

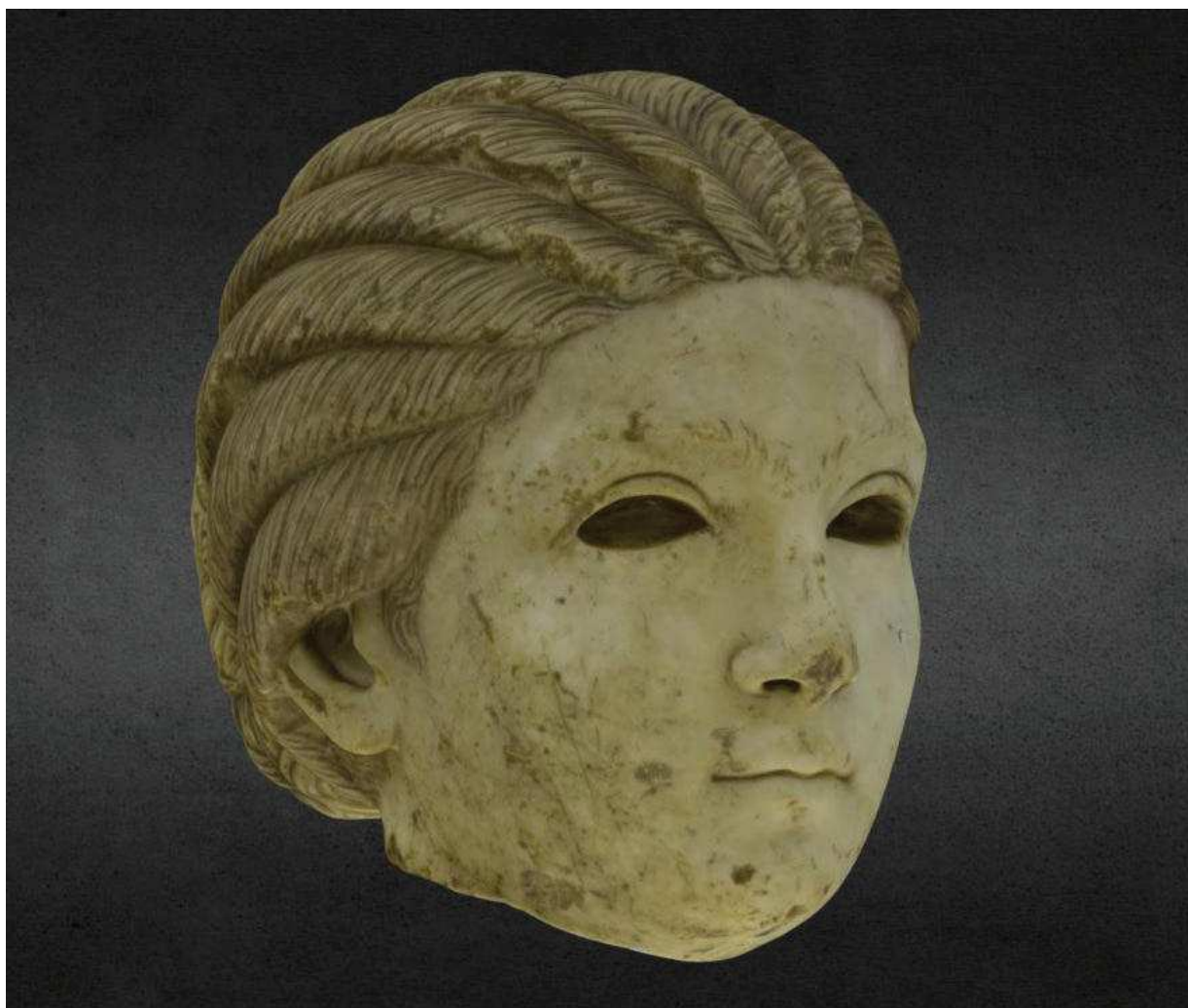
**AMZ 3D –  
DIGITALIZACIJA  
FUNDUSA  
ARHEOLOŠKOG MUZEJA  
U ZAGREBU**

**ANA SOLTER**

Arheološki muzej u Zagrebu  
*asolter@amz.hr*

Arheološki muzej u Zagrebu u suradnji  
s Geodetskim fakultetom Sveučilišta

u Zagrebu od 2012. godine provodi sustavnu 3D digitalizaciju muzejske građe. Digitalizacija se provodi projektima financiranim sredstvima Ministarstva kulture Republike Hrvatske: *3D skeniranje izabranih predmeta A kategorije fundusa Arheološkog muzeja u Zagrebu te kamenih spomenika izloženih u Lapidariju Muzeja* (2012.), *Virtualni muzej – 3D skeniranje predmeta A kategorije fundusa Arheološkog muzeja u Zagrebu* (2013. – 2015.) i *Testiranje novih tehnologija 3D skeniranjem arheološke baštine AMZ-a* (2018.). Predstavljanje kulturne baštine upotrebom 3D modela vrlo je zanimljivo javnosti te se 3D modeli



*Slika 1. 3D model Portreta djevojke*

mogu iskoristiti za niz različitih načina prikaza: na zaslonu računala, s pomoću mrežnih preglednika, korištenjem dodatnim uređajima za prividnu ili proširenu stvarnost ili u obliku ispisa fizičkog modela 3D pisačem.

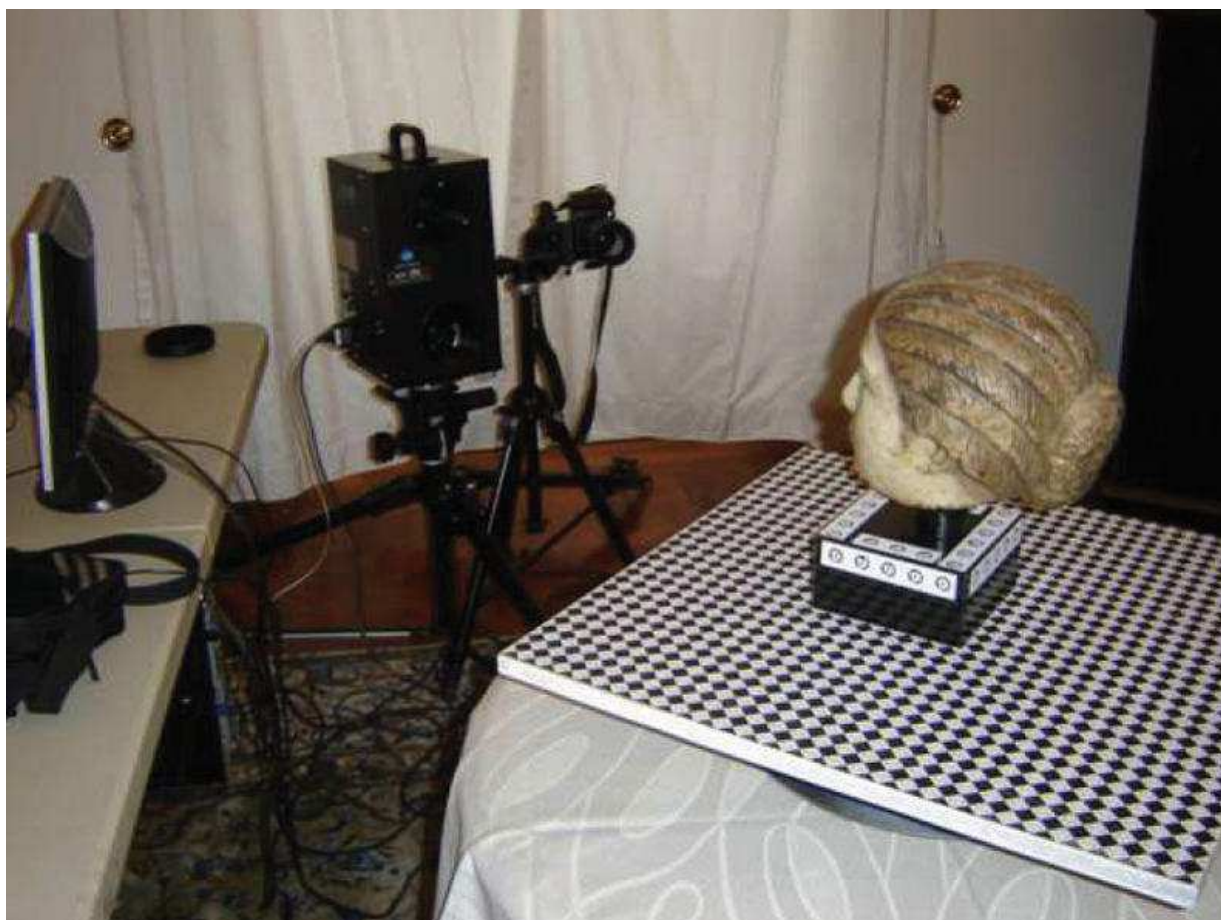
U okviru navedenih projekata istražili smo i razradili tehnologije prikupljanja podataka, obrade, analize i predstavljanja prikupljenih informacija o arheološkim artefaktima. Težište je istraživanja na dobivanju fotorealističnih 3D modela arheoloških artefakata, prikladnih za najrazličitije vrste vizualizacija, i u virtualnom okružju i u stvarnoj okolini izradom modela s pomoću 3D pisača.

Pritom smo posebno vodili računa o tome da se osigura vjerodostojnost 3D

modela u odnosu na stvarni predmet, po svim prikupljenim informacijama u trenutku snimanja, tj. geometrijska točnost i detaljnost, radiometrijska i spektralna vjerodostojnost. Digitalizacija se provodila dvjema različitim metodama prikupljanja 3D podataka – povezujući 3D skeniranje preciznim triangulacijskim skenerom i fotogrametriju te 3D skeniranjem isključivo fotogrametrijskim metodama.

### **3D SKENIRANJE PRECIZNIM TRIANGULACIJSKIM SKENEROM**

Digitalizacija 3D skeniranjem provedena je preciznim triangulacijskim skenerom Minolta Vivid 9i, s usporednim fotogra-



*Slika 2. 3D skeniranje preciznim triangulacijskim skenerom s usporednim fotografiranjem kalibriranom digitalnom kamerom*

firanjem kalibriranom digitalnom kamerom Nikon D90 s objektivom Sigma 20/2.8. U cilju primjene povezane tehnike skeniranja i fotogrametrije, a radi dobivanja visoke vjernosti 3D modela, u geometrijskom smislu i u vjernosti tekstura, izrađena su posebna postolja s fotogrametrijskim signalima koja omogućuju visok stupanj podudarnosti snimljenih tekstura s 3D modelom. Nakon skeniranja pojedinačne preslike spojene su u jedinstveni koordinatni sustav objekta koji je predmet skeniranja, obavljena je prethodna obrada i potom modeliranje. Tehnologija obrade istražena je i ostvarena upotrebom slobodnoga računalnog programa MeshLab v1.3.2. Nakon modeliranja, a radi vjernog dokumentiranja boje površine modela, provedeno je fototeksturiranje svakog modela, tako što se sadržaj fotografija centralno projicirao na površinu modela. Za fototeksturiranje koristilo se snimkama dobivenim prostorno kalibriranom digitalnom kamerom Nikon D90. Tako su postignute visoka vjernost i prostorna razlučivost kolorističkih detalja na površini artefakta, kakvu upotrebom samo skenera nije moguće postići.

### **3D SKENIRANJE FOTOGRAMETRIJSKIM METODAMA**

Metoda fotogrametrijske izmjere s pomoću kalibriranih kamera prikladna je za prikupljanje velike količine podataka u kratkom vremenu. Korištenje fotogrametrijskim načelima kalibracije kamere i fototriangulacijom s pomoću signala visokotočnih koordinata omogućilo je stvaranje mjerljivih modela zajamčenom i poznatom točnošću. Primjenom

tehnologije HDR-a (engl. *High Dynamic Range*) u prikupljanju snimki u spoju s fototeksturiranjem provedenim po fotogrametrijskim načelima, projekcijom stvarnih tekstura na 3D modele arheoloških artefakata, dobiveni su vizualno dojmivi modeli naglašenih detalja i ujednačenih radiometrijskih značajki. Ova metodologija prikupljanja i obrade podataka praktična je, jednostavna i relativno jeftina, a dobivene točnosti usporedive su s točnostima koje se postižu laserskim skenerima. Time je smanjena potreba za primjenom skupih laserskih skenera bez velikoga gubitka kvalitete.

Prednosti prikupljanja informacija o predmetnom artefaktu isključivo fotogrametrijskim metodama u odnosu na dosadašnje uobičajene metode korištenja specifičnim 3D skenerima jesu:

- pasivna tehnika (bilježi se samo reflektirano zračenje s artefakta, bez aktivnog osvjetljavanja laserskom zrakom – potpuno bezopasna metoda)
- brže prikupljanje puno veće količine relevantnih informacija, kraće rukovanje pojedinim predmetom, puno veći kapacitet snimanja u odnosu na 3D skener
- korištenje široko dostupnom opremom (i sklopovskom i programskom)
- veća količina prikupljenih detalja, ne samo u geometrijskom smislu već i u radiometrijskome i spektralnom smislu, a rezultat su puno točniji, vjerodostojniji i koloristički vjerniji modeli stvarnim artefaktima.

Za postizanje, ali i dokazivanje visoke geometrijske točnosti snimljenih predmeta razvili smo posebno testno polje, prilagođeno snimanju arheološke građe, korištenjem tzv. kodiranim signalima. Tako smo osigurali potpuno automatizirano



ran, objektivan postupak opažanja ovih kodiranih signala na svim snimkama, potpuno izbjegavajući mogućnost grube pogreške zbog pogrešne identifikacije signala. Relativan prostorni položaj signala odredili smo preciznim fotogrametrijskim koordinatometrom do 0,01 mm točnosti. Time smo izbjegli utjecaj netočnosti kalibracijskog polja na točnost samog modela. Točnost modela procjenjuje se na 0,2 mm.

Snimanje svih predmeta proveli smo u HDR-u, optimiziranom za snimanje određenih predmeta. Isto tako pri obradi HDR fotografija istražili smo i predložili metode isticanja obilježja, tonских korekcija snimki (balans bijele) i radiometrijskih ujednačavanja te time učinili 3D

model predmeta potpuno slobodnim od vanjskog utjecaja ambijentalne rasvjete i bačenih sjena na predmetu, koje najčešće smetaju interpretaciji.

### TESTIRANJE NOVIH TEHNOLOGIJA 3D SKENIRANJEM ARHEOLOŠKE BAŠTINE AMZ-A

Projektom *Testiranje novih tehnologija 3D skeniranjem arheološke baštine AMZ-a* istražili smo kako učiniti kvalitetan 3D model s malim predznanjem koristeći se različitom, financijski pristupačnom opremom za digitalizaciju te programima otvorenog koda (engl. *open source*) za obradu. Tijekom ovih snimanja koristilo se fotogrametrijskom meto-



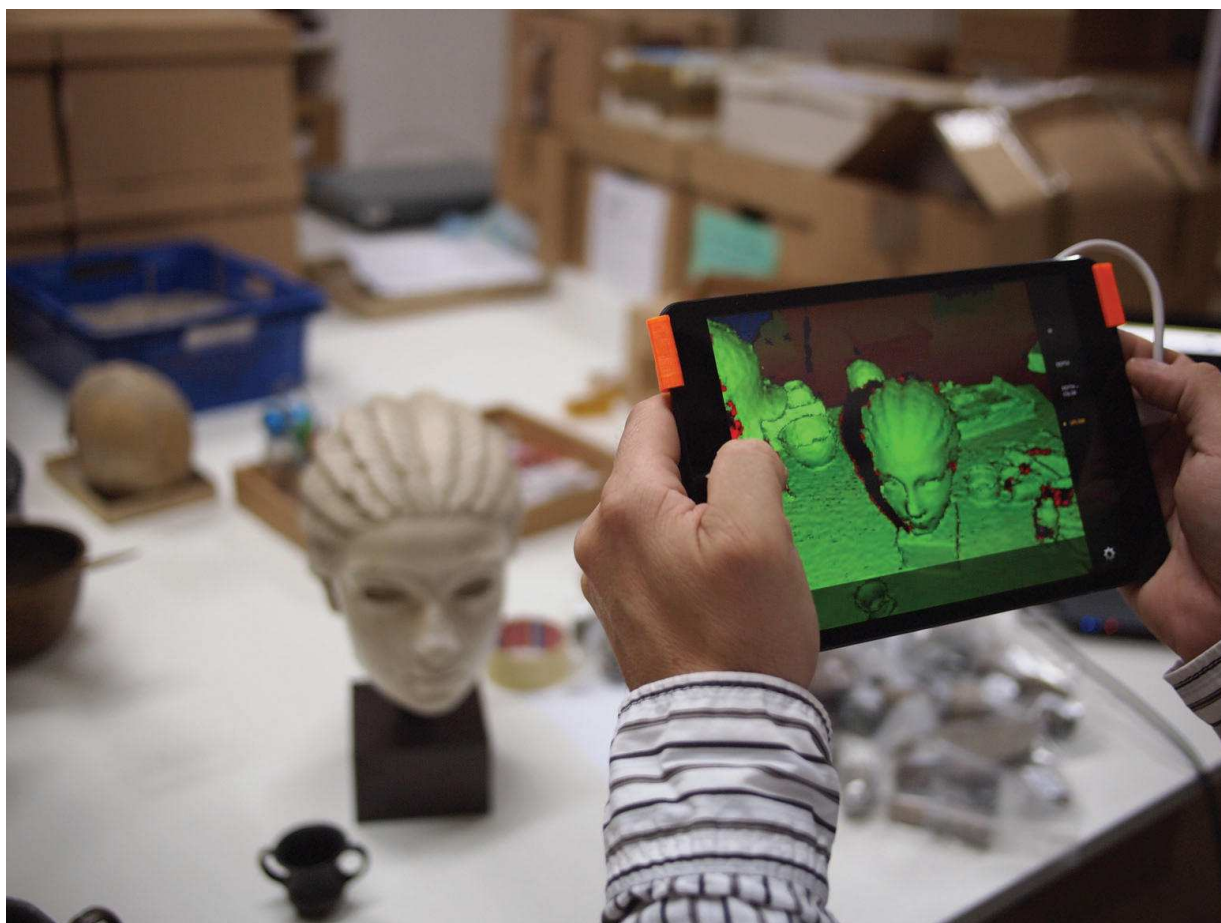
Slika 3. 3D skeniranje fotogrametrijskim metodama

dom s dva različita fotoaparata i komercijalnim skenerom Structure Sensor, kao i metodom SLS (engl. *structured light*) sa skenerom David 2 SLS. Snimljeni predmeti tijekom prethodnih su projekata snimljeni i laserskim skenerom, što nam pruža još jednu metodu za kasnije usporedbe rezultata.

Sami predmeti odabrani su prema vrsti materijala i geometrijskom obliku jer su te značajke presudne za izradu 3D modela. Naime, jednostavni predmeti ne moraju nužno značiti da će snimanje biti jednostavno. Vrlo važni čimbenici su tekstura predmeta, refleksija i transparentnost materijala koji se snima. Pokušali smo obuhvatiti sve materijale i relevantne veličine koje se mogu naći u

muzejskim fundusima, s posebnim naglaskom na arheološku građu. Uz probleme sa samim predmetima i njihovom raznolikošću javljaju se i problemi tijekom primjene različitih metoda snimanja. Testirane metode uključuju tri posve različita tehnološka pristupa digitalizaciji i izradi 3D modela, od kojih svaka ima svoje posebne probleme ovisno o vrsti materijala koji se snima.

Oprema kojom smo se koristili u ovom projektu bila je: fotoaparat Canon IXUS 160, fotoaparat Nikon D7100 s objektivom Sigma 18 – 35 mm 1:1.8 DC 72r, skener David 2 SLS i Structure Sensor. Snimanja fotogrametrijskom metodom i metodom SLS ovisna su o svjetlosti i dobroj rasvjeti. Premda se kod SLS-a kori-



Slika 4. 3D skeniranje i modeliranje (Structure Sensor i Skanect)



sti projektorom koji projicira svjetlost na predmet, opet je nužna dobra rasvjeta. Zbog toga koristili smo se trima reflektorima s difuznim filtrima jačine 500 W i s toplinom svjetla 5000 K. Reflektori nisu usmjereni izravno u predmet, već neizravno osvjetljavaju predmete. Predmeti su postavljani na bijelo postolje s rotacijskim stolom. Upotrijebljene su i različite pozadine za snimanja (crne i bijele tkanine i papiri) te stativ za fotoaparate i skener. Tijekom upotrebe skenera David 2 SLS koristilo se i pripadajućim rotacijskim postoljem koje je sinkronizirano sa samim skenerom, što proces snimanja čini poluautomatskim. Za različite metode upotrijebljene su različite pozadine; naime, metoda SLS dopušta upotrebu i snimanje isključivo s crnom pozadinom.

## STEREOSKOPSKA VIZUALIZACIJA

Metode stereoskopskih vizualizacija dobivenih 3D modela arheoloških predmeta istražili smo na primjeru posude u obliku ptice (tzv. Vučedolske golubice). Radi toga analizirali smo i predložili optimalna hardverska i programska rješenja za postizanje stereoskopije. Optimalne tehnologije stereoskopije su:

- anaglifski postupak
- polarizacijski postupak.

Anaglifski postupak iznimno je jednostavna i jeftina tehnologija dobivanja stereopogleda na virtualni 3D objekt. Od posebne opreme potrebne su samo tzv. anaglifske 3D naočale, vrlo pristupačne cijene. Ipak, ova tehnologija ne omogućuje vjerno promatranje boja, pa za oz-



*Slika 5. Snimanje keramičkog predmeta metodom SLS (skener David 2 SLS)*

biljniju stereoskopsku interpretaciju ova tehnologija nije primjerena.

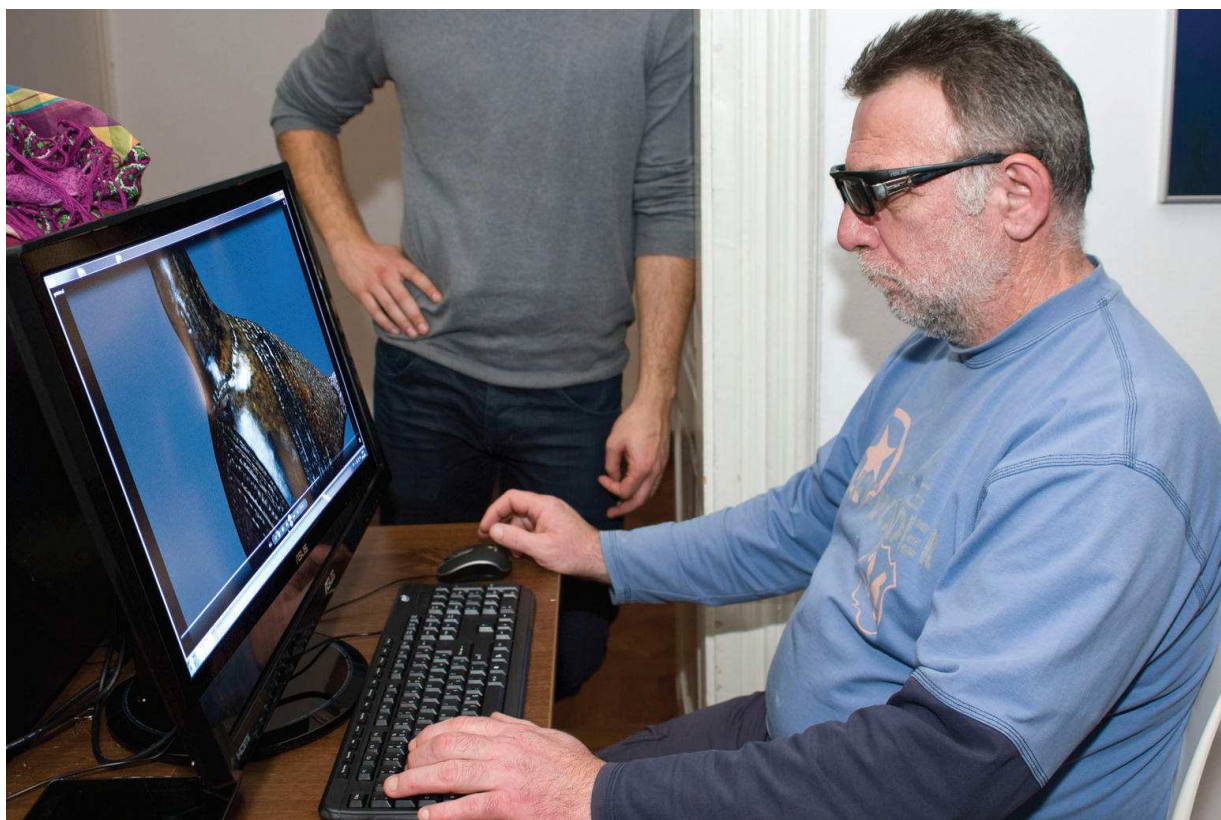
Polarizacijski postupak zahtijeva, uz standardno računalo, dodatno sklopovlje (polarizacijske naočale, 3D monitor i posebnu grafičku karticu) koje omogućuje stereoskopsko promatranje.

Cjelokupna istraživanja primijenili smo u cilju izrade 3D filma arheološkog artefakta s prikazima svih načina predstavljanja virtualnog modela (žičana mreža, sjenčani model, fototeksturirani model). Stvaranje 3D modela u virtualnom svijetu računala uglavnom se dobiva postupkom 3D modeliranja. Međutim, postojeće predmete, posebno nepravilnih oblika, može se dobiti s pomoću vrlo preciznih i vrijednih uređaja za 3D očitavanje točaka s fizičkih modela, ali i manje preciznim i dostupnim tehnologijama, poput

dobivanja 3D modela iz niza fotografija, nekim od senzora ili očitavanjem projekcije svjetlosnih uzoraka, odnosno spojem projektora i kamere.

### **WEB3D – PRIKAZ 3D MODELA NA MREŽNIM STRANICAMA**

Prikaz 3D modela na mrežnim stranicama omogućuje njegov pregled s bilo kojeg mjesta s dostupnim internetom. Predmet s teksturom ili bez nje u različitim preglednicima ima drukčije mogućnosti prikaza i pregledavanja, npr. postavljanje presjeka, provjeru dimenzija kod više tehnički orijentiranih preglednika, do opisa, ilustriranja i animiranja pojedinih dijelova kod onih više orijentiranih prema prezentaciji 3D modela, koji se u nekim slučajevima može prikazati i kao model prividne stvarnosti. Za prikaziva-



*Slika 6. Stereoskopska interaktivna vizualizacija*

nje 3D modela odlučili smo za platformu Sketchfab čiji se preglednik 3D modela zasniva na tehnologiji WebGL kojom se modeli prikazuju na bilo kojoj vrsti mobilnoga i stolnog mrežnog preglednika ili s pomoću naočala za virtualnu stvarnost. Sketchfab je otvorena platforma koja ima i društveni portal na kojemu posjetitelji mogu tražiti, ocjenjivati i preuzimati stvorene 3D modele. Postavljanje na stranice može se učiniti izravno s raznim 3D programskim podrškama, koristeći se dodacima (engl. *plugins*) za 3ds Max ili SketchUp ili izvorno s pomoću Blendera ili Adobe Photoshopa. Mi smo se za ovu priliku koristili formatom Collada – formatom za interaktivne 3D aplikacije koji se pokazao najboljim za unos kvalitetnih tekstura.

## HOLOPRIKAZ – PRIVIDNI 3D PRIKAZ

Hologramski prikaz još je jedna od mogućnosti prikaza 3D modela u fizičkom prostoru. S pomoću četverostrane prizme moguće je doživjeti prividni holografski prikaz modela u prostoru. Takvi modeli mogu biti statični i animirani, a posebno je zanimljivo ostvarivanje interakcije s modelom s pomoću nekih već spomenutih tehnologija.

## VR – VIRTUALNA STVARNOST

Virtualna ili prividna stvarnost danas postaje sve dostupnija, a posebnu zaslugu u tome ima Cardboard, uređaj koji je moguće pripremiti gotovo samostalno s pomoću pametnog telefona, a nudi pribli-



### Posuda u obliku ptice

3D Model



Arheološki muzej u Zagrebu PRO

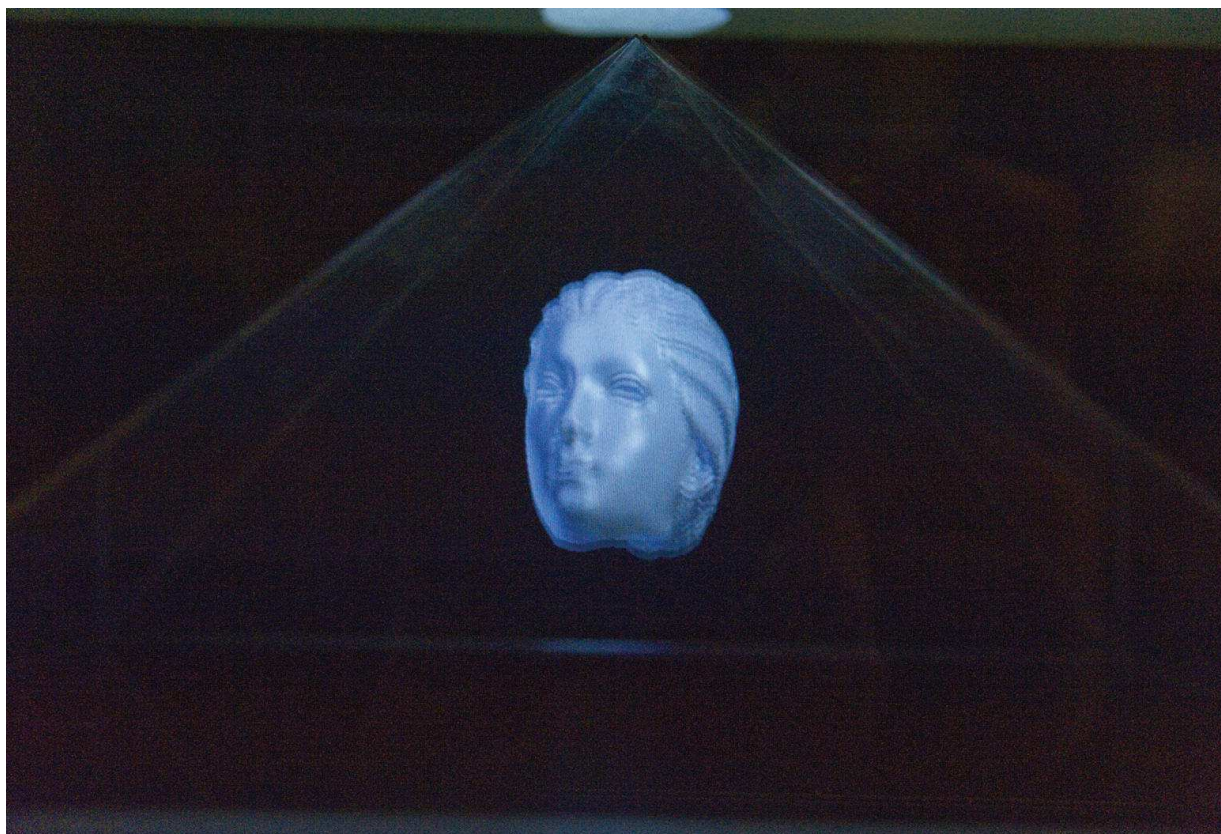
FOLLOW

340



Slika 7. Prikaz sučelja mrežne stranice Sketchfab





Slika 8. Holoprikaz Portreta djevojke prikazan u povodu Noći muzeja 2015. godine

žan osjećaj koji se dobiva na posebnim uređajima. Ipak, zasebni uređaji mogu ostvariti potpunu interakciju u virtualnoj stvarnosti, što pak dovodi do situacije da korisnik potpuno uroni u virtualni svijet računala.

### AR – PROŠIRENA STVARNOST

Stvaranje složenih virtualnih svjetova nije jednostavno, ali katkad je okružje potrebno za kvalitetan doživljaj promatranog predmeta. Upravo tu nastupa proširena stvarnost, koja postojeće fizičko okružje koje promatramo oko sebe proširuje virtualnim sadržajem. Tako je novim digitalnim sadržajem moguće „proširiti“ inače postojeći sadržaj npr. tiskanog kataloga ili sadržaj koji se nalazi u stalnom postavu.

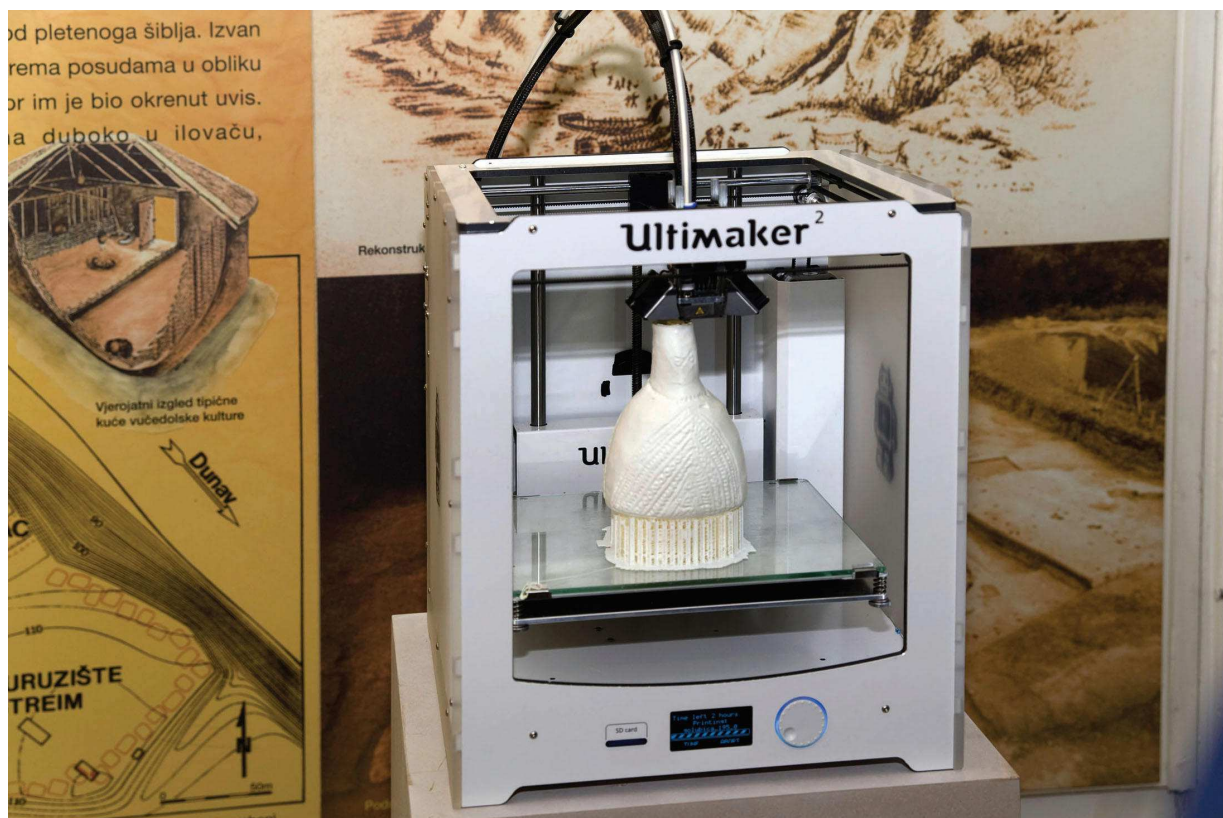
### 3D ISPIS

Jednom preneseni fizički model u virtualni prostor računala može se ponovno pretvoriti u fizički model u svojem izvornom ili izmijenjenom obliku. Promjene se najčešće odnose na promjene dimenzija, uglavnom u manjem mjerilu, što umanjuje nedostatak preciznosti kod šire dostupnih tehnologija.

### #DOVETALES, VUČEDOLSKA GOLUBICA PUTUJE S VAMA

Kao dio digitalizacijskih projekata Arheološkog muzeja u Zagrebu nastao je i projekt *#DoveTales, Vučedolska golubica putuje s Vama*. Projekt *#DoveTales* započeo je 2014. godine i osmišljen je u cilju popularizacije hrvatske kulturne baštine i arheologije primjenom „novih“ tehnologija.



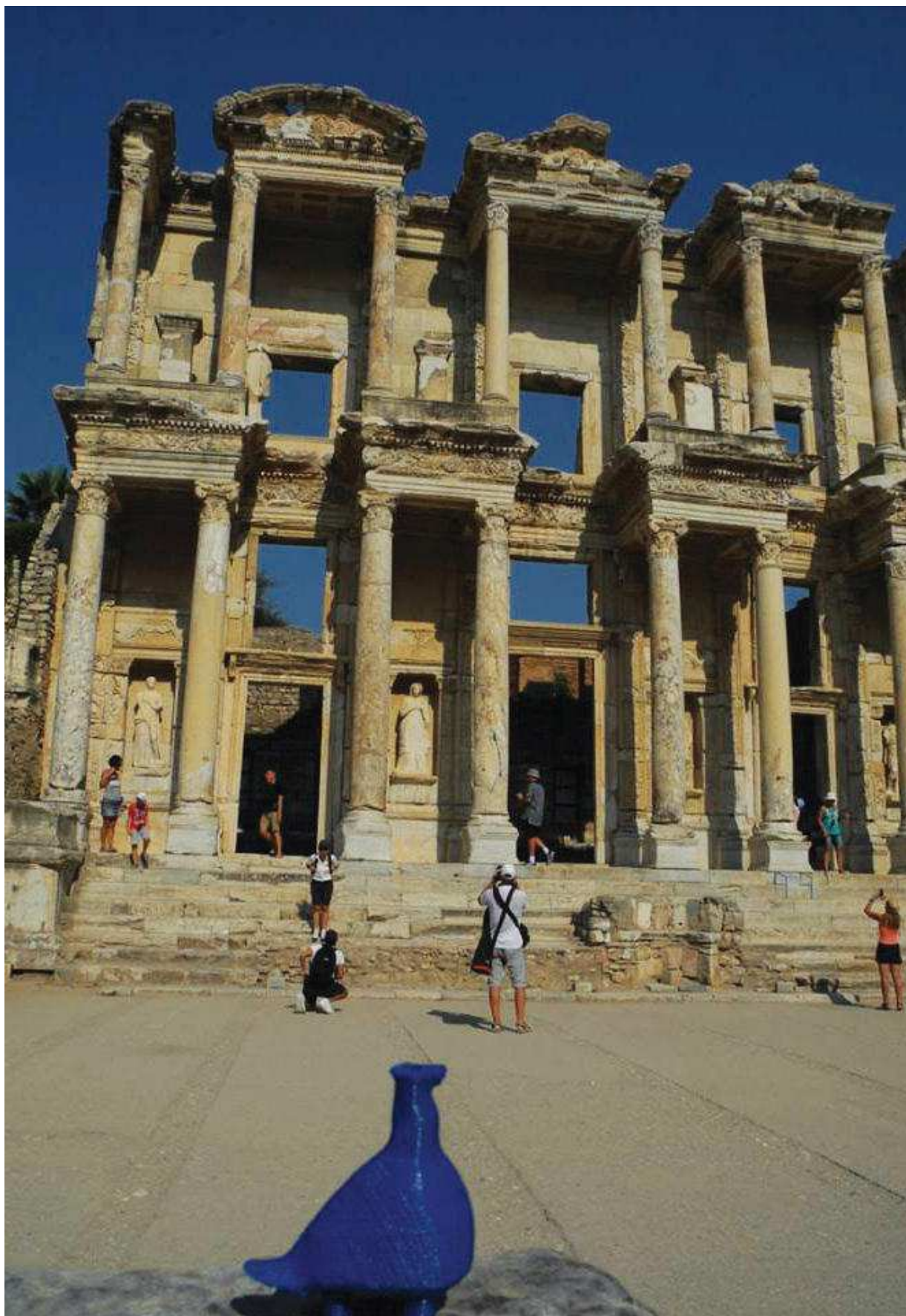


*Slika 9. Ispis 3D modela posude u obliku ptice*



*Slika 10. Golubice za projekt #DoveTales, Vučedolska golubica putuje s Vama*





*Slika 11. #DoveTales, Vučedolska golubica putuje s Vama*

U sklopu projekta *#DoveTales* svatko tko posjeti Arheološki muzej u Zagrebu može preuzeti svoju kopiju Vučedolske golubice, a potom je njegov zadatak da je fotografira na nekoj zanimljivoj lokaciji koju posjeti te sliku objavi na službenim stranicama projekta na Facebooku i Twitteru. Tako su umjesto originalne Vučedolske golubice svijetom letjele kopije ispisane 3D pisačem u raznim bojama – model se ispisa u veličini od 5 cm na 3D pisaču Ultimaker 2. Golubica je dosad već posjetila gotovo cijelu Hrvatsku, dobar dio Europe, a bila je i na drugim kontinentima, u Aziji, Americi i Australiji. Sudjelovala je na znanstvenim skupovima, posjećivala izložbe i dječje radionice, pa čak bila i na privatnim druženjima i proslavama.

Projekt je namijenjen domaćim i stranim posjetiteljima svih uzrasta te je svojom pristupačnošću i dopadljivošću osvojio svakog posjetitelja Arheološkog muzeja. Nadamo se da ćemo ovakvim projektima približiti Muzej novoj generaciji posjetitelja kojima je korištenje društvenim medijima važan oblik komunikacije. Ovim projektom želimo postići jedinstven spoj materijalne arheološke baštine s današnjim virtualnim svijetom i pokazati da danas muzeji moraju i mogu pratiti trendove i tako se uklopiti u svakodnevicu. Dosad je Muzej podijelio više od 4000 golubica koje su obišle pet kontinenata.

### DAN 3D U ARHEOLOŠKOM

Arheološki muzej u Zagrebu u povodu Svjetskog dana audiovizualne baštine 2014. godine organizirao je *Dan 3D u Arheološkom* kada je predstavljen projekt *AMZ 3D* i održane dvije radionice: *Pristupačno 3D skeniranje i ispisivanje*

*arheoloških predmeta* u suradnji s Fab-Labom i *Fotogrametrijska 3D-izmjera arheoloških predmeta* u suradnji s Geodetskim fakultetom.

Na radionici *Pristupačno 3D skeniranje i ispisivanje arheoloških predmeta*, koja je bila namijenjena učenicima osnovne i srednje škole, polaznici su nakon uvodnih objašnjenja pojmova povezanih s 3D skeniranjem i 3D ispisom mogli samostalno isprobati postupak skeniranja i ispisa nekih predmeta. Za 3D skeniranja koristilo se uređajima koji su već dostupni u našem okružju ili se mogu nabaviti po vrlo pristupačnim cijenama (npr. dodatak na iPad, uređaj Kinect) te programskim aplikacijama koje su slobodne za korištenje ili besplatne, a kojima se očitavaju 3D modeli predmeta i prikazuju na računalu. Tako očitane 3D modele predmeta, nakon jednostavne obrade, polaznici su mogli pripremiti za ispis te ih ispisati na 3D pisaču.

Na radionici *Fotogrametrijska 3D-izmjera arheoloških predmeta* sudjelovali su studenti arheologije Filozofskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Ovom radionicom željeli smo približiti polaznicima mogućnosti, problematiku, načela i tehnologiju prostorne izmjere arheoloških predmeta, prije svega u cilju izrade objektivne relevantne dokumentacije. Fotogrametrijska metoda posebno je pogodna za izmjeru arheoloških predmeta jer se čitav postupak izmjere dosljedno odvija bez neposrednog kontakta s predmetom, što isključuje bilo kakvo oštećivanje objekta zbog primjene mjerne metode. Osim toga, mjerni pribor široko je dostupan i cjenovno prihvatljiv, pa je i s te strane zanimljiv za širu primjenu. Tijekom radionice načela opisana u ovom tekstu prikazala su se na primjeru foto-





Slika 12. Pozivnica za Dan 3D održan 2014. godine u Arheološkome muzeju u Zagrebu

grametrijske izmjere jednog dijela (ili eventualno cijelog) predmeta, koristeći se u najvećoj mjeri slobodnom programskom podrškom gdje god je to moguće.

### AMZ 3D – DIGITISATION OF THE COLLECTION OF THE ARCHAEOLOGICAL MUSEUM IN ZAGREB

Since 2012, the Archaeological Museum in Zagreb, in collaboration with the Faculty of Geodesy, University of Zagreb, has been conducting systematic 3D digitisation of museum objects. Presenting cultural heritage using 3D models

is exciting, and 3D models can be used for a variety of display modes: on computers, via an Internet browser, using additional devices for virtual or augmented reality, or by printing a physical model with a 3D printer. Through these projects, we have researched and developed technologies for data collection, processing, analysis and presentation of collected information on archaeological artefacts. The focus of the research is on obtaining photorealistic 3D models of archaeological artefacts, suitable for a wide variety of visualisations, both in the virtual environment and the real-life environment by creating models. Digitisation was performed by two different methods of collecting 3D data – linking triangulation based 3D laser scanner and photogrammetry and 3D scanning solely by photogrammetric methods.