nastaju plinovi poput  $ClO$ ,  $ClO_2$ ,  $HOCl$ ,  $ClCO$ ,  $ClCO_2$ ,  $CH_3Cl$ . Klora ima u atmosferi, ali nije svugdje jednako prisutan. Najveća koncentracija mu je blizu vulkana Tharsis i na područjima planina. Prisutnost perklorata je očekivana zbog oksidirajuće prirode atmosfere i povoljnih uvjeta za njihovo opstajanje.

## § 3. LITERATURNI IZVORI

1. G.L.Villanueva, M.J.Mumma, R.E.Novak, Y.L.Radeva, H.U.Käufel, A.Smette, P.Hartogh, *Icarus* **223** (2013) 11-27.
2. J.D.Fix, *Astronomy; Journey to the Cosmic Frontier*, The McGraw Hill, University of Iowa, Second edition, 1999, str.120-252.
3. <https://mars.nasa.gov/MPF/science/clouds.html> (datum pristupa 22. svibnja 2021.)
4. <https://www.zmescience.com/other/did-you-know/why-is-mars-red/> (datum pristupa 22. svibnja 2021.)
5. <https://hr.eferit.com/zasto-je-mars-crven/> (datum pristupa 22. svibnja 2021.)
6. M.J.L.Turner, *Expedition Mars*, Springer, Leioester, 2004, str.207.-237.
7. <https://airandspace.si.edu/exhibitions/exploring-the-planets/online/solar-system/mars/wind/> (datum pristupa 22. svibnja 2021.)
8. <https://airandspace.si.edu/exhibitions/exploring-the-planets/online/solar-system/mars/wind/dust-devils.cfm> (datum pristupa 22. svibnja 2021.)
9. N.M.Schneider, Z.Milby, S.K.Jain, F.González-Galindo, E.Royer, J.C.Gérard, S.W.Bougher, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **125** (2020) 1-18
10. P.V.Johnson, R.Hodyss, J.L.Beauchamp, *Journal of The American Society for Mass Spectrometry* **25** (2014) 1832–1840
11. E.S.Kite, P.Gao, C.Goldblatt, M.A.Mischna, D.P.Mayer, Y.L.Yung, *Nature Geoscience* **10** (2017) 737-740
12. C.R.Webster, P.R.Mahaffy, S.K.Atreyia, J.E.Moores, G.J.Flesch, C.Malespin, A.R.Vasavada, *Science* **360** (2018) 1093–1096
13. J.L.Eigenbrode, R.E.Summons, A.Steele, C.Freissinet, M.Millan, R.Navarro-González, P.Coll, *Science* **360** (2018) 1096–1101
14. P.Voosen, *Science* **360** (2018) 1054-1055
15. O.Korablev, K.S.Olsen, A.Trokhimovskiy, F.Lefèvre, F.Montmessin, A.A.Fedorova, A.C.Vandaele, *Science Advances* **7** (2021) 1-8
16. A.C.Vandaele, O.Korablev, F.Daerden, S.Aoki, I.R.Thomas, G.Liuzzi, *Nature* **568** (2019) 521–525
17. S.Aoki, A.C.Vandaele, F.Daerden, G.L.Villanueva, G.Liuzzi, I.R.Thomas, *Journal of Geophysical Research: Planets* (2019) 1-26.
18. J.Alday, C.F.Wilson, P.G.J.Irwin, K.S.Olsen, L.Baggio, F.Montmessin, A.Shakun, *Astronomy & Astrophysics* **630** (2019) 1-8.