

# **Simulacija udarnih kratera**

Marin Vojković

Mentor: doc. dr.sc. Dejan Vinković

## **ZAVRŠNI RAD**

Split, rujan 2011.

Odjel za fiziku  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Sveučilište u Splitu



## Sažetak

Udarni krateri su geološke strukture koje nalazimo na svim čvrstim tijelima Sunčevog sustava. Budući da njihove dimenzije mogu varirati od par centimetara (na malim tijelima npr. asteroidima), a proces njihova nastajanja može imati i globalne posljedice za klimu i površinske uvjete planeta, javlja se potreba za boljim razumijevanjem procesa njihova nastanka, te parametara koji određuju njihove dimenzija i oblik. U ovom radu predstavljamo dvije eksperimentalne metode simulacije udarnih kratera, zračnom puškom, te eksplozivom. Rezultate eksperimenata smo usporedili s kraterima iz novog GT-115225 kataloga marsovskih kratera. Laboratorijski krateri, koji su reda veličine centimetara dobro se uklapaju u gravitacijski režim nastajanja zahvaljujući zanemarivoj čvrstoći podloge. Njihov odnos dubine i promjera isti je kao i kod nedavno nastalih kratera koje nalazimo na Marsu, na čiji oblik i omjer dubine i promjera još nije utjecala erozija i zatrpanje.

## Sadržaj

1. Uvod .....	6
2. Mjerenja.....	10
2.1. Zračna puška.....	11
2.2 Eksploziv .....	14
3. Analiza mjerenja i rezultati.....	16
4. Diskusija.....	18
5. Zaključak.....	19
Zahvale .....	20
Popis literature.....	21
Dodatak A .....	22

## Popis slika

- Slika 1. Primjeri kratera u Sunčevom sustavu.....  
Slika 2. Barringerov krater u Arizoni .....  
Slika 3. Usporedba strukture jednostavnih i složenih kratera .....  
Slika 4. Deformacije površinskog sloja uslijed eksplozije .....  
Slika 5. Priprema podloge.....  
Slika 6. Barringerov krater u Arizoni; Laboratorijski krater - usporedba.. ....  
Slika 7. Krater Tycho na Mjesecu;Laboratorijski krater.....  
Slika 8. Snimka jednog ispaljivanja zračne puške.. ....  
Slika 9. Priprema sloja kave ispod površine.....  
Slika 10. Presjek kratera dobivenog zračnom puškom.....  
Slika 11. Metalni stalak pomoću kojeg reguliramo visinu puške.....  
Slika 12. Detoniranje eksploziva pomoću fitilja .. ....  
Slika 13. Skica naboja eksploziva i njegovog paljenja.. ....  
Slika 14. Graf sa rezultatima mjerena .. ....

## Popis tablica

Tabela 1. Rezultati mjerjenja laboratorijskih kratera.....

## 1. Uvod

Udarni krateri su geološke strukture na površini planeta, satelita ili planetoida nastale udarom nekog manjeg tijela, asteroida ili kometa o njihovu površinu. Sva čvrsta tijela Sunčevog sustava (Merkur, Venera Zemlja, Mjesec, Mars, planetarni sateliti, asteroidi, ...) su preživjela mnogo ovakvih udara, a to se može i jasno vidjeti (Slika1.), naročito na geološki neaktivnim tijelima.

Zemlja je kroz svoju povijest bila mnogo puta bombardirana (Slika2.), no zbog toga što se njena površina stalno mijenja, mnogi krateri su izbrisani ili su jako teško uočljivi.

Budući da veličina impaktora (pa tako i snaga eksplozije) mogu jako varirati, neki udari utječu samo na malo područje, dok neki imaju globalne posljedice. Zbog toga je važno poznavati mehanizam udara i nastanka kratera.



Slika 1.. Primjeri kratera u Sunčevom sustavu: saturnov satelit Mimas (lijevo), asteroid Eros (desno). Čvrsta tijela u Sunčevom sustavu nose tragove sudara s drugim tijelima. Krateri su poput „ožiljaka“ koji ostaju nakon takvih sudara (slike preuzete iz [1]).



Slika 2. Barringerov krater u Arizoni (slika preuzeta iz [1])

Udari poput onog 1908. u pokrajini Tunguska u Sibiru (impaktor oko 70-90m) se ponavljaju otprilike svakih 200 godina. Veći udari su manje učestali: tijela promjera oko 1km, u prosjeku udaraju svakih 500 000 godina.

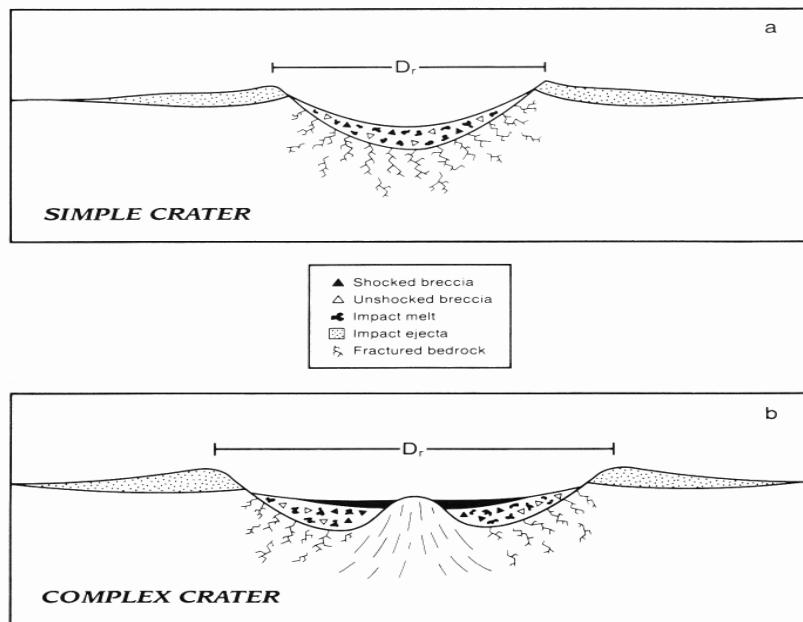
Kada neki asteroid ili malo tijelo uđe u zemljinu atmosferu, tada ga nazivamo bolid. Njihova brzina se kreće od 11km/s (druga kozmička brzina - minimalna brzina koju tijelo treba postići da se osloboди Zemljinog gravitacijskog utjecaja, te minimalna brzina kojom će tijelo pasti na Zemlju ), do čak 72 km/s.

Prilikom kontakta bolida i atmosfere dolazi do ogromnog povećanja tlaka i temperature na "prednjoj" strani bolida zbog trenja s atmosferom. Ovisno o strukturi i čvrstoći bolida ta razlika tlaka može dovesti do njegove eksplozije iznad površine (što se i dogodilo 1908. u Tunguskoj eksploziji). Kod takvih eksplozija ne dolazi do nastanka kratera i njihovi tragovi se vrlo brzo izgube. Malo veća (i čvršća) tijela prežive prolazak kroz atmosferu i velikom brzinom udaraju o površinu planeta. U trenutku kontakta dolazi do vrlo naglog usporavanja tijela i njegove kompresije. Kod većih udara tlak se penje i do  $10^{12}$ Pa.[1] Ovako visoki tlakovi daleko nadmašuju čvrstoću bilo kojeg materijala tako da se impaktor u cijelosti raspade. U ovoj fazi dolazi do nastanka mnogih karakterističnih kristalnih struktura u stijenama prema kojima se kasnije mogu identificirati mjesto udara, čak i kad je sam krater izbrisana erozijom. Nakon ove početne kompresije, dolazi do dekompresije, pošto materijali teže vraćaju na normalne vrijednosti gustoće i tlakova. Također, dolazi i do drastičnog povećanja temperature, koja je dovoljna da rastopi ili (kod većih udara) potpuno vaporizira impaktor. Sve ovo se odvija kroz nekoliko desetinki sekunde, i brzinama višestruko većim od zvuka, tako da je faza dekompresije zapravo eksplozivna.[2] Nastanak kratera i rasipanje izbačenog materijala koje neposredno slijede, odvijaju se podzvučnim brzinama i traju nešto

duže. Izbačeni materijal u početku ostavlja udubljenje oblika približno polukugle, koja, kako raste postaje paraboloid.[1] Ova formacija nije stabilna, te se nakon što dosegne maksimalnu veličinu stjenke urušavaju, i dio materijala koji je izbačen manjom brzinom ili pod većim kutovima pada nazad, pa nastaje krater, paraboloidnih stjenki, zaravnatog dna, s povišenim rubom.

Jednostavnici krateri se razlikuju od složenih po tome što imaju ravno dno bez ikakvih centralnih ili prstenastih uzvišenja (Slika 3.). Također, kod jednostavnih kratera omjer dubine i promjera je oko 1:5 do 1:7, dok je kod složenih kratera taj omjer oko 1:10 do 1:20.[3] Također gravitacija utječe na složenost kratera. Što je veća gravitacija, manji je promjer kod kojega krater postaje složen. Na Zemlji ( $g=9,81\text{m/s}^2$ ) je taj promjer oko 2-4km[3], dok je na Marsu ( $0,36g$ )[1] otprilike 11,5-16km.

Budući je Zemlja geološki jako aktivna većina udarnih kratera na njoj je izbrisana ili su jako deformirani. Mars s druge strane je mnogo manje geološki aktivavan planet, te su krateri na njemu mnogo bolje očuvani, zato smo ga i odabrali za ov istraživanje. Cilj ovog rada je bio pronaći jednostavnu metodu simulacije marsovskih kratera, kako bismo mogli bolje razumjeti proces nastajanja ovih struktura. U tu svrhu smo obavljali mjerjenja na laboratorijskim kraterima i uspoređivali rezultate s mjerjenjima marsovskih kratera.



**Slika 3. Usporedba strukture jednostavnih (simple craters) i složenih kratera (complex craters).**  
Jednostavnici krateri imaju zaobljene stjenke i ravno dno, te rubni povišeni prsten, dok složeni krateri u središtu imaju povišenje ili čai i po nekoliko prstenova oko njega.(slika preuzeta iz [1])

Teorija nastanka jednostavnih kratera razlikuje dva režima: gravitacijski režim i režim čvrstoće tla. Režim čvrstoće tla koristimo kad je čvrstoća tla znatno manja od tlaka stvorenog udarom. Oblik kratera u ovom slučaju ovisi jako puno o svojstvima tla, kao i o svojstvima impaktora. Gravitacijski režim se upotrebljava kad je čvrstoća tla zanemariva u usporedbi s tlakom stvorenim impaktom. Karakteristike kratera tada ovise samo o veličini, masi i brzini impaktora, te o gravitacijskoj sili. Ovo uglavnom vrijedi za kratere promjera reda veličine par kilometara, ali u laboratorijskim eksperimentima se pokazuje da se u slučaju kad je čvrstoća podloge zanemariva to može proširiti i za mnogo manje kratere. To je upravo slučaj kod našeg eksperimenta, jer imamo podlogu koja se sastoji od mnoštva sitnih, međusobno nepovezanih čestica. Dimenzija ovakvih jednostavnih kratera dobivenih mjeranjima na Mjesecu, zemlji i drugim tijelima slijede relaciju:

$$d = 0.204 \cdot D \quad (1)$$

gdje je  $d$  dubina, a  $D$  promjer kratera[4]. Koeficijent 0.204 je dobiven iz jednadžbi za radijus kratera na razini tla, razine dna kratera ispod ruba, te visine ruba iznad originalne razine tla. Ako mjerimo  $d/D$  od ruba kratera, ovaj koeficijent će iznositi 0.2[4]. Sada trebamo provjeriti da li naši eksperimenti stvaraju kratere čije su dimenziije u skladu s ovom relacijom.

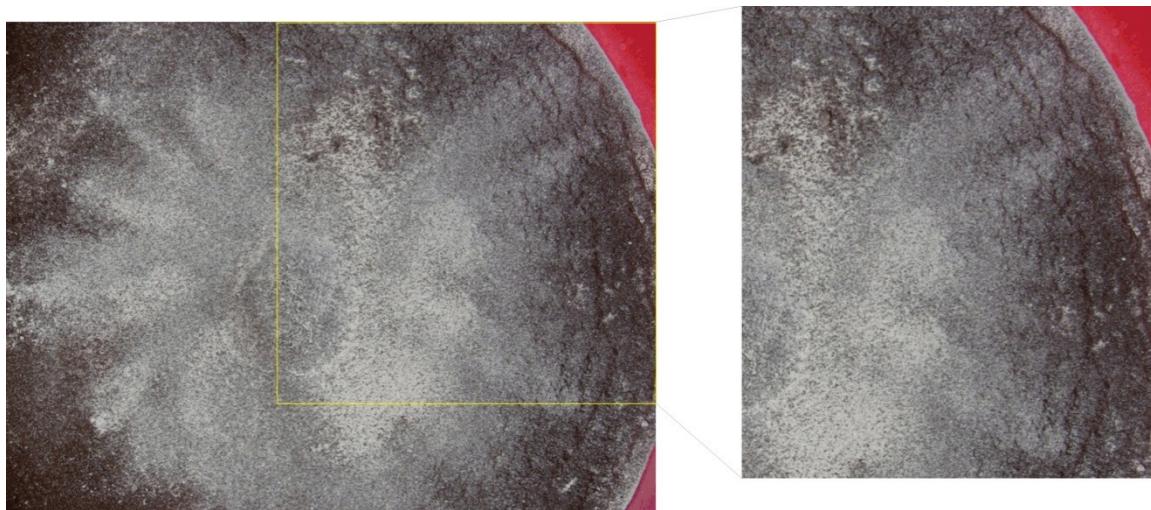
Glavna ideja eksperimenta je bila naći što jednostavniju metodu dobivanja kratera u laboratoriju, koji bi poslužili kao aproksimacija pravih kratera na Marsu. Rezultate mjeranja laboratorijskih kratera dobivenih zračnom puškom, kao i onih dobivenih eksplozivom, uspoređivali smo s kraterima na Marsu, iz kataloga GT-115225[5], koji sadrži 115 225 Marsovih kratera identificiranih iz podataka dobivenih s MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter), sa laboratorijskim kraterima dobivenim eksplozijama sfernih naboja, te sa novonastalim kraterima na Marsu[6].

## 2. Mjerenja

Jedna od metoda simuliranja impaktora je ispuštanje različitih komada metala i kamenja sa različitih visina (pa imamo različite energije udara). Takav pristup međutim ima vrlo velik nedostatak, a to je što tako ispušteni projektili ne postižu ni izbliza dovoljne brzine, pa stoga ne stvara eksploziju (i pritom se raspadne), nego se samo zabije u podlogu.

U ovom smo eksperimentu koristili drugaciju metodu. Udare smo simulirali hitcem iz prazne zračne puške, te kasnije eksplozijama. Ovaj pristup je bolji od gore opisanog zato jer pri stvarnim udarima energija udara bude toliko velika da se sam impaktor potpuno dezintegrira, pa je od trenutka kontakta imaktora i podloge cijeli proces zapravo klasična eksplozija. Također, na taj način nema dijelova projektila koji deformiraju oblik kratera.

Pokuse smo radili u spremniku dimenzija znatno većih od dimenzija kratera koje smo dobivali, tako da ne bi došlo do deformacija kratera zbog odbijanja udarnih valova od stijenki. Ovaj efekt je jako dobro vidljiv kod kratera rađenih eksplozivom, osobito kada smo radili s većim nabojima.(Slika 4.)



Slika 4. Kod najjačeg naboja eksploziva (635mg) vide se deformacije u površinskom sloju kave koje ostavi udarni val eksplozije. Deformacije su najjače uz rub spremnika i vrlo brzo se prigušuju, pa nemaju znatan utjecaj na konačan oblik kratera.

Kao podlogu smo koristili finu kamenu prašinu, nabavljenu iz obližnjeg kamenoloma vapnenca, koja nastaje pri rezanju kamenja i koristi se kao jalovina. Ovaj materijal smo jednoliko sabijali, tako da je površinska gustoća pri svim eksperimentima bila  $1,60\text{-}1,75\text{g/cm}^3$ . Budući su krateri dobiveni na ovaj način jako osjetljivi (zbog sipkosti podloge), mjerena nismo obavljali direktno, već smo svaki krater posipali cementom i prskali vodom, pa kad cement očvrsne preko svega smo prelili gips, tako da dobijemo čvrsti odljev kojega možemo mjeriti.

## 2.1. Zračna puška

U prvoj fazi eksperimenta, udare smo simulirali hitcem iz zračne puške. Fronta komprimiranog zraka koja izlazi iz cijevi djeluje na podlogu vrlo slično kao i eksplozija impaktora pri stvarnom udaru. Pritom je mnogo bolje ispaljivati praznu pušku, nego olovni metak koji se samo zabije u podlogu stvarajući uzak rov okomitih strana kakav oblikom nimalo ne odgovara pravim kraterima. Radili smo pojedinačno u manjim plastičnim četverostranim posudama zakrivljenih stjenki, duljine stranice 10cm i dubine (u sredini) 10cm. Pogreška mjerena za dimenzije posuda iznosi 0,5cm.

Također priprema podloge ima velik utjecaj na konačni oblik i veličinu kratera. Najvjerniji oblik kratera se dobije ako podlogu lagano sabijemo da bude kompaktna, te poravnamo površinu (Slika 5., Slika 6.).



Slika 5. Pripremu podloge obavljali smo ručno, pazeći pritom da bude jednoliko sabijena i ravne površine kako bismo mogli obaviti što bolja mjerena kratera.



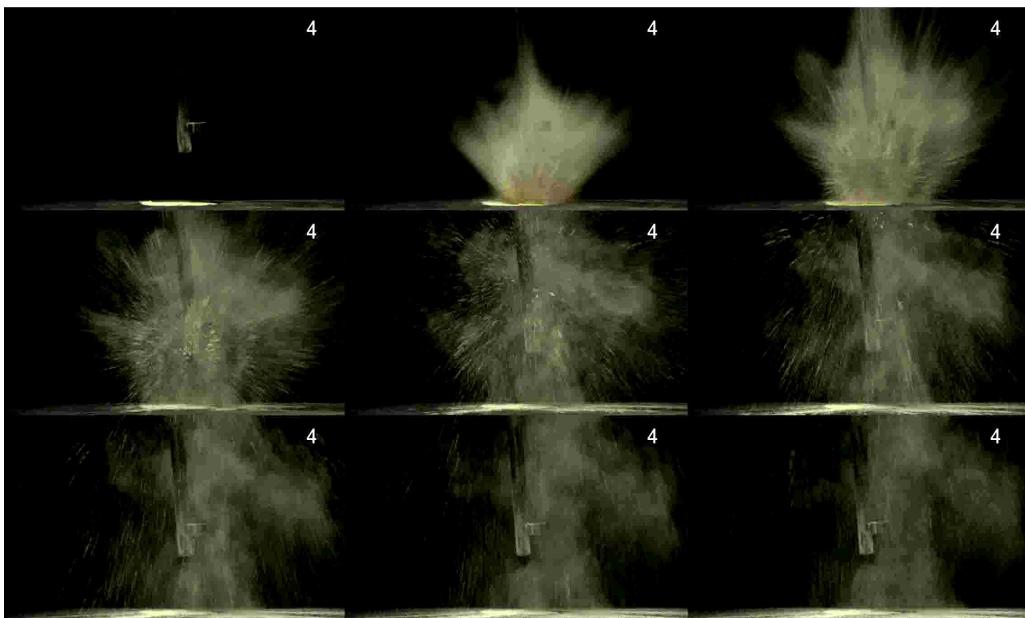
Slika 6. Lijevo: Barringerov krater u Arizoni(slika preuzeta iz [1]); Desno: jedan od laboratorijskih kratera. Vidimo da je povišeni rub, te oblik kod laboratorijskih kratera vrlo sličan onome kod pravih.



Slika 7. Lijevo: krater Tycho na Mjesecu; (slika preuzeta iz [1]) Desno: laboratorijski krater. Podlogu smo prekrili crnim hamer-papirom kako bi se vidjela distribucija izbačenog materijala. Hitcima iz zračne puške postiže se jako slična distribucija izbačenog materijala u laboratoriju kao što se dešava u i stvarnosti.

Podloga treba biti jednoliko sabijena i ravna, pa će se dobro vidjeti i zrake koje stvara izbačeni materijal koji se šire radikalno od kratera (Slika 7.). Kada radimo s rahljom podlogom, dobivamo kratere nepravilnog oblika, okomitih strana kakav ne odgovara oblikom udarnim kraterima.

Po izgledu zraka vidimo da je materijal izbačen približno jednoliko u svim smjerovima. Isto vidimo na seriji slika koja je zapravo snimka jedne od simulacija rastavljena po pojedinačnim sličicama. Vremenski razmak između sličica je 0,0416s (Slika 8.).



Slika 8. Snimka jednog ispaljivanja zračne puške. Neposredno nakon hitca izbačeni materijal formira karakterističan stožac (gornji red, sredina), i raspršuje se. Dio materijala ostaje u zraku još neko vrijeme nakon hitca te mu treba dosta vremena da padne na tlo.



**Slika 9. Priprema sloja kave malo ispod površine (tri lijeve slike) i pripadni krater. Potrebno je paziti kako bi svi slojevi bili približno jednako sabijeni, te da sloj kave koji posipamo bude jednolike debljine.**

Kako bismo promotrili raspodjelu materijala u zrakama s obzirom na dubinu, tj. da vidimo da li dalje odleti materijal koji je bliže površini ili onaj koji je dublje, možemo na površinu posuti tanak sloj nekog tamnjeg praška (npr. kava, kakao, ...).

Također možemo taj sloj postaviti malo ispod površine, tako da vidimo kako se rasipa materijal iz sredine kratera (Slika 9.).

U ovom slučaju je zanimljivo napraviti presjek nastalog kratera, čime vidimo deformacije slojeva koje nastaju pri formaciji kratera (Slika 10.). To je vrlo jednostavno napraviti komadom stakla, pleksiglasa ili nečeg sličnog, samo treba biti vrlo oprezan da se ne naruše stjenke i oblik kratera.

Karakteristike kratera uvelike ovise o energiji eksplozije. U našem eksperimentu energija se može mijenjati tako da mijenjamo visinu puške. Time se postižu različiti tlakovi zraka iz puške u kontaktu s podlogom. Kako bismo mogli što preciznije mjeriti visinu puške, montirali smo je na metalni stalak pomoću kojeg joj možemo mijenjati visinu (Slika 11.).



**Slika 10. Presjek kratera dobivenog zračnom puškom. Dio materijala biva potisnut direktno dolje i on završi na dnu kratera. Ostatak biva potisnut prema vani, te pri tome deformira susjedne slojeve, što se vidi iz uzdignuća u sloju kave uz stjenke kratera.**



Slika 11. Metalni stalak pomoću kojeg reguliramo visinu puške

## 2.2 Eksploziv

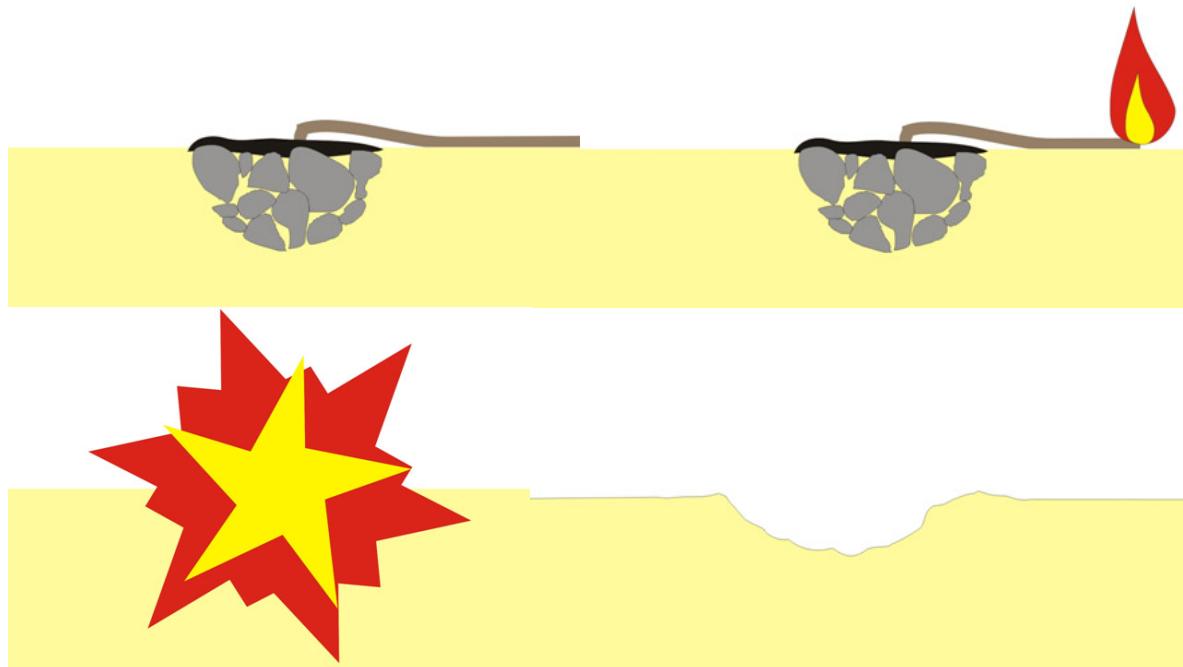
U drugoj fazi eksperimenta, nismo više koristili zračnu pušku za simuliranje udara bolida, već srebrov acetilid ( $\text{Ag}_2\text{C}_2$ ), kemijski eksploziv koji se koristi u detonatorima, jer ga je lako nabaviti u malim količinama, budući da je nusproizvod pri uobičajenim kemijskim pokusima. Ovaj način je bolji nego simulacije sa zračnom puškom jer je i stvarni udar bolida u površinu zapravo eksplozija na samoj površini tla, koja potiskuje materijal u svim smjerovima jednako, dok zračna puška daje udar komprimiranog zraka koji je usmjereniji, tj. jače mu je djelovanje direktno u smjeru cijevi nego sa strane.

Masu naboja smo varirali od 10mg do 635mg. Eksploziv je bio zakopan odmah ispod površine, međutim oblik i srednja gustoća naboja su varirali zbog njegove nepravilne zrnate strukture. Ovaj nedostatak smo kompenzirali radeći više kratera sa sličnom masom naboja. Također i sam eksploziv zahtjeva određenu pripremu prije eksperimenta. Naime, nakon što se sitetizira u kemijskim reakcijama još neko vrijeme ostaje vlažan i nezapaljiv, te se stoga treba ostaviti na zraku nekoliko sati da se dovoljno osuši. Ako se radi sa nepotpuno osušenim eksplivojem, dogodi se ili da ne detonira uopće ili da detonira samo dio, što opet ne možemo uspoređivati s eksplozijama gdje smo koristili pravilno osušen eksploziv. Za detonaciju eksploziva koristili smo papirnati fitilj natopljen petrolejem (Slika 12, Slika 13.). Kako bi lakše zapalili eksploziv na vrhu smo posipali po malu količinu crnog baruta da osiguramo da se zapali cijeli naboј eksploziva jednako.

Za manje kratere (10-40mg) koristili smo metalni lonac okomitih stjenki, promjera 27cm i dubine 11cm, u kojem bi napravili seriju od 4-5 kratera. Veće kratere (100-635mg) smo radili pojedinačno u plastičnim posudama promjera 54cm i dubine 26cm.



Slika 12. Detoniranje eksploziva pomoću fitilja



Slika 13. Skica naboja eksploziva i njegovog paljenja. Kako bi mjerena bila što bolja naboja smo nastojali oblikovati što simetričnije, međutim zbog njegove nepravilne strukture to nije uvijek bilo moguće. Zbog toga smo radili više mjerena sa približno istim masama eksploziva kako bismo statistički umanjili pogrešku.

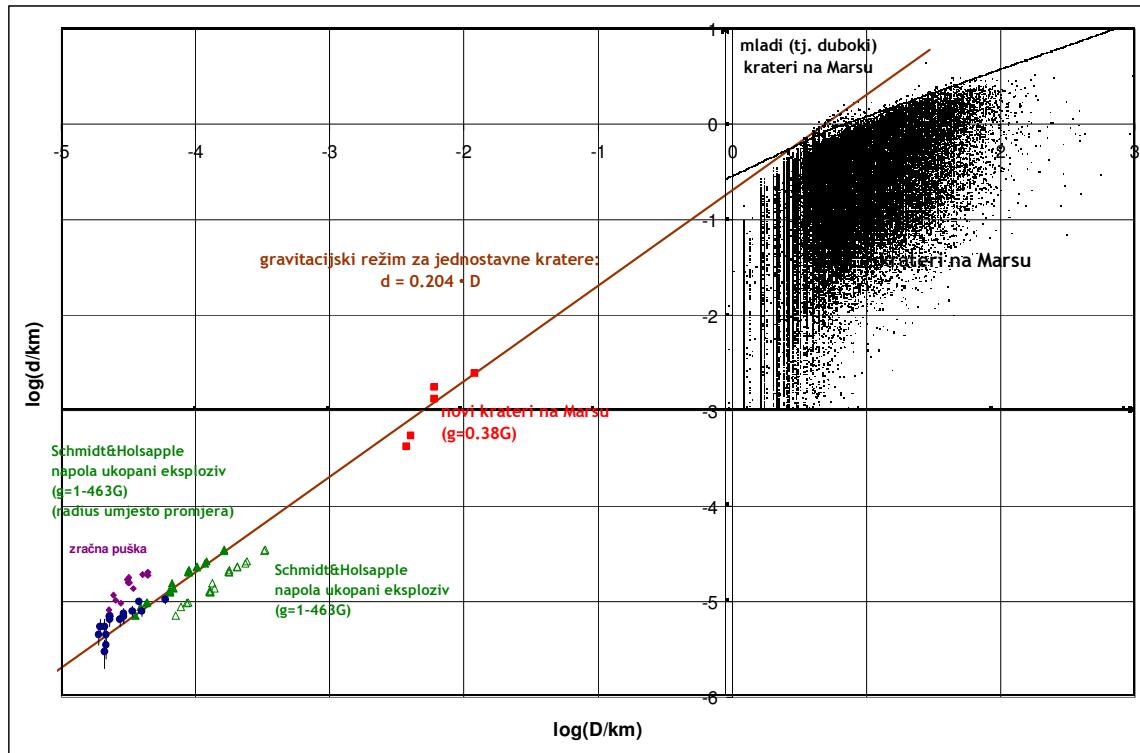
### 3. Analiza mjerena i rezultati

Dubine laboratorijskih kratera kreću se od 3mm do 15,7mm, a promjeri od 19mm do 59,5mm. Treba napomenuti da smo ovim eksperimentima simulirali samo jednostavne kratere, dakle rezultati koje smo dobili ne vrijede za složene strukture.

Svi rezultati mjerena su u Tablici 1.

EKSPLOZIV		ZRAČNA PUŠKA	
dubina (d/mm)	promjer (D/mm)	dubina (d/mm)	promjer (D/mm)
4,5	19,0	0,8300	2,2700
3,5	21,5	0,7440	2,3000
5,5	19,5	1,1800	2,4300
4,5	21,5	1,0300	2,5500
5,5	21,0	0,9600	2,7800
3,0	21,0	1,7100	3,1045
7,0	23,0	1,5850	3,1480
6,5	23,0	1,7920	3,1900
7,0	29,0	1,5755	3,2150
10,0	38,0	1,3655	3,4230
7,0	23,0	1,9400	4,0150
6,5	27,5	1,8800	4,4100
7,5	29,0	2,0200	4,4150
7,0	29,0		
8,0	34,0		
10,5	59,5		
8,0	40,0		

Tabela 1. Rezultati mjerena laboratorijskih kratera



**Slika 14.** Graf sa rezultatima mjeranja(eksploziv – plavi kružići, zračna puška – ljubičasti kružići), kraterima iz kataloga[5](crne točkice), novim kraterima na Marsu[6](crveni kvadratići), te laboratorijskim kraterima iz centrifuge[7](zeleni trokutići) [d-dubina kratera; D-promjer kratera]

Graf na Slici 14., prikazuje naše rezultate mjerena, te usporedbu s drugim eksperimentima i sa kraterima na Marsu. Vidimo da naši laboratorijski krateri dobiveni eksplozivom jako dobro padaju na teorijsku liniju koja se dobije iz jednadžbe (1)[4]. Ta se linija dobro slaže s novim, malim kraterima na Marsu[6] (crveni kvadratići), a i s mlađim kraterima identificiranim iz kataloga GT-115225[5] (crne točkice na desnoj strani grafa). Krateri koji su na samom vrhu te skupine (odmah ispod pravaca) su mlađi jer imaju veći omjer dubina/promjer. Kako krater stari, erozija i materijal nanošen vjetrom mu pomalo smanjuju dubinu, ali nemaju velikog utjecaja na njegov promjer, pa se stoga omjer dubina/promjer smanjuje. Također se pokazuje da su krateri koje smo dobili zračnom puškom ipak lošija aproksimacija za stvarne kratere jer ih većina pada dosta dalje od linije. Eksperimentalni krateri dobiveni eksplozijama u centrifugama, kako bi se simulirali udari pod različitom gravitacijskom silom, (Schmidt&Holsapple)[7] ne padaju direktno na liniju koju predviđa teorija, međutim kada uvrstimo radijus kratera umjesto promjera, onda dobijemo jako dobro slaganje. Taj pomak je vjerojatno uzrokovani time što su u tim eksperimentima korišteni sferni naboji napola ukopani u tlo, dok smo u našem eksperimentu radili s potpuno ukopanim nabojima, pa se tako dobiju krateri većeg promjera.

U DODATKU A nalazi se rad na ovu temu koji smo predstavili na LPSC 2009 (Lunar and Planetary Science Conference 2009). Graf (Slika 14.) i svi podatci laboratorijskih mjerena uzeti su iz tog rada.

## 4. Diskusija

Ovime smo pokazali da se laboratorijski krateri dobiveni eksplozivom mogu koristiti kao aproksimacija jednostavnih kratera na Marsu nastalih u gravitacijskom režimu. Jednadžba (1)[4] daje odnos dubine i promjera takvih kratera i vrijedi za raspon od 6 redova veličine dubine i promjera. Ovdje opisana metoda predstavlja jednostavan i jeftin, a ipak dobar način za simulaciju udarnih kratera. Bolji rezultati bi se mogli dobiti obavljanjem većeg broja mjerjenja, te poboljšanjem metode mjerjenja dimenzija kratera. Također, razvijanje metode kojom bi se odredili točni obrisi stijenki kratera, te na taj način izradili njihovi profili otvorilo bi nove mogućnosti istraživanja njihovih svojstava.

## 5. Zaključak

Udarne kratere nalazimo na svim čvrstim tijelima Sunčevog sustava. Budući da procesi njihove formacije značajnog utjecaja na tijelo na kojem nastaju, postoji potreba za razumijevanjem procesa njihova nastanka, te parametara koji određuju njihove dimenzije i oblik. Pokazali smo dvije jednostavne a ipak dovoljno precizne metode simulacije udarnih, pomoću zračne puške, te eksploziva. Rezultate eksperimenata smo usporedili s kraterima iz novog GT-115225 kataloga marsovskih kratera. Krateri nastali u laboratoriju, koji su reda veličine centimetara dobro se uklapaju u gravitacijski režim nastajanja zahvaljujući zanemarivoj čvrstoći podloge. Njihov odnos dubine i promjera slijedi empirijsku formulu  $d = 0.204 \cdot D$  i isti je kao i kod nedavno nastalih kratera koje nalazimo na Marsu, na čiji oblik i omjer dubine i promjera još nije utjecala erozija i zatrpanje. Krateri dobiveni eksplozivom pokazuju bolje slaganje s formulom i veću sličnost s realnim kraterima budući da je njihov proces nastanka sličniji pravim udarima.

## Zahvale

Kolegici Luči Karbonini za pomoć pri izvođenju eksperimenata i mjerjenja, roditeljima za pomoć pri nabavi materijala, dr.sc.Dominiku Cinčiću na pripremi eksploziva, te mom mentoru na velikoj količini strpljenja i truda uloženog u izradu ovog rada.

## Popis literature

- 1 <http://www.wikipedia.org/>
- 2 <http://www.crystalinks.com/craters.html>
- 3 Schmidt R. M. and Holsapple K. A. (1980) *J. Geophys. Res.*, 85, 235-252.
- 4 Holsapple K. A. (1994) *LPS XXV*, Abstract #1280.
- 5 Salamunićcar G. and Lončarić S. (accepted) *Trans. Geosci. Remote Sens.*, (DOI: 10.1109/TGRS.2009.2037750).
- 6 Byrne S. et al. (2009) *Science*, 325, 1674-1676.
- 7 Holsapple K. A. (1993) *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 21, 333-373.
- 8 [http://astro.fdst.hr/index.php?option=com\\_content&view=article&id=104:udarni-krateri&catid=38:sunev-sustav&Itemid=62](http://astro.fdst.hr/index.php?option=com_content&view=article&id=104:udarni-krateri&catid=38:sunev-sustav&Itemid=62)
- 9 [http://farm1.static.flickr.com/77/205743683\\_a66a26ae21.jpg](http://farm1.static.flickr.com/77/205743683_a66a26ae21.jpg)

## Dodatak A

### Laboratory Craters and their Comparison with Craters from GT-115225 Global Catalogue of Martian Impact Craters.

M. Vojković<sup>1</sup>, L. Karbonini<sup>2,1</sup>, D. Vinković<sup>3,1</sup>, G. Salamunićcar<sup>4,5</sup> and S. Lončarić<sup>5</sup>

<sup>1</sup>University of Split, marvoj@pmfst.hr, <sup>2</sup>luckar@pmfst.hr, <sup>3</sup>vinkovic@pmfst.hr, <sup>4</sup>AVL-AST d.o.o., gsc@ieee.org, <sup>5</sup>University of Zagreb, sven.loncaric@fer.hr.

(Abstract #1428, see also Abstracts #1426, #1417 and #1421)



**1) Summary:** We present the results of comparison between explosion-induced laboratory craters and GT-115225 catalogue. Laboratory craters fit into the gravity regime and we show that they follow the same  $d/D$  relationship as the young Martian craters.

**2) Introduction:** The main objectives of this work was to develop a simple method for making laboratory craters that could be used as a proxy for real impact craters on Mars. In order to achieve this, we performed measurements of craters produced in a laboratory and compared the results with the automated depth/diameter measurements for Martian craters using MOLA data. Data for Mars are taken from new GT-115225 catalogue.

**3) Methods:** The experiments were performed on a fine dry stone powder produced in a local limestone quarry as a by-product of stone cutting, as shown in Fig. 1. The explosive's shape and bulk density varied because it was in a granular form. We compensated this uncertainty in explosive charge properties by performing multiple experiments with a similar overall mass of the charge. Since the obtained craters are very fragile for detailed measuring, we had to use a method that would harden the crater surface. Therefore, we first covered the crater with a layer of a cement powder and sprayed it with water. Once the cement hardened, we covered it with gypsum plaster. This produced the cast of the crater that we could cut and measure.

**4) Results:** The depth of our laboratory craters was 3.0–19.0 mm and the diameter was 19.0–59.5 mm. Their position in the depth-diameter diagram is shown in Fig. 2, together with the Mars craters.

**5) Conclusion:** The results show that our experimental cratering can be used as a proxy for simple Mars craters formed under gravity regime. The analytic relationship in equation  $d=0.204 \cdot D$  reproduces the depth-diameter relationship for such craters and holds for 6 decades of depth (from mm sizes to kilometers) and diameter (from cm sizes to tens of kilometers).



Fig. 1: Our explosion-induced laboratory craters were produced in stone powder using silver acetylide ( $\text{Ag}_2\text{C}_2$ ) as the explosive. The powder was compressed such that the surface density was 1.60–1.75 g/cm<sup>3</sup>. The charge mass varied from 10mg to 635mg. The explosive was positioned just below the surface.

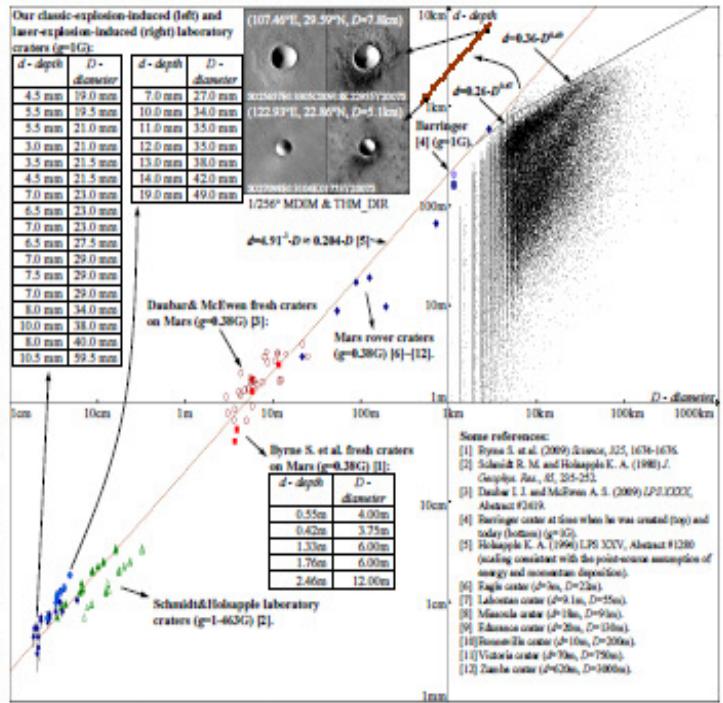


Fig. 2: The depth/diameter ( $d/D$ ) in log/log scale for: our laboratory craters (solid dots with error bars - the upper left table); laboratory craters by other authors; recent fresh craters on Mars; Mars rover craters; Barringer crater on Earth; and all craters from new GT-115225 catalogue (dots in top-right).