

## ATOMERŐ-MIKROSZKÓP A MARSON

*Pozsgai Imre*  
**Richter Gedeon Rt.**

Az embert különös érzések fogják el, amikor a földi méretekhez képest nagy távolságokat, tíz vagy százmillió kilométereket, vagy amikor éppen az ellenkező végletet, a mikrovilág nanométereit próbálja maga elé képzelni. Hát még ha a nagyon nagy és a nagyon kis méretek egyetlen kérdéskörön belül fordulnak elő. Ilyen például az, amikor az ember a Marson, sok millió kilométer távolságra a Földtől, nanométeres távolságokat akar mérni atomerő-mikroszkóp segítségével.

Az atomerő-mikroszkóp a túsugaras mikroszkópok családjának második tagja (1986; az első a pásztázó alagút mikroszkóp, 1981) rendkívül érzékeny műszer és nagymértékben kell a környezet rezgéseitől függetleníteni, hogy működőképességét biztosíthassuk. Ezért nehéz elképzelni, hogy atomerő-mikroszkóp a Földön kívül, mostoha űrbéli körülmények között működjön.

Az alábbiakban Mars-missziók, majd az atomerő-mikroszkóp (AFM) rövid ismertetése után arról szeretnék írni, hogy mi indokolta AFM bevonását a Mars-kutatásba, milyen műszaki megoldásokra volt szükség az űrbéli körülményeket elviselő AFM kifejlesztéséhez.

### **Mars és a Mars-missziók**

A Mars iránt az ember régóta érdeklődik, és ez az érdeklődés az alapja, hogy 2030-2040 között szeretné megvetni lábát a Marson. [\[1-3, 6-8\]](#)

A Mars Földhöz viszonyított legkisebb távolsága körülbelül 60-100 millió km között változik a következő évtizedben, és a kedvező útra kelési időpontok 780 naponként következnek be (ennyi a Mars szinodikus periódusa). A 4-6 hónapig tartó odaút és a Marson tartózkodás együttes optimális ideje ez a bizonyos 780 nap. Ehhez hozzászámolva a visszafelé utat, csaknem három esztendő adódik, hacsak újabb meghajtási technikát (pl. plazmasugarhajtást) nem sikerül kifejleszteni. Addig viszont rengeteg információt kell beszerezni ahhoz, hogy egy ilyen vállalkozás ne valljon kudarcot, márpedig a Mars-missziók között feltűnően sok volt a kudarc.

A Marssal kapcsolatos csillagászati mérések a 19. század elejére nyúlnak vissza, de az ismeretek akkor kezdtek igazán gyarapodni, amikor a Mars mellett elhaladó (Mariner 4, 1965-ben), a körülötte keringő (Mariner 9, 1971-1972) vagy éppen a Marsra leszálló űrszondák (Viking 1 és Viking 2, 1976-ban, Pathfinder 1997-ben) berendezései ontották a mérési eredményeket.

2008 végén a Mars körül három űrszonda kering: a Mars Odyssey, a Mars Express és a Mars Reconnaissance Orbiter; felszínén két Mars-járó működik, a Spirit és az Opportunity, valamint egy álló egység, a Phoenix.

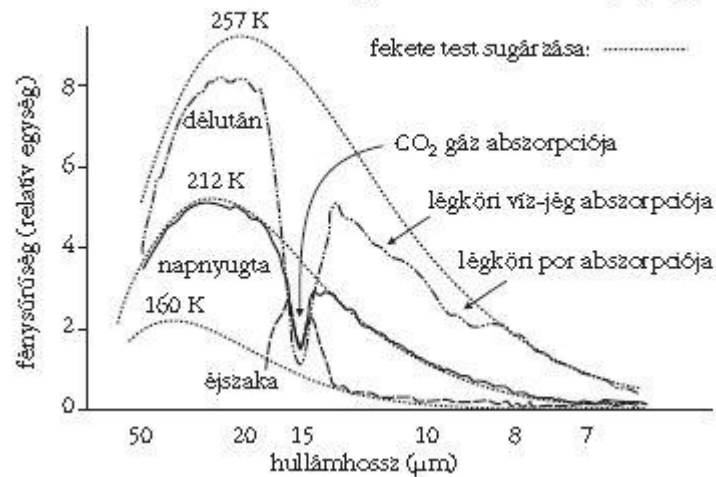
A Mars felszínén mért alacsony hőmérsékletek ismeretében várható, hogy folyékony víz nincs, és ha nincs, akkor a tudomány mai állása szerint élet sincs. A "lehetetlenségre" egy példa a közelmúltból: olyan mikroorganizmust találtak az amerikai Yellowstone Nemzeti Park savas iszapjában, amely optimális életkörülményeit a 80 Celsius-fokos "savfürdőben" találja meg. A Mars Asztrobiológia Kutatócsoport létezése is azt mutatja, hogy komoly érdeklődés van a Marson elképzelt élet iránt. Létezhetnek a Marson olyan baktériumok, amelyek extrém hőmérsékleteket is elviselnek, vagy olyanok, amelyek nagyon hosszú ideig inaktív állapotban maradnak [4, 9]. Ezért, ha egyszer létezett folyékony víz a Marson (márpedig erre közvetett bizonyítékok vannak), akkor élő szervezetek megőrződhettek.

Nemcsak a mikroorganizmusok, de a Mars talaja, a felszínén lévő por is befolyásolhatja az ember tartózkodását a Marson. A por szemcsemérete például a szilikózis szempontjából fontos, ugyanis a 4  $\mu\text{m}$ -nél kisebb szemcsék jutnak le a legnagyobb eséllyel mélyen a tüdőbe. A porok keménységét pedig a mérőműszerek és az űrruha tervezésekor kell ismerni. A Phoenix-missziót megelőzően is volt már közvetett bizonyíték a víz-jég létezésére: a NASA szerint annyi jég van a Mars két sarkvidékén, hogy felolvadása esetén 11 méter mélységű víz borítaná a bolygó felszínét.

A Mars felszínén lévő porviharokról, továbbá a por szemcseméretéről is van rengeteg közvetett adat. Az [1. ábrán](#) látható termoemissziós spektrumokat a Mars körül keringő Global Surveyor fedélzetén lévő spektrométer vette fel 1997-ben. A mérési eredményeket az ábrán kiegészítik a feketetestspektrumok is, amelyek bár közelítések (minthogy a Mars nem tekinthető tökéletes feketetestnek), mégis sok következtetést lehet levonni belőlük. A hőmérséklet az éjszakai 160 K-ről (-113 °C) délutánra 257 K-re (-16 °C) emelkedik. A légkör viszonylag sok szén-dioxidot tartalmaz, ezt jelzi a 15  $\mu\text{m}$  körüli erős abszorpció, de a légkörben lévő víz-jég és por hatása is detektálható volt.

Az [1. ábrán](#) lévő spektrumokat elméletileg modellezni lehet, ebből meg lehetne állapítani a por kémiai összetételét. Sajnálatos módon túl sok feltételezést kell tenni a modellben az összetétel meghatározásához az egyes poralkotók szemcseméretére, alakjára, [2. ábra](#). A Phoenix mikroszkópos egysége felületi simaságára, szemcseméret-eloszlására, optikai tulajdonságára (a törésmutató valós és képzetes részére), így nem jutottak elfogadható eredményre. Az 1971-72-es porvihar magyarázatára egy sor anyagot (pl. kvarc, bazalt, andezit, obszidián, gránit stb.), illetve ezek kombinációját tételezték fel a por alkotójaként, mégsem kaptak kielégítő egyezést. Viszont eredménynek tudható be, hogy tíznél több Mars-misszió közvetett méréseinek kiértékelésekor a porszemcsék effektív méretére mindig 2  $\mu\text{m}$ -nél kisebb értéket kaptak.

1. ábra. A Mars termóemissziós spektruma (Global Surveyor, 1997)



A fentiek alapján érthető, hogy miért fontos a Mars felszínét fedő finom por tulajdonságainak (méret, méreteloszlás, keménység stb.) pontos ismerete, és miért terveztek közvetlen mikroszkópos méréseket a bolygó felszínén a Phoenix-misszió során.

## Phoenix-misszió

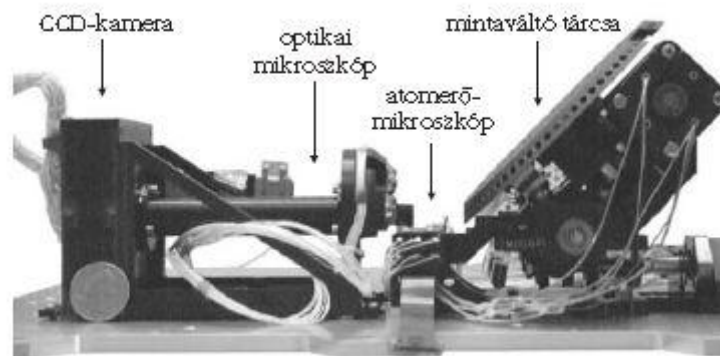
A Phoenix Mars-szonda 2007. augusztus 4-én indult és 295 napos utazás után 2008. május 25-én szállt le a Marsra. Az Arizonai Egyetem vezetése alatt álló projekt széles együttműködés eredményeként jött létre, amelynek résztvevői az Amerikai Űrhajózási Hivatal (NASA), a NASA Jet Propulsion Laboratory (a California Institute of Technology-ban), a Lockheed Martin Space System és még sokan mások, közülük említsük meg a Neuchâtel-i Egyetemet, a Baseli Egyetemet és a Nanosurf A.G. alkotta svájci konzorciumot, amely a cikk címében szereplő atomerő-mikroszkópot létrehozta.

A Phoenix-küldetés célja volt víz-jég jelenlétét kimutatni a felszín alatt, és megvizsgálni a talaj összetételét, hogy alkalmas-e az élet fenntartására.

A leszálló egység berendezései közé tartozik - többek között - egy ásóval ellátott robotkar és két tudományos egység: a TEGA (termikus gáz analizátor) és a MECA. Az előbbi a marsi mintákat felmelegítő kályhákat és tömegspektrométert tartalmaz, az utóbbi pedig mikroszkópos (M), elektrokémiai (E) és konduktivitási (C) analíziseket (A) végez a talajmintákon.

A sajtóban nagy visszhangot kapott, hogy a Phoenix-misszió során sikerült közvetlenül vizet kimutatni a Mars felszínén talált jégből. A küldetésben résztvevő AFM-ről kevesebb szó esett, pedig mint látni fogjuk, igencsak nagy műszaki teljesítmény volt. A néhány nanométer felbontásra képes berendezés gyufásdoboz méretű, és a meghajtó elektronika nélkül 15 grammot nyom. Ez a kis méret jelentős, ha figyelembe vesszük, hogy minden egyes Marsra küldött kilogramm 1 millió dollárba kerül. A Phoenix atomerő-mikroszkópja nem az első a világűrben, mert az Európai Űrügynökség (ESA) 2004-ben felbocsátott Rosetta űrszondáján már helyet kapott egy MIDAS (Micro-Imaging Dust Analysis System) elnevezésű atomerő-mikroszkóp.

Mi ebben a cikkben főként a Phoenix mikroszkópos egységére, azon belül is az atomerő-mikroszkópra összpontosítjuk figyelmünket ([2. ábra](#)).



2. ábra. A Phoenix mikroszkópos egysége

Az optikai mikroszkópban keletkező képet CCD-kamerával detektálták. Az optikai mikroszkóphoz képest kisméretű atomerő-mikroszkóp néhány nanométeres felbontásával jelentősen kiszélesíti a még mérhető szemcsék tartományát a fénymikroszkóppal összevetve. A mintákat a mintaváltó tárcsa vitte a vizsgálatra alkalmas pozícióba. Mielőtt a képen látható atomerő-mikroszkóppal megismerkednénk, vessünk egy pillantást a földi körülmények között működő atomerő-mikroszkópra, amelynek megtervezésekor és kivitelezésekor távolról sem kellett olyan szigorú követelményeknek eleget tenni, mint az űrbéli változatnak.

## Az atomerő-mikroszkóp működési elve és földi változatai

Az atomerő-mikroszkóp (AFM) működését sematikusán a [3. ábrán](#) láthatjuk.

A vizsgálandó minta fölött egy rugalmas tartón, nevezzük szondakarnak, található egy tű, amely alatt a vizsgálandó minta vízszintes síkban pásztázó mozgást végez. A pásztázás módja olyan, hogy egy pontban való információgyűjtés után az asztal a következő pontba lép, majd a sor végén általában visszamegy az adott soron, mielőtt átlép a következő sorba. Az érzékelő tű, vagy ahogy az [ábrán](#) nevezzük, tűszonda, kölcsönhatásba kerül a minta felszínével és rá vonzó vagy taszító erők hatnak attól függően, hogy milyen távol van a minta felszínétől ([3.b ábra](#)). Ezáltal a mintafelület topográfiaja leképezhető. A szondakar lehajlását a Hooke-törvény írja le. Meg kell jegyezni, hogy a [3.b ábrán](#) feltüntetett van der Waals-erőket csak egy lehetséges kölcsönhatásnak szabad tekintenünk, amely most a megértés elősegítésére szolgál. Sok egyéb kölcsönhatási forma létezik, például mágneses, kapilláris, elektrosztatikus stb. erők, amelyek mérése az atomerő-mikroszkópia egy-egy külön ágát képezik.

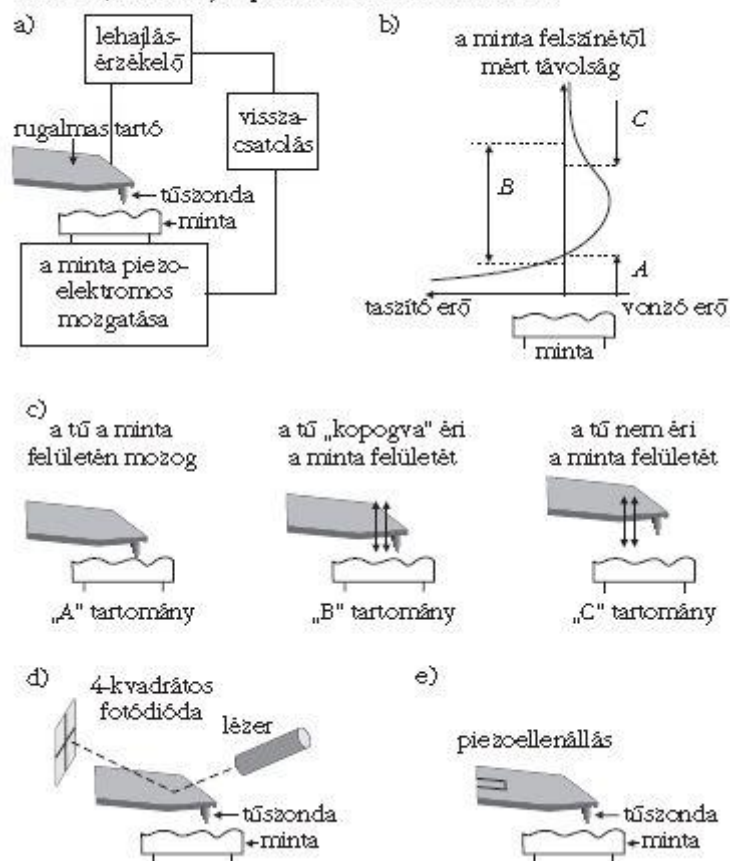
A szondakar mintához viszonyított magasságát a visszacsatoló körrel lehet szabályozni. Amikor a tűszonda a minta felszínét éri ([3.c ábra](#)), akkor a taszítóerőket használjuk a felület egyenetlenségeinek leírására. Puha mintafelületek esetén ez az üzemmód a minta megkarcolását vonhatja maga után, szerencsére a vonzó erők tartományában is ("B" és "C" tartomány az [ábrán](#)) lehet működtetni a mikroszkópot. Ilyenkor a szondakart a sajátfrekvenciájának megfelelő rezgésbe hozzák és a vizsgált felület a szondakar rezgésének amplitúdóját vagy a frekvenciáját változtatja meg, ez szolgál a mérés vagy képalkotás alapjául. Alapesetben a szondakar lehajlását mérik; a [3.d](#) és [3.e ábrán](#) a két leggyakrabban alkalmazott detektálást láthatjuk: a lézersugárzást érzékelő fotodiódát, illetve a szondakarbon ébredő mechanikai feszültség piezoelektromos detektálását.

Nem kézenfekvő, hogy a leírtak a valóságban is működnek: az 1970-es években a műszaki feltételek hiányoztak ahhoz, hogy mindezt kivitelezni lehessen [5].

A felbontóképességet az AFM-gyártók számszerűen nem szokták megadni, mert azt a minta síkjában a tűszonda mérete és a felület tulajdonságai együttesen határozzák meg. Minél kisebb a szonda lekerekítési sugara, annál jobb felbontás érhető el. Ha még azt is hozzávesszük, hogy olyan tűszonda, amely egyetlen atomban végződik, nem számít kuriózumnak, akkor bizony nanométernél kisebb felbontásra számíthatunk. A minta felületére merőleges irányban meg szokták adni, hogy a pásztázó mechanika mekkorára korlátozza a felbontást, és ez általában 0,05 nm. A kristályrács atomjai megjeleníthetők, ha az atomerő-mikroszkópot ultravákuum-körülmények között alkalmazzák. Lényeges, hogy a tűsugárral működő mikroszkópoknál nincs lencse, és ennek következtében nincsenek lencsehibák. Ugyanakkor nem kellő vékonyágú tű használata műtermékek képződéséhez vezethet.

Általánosságban elmondható, hogy AFM felbontóképessége körülbelül ezerszer jobb, mint a fénymikroszkópé, és ha ez utóbbit 200 nm-nek vesszük, akkor az AFM felbontóképessége a minta síkjában 0,2 nm. A minta felületére merőleges irányban jobb, körülbelül 0,05 nm.

3. ábra. Az atomerő-mikroszkóp: a) működési elv, b) a tűre ható van der Waals-erők, c) működési módok, d) a lehajlás lézeres detektálása, e) a lehajlás piezoelektromos detektálása

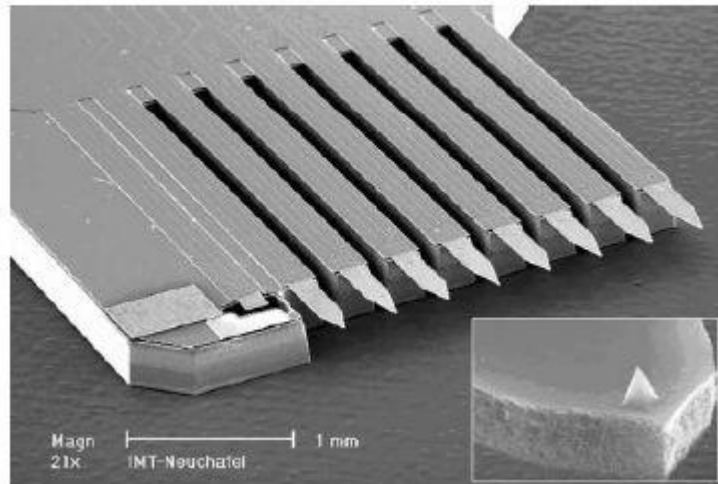


Az atomerő-mikroszkóp erőmérő üzemmódban is működtethető, 10-12 newton erőt meg lehet mérni, és például a biológusok számára rutin feladatnak számít annak az erőhatásnak kimérése atomerő-mikroszkóppal, amely egy összecsavarodott DNS molekula kiegyenesítéséhez szükséges.

## Az atomerő-mikroszkóp (AFM) űrbeli változata

Az itt ismertetendő AFM különlegességét [\[10\]](#) az űrutazás által szabott kemény követelmények jelentik. Emiatt nem is lehetett olyan tökéletes, mint földi "testvére". A mechanikai igénybevétel, a rázkódás különösen erős a kilövés és landolás idején. A hőmérséklet akár  $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$  is lehet, és a nyomás erősen eltér a földi viszonyoktól. A Mars légköri nyomása 7 mbar, ami miatt az elektromos kisülések könnyebben bekövetkezhetnek az elektronikában, mint a Földön. A következő veszélyt a kozmikus sugárzás hordozza magában, amely meglehetősen kemény és veszélyesebb az elektronikára, mint az alfa- és béta-sugarak. Még tovább lehetne sorolni a veszélyforrásokat, de inkább említsünk egy másik erősen korlátozó tényezőt, a pénzt. A pénz határozza meg, hogy mekkora tömeget és mekkora térfogatot küldhetnek fel, mert a költségek e kettővel arányosak, ezért mindkettőnek a lehető legkisebbnek kell lennie.

4. ábra. Az atomerő-mikroszkóp chipjének pásztázó elektronmikroszkópos képe. Nyolc szondakart készítettek, hogy a tűszonda kopása esetén egy új szonda vehesse át a feladatot. A jobb alsó sarokban a szondakar végén felfelé néző tűszonda látható.



Ha visszatekintünk a [3.a ábrára](#), akkor a mintamozgató egységen kívül az összes többi szilíciumlapkára, pontosabban szigetelőanyagon lévő szilíciumlapkára integrálták. A [3.d](#) és [3.e ábrák](#)on látható lehetőségek közül nem a lézersugaras, hanem a piezoelektromos detektálást valósították meg, mert energiaigénye kisebb, mint a lézeres változatnak, és behangolása sem olyan kritikus. A piezoelektromos ellenállást bór implantálással készítették a szondakaron. Az AFM-chipet a [4. ábra](#) mutatja.

A részletek mellőzésével azt mondhatjuk, hogy a mikroelektronikában ismeretes gyártási lépéseket, fotolitográfiát, oxidmaratást, ionimplantálást, foszforszilikát üveg felvitelét, kémiai rétegleválasztást (CVD) stb. használtak arra, hogy a szondakar, a tűszonda és a szükséges elektronika monolitikusan létrejöjjön egy n-típusú szilícium-szilíciumoxid lapon.



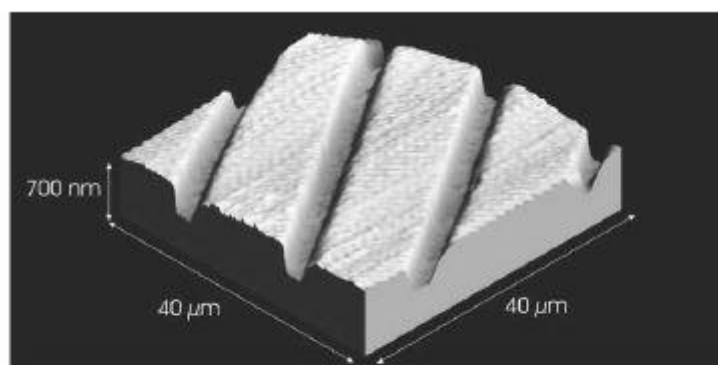


5. ábra. A komplett marsbeli atomerő-mikroszkóp. A kép közepén a 4. ábrán mutatott AFM-chip látható.

A mintamozgató egységet (3.a ábra alsó része) földi körülmények között piezoelektromos kerámiahengerrel valósítják meg. A meghajtásához mintegy 100 V feszültségre van szüksége, viszont a marsi 7 mbar szén-dioxid atmoszférában már 50 V is átütne. Ezért olyan mágneses mintamozgatót terveztek, amely 12 V-tal működik. Ez az egység foglal helyet az AFM-chip alatti sötét dobozban az 5. ábrán.

A 6. ábra a Marsról küldött első atomerő-mikroszkópos képet mutatja, amely egy kalibrációs kép, de ez mit sem von le értékéből.

A 7. ábrán egy marsbeli porszemcse AFM-képét látjuk a bekarikázott helyen. A hordozóban lyukak voltak kiképezve, hogy a porszemek ott csapdába essenek.



6. ábra. Az első AFM-kép a Marsról; a kalibrációra szolgáló objektumot mutatja.

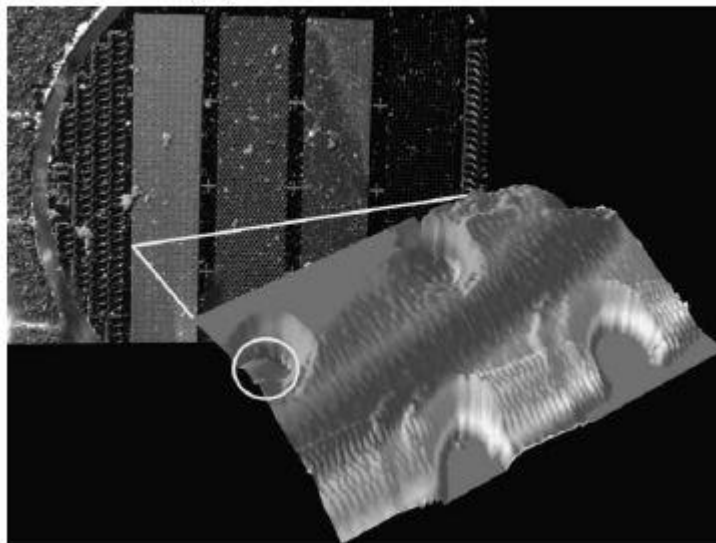
Néhány érdekesség a tervezésből és kivitelezésből:

- Az AFM chip oly kicsi, hogy 60 darabfér el egy 10 cm átmérőjű szilícium szeleten.
- Felváltva alkalmaztak szilícium és gyémánt tűszondát a nyolc szondakaron. A szilícium tűt monolitikus formában KOH-ban való maratással állították elő a szondakarból, míg a gyémánt tűket a Si szondakaron előkészített piramis alakú

bemélyedésekben kémiai rétegleválasztással (CVD) hozták létre. A gyémánt tűket keményebb porszemek vizsgálatára tervezték.

- A kozmikus sugárzás elleni védelemként az elektronikát úgy tervezték, hogy minden egyes bitet három független regisztercellában tárolnak, amelyeket egy "szavazó" cella vizsgál, hogy fellépett-e sérülés és dönt arról, hogy melyik bit volt többségben a három regiszterben. Különösen veszélyes az, amikor a kozmikus sugárzás olyan helyen üt be, ahol rövidzárat okoz a tápvonalban és a keletkező nagy áram tönkretesz egy CMOS chipet. Ennek megakadályozására védő áramkört kellett beépíteni, amely rövidzár esetén lekapcsolja a tápegységet, majd kis idő múlva újra visszakapcsolja és letölti a megszakadt programot.
- Az AFM-et földi viszonyok között a belélegzésre veszélyes tartományba eső (100 nm - 3  $\mu$ m)  $\alpha$ -kvarc kristályokon tesztelték 10 nm-es lekerekítési sugarú szondatűkkel. A szemcsék méreteloszlását lézerdiffrakciós mérésekkel határozták meg, majd 150 szemcsét AFM-mel is megmértek. A kétféle eljárás jó egyezést mutatott.
- A berendezést karcolások profiljának meghatározására is használták, hogy ebből a karcolást okozó szemcsék keménységére következtethessenek.
- Külön gondot kellett fordítani arra, hogy a berendezés sterilen kerüljön fel a Marsra. Téves következtetésekre lehet jutni a marsi életre vonatkozóan, ha a műszert az ember elszennyezi.

7. ábra. Fénymikroszkópos (fent) és atomerő-mikroszkópos kép (lent) montážsa. A körrel jelölt helyen egy marsbeli porszem AFM-képe látható. A hordozó üreges kiképzése a részecskék helyzetének stabilizálását szolgálja.



## Összefoglalás

A Phoenix-expedíció egy lépés ahhoz, hogy az ember majdan megvethesse a lábát a Marson. A Mars felszínén lévő finom por jellemzésére olyan miniatürizált atomerő-mikroszkópot küldtek fel, amely néhány nanométeres felbontásával a fénymikroszkóp lehetőségeit messze túlhaladja. Ez a példa arra is ráirányítja a figyelmet, hogy a miniatürizálás segítségével olyan költségcsökkenést lehet elérni, ami az eddigi űrkísérletezés újragondolását teszi szükségessé.

## Irodalom:

1. <http://origo.hu/tudomany/mars/>



2. <http://hirek.csillagaszat.hu/mars.html>
3. <http://www.urvilag.hu/>
4. <http://www.origo.hu/tudomany/vilagur/20080102-asztrobiologia-szelsoseges-elolenyek-es-elohelyek-a-foldon.html>
5. Kálmán Erika, Nagy Péter: Pásztázó tűszondás mikroszkópia. In: *Műszaki felülettudomány és orvosbiológiai alkalmazásai* (szerk.: Bertóti, Marosi, Tóth) B+V Lap- és Könyvkiadó Kft. 2003. 187- 218.
6. Arizona University: a <http://phoenix.lpl.arizona.edu/>
7. JET Propulsion Laboratory: <http://marsprogram.jpl.nasa.gov/>
8. NASA: [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/phoenix/](http://www.nasa.gov/mission_pages/phoenix/)
9. Mars Astrobiology Group Budapest, <http://www.colbud.hu/esa/>
10. Sebastian Gautsch: *Development of An Atomic Force Microscope and Measurement Concepts for Characterizing Martian Dust and Soil Particles, Dissertation*. Institute of Microtechnology University of Neuchâtel, 2002.