

# Procjena izvođenja simulacije fizike na Windows sustavu

---

Ćosić, Marin

Master's thesis / Diplomski rad

2022

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:576310>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-26**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH  
TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**PROCJENA IZVOĐENJA SIMULACIJE FIZIKE NA  
WINDOWS SUSTAVU**

**Diplomski rad**

**Marin Čosić**

**Osijek, 2022.**

# SADRŽAJ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. UVOD .....</b>                            | <b>1</b>  |
| <b>1.1.Zadatak diplomskog rada .....</b>        | <b>1</b>  |
| <b>2. PRIMIJENJENE TEHNOLOGIJE .....</b>        | <b>2</b>  |
| <b>2.1.Blender .....</b>                        | <b>2</b>  |
| <b>2.2.Računala različitih kategorija .....</b> | <b>3</b>  |
| <b>2.3.NZXT CAM.....</b>                        | <b>4</b>  |
| <b>3. FIZIKA U BLENDERU.....</b>                | <b>5</b>  |
| <b>3.1.Kruto tijelo .....</b>                   | <b>8</b>  |
| <b>3.2.Meko tijelo.....</b>                     | <b>10</b> |
| <b>3.3.Tkanina.....</b>                         | <b>11</b> |
| <b>3.4.Tekućine .....</b>                       | <b>12</b> |
| <b>3.5.Sustav čestica.....</b>                  | <b>13</b> |
| <b>3.6.Dinamičko bojanje.....</b>               | <b>14</b> |
| <b>4. PROVEDBA TESTIRANJA .....</b>             | <b>16</b> |
| <b>4.1.Potrebne Informacije .....</b>           | <b>16</b> |
| <b>4.2.Simulacije .....</b>                     | <b>17</b> |
| <b>4.2.1.Kruto tijelo .....</b>                 | <b>18</b> |
| <b>4.2.2.Meko tijelo .....</b>                  | <b>20</b> |
| <b>4.2.3.Tkanina .....</b>                      | <b>22</b> |
| <b>4.2.4.Tekućina.....</b>                      | <b>24</b> |
| <b>4.2.5.Dim .....</b>                          | <b>26</b> |
| <b>4.2.6.Čestice .....</b>                      | <b>28</b> |
| <b>4.2.7.Kosa .....</b>                         | <b>30</b> |
| <b>4.2.8.Dinamičko bojanje .....</b>            | <b>33</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.3.Rezultati.....                            | 35        |
| <b>5. USPOREDBA S DRUGIM RJEŠENJIMA .....</b> | <b>38</b> |
| 5.1.Houdini .....                             | 38        |
| 5.2.Embergen .....                            | 40        |
| 5.3.Simulacije u igrama.....                  | 41        |
| <b>6. ZAKLJUČAK.....</b>                      | <b>43</b> |
| <b>LITERATURA .....</b>                       | <b>44</b> |
| <b>SAŽETAK.....</b>                           | <b>45</b> |
| <b>ABSTRACT .....</b>                         | <b>46</b> |
| <b>ŽIVOTOPIS.....</b>                         | <b>47</b> |
| <b>PRILOG .....</b>                           | <b>48</b> |

## 1. UVOD

3D računalna grafika obuhvaća veliki spektar mogućnosti za kreiranje scena koje mogu biti realistične ili stilizirane. Neki od koraka koji se mogu naći u tom procesu su modeliranje, digitalno kiparstvo, teksturiranje, animacije, postavljanje armature objekata, iscrtavanje, simulacije i mnogi drugi. Dobro poznavanje pojedinih alata znatno ubrzava proces kojim se dolazi do rezultata, ali ponekad je ta brzina ograničena računalom koji se koristi. S razvojem tehnologije proces se znatno ubrzao, postao pristupačniji i dostupniji. Time je povećan broj alata, kreatora i korisnika proizvoda računalne grafike. 3D se našao u pozicije gdje je postao praktičnije rješenje za rekreiranje prizora iz stvarnosti za koje bi inače trebalo znatno više resursa, ljudske snage i vremena ili čak ne bi bili ni izvedivi. Simulacije su najbolji primjer objašnjenog te područje koje je najviše profitiralo zbog napretka tehnologije. Nekoć gotovo nasumični događaji poput strujanje vjetra, gibanje tkanine ili karakteristike vode dobili su mogućnost biti rekreirani pomoću parametara kojima se mogu dobiti i najspecifičniji rezultati. Premda su simulacije potpuno temeljene na stvarnosti mogu vrlo loše izgledati ako rezultati i najmanje odstupaju od prizora na koje je ljudsko oko naviklo. Prizori mogu biti od kotrljanja kugle do gibanja oceana. Što je scena veća to je mjesta za pogrešku više i postaje računalno zahtjevnije. Zbog svega navedenog vrlo je važno poznavati mogućnosti računala i s time uskladiti projekt kako bi rezultati što vjerodostojnije izgledali. Simulacije također imaju svoje potkategorije koje su različito zahtjevne. U ovom radu će se detaljno opisati svaka od njih, testirati kako *hardware* utječe na njihov rad i usporediti s drugim dostupnim rješenjima.

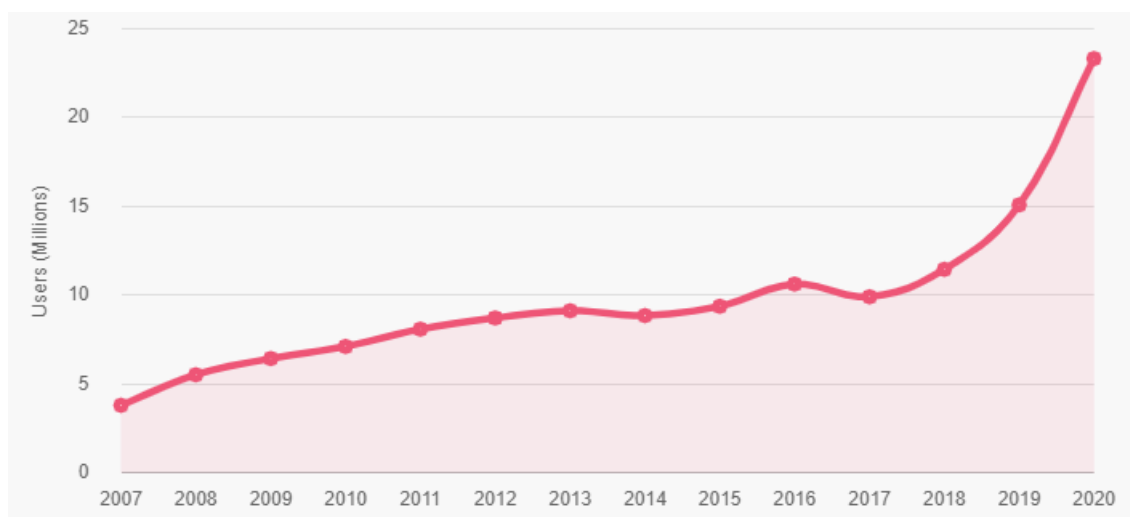
### 1.1. Zadatak diplomskog rada

U radu je potrebno opisati sve postojeće simulacije fizike u Blender paketu te ih detaljno ispitati, vidjeti mogućnosti s obzirom na dostupan *hardware* i operativni sustav.

## 2. PRIMIJENJENE TEHNOLOGIJE

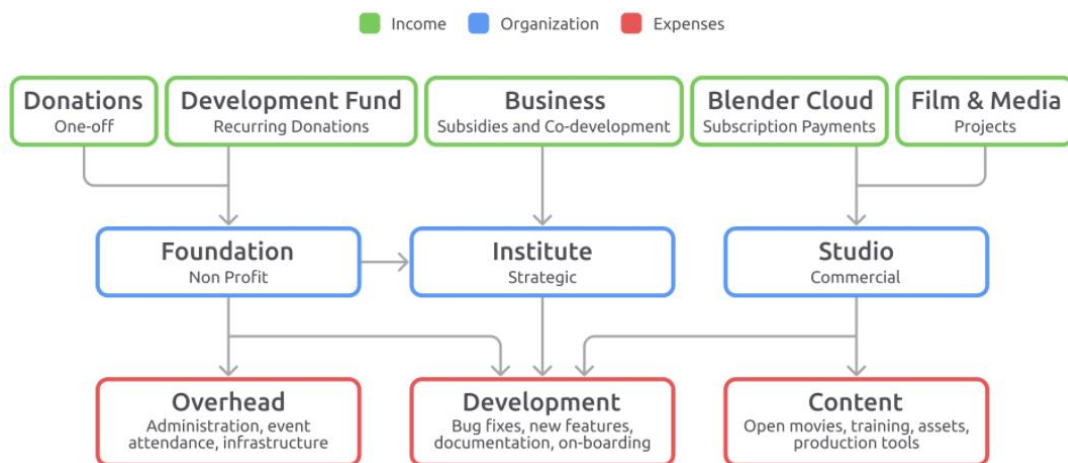
### 2.1. Blender

Blender je besplatan alat za 3D računalnu grafiku otvorenog koda. Podržava cjelokupni 3D portfelj (engl. *Pipeline*) – modeliranje, postavljanje armature objekata, animacije, simuliranje, iscrtavanje, komponiranje, praćenje pokreta, uređivanje videa i 2D animacije. Također je i višepatformski sustav, s OpenGL grafičkim sučeljem koji je jednak na svim glavnim platformama. Prilagodljivost se postiže *python* skriptama. Sadrži visokokvalitetnu 3D arhitekturu, što omogućuje brz i učinkovit tijek rada [1]. Iako postoji preko 20 godina, opću popularnosti je stekao 2019. s izlaskom verzije 2.8. koja je zbog promijenjenog izgleda sučelja i intuitivnijeg načina rada, olakšala proces učenja i samim tim privukla veći broj korisnika (Slika 2.1.). Kako je projekt vođen zajednicom pod GNU općom javnom licencom (engl. *General Public License*), povećan broj korisnika omogućio je i brži napredak. Javnost je ovlaštena unijeti male i velike promjene u bazu koda, što dovodi do novih značajki, brzih ispravka programskih pogrešaka i bolje upotrebljivosti.



Slika 2.1. Godišnji korisnici Blender stranice [2]

Premda se radi o besplatnom programu, za njegov razvoj, novčani resursi dolaze preko donacija (Slika 2.2.). Svi mogu sudjelovati u tome neovisno o iznosu, ali najveću ulogu igraju donacije velikih kompanija poput Amazona, Facebooka, Epic Gamesa, Nvdije i mnogi drugih [2].



Slika 2.2. Tijek financija [2]

## 2.2. Računala različitih kategorija

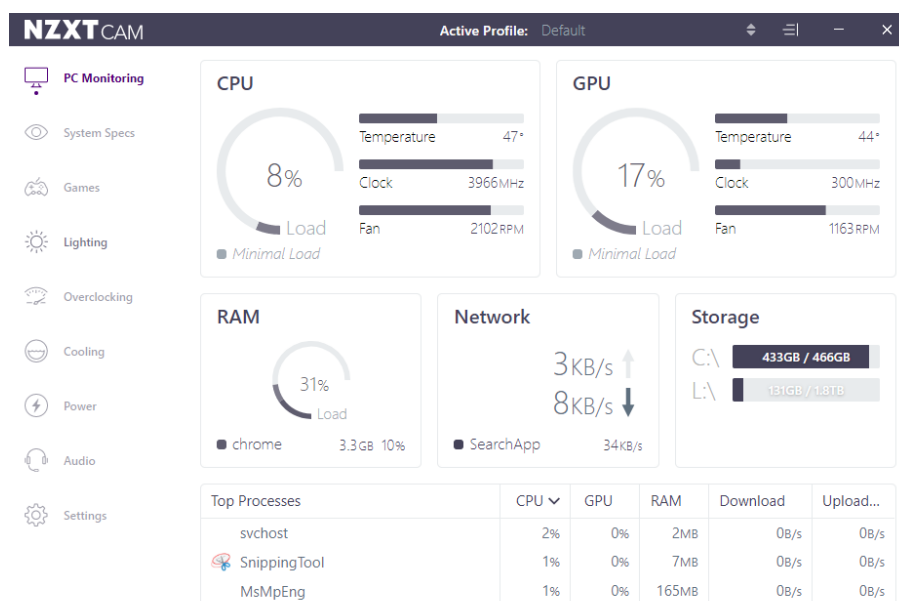
Kao što je spomenuto u uvodu, osim samog programa, bitne su i performanse računala koje se koristi za simulacije. Za svaku simulaciju prikazat će se aktivnost parametara koji utječu na brzinu izvođenja. Parametri su procesor (engl. *CPU*), radnja memorija, temperatura procesora, brzina procesora i aktivnost ventilatora. Premda je računalna snaga jedan od glavnih faktora ovoga rada, važno je napomenuti koje će se računalo koristiti. Premda će se testirati vrijeme potrebno za izvođenje simulacije i sama mogućnost izvođenja, potrebno je imati nekoliko referentnih vrijednosti kako bi se mogao izvući što bolji zaključak. U ovom radu će se koristiti dva računala, igraće stolno računalo i prijenosno računalo. Njihove komponente su znatno različite, a samim tim i njihove uloge u svakodnevnom životu, čime će se dobiti šira slika o izvedivosti simulacije fizike. Radi praktičnih razloga, računala će biti imenovana s radna stanica jedan (1) i radna stanica dva (2) (Tablica 2.1.). Svako računalo ima instalirane najnovije *drivere* u vrijeme pisanja rada.

Tablica 2.1. Komponente radnih stanica bitne za izvođenje simulacije

|               | Igraće stolno računalo(1) | Prijenosno računalo(2) |
|---------------|---------------------------|------------------------|
| Procesor(CPU) | Ryzen 7 2700X             | Ryzen 5 3500U          |
| RAM           | 32 GB                     | 6 GB                   |

## 2.3. NZXT CAM

Kako bi se prikazala iskorištenost računala pri svakoj od simulacija koristit će se NZXT CAM. NZXT CAM je jednostavan program za korištenje koji omogućuje praćenje opterećenost komponenti računala. Također omogućuje uvid u aktivnosti svake aplikacije i njihovo korištenje resursa. Može se brzo ući u trag svim problemima kako bi se osigurala optimalna izvedba računala. Neke od podržanih značajki su: trenutni broj slika u sekundi (engl. *FPS*), temperatura i opterećenost procesora i grafičke kartice (engl. *GPU*), vrijeme uporabe i stanje baterije (Slika 2.3.) [3].



**Slika 2.3.** Glavni prozor NZXT CAM-a



### 3. FIZIKA U BLENDERU

Blenderov sustav fizike omogućuje simulaciju niza različitih fizičkih pojava u stvarnom svijetu. Ovi sustavi su korišteni za stvaranje različitih statičkih i dinamičkih efekata kao što su tekućine, kosa, vegetacija, dim, kiša i mnogi drugi. Mogu se koristiti pojedinačno i u kombinaciji za kreiranje realističnijih rezultata, kao što je vidljivo na slici 3.1. gdje tekućina na zidovima ostavlja tragove pomoću dinamičkog bojanja. Osim za simulacije fizičkih pojava iz stvarnosti, simulacije se također mogu koristiti za apstraktne stvari u umjetnosti [4].



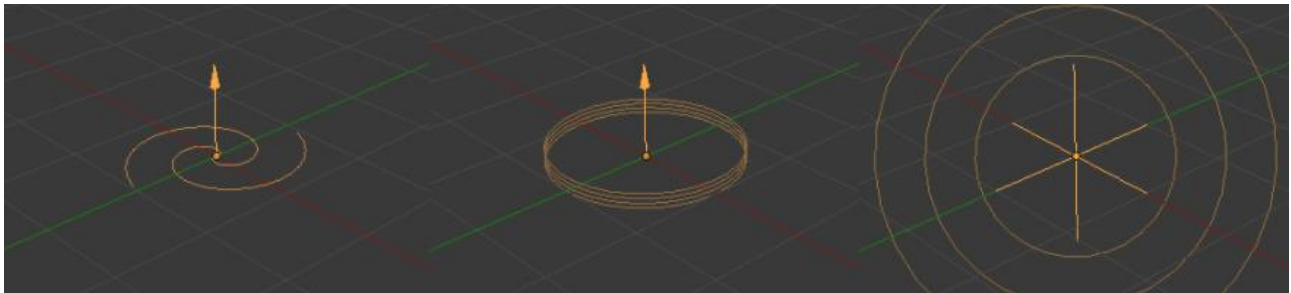
**Slika 3.1.** Scena dobivena korištenjem kombinacije simulacija tekućine i dinamičkog bojanja [5]

Važan dio simulacija su vanjski faktori, kolizija, polje sila i gravitacija, koji utječu na njih, a nisu direktno vezani uz simulaciju. Kada bi isključili njihov utjecaj, objekti bi bili statični ili bi padali beskonačno netaknuti. Gravitacija je glavna sila i iznos joj je, kao i na zemlji,  $9.81 \text{ m/s}^2$ . Ona se može promijeniti u postavkama scene (Slika 3.2.) i težinama polja svake simulacije (Slika 3.4.). Iako se time odstupa od stvarnosti u fizičkom smislu, ali vizualno to može pomoći kako bi se prikazala kretanja znatno većih ili manjih objekata od onih iz svakodnevice (npr. smanjit će se utjecaj gravitacije pri kreiranju scene planeta kako bi se naglasila dimenzija) [6].



**Slika 3.2.** Promjena vrijednosti gravitacije

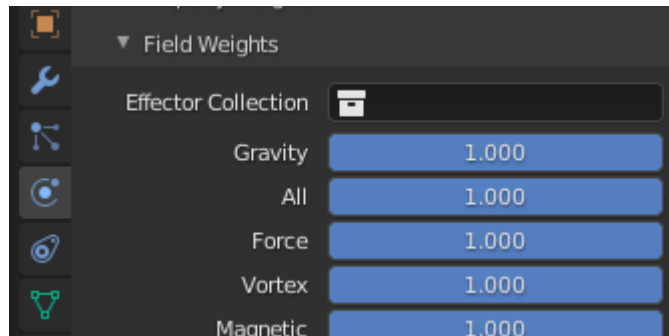
Sile koje također mogu utjecati na simulaciju, a nisu automatski postavljene u scenu kao gravitacija, su polja sila. Ove sile su prikazane pomoću praznog objekta sa strelicom koja ukazuje na smjer kretanja sile (Slika 3.3.). Većina polja ,osim vodiča krivulje i teksture polja, imaju vrlo slične postavke. Poljem sila se unosi dodatna kretnja objekta i čestica u sceni, a ta kretnja može biti kaotična ili kontrolirana ovisno o postavkama i broju sila u sceni koje zajednički djeluju na objekt. Intenzitet svih polja sila i gravitacijske sile može se smanjiti za pojedini objekt u postavkama unutar same simulacije. Opcija se nalazi pod opcijom „Težina sile“ kao što je vidljivo na slici 3.4.



**Slika 3.3.** *Primjer praznog objekta s pričvršćenim poljem sila*

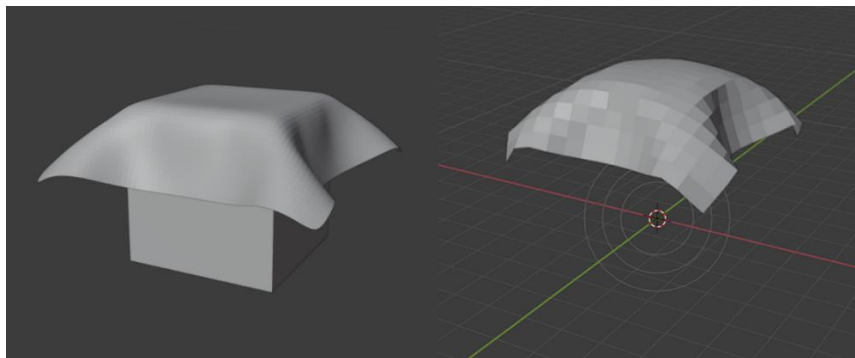
Polja sila koja se nalaze u Blenderu:

- Sila (engl. *Force*)
- Vjetar (engl. *Wind*)
- Vrtlog (engl. *Vortex*)
- Magnetski (engl. *Magnetic*)
- Harmonijski (engl. *Harmonic*)
- Naboj (engl. *Charge*)
- Lennard-Jones
- Tekstura (engl. *Texture*)
- Vodiči krivulje (engl. *Curve Guide*)
- *Boid*
- Turbulencija (engl. *Turbulence*)
- Povlačenje (engl. *Drag*)
- Protjecanje dima (engl. *Smoke Flow*)



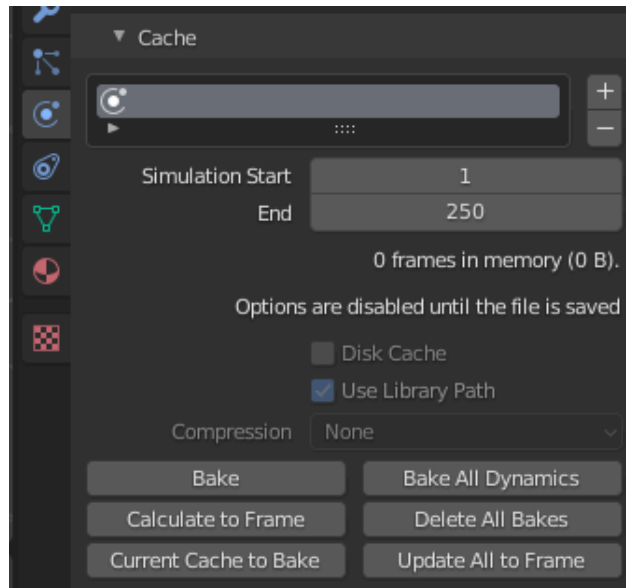
**Slika 3.4.** Postavljanje intenziteta utjecaja sile na objekt

Iako se kolizija može svrstati pod oblik simulacije, ona se neće tako promatrati zbog nedostatka vlastitog rješavača (engl. *Solver*) i parametara koji su uglavnom estetske karakteristike poput parametara sila. Kolizija je akcija koja se nastoji deformirati, zaustaviti ili usmjeriti objekt. Čestice, meka tijela i predmeti od tkanine mogu biti sudionici kolizije. Predmet kolizije može biti bilo koji od navedenih tipova objekata i objekt koji ne posjeduje status simulacije. Unutar panela za postavke kolizije nalaze se parametri poput propusnosti, ljepljivost, prigušivanje, trenje itd. Neke od sila se mogu koristiti u sličnu svrhu kao i kolizija, ako joj je udaljenost djelovanja vrlo kratka (Slika 3.5.).



**Slika 3.5.** Usporedba kolizije (lijevo) i polja sile s malom udaljenošću djelovanja (desno)

Jedna od važnijih opcija pri simuliranju je priprema (engl. *Baking*). Ona radi izračune scene i sprema ih u memoriju, tako da ti podaci budu pregledniji u prozoru za prikaz i da mogu biti kasnije korišteni za iscrtavanje bez potrebe za ponovnim izračunima i tako smanjuje potencijalne greške. Ako nije dobiven željeni rezultat, priprema se može izbrisati iz memorije. Pripremu se može i prekinuti ako se odluče promijeniti parametri. Ostale opcije se mogu naći unutar predmemorije (engl. *Cache*) svakog objekta nad kojim se radi simulacija (Slika 3.6.). Blender također omogućuje korisniku spremanje i upravljanje više predmemorija od jednom za isti objekt u sceni.



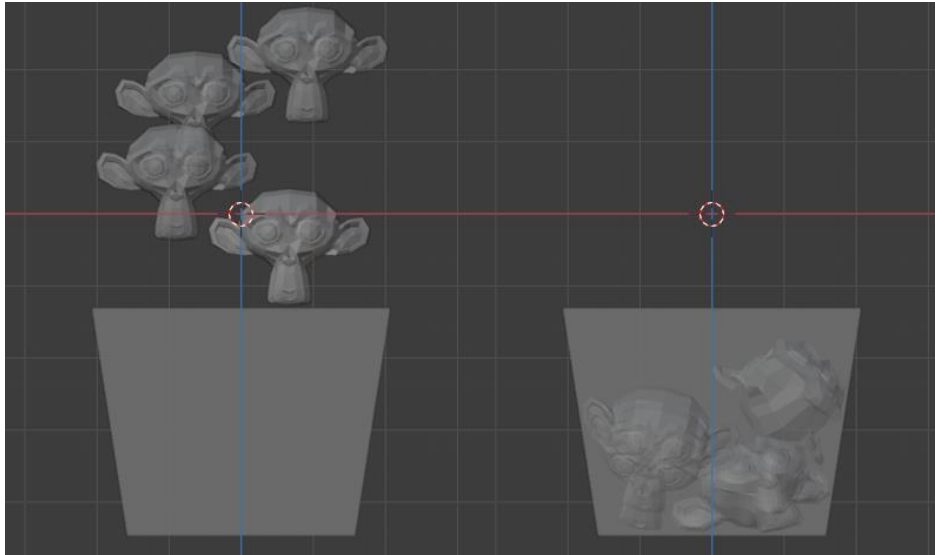
**Slika 3.6.** Postavljanje pripreme za simulaciju

Vrste fizika u Blenderu:

- Kruto tijelo (engl. *Rigid Body*)
- Meko tijelo (engl. *Soft Body*)
- Tkanina (engl. *Cloth*)
- Tekućine (engl. *Fluid*)
- Sustav čestica (engl. *Particles System*)
- Dinamičko bojanje (engl. *Dynamic Paint*)

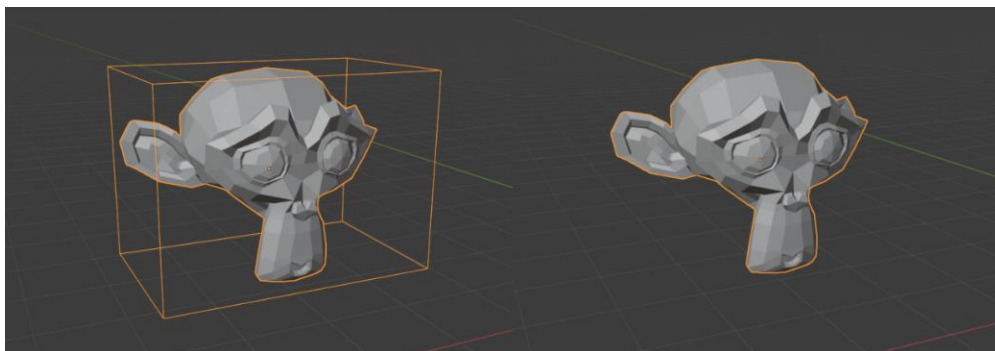
### 3.1. Kruto tijelo

Simulacija krutog tijela predstavlja odnos između dva ili više objekata, gdje ne dolazi do deformacije nego samo utječe na poziciju i orijentaciju objekata (Slika 3.7.). Interakcije mogu biti običan pad ili odbijanje od drugih objekata, ovisno o tome kako je definirano u postavkama. Kruta tijela mogu biti aktivna i pasivna. Aktivni objekti su pod utjecajem gravitacijske sile, drugih objekata i ostalih sila, dok pasivni ostaju statični.



**Slika 3.7.** Prikaz simulacije na početku i na kraju

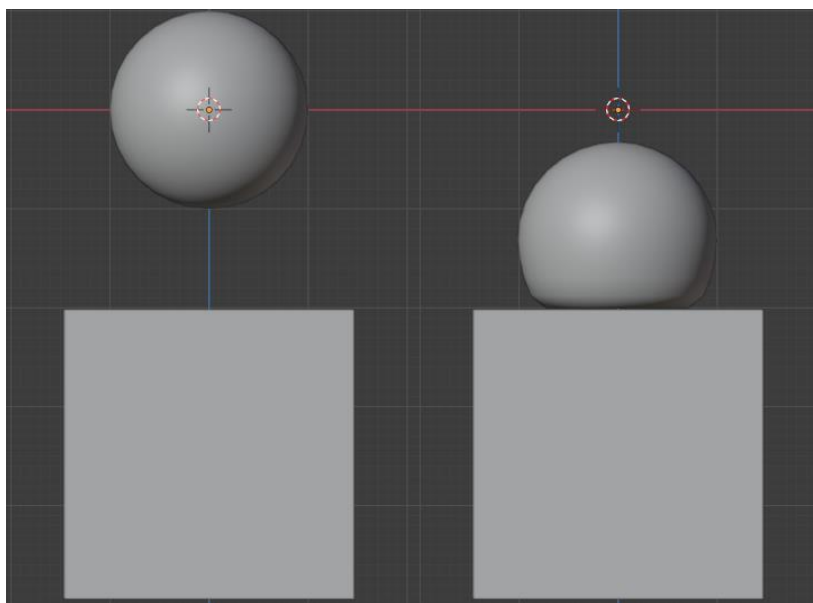
Prilikom simulacije sustav krutih tijela prepisuje lokaciju i rotaciju dinamičkih objekata, ali ne mijenja lokaciju i rotaciju samog objekta. Kada se potvrdi simulacija, time se učini objekte statičnima, otkloni se sustav krutih tijela i promijeni se lokacija i rotacija tijela. Razlog tome je što tijekom simulacije, objekti oko sebe imaju dodatni dinamični objekt, koji predstavlja „oklop“ primarnom objektu i kreću se s njim. Oblici dinamičkog objekta se dijele, na konveksni oblik, jednostavne oblike i oblik samog primarnog objekta (Slika 3.8.). Konveksni oblici su bolji za objekte s malim brojem vrhova i koji nemaju složeniju strukturu. Ovisno o ciljanoj razini preciznosti i raspoloživim resursima, tako se bira oblik dinamičkog tijela. Važno je napomenuti marginu (razmak od drugih objekata) radi moguće greške simulacije u Blenderu. U nekim slučajevima, objekt probija druge objekte, dok je u drugim razmak između objekata prevelik.



**Slika 3.8.** Lijevo je prikazan dinamički objekt s oblikom kocke, a desno s oblikom primarnog objekta

## 3.2. Meko tijelo

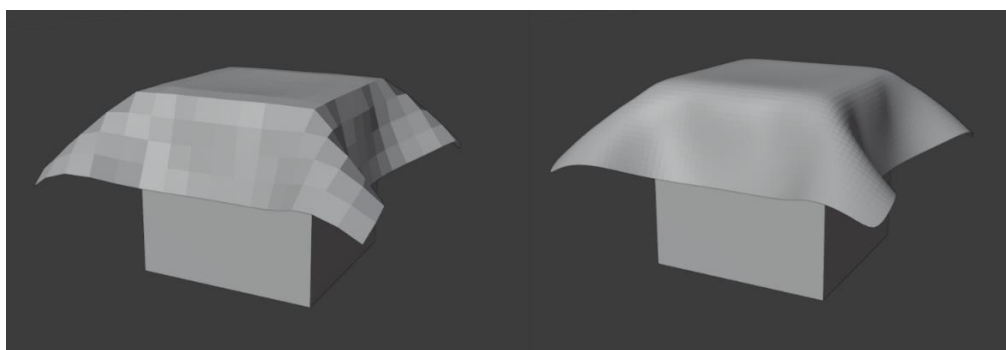
Simulacija mekog tijela koristi se za simulaciju predmeta koji se mogu deformirati (Slika 3.9.). Dizajniran je prvenstveno za dodavanje sekundarnog pokreta u animaciju. Korisno je za objekte sklone savijanju, deformaciji, reagiranju na gravitaciju, vjetar ili interakciju s drugim objektima poput pomaka dijelova tijela tijekom hodanja, odbijanje košarkaške lopte od pod ili kretnje latica cvijeta na vjetru. Simulacija djeluje kombiniranjem postojeće animacije na objekt (ručno animiran objekt ili animacije dobivene simulacijom krutih tijela) sa silama koje djeluju na njega. Spomenute sile se dijele na vanjske sile kao što su gravitacija ili polje sila i unutarnje sile koje drže vrhove zajedno. Na taj se način mogu simulirati oblici koje bi objekt poprimio u stvarnosti da ima volumen. Meka tijela djeluju posebno dobro ako objekti imaju ravnomjernu raspodjelu vrhova. Potrebno je dovoljno vrhova za dobre sudare. Deformacija (krutost) se mijenja tako da se doda više vrhova u određenoj regiji. Kao i simulacija tkanine, meka tijela mogu djelomično prikazati deformiranje tkanine te posjeduju opciju detektiranja kolizije sa samim sobom, ali vrlo brzo dolazi do ograničenja jer nije primarno namijenjena za to.



**Slika 3.9.** Kugla postavljena kao meko tijelo i kocka kao kolizija

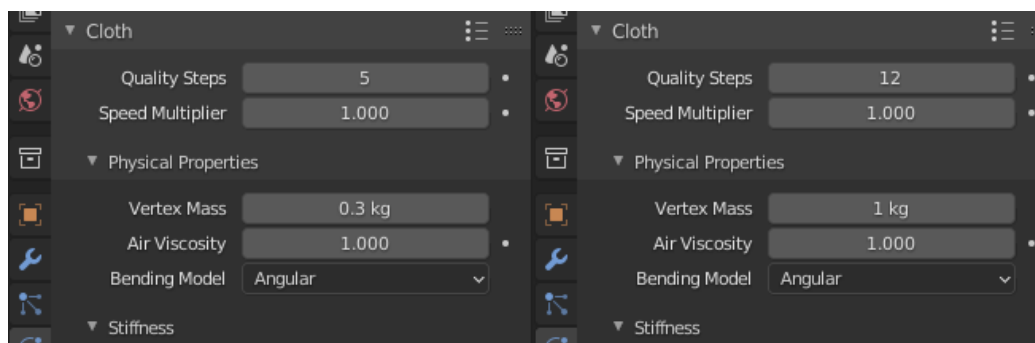
### 3.3. Tkanina

Tkanina se obično primjenjuje na 2D mrežu za simulaciju predmeta iz stvarnog svijeta (Slika 3.10.) kao što su tkanine, zastave i transparenti, ali se može koristiti i za modeliranje 3D predmeta poput jastuka, lopte ili balona. Tkanina ima interakciju s drugim pokretnim tijelima, gravitacijom i ostalim silama. Jednom kada je fizika primijenjena na objekt, pojavljuje se modifikator tkanine, a nakon toga može biti pod utjecajem drugih modifikatora. Najčešće su to zaglađivanje (engl. *Smooth*) i podjela površine (engl. *Subdivision surface*) modifikatori. Razlog tome je da se smanji broj poligona s kojima simulaciju mora raditi te se dodaju naknadno kako bi „popravili“ izgled tkanine. Objekt će različito izgledati za povećanje broja vrhova prije i nakon izvođenja simulacije.



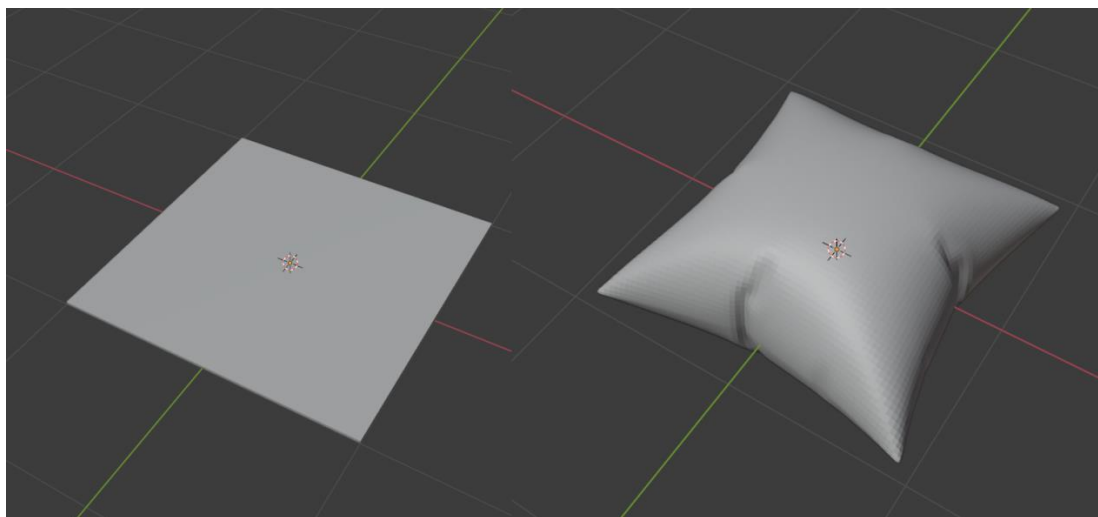
**Slika 3.10.** *Scena simulacije tkanine prije i nakon korištenja subdivision surface modifikatora*

Simulacija nudi puno faktora koji se mogu mijenjati za dobivanje željenog efekta. Kako bi se pojednostavio taj proces, Blender nudi pet unaprijed postavljenih verzija svih opcija (Slika 3.11.). Svaka od tih verzija predstavlja ponašanje materijala tkanine koji se najčešće susreću u stvarnosti. Ti materijali su pamuk, traper, koža, guma i svila.



**Slika 3.11.** *Unaprijed postavljene opcije za pamuk i traper*

Opcije koje se mogu mijenjati su masa, krutost, prigušivanje, unutarnje opruge, pritisak, pin grupa, samosudaranje i ostale. Unutarnje opruge i pritisak vrijede samo za 3D tijela odnosno zatvorene mreže. Ako se one omoguće, dobije se sličan efekt kao i s mekim tijelima. Pritiskom se na vrlo jednostavan način mogu dobiti složeni oblici za koje bi trebalo dosta vremena kada bi se koristila metoda digitalnog kiparstva. Na slici 3.12. se može vidjeti jednostavna 2D ploha kojoj je dodana gotovo neprimjetna debljina kako bi se omogućila zatvorena mreža i samim tim prostor za pritisak.

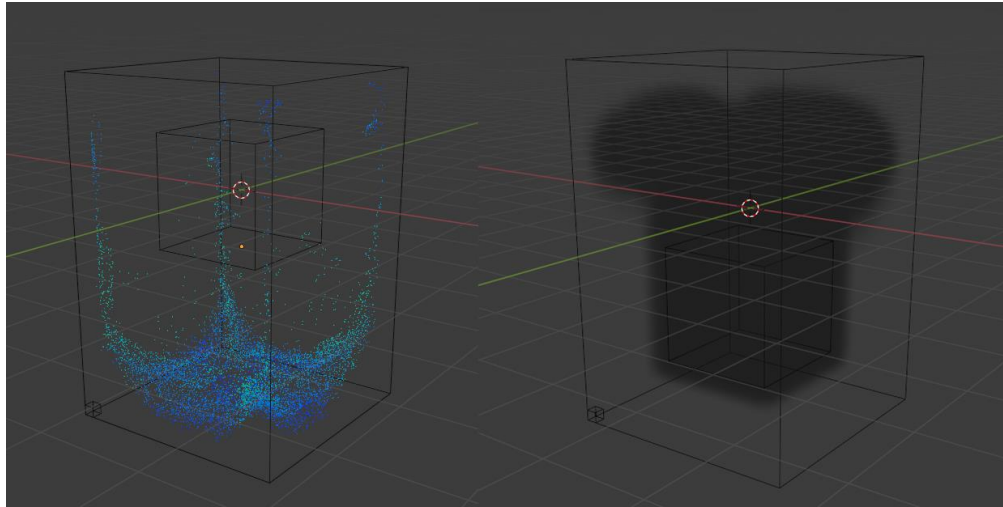


**Slika 3.12.** Zadebljana ploha kojoj je dodan pritisak

### 3.4. Tekućine

Simulacija tekućine sastoji se od domene, izvora tekućine i opcionalno prepreke. Unutar domene mogu se definirati simulacijski parametri kao što su viskoznost i gravitacija. Simulacija dima podskup je sustava tekućine. Za razliku od tekućine dim nije predstavljen kao objekt, nego kao strujanje zraka definirano preko volumnog materijala. Početno stanje tekućine također nije objekt, nego skup čestica (Slika 3.13.) čije je prikazivanje manje računalno zahtjevno. Izgled objekta dodaje se tek naknadno, jer inače tekućina nije vidljiva pri iscrtavanju. Kvaliteta tekućine je predstavljena rezolucijom domene. Veća vrijednost rezolucije predstavlja veći broj čestica, u određenoj jedinici prostora, koji sudjeluje u procesu. Oblik domene je uvijek kvadar, za svaki ostali geometrijski oblik potrebno je koristiti prepreku navedenog oblika.





**Slika 3.13.** *Tekućina i dim dobiveni preko opcije za brze efekte*

Proces postavljanja simulacije:

- Kreiranje objekta koji predstavlja domenu i predstavlja granice simulacije
- Postaviti objekt koji predstavlja protok koji će emitirati tekućinu
- Postaviti efektivne objekte kako bi tekućina imala interakciju s objektima u sceni
- Postaviti materijal objekta domene
- Pripremiti simulaciju koja ju sprema u memoriju

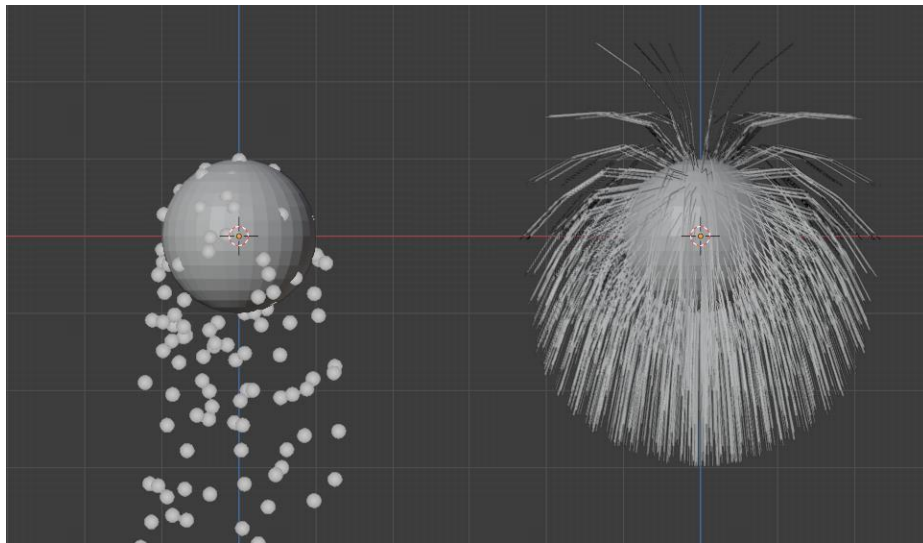
### 3.5. Sustav čestica

Čestice su veliki broj predmeta koji se emitiraju iz objekata. Broj čestica može biti od nekoliko desetaka pa sve do nekoliko stotina tisuća ovisno o mogućnostima *hardwera* i potrebama projekta. Svaka čestica može biti svjetlosna točka ili objekt te biti spojena ili dinamična. Oni mogu reagirati na mnogo različitih utjecaja i sila i imaju pojam životnog vijeka. Dinamičke čestice mogu predstavljati vatru, dim, maglu i druge stvari poput čarolija prašine ili čarolije. Postoje dvije vrste sustava čestica, a to su emitirane čestice i kosa (Slika 3.14.). Kosa je podskup čestica, čiji su emitirani objekti krivulje koje mogu predstavljati kosu, travu ili dlačice na kistu itd. Razlog zašto su podskup normalnih čestica je zbog načina na koji su mogu ocrtati emitirane čestice.

Emitirane čestice mogu biti iscrtane kao:

- Halo - korišten za vatru, dim, oblake
- Objekt – svaka čestica predstavlja objekt sa svim njegovim svojstvima, tako da objekt može biti animiran, teksturiran ili dio kolekcije
- Put – ovim ocrtavanjem dobije se put koji je čestica prešla, tako da se može doći do istog efekta kao što je kosa

Razlika između emitiranja čestica i kose je taj što kosa ima dosta opcija koje skraćuju vrijeme potrebno za dobivanje efekta koji stoji u nazivu. Ako bi se išlo do izgleda kose putem emitiranih čestica, moralo bi se čestice ocrtati kao put, u modifikatoru potvrditi simulaciju i samim tim bi se izgubila mogućnost izmijene, zatim bi se objekt trebao pretvoriti u krivulju i dodati joj debljinu jer je krivulja beskonačno tanka. Korištenjem kose navedeni koraci se mogu odraditi u svega par koraka.



**Slika 3.14.** *Sustav čestica kao emiter i kosa*

### **3.6. Dinamičko bojanje**

Dinamičko bojanje je modifikator i sustav fizike koji može pretvoriti objekte u platno i kistove. Označavanjem vrhova objekta, kreiranjem slika ili stvaranjem udubljenja mogu se dobiti različiti efekti poput bojanje zida, valovi, prolazak auta kroz snijeg i mnogi drugi (Slika 3.15.).

Modifikator ima dvije vrste:

- Četka (engl. *Brush*) – služi za primjenu boje na drugi objekt
- Platno (engl. *Canvas*)– apsorbira boju koju nanosi kist

Odabirom platna pojavljuje se novi dio panela koji ima nekoliko osnovnih parametara poput *anti-aliasinga*, broj uzorkovanja po jednom *frameu*. Oba parametra su zadužena za glađi izgled efekta. Platno se dijeli na nekoliko vrsta podloge čijim se odabirom dobije različit izgled panela.

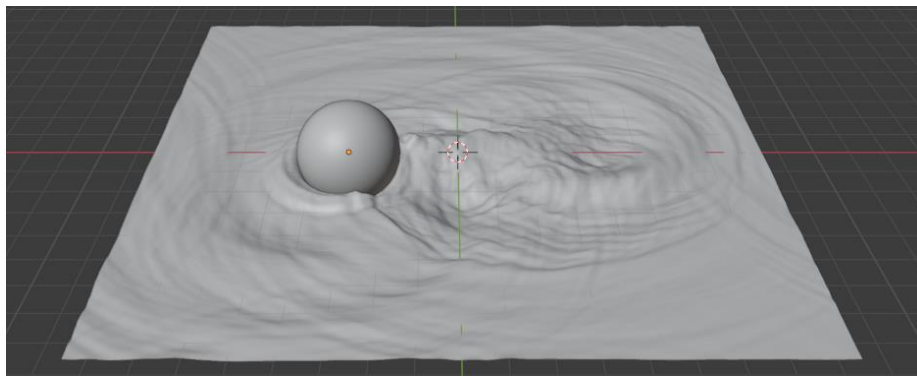
Vrste podloge platna:

- Boja (engl. *Paint*) - vrijednosti boje i vlažnosti
- Pomak (engl. *Displacement*) - dubina sjecišta objekata kista
- Težina (engl. *Weight*) – sjecište kista rezultira kreiranjem valova
- Val (engl. *Wave*) - težinske skupine vrhova koje mogu koristiti drugi modifikatori i alati

Osnovni parametri kista su boja, prozirnost i vlažnost. Ovisno koja je vrsta podloge odabrana, različiti će parametri biti dostupni pored osnovnih.

Vrste kistova:

- Volumen objekta (engl. *Mesh Volume*) - utječe na sve površinske točke unutar volumena
- Blizina (engl. *Mesh Proximity*) - koristi udaljenost do najbliže točke na površini kista
- Volumen objekta + Blizina - isto kao volumen, ali također ima utjecaj definirane umjetnosti
- Centar objekta (engl. *Object Center*) – udaljenost između središta kista i platna
- Sustav čestica (engl. *Particle System*) - utjecaj kista definiran je česticama



**Slika 3.15.** Dinamičko bojanje „val“ tipom podloge i „volumen objekta“ kao kist

## 4. PROVEDBA TESTIRANJA

### 4.1. Potrebne Informacije

Prije nastavka važno je napomenuti nekoliko stvari koje nisu dio opisa simulacija nego općenite informacije koje će pomoći boljem razumijevanju rezultata testiranja.

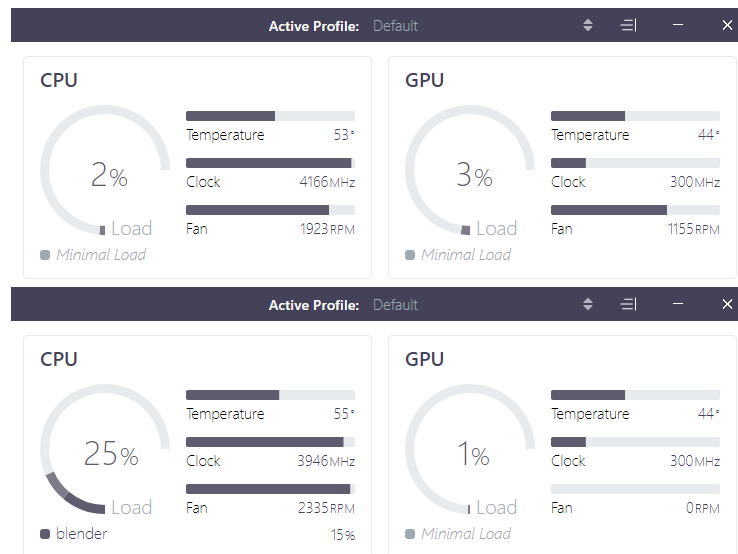
Prije svakog izvođenja simulacije, program je zatvoren i ponovno otvoren kako bi se proces započeo „iznova“ tako da se obrišu svi povezani podaci iz radne memorije. Unatoč opcijama poput *Delete All Bakes* ili *Delete Cache* određeni su podaci često ostali spremljeni.

Rezultati će varirati ovisno koji se operativni sustav koristi. Ta činjenica ne dolazi zbog razlike u optimiziranosti Blendera za pojedini sustav nego zbog samog načina na koji operativni sustav rukuje s memorijom. Između Linuxa i Windowsa je najznačajnija razlika tijekom simulacija, a znatno manja tijekom iscrtavanja (Slika 4.1.).



**Slika 4.1.** Usporedba Linuxa i Windowsa u simulaciji tekućine [7]

Simulacije se potpuno oslanjaju na snagu procesora i količini RAM-a. Grafička kartica koristi se za vizualni prikaz simulacije na zaslonu i njeno iscrtavanje u interakciji sa svjetlom. Iako se iscrtavanje može odraditi i bez GPU snage, taj pristup se koristi uglavnom pri projektima većih razmjera kao što su filmovi, gdje scene budu prevelike da bi se koristile grafičke kartice. Na slici 4.2 može se vidjeti kako GPU ostaje nepromijenjen tijekom simulacije. Postoje iznimke za ovo pravilo koje će biti navedene kasnije u radu.



**Slika 4.2.** Usporedba rada komponenata prije i tijekom simulacije

Dobiveni rezultati nisu u potpunosti precizni jer varijable osciliraju tijekom simulacije. Oscilacija se uglavnom odvija oko određene vrijednosti, tako da se srednja vrijednost uzima kao podatak u tablici (npr. aktivnost CPU-a se mijenja između 40% i 75%, stoga se kao podatak u tablici upisuje 60%). Osim srednje vrijednosti uzima se u obzir i koliko je dugo bila prikazana određena vrijednosti (npr. aktivnost CPU-a je uglavnom bila 75%, ali je u nekoliko navrata pala na 40%, kao podatak u tablici će se pisati 70%)

Svako simulaciji pristupilo se tako da je u obzir uzeta situacija i okruženje u kojoj se simulacija uglavnom koristi, ovisno o tome su se prilagodili parametri i varijable koje utječu na simulaciju. Pri simulaciji tkanine važnije je uzeti u obzir složenost tkanine, nego broj tkanina u sceni.

## 4.2. Simulacije

Provest će se testiranje svih oblika fizike navedenih u trećem poglavlju. Svaki oblik fizike imat će dvije vrste simulacije, jednostavniju i složeniju. Jednostavnije predstavljaju simulacije gdje je vrijeme izvođenja uglavnom nekoliko minuta i proces nije zahtjevan. Trajanje je dovoljno da se može uvidjeti odstupanje pri promjeni parametara, a da se pri tome ne potroši previše vremena čekajući svako izvođenje. Složenije simulacije predstavljaju procese od desetak minuta do nekoliko sati. Izvršavanje simulacija može trajati i duže, ali ovo je dovoljno da se uvide prednosti, nedostaci i da se usporede zahtjevnije scene.

Za svaki oblik simulacije provode se testovi na početnim uvjetima i izmijenjenim pojedinačnim parametrima, a da pri tome ostali iz početnih uvjeta ostaju nepromijenjeni. Početni uvjeti predstavljaju standardne uvjete u kojima se simulacija pojavljuje pri njenom kreiranju uz nekoliko izmjena kako bi uvjeti bili što bolja podloga za naknadne izmjene kroz tablicu.

#### 4.2.1. Kruto tijelo

Kruto tijelo predstavlja simulacije u kojoj je jedan od bitnijih aspekata kako ona rukuje s većim brojem objekata premda se ona vrlo često koristi u svrhu toga (npr. usipanje žitarica u zdjelu, rušenje pinova kuglom). Bitno je i kako reagira sa složenijim objektima koji imaju znatno veći broj poligona (npr. rušenje zida, razbijanje čaše).

Početni uvjeti:

- *Shape = Mesh*

Oblik (engl. *Shape*) je jedini izmijenjeni parametar iz zadanih standardnih uvjeta jer uglavnom aktivni oblici neće biti objekti koji spadaju u primitivne geometrijske oblike, tako da će njihov oklop uglavnom biti i sam oblik objekta. Razlika između objekta i sfere kao oklopa je prikazana u tablici 4.1. Radi pojednostavljenja zadatka, kao aktivni objekt je uzeta sfera, ali je kao oklop uzet objekt.

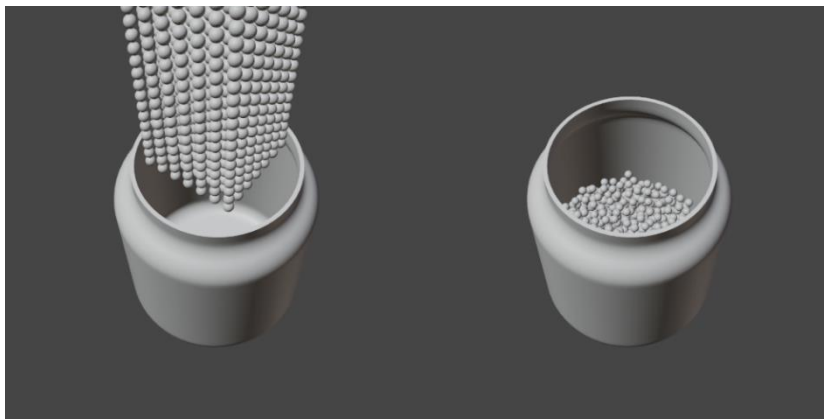
**Tablica 4.1.** *Usporedba objekta i geometrijskog oblika kao oblik oklopa objekta*

|                       | CPU | RAM   | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|-----------------------|-----|-------|-------|----------|----------|---------|
| <i>Shape = Mesh</i>   | 15% | 640MB | 63°C  | 3950 MHz | 2400 RPM | 47s     |
| <i>Shape = Sphere</i> | 16% | 650MB | 65°C  | 4000 MHz | 2420 RPM | 160s    |

Za jednostavnu simulaciju je odabrana scena koja prikazuje velik broj objekata koji se sudaraju, ali je broj poligona pojedinačnih objekata minimalan (Tablica 4.2) (Slika 4.3.). Kao složenija simulacija odabrana je slična scena samo je kao pasivni objekt odabran složen objekt s više od 100000 poligona i znatno većim brojem aktivnih objekata (Tablica 4.3.) (Slika 4.4.).

**Tablica 4.2.** Rezultati simulacije krutih tijela za scenu od 500000 poligona i trajanja 70 frameova

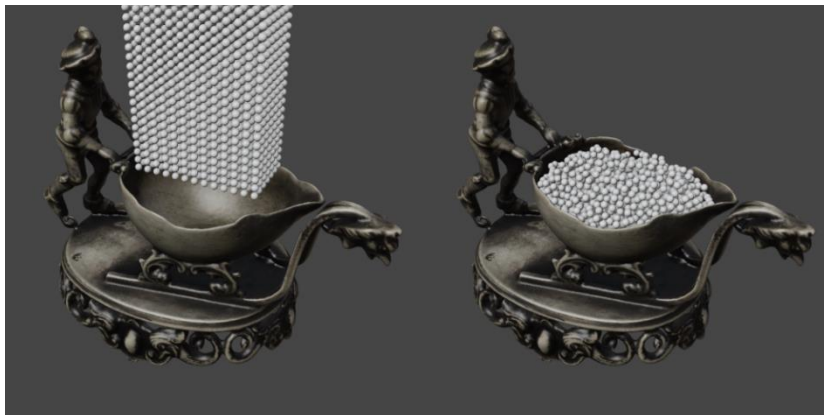
|                         | CPU | RAM   | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|-------------------------|-----|-------|-------|----------|----------|---------|
| Početni uvjeti          | 15% | 640MB | 63°C  | 3950 MHz | 2400 RPM | 47s     |
| <i>Margins</i> = 0.01m  | 16% | 650MB | 65°C  | 4000 MHz | 2420 RPM | 160s    |
| <i>Friction</i> = 0.1   | 16% | 640MB | 65°C  | 3950 MHz | 2410 RPM | 47s     |
| <i>Bounciness</i> = 0.5 | 15% | 640MB | 62°C  | 4000 MHz | 2400 RPM | 45s     |
| <i>SpF</i> = 15         | 16% | 630MB | 63°C  | 4025 MHz | 2400 RPM | 63s     |
| <i>SI</i> = 15          | 15% | 640MB | 64°C  | 3950 MHz | 2400 RPM | 55s     |



**Slika 4.3.** Rezultat jednostavnije simulacije krutih tijela

**Tablica 4.3.** Rezultati simulacije krutih tijela za scenu od 1000000 poligona i trajanja 70 frameova

|                 | CPU | RAM    | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|-----------------|-----|--------|-------|----------|----------|---------|
| Radna stanica 1 | 18% | 1600MB | 67°C  | 3950 MHz | 2450 RPM | 608s    |
| Radna stanica 2 | 26% | 550MB  | 53°C  | 2400 MHz | n/a      | 1220s   |



**Slika 4.4.** Rezultat složenije simulacije krutih tijela

#### 4.2.2. Meko tijelo

Meko tijelo je simulacija s vjerojatno najmanjim područjem primjena. Ako je krutost aktivnog objekta visoka, onda je simulacija bliža krutim tijelima, ako je obratno onda je simulacija bliža zatvorenoj tkanini s unutarnjim pritiskom. Područje korištenja je uglavnom za scene s manjim brojem objekata ili za dio jednog objekta (stomak animiranog lika). Uzevši to u obzir kao glavni faktor pri razdvajanju jednostavne (Tab. 4.5.) (Sl. 4.5.) od složene simulacije (Tab. 4.6.) (Sl. 4.6.) je broj poligona uključen u simulaciju.

Početni uvjeti:

- Omogućeno samosudaranje (engl. *Self-collision*)
- Onemogućen cilj (engl. *Goal*)

Samosudaranje predstavlja vrlo učestali parametar kod simulacije gdje dolazi do deformiranja objekta (meko tijelo i tkanina). Iako znatno povećava vrijeme, uglavnom je potreban parametar jer onemogućuje prodiranje objekta (Tablica 4.4.). Cilj koristi pokrete animacije u obzir, ali je izgled nezgodan za prikazati u obliku slika i ne unosi dodatan faktor jer se i samo padanje objekta pod utjecajem gravitacije može gledati kao oblik animacije.

**Tablica 4.4.** *Usporedba simulacija sa i bez samosudaranja*

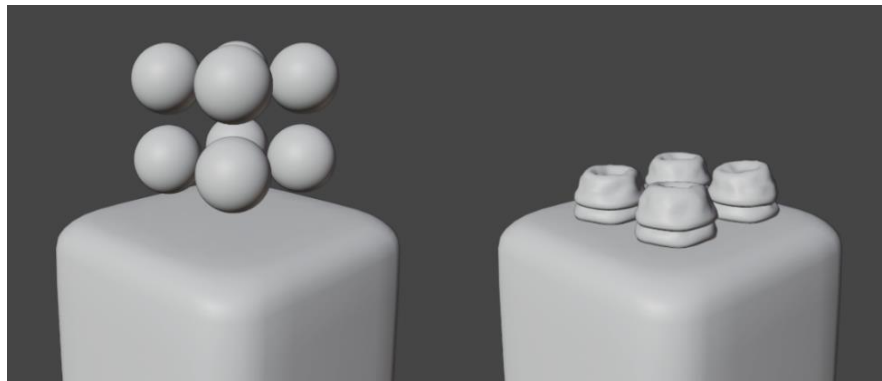
|                           | CPU | RAM   | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|---------------------------|-----|-------|-------|----------|----------|---------|
| <i>Self-collision</i> = 1 | 26% | 290MB | 67°C  | 3970 MHz | 2570 RPM | 92s     |
| <i>Self-collision</i> = 0 | 24% | 300MB | 62°C  | 3930 MHz | 2490 RPM | 42s     |

**Tablica 4.5.** *Rezultati simulacije mekih tijela za scenu od 10000 poligona i trajanja 50 frameova*

|                      | CPU | RAM    | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|----------------------|-----|--------|-------|----------|----------|---------|
| Početni uvjeti       | 26% | 290 MB | 67°C  | 3970 MHz | 2570 RPM | 92 s    |
| <i>Friction</i> = 10 | 25% | 287 MB | 67°C  | 3980 MHz | 2490 RPM | 95 s    |
| <i>Mass</i> = 5kg    | 26% | 280 MB | 66°C  | 3960 MHz | 2500 RPM | 132 s   |
| <i>Pull</i> = 0.1    | 25% | 290 MB | 66°C  | 3950 MHz | 2490 RPM | 96 s    |
| <i>Push</i> = 0.1    | 26% | 288 MB | 67°C  | 3975 MHz | 2470 RPM | 98 s    |
| <i>Damp</i> = 10     | 26% | 290 MB | 67°C  | 4000 MHz | 2480 RPM | 74 s    |



|                        |     |        |      |          |          |        |
|------------------------|-----|--------|------|----------|----------|--------|
| <i>Plasticity = 10</i> | 26% | 285 MB | 66°C | 4025 MHz | 2470 RPM | 81 s   |
| <i>Bending = 5</i>     | 25% | 287 MB | 66°C | 3950 MHz | 2460 RPM | 65 s   |
| <i>Length = 150</i>    | 26% | 290 MB | 67°C | 4000 MHz | 2510 RPM | 160 s  |
| <i>Collision Edge</i>  | 27% | 295 MB | 68°C | 3975 MHz | 2490 RPM | 158 s  |
| <i>Collision Face</i>  | 27% | 290 MB | 67°C | 3950 MHz | 2480 RPM | >300 s |
| <i>Shear = 0.5</i>     | 26% | 288 MB | 67°C | 4000 MHz | 2520 RPM | 90 s   |
| <i>Solver Min = 50</i> | 27% | 290 MB | 67°C | 3950 MHz | 2480 RPM | 126 s  |
| <i>Choke = 20</i>      | 26% | 288 MB | 66°C | 3960 MHz | 2490 RPM | 118 s  |
| <i>Fuzzy = 10</i>      | 25% | 290 MB | 67°C | 3990 MHz | 2485 RPM | 14 s   |



**Slika 4.5.** Rezultat jednostavnije simulacije mekih tijela

**Tablica 4.6.** Rezultati simulacije mekih tijela za scenu od 50000 poligona i trajanja 60 frameova

|                 | CPU | RAM   | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|-----------------|-----|-------|-------|----------|----------|---------|
| Radna stanica 1 | 80% | 360MB | 84°C  | 3800 MHz | 3570 RPM | 540s    |
| Radna stanica 2 | 85% | 350MB | 77°C  | 3000 MHz | n/a      | 1320s   |



**Slika 4.6.** Rezultat složenije simulacije mekih tijela

### 4.2.3. Tkanina

Faktori koji najviše utječu na simulaciju tkanine su broj poligona u sceni i oblik objekta kolizije. Broj poligona osim na vrijeme, utječe na izgled i ponašanje tkanine. Tkanina postaje naboranija jer sadrži više pomičnih točaka, što daje responzivniji i „tanji“ izgled. Ako objekt kolizije ima oštre izbočene dijelove, kao na primjer prsti kipa na slici 4.8., simulacija postaje znatno nepreciznija. Dolazi do prodiranja objekata i neobičnih ponašanja površine. U tom slučaju je potrebno povećati iznos parametara za kvalitetu simulacije, čime raste vrijeme i njena složenost. Samosudaranje povećava vrijeme simulacije, ali je u većini situacija nužan parametar (Tab. 4.7.).

Početni uvjeti:

- Omogućen samosudar (engl. Self-collision)

**Tablica 4.7.** Usporedba simulacija sa i bez samosudaranja

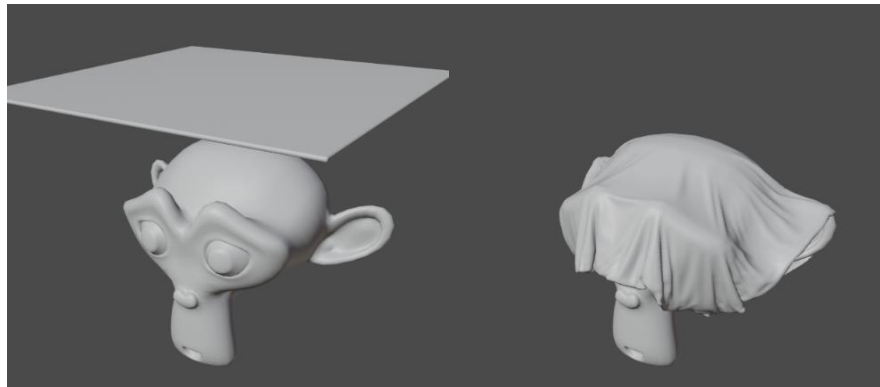
|                           | CPU | RAM   | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|---------------------------|-----|-------|-------|----------|----------|---------|
| <i>Self-collision</i> = 1 | 21% | 640MB | 68°C  | 4000 MHz | 2450 RPM | 117s    |
| <i>Self-collision</i> = 0 | 20% | 700MB | 65°C  | 3950 MHz | 2390 RPM | 39s     |

Scena jednostavnije simulacije sadrži zatvoren objekt i objekt kolizije sa sveukupno 35000 poligona (Tab. 4.8.) (Sl. 4.7.). Objekt je zatvorenog tipa kako bi se mogao testirati i utjecaj parametra pritiska, koji u slučaju otvorenog objekta nema utjecaja.

**Tablica 4.8.** Rezultati simulacije mekih tijela za scenu od 35000 poligona i trajanja 60 frameova

|                             | CPU | RAM    | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|-----------------------------|-----|--------|-------|----------|----------|---------|
| Početni uvjeti              | 21% | 640 MB | 68°C  | 4000 MHz | 2450 RPM | 117 s   |
| <i>Quality</i> = 15         | 27% | 630 MB | 68°C  | 4000 MHz | 2500 RPM | 289 s   |
| <i>Mass</i> = 1kg           | 25% | 640 MB | 69°C  | 3950 MHz | 2430 RPM | 107 s   |
| <i>Air Viscosity</i> = 0.1  | 21% | 570 MB | 68°C  | 3975 MHz | 2450 RPM | 109 s   |
| <i>Linear Bending Model</i> | 21% | 600 MB | 67°C  | 4000 MHz | 2500 RPM | 120 s   |
| <i>Tension</i> = 5          | 22% | 570 MB | 68°C  | 4000 MHz | 2490 RPM | 114 s   |
| <i>Compression</i> = 5      | 21% | 565 MB | 66°C  | 3950 MHz | 2500 RPM | 115 s   |
| <i>Shear</i> = 20           | 21% | 580 MB | 68°C  | 3950 MHz | 2475 RPM | 119 s   |

|                              |     |        |      |          |          |       |
|------------------------------|-----|--------|------|----------|----------|-------|
| <i>Bending = 10</i>          | 22% | 620 MB | 68°C | 3975 MHz | 2500 RPM | 110 s |
| <i>Collision Quality = 5</i> | 27% | 660 MB | 67°C | 4000 MHz | 2475 RPM | 170 s |
| <i>Distance = 0.005</i>      | 22% | 630 MB | 68°C | 3950 MHz | 2500 RPM | 115 s |
| <i>Spring Length = 10</i>    | 22% | 620 MB | 67°C | 4000 MHz | 2450 RPM | 119 s |
| <i>Pressure = 10</i>         | 21% | 630 MB | 69°C | 3850 MHz | 2540 RPM | 150 s |



**Slika 4.7.** *Rezultat jednostavnije simulacije tkanine*

Složenija se simulacija sastoji od dva dijela tkanine i složenog objekta kolizije sa sveukupno 700000 poligona (Tab. 4.9.) (Sl. 4.8.). Radi preciznosti rezultata kvaliteta kolizije se morala povećati na 15, a kvaliteta samosudara na 5.

**Tablica 4.9.** *Rezultati simulacije mekih tijela za scenu od 720000 poligona i trajanja 50 frameova*

|                 | CPU | RAM    | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|-----------------|-----|--------|-------|----------|----------|---------|
| Radna stanica 1 | 20% | 2150MB | 71°C  | 4075 MHz | 2600 RPM | 1150 s  |
| Radna stanica 2 | 42% | 1000MB | 60°C  | 2400 MHz | n/a      | 3200 s  |



**Slika 4.8.** *Rezultat složenije simulacije tkanine*

#### 4.2.4. Tekućina

Količina čestica u tekućini, faktor je koji najviše utječe na vrijeme i složenost simulacije. Kod ostalih simulacija vjerodostojan izgled može se dobiti s jednostavnom scenom i za malo uložnog vremena, ali kod tekućine čak i složena scena ne znači da će ona realistično izgledati. Jednostavna (Tab. 4.11.) (Sl. 4.9.) i složena scena (Tab. 4.12.) (Sl. 4.10.) će se samo razlikovati po broju čestica u tekućini koje će sezati između  $5 \times 10^4$  i  $3.5 \times 10^6$  čestica. Razlika u scenama će biti ta da je u složenoj sceni rezolucija (engl. *Resolution Division*) postavljena na vrijednost 250.

Početni uvjeti:

- *Resolution Division* = 100
- Omogućeno oblikovanje (engl. *Mesh*)
- *Flow Behavior* = *Inflow*

Rezolucija i ponašanje izvora (engl. *Flow Behavior*) su postavljeni na vrijednosti navedene u tablici 4.11. ponajviše kako bi se dobilo vrijeme simulacije u rasponu koje je praktično za promatrati. Rezolucija konkretno utječe na vrijeme jer raste detaljnost tekućine i broj čestica. Oblikovanje je korak koji je potrebno omogućiti jer u suprotnom nije moguće iscrtati tekućine, ali ga je korisno onemogućiti pri testiranju složenije simulacije, jer skraćuje vrijeme. Ponašanje izvora znatno ovisi o situaciji, na vrijednost „*Geometry*“ se postavlja u slučaju da oblik izvora predstavlja i ukupnu konačnu količinu tekućine, a „*Flow*“ kada objekt predstavlja konstantan izvor čime se dobije ujedno i duža simulacija.

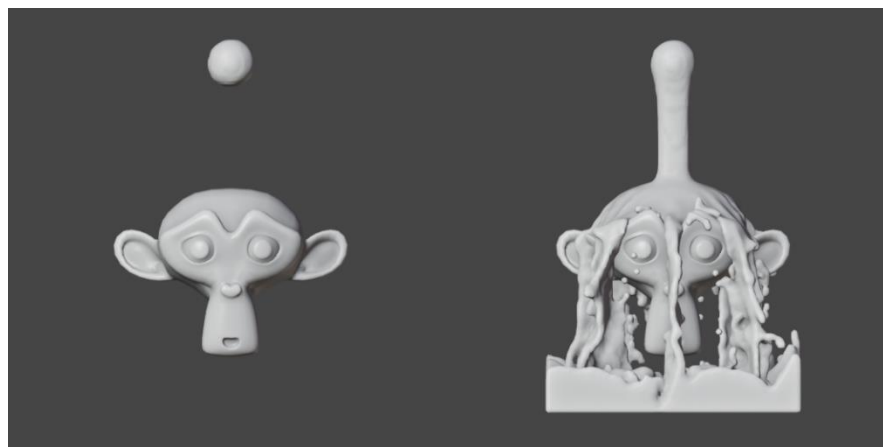
**Tablica 4.10.** *Usporedba prije i poslije dodavanja početnih uvjeta*

|                          | CPU | RAM    | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|--------------------------|-----|--------|-------|----------|----------|---------|
| Resolution Division = 32 | 15% | 430MB  | 51°C  | 3400 MHz | 2100 RPM | 2 s     |
| Onemogućeno oblikovanje  | 40% | 540MB  | 50°C  | 3900 MHz | 2200 RPM | 19 s    |
| Flow Behavior = Geometry | 40% | 350 MB | 51°C  | 3900 MHz | 2200 RPM | 28 s    |
| Početni uvjeti           | 40% | 1350MB | 65°C  | 3925 MHz | 2450 RPM | 37 s    |

**Tablica 4.11.** *Rezultati simulacije tekućine za scenu od 100000 čestica i trajanja 60 frameova*

|                | CPU | RAM     | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|----------------|-----|---------|-------|----------|----------|---------|
| Početni uvjeti | 40% | 1350 MB | 65°C  | 3925 MHz | 2450 RPM | 37 s    |

|                             |     |         |      |          |          |       |
|-----------------------------|-----|---------|------|----------|----------|-------|
| <i>Resolution = 150</i>     | 50% | 3000 MB | 70°C | 3950 MHz | 2780 RPM | 151 s |
| <i>CFL Number = 6</i>       | 40% | 1350 MB | 66°C | 3950 MHz | 2430 RPM | 36 s  |
| <i>Timesteps Max = 8</i>    | 38% | 1300 MB | 68°C | 3925 MHz | 2430 RPM | 36 s  |
| <i>Timesteps Min = 2</i>    | 40% | 1400 MB | 70°C | 3950 MHz | 2460 RPM | 45 s  |
| <i>Sim. Method = APIC</i>   | 39% | 1350 MB | 68°C | 3925 MHz | 2490 RPM | 41 s  |
| <i>FLIP Ratio = 0.5</i>     | 45% | 1050 MB | 67°C | 3950 MHz | 2450 RPM | 31 s  |
| <i>Particle Radius = 2</i>  | 42% | 1300 MB | 67°C | 3950 MHz | 2500 RPM | 43 s  |
| <i>Sampling = 4</i>         | 45% | 1400 MB | 66°C | 3975 MHz | 2500 RPM | 45 s  |
| <i>Randomness = 0.5</i>     | 42% | 1300 MB | 66°C | 4025 MHz | 2485 RPM | 40 s  |
| <i>Particle Max = 24</i>    | 45% | 1450 MB | 67°C | 3975 MHz | 2490 RPM | 40 s  |
| <i>Particle Min = 12</i>    | 42% | 1450 MB | 67°C | 3925 MHz | 2500 RPM | 38 s  |
| <i>NBW = 6</i>              | 41% | 1440 MB | 65°C | 3950 MHz | 2510 RPM | 38 s  |
| <i>Fractional Obstacles</i> | 47% | 1700 MB | 69°C | 3990 MHz | 2500 RPM | 57 s  |
| <i>Viscosity</i>            | 80% | 800 MB  | 75°C | 3980 MHz | 2600 RPM | 195 s |
| <i>Diffusion</i>            | 40% | 1500 MB | 67°C | 3950 MHz | 2500 RPM | 39 s  |
| <i>Guides</i>               | 70% | 1300 MB | 72°C | 3875 MHz | 3245 RPM | 221 s |



**Slika 4.9.** Rezultat jednostavnije simulacije tekućine

**Tablica 4.12.** Rezultati simulacije tekućine za scenu od  $3 \times 10^6$  (250) čestica i trajanja 140 frameova

|                 | CPU | RAM    | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|-----------------|-----|--------|-------|----------|----------|---------|
| Radna stanica 1 | 75% | 9350MB | 73°C  | 4075 MHz | 3200 RPM | 3100 s  |
| Radna stanica 2 | 60% | 3600MB | 66°C  | 3400 MHz | n/a      | 12000 s |



**Slika 4.10.** Rezultati složenije simulacije tekućine

#### 4.2.5. Dim

Za razliku od svih prethodnih, simulacija dima se ne oslanja na broj poligona niti broj čestica, nego na rezoluciju domene. Tekućina također koristi rezoluciju domene kao mjeru detaljnosti, ali je u suštini promjena broja čestica. Simulacija dima je također specifična jer se znatno oslanja na njen materijal, tako da se loše postavljena simulacija može znatno unaprijediti promjenom materijala koji su vremenski manje zahtjevni od izvođenja simulacije ponovno.

Početni uvjeti:

- *Resolution Division* = 100
- Omogućen šum

Kao i u slučaju tekućine povećana je rezolucija radi duže simulacije i bolje kvalitete jer zadana rezolucija (32) ne predstavlja gotovo ni jednostavnu simulaciju. Šum (engl. *Noise*) je dodan jer će u većini slučajeva biti poželjan dim s nepredvidljivijim kretnjama (Tab. 4.13.).

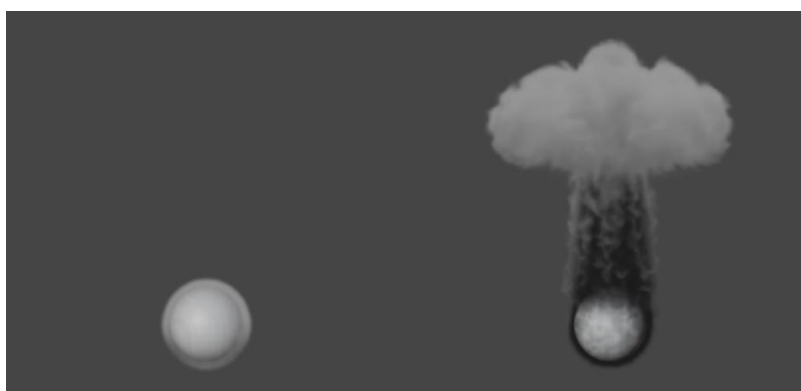
**Tablica 4.13.** Usporedba prije i poslije dodavanja početnih uvjeta

|                          | CPU | RAM   | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|--------------------------|-----|-------|-------|----------|----------|---------|
| Resolution Division = 32 | 52% | 390MB | 56°C  | 3900 MHz | 2200 RPM | 9 s     |
| Onemogućen šum           | 58% | 560MB | 68°C  | 4000 MHz | 2400 RPM | 55 s    |
| Početni uvjeti           | 58% | 640MB | 68°C  | 4025 MHz | 2490 RPM | 58 s    |

Jednostavna simulacija, predstavljena je običnom sferom i početnim uvjetima (Tab. 4.14.) (Sl. 4.11.). U složenu simulaciju uključena je i kolizija s drugim objektom, premda je to česta pojava u konkretnim primjenama (Tab. 4.15.) (Sl. 4.12.). Rezolucija je postavljena na 250.

**Tablica 4.14.** Rezultati simulacije tekućine za scenu rezolucije 100 i trajanja 60 frameova

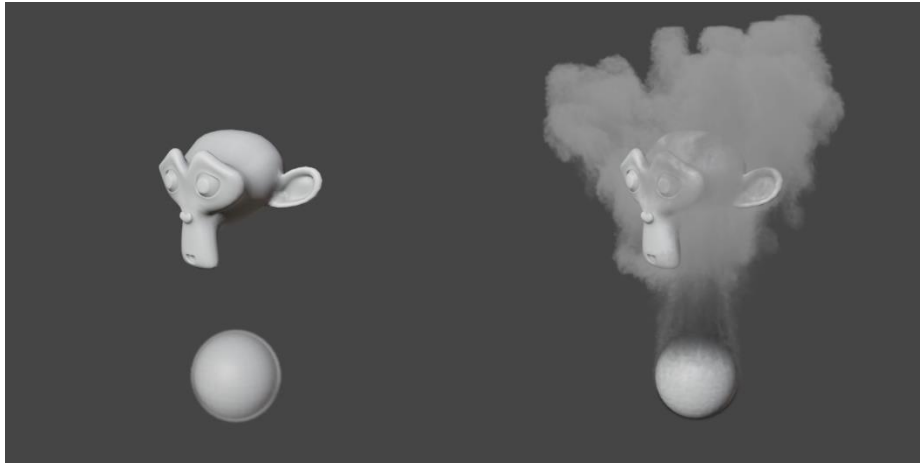
|                             | CPU | RAM     | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|-----------------------------|-----|---------|-------|----------|----------|---------|
| Početni uvjeti              | 58% | 640 MB  | 68°C  | 4025 MHz | 2490 RPM | 58 s    |
| <i>Resolution = 150</i>     | 75% | 1350 MB | 71°C  | 3975 MHz | 2970 RPM | 223 s   |
| <i>CFL Number = 6</i>       | 55% | 680 MB  | 66°C  | 3950 MHz | 2730 RPM | 60 s    |
| <i>Timesteps Max = 8</i>    | 60% | 630 MB  | 70°C  | 3950 MHz | 2910 RPM | 60 s    |
| <i>Timesteps Min = 2</i>    | 63% | 630 MB  | 70°C  | 4050 MHz | 2900 RPM | 68 s    |
| <i>Empty Space = 0.0001</i> | 58% | 620 MB  | 68°C  | 3950 MHz | 2850 RPM | 59 s    |
| <i>Adaptive Domain</i>      | 50% | 800 MB  | 61°C  | 3950 MHz | 2400 RPM | 29 s    |
| <i>Buoyancy Density = 2</i> | 58% | 630 MB  | 66°C  | 3975 MHz | 2500 RPM | 63 s    |
| <i>Heat = 2</i>             | 57% | 650 MB  | 67°C  | 4000 MHz | 2490 RPM | 59 s    |
| <i>Vorticity = 1</i>        | 67% | 680 MB  | 70°C  | 3975 MHz | 2490 RPM | 102 s   |
| <i>Dissolve</i>             | 57% | 630 MB  | 67°C  | 3925 MHz | 2850 RPM | 58 s    |
| <i>Guides</i>               | 68% | 700 MB  | 69°C  | 3900 MHz | 2710 RPM | 90 s    |



**Slika 4.11.** Rezultat jednostavnije simulacije dima

**Tablica 4.15.** Rezultati simulacije tekućine za scenu rezolucije 250 i trajanja 100 frameova

|                 | CPU | RAM    | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|-----------------|-----|--------|-------|----------|----------|---------|
| Radna stanica 1 | 80% | 5200MB | 73°C  | 4075 MHz | 3500 RPM | 1900 s  |
| Radna stanica 2 | 85% | 3800MB | 77°C  | 3000 MHz | n/a      | 7200s   |



**Slika 4.12.** *Rezultat složenije simulacije dima*

#### 4.2.6. Čestice

Čestice predstavljaju simulaciju gdje se čestice emitiraju iz definiranog objekta. Čestice mogu biti predstavljene bilo kojim objektom, u ovom primjeru će to biti piramida jer sadrži najmanje poligona od svih zatvorenih objekata. Pri velikom broju će piramide izgledati kao obične točke, a uštedi se na sveukupnom broju poligona u sceni. U početnim uvjetima onemogućena je gravitacija kako bi točke ostale u kadru, a ne nestale prema dnu. Dodana je turbulencija radi zanimljivijeg rezultata, u suprotnom bi se točke širile u smjeru površine kugle. Životni vijek je stavljen na proizvoljno velik broj kako bi sve čestice ostale tijekom simulacije u sceni (Tab. 4.16.).

Početni uvjeti:

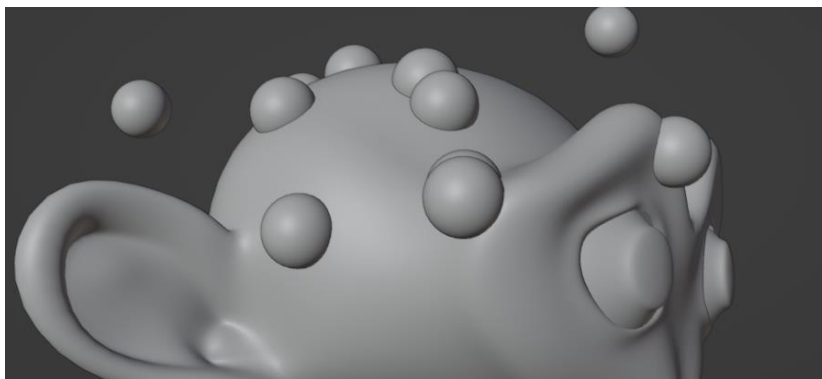
- *Number* = 250000
- *Lifetime* = 1000
- *Render as* = *Object*(Piramida)
- Onemogućena gravitacija
- Dodana turbulencija

**Tablica 4.16.** *Usporedba prije i poslije dodavanja početnih uvjeta*

|                            | CPU | RAM    | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|----------------------------|-----|--------|-------|----------|----------|---------|
| Render as = Object(Sphere) | 7%  | 1060MB | 57°C  | 4100 MHz | 2170 RPM | 42 s    |
| Onemogućena turbulencija   | 7%  | 1060MB | 56°C  | 4100 MHz | 2200 RPM | 42 s    |
| Početni uvjeti             | 7%  | 1070MB | 56°C  | 4100 MHz | 2200 RPM | 42 s    |



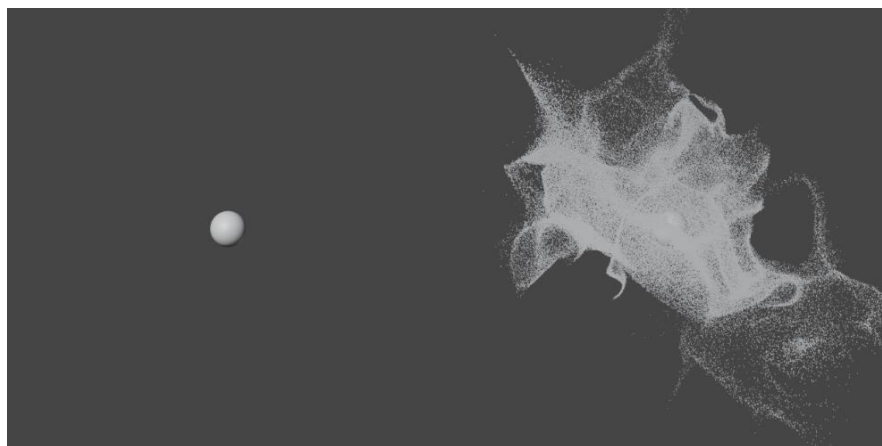
U slučaju jednostavne simulacije scena sadrži samo sferu (Tab. 4.17.) (Sl. 4.14.). Premda je složenost simulacije određena samo brojem čestica jer se broj poligona instanciranog objekta proizvoljno određuje, tako da to nije u domeni problema simulacije, nego rukovanja same scene većim brojem poligona, složenija sadrži samo veći broj točaka i objekt kolizije (Tab. 4.18.) (Sl. 4.15.). Složenost objekta kolizije ne utječe znatno na vrijeme kalkulacije jer se gleda sjecište čestice i objekta kolizije, ali predstavlja napredniji oblik simulacije koji ima čestu primjenu (Sl. 4.13.).



**Slika 4.13.** Sjecište čestica i objekta kolizije

**Tablica 4.17.** Rezultati simulacije scene s  $2.5 \times 10^5$  čestica i trajanja 200 frameova

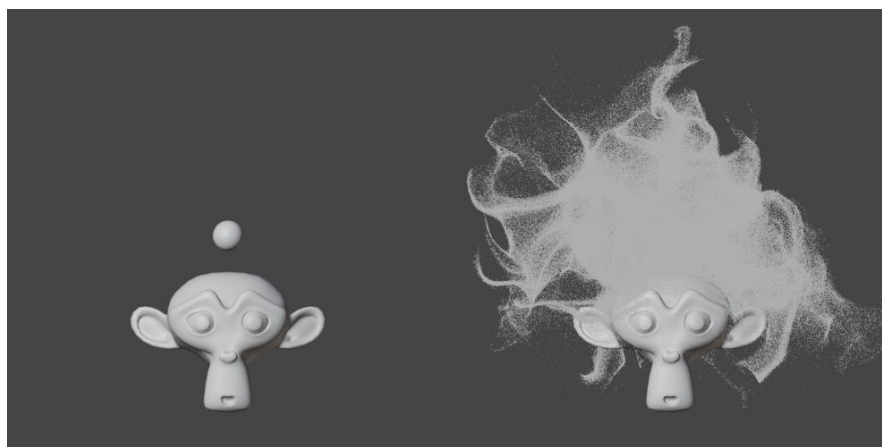
|                              | CPU | RAM     | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|------------------------------|-----|---------|-------|----------|----------|---------|
| Početni uvjeti               | 7%  | 1070 MB | 56°C  | 4100 MHz | 2200 RPM | 42 s    |
| <i>Number = 350000</i>       | 7%  | 1300 MB | 58°C  | 4075 MHz | 2200 RPM | 59 s    |
| <i>Lifetime = 50</i>         | 6%  | 580 MB  | 56°C  | 4050 MHz | 2200 RPM | 21 s    |
| <i>Source = Volume</i>       | 7%  | 1000 MB | 56°C  | 4075 MHz | 2200 RPM | 43 s    |
| <i>Distribution = Random</i> | 7%  | 1030 MB | 56°C  | 4050 MHz | 2250 RPM | 42 s    |
| <i>Normal = 3m/s</i>         | 7%  | 980 MB  | 57°C  | 4000 MHz | 2250 RPM | 51 s    |
| <i>Tangent = 2m/s</i>        | 7%  | 1050 MB | 56°C  | 3975 MHz | 2200 RPM | 41 s    |
| <i>Physics = Fluid</i>       | 65% | 1000 MB | 59°C  | 4000 MHz | 2500 RPM | 56 s    |
| <i>Mass = 5kg</i>            | 7%  | 1300 MB | 59°C  | 4000 MHz | 2350 RPM | 51 s    |
| <i>Brownian = 1</i>          | 7%  | 1350 MB | 58°C  | 3975 MHz | 2250 RPM | 44 s    |
| <i>Drag = 1</i>              | 7%  | 1000 MB | 57°C  | 4000 MHz | 2350 RPM | 41 s    |
| <i>Damp = 1</i>              | 7%  | 1100 MB | 56°C  | 4000 MHz | 2200 RPM | 34 s    |
| <i>Integration = Euler</i>   | 7%  | 1000 MB | 56°C  | 4000 MHz | 2200 RPM | 26 s    |
| <i>Children Simple</i>       | 7%  | 1100 MB | 57°C  | 4050 MHz | 2250 RPM | 42 s    |



**Slika 4.14.** *Rezultat jednostavnije simulacije čestica*

**Tablica 4.18.** *Rezultati simulacije scene s  $1 \times 10^6$  čestica i trajanja 200 frameova*

|                 | CPU | RAM    | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|-----------------|-----|--------|-------|----------|----------|---------|
| Radna stanica 1 | 12% | 6500MB | 65°C  | 4100 MHz | 2500 RPM | 185 s   |
| Radna stanica 2 | 25% | 3000MB | 75°C  | 3400 MHz | n/a      | 270s    |



**Slika 4.15.** *Rezultat složenije simulacije čestica*

#### 4.2.7. Kosa

Kosa predstavlja potkategoriju čestica jer se sličan efekt može dobiti prikazom putanje čestica. Zbog većeg broja zasebnih parametara i široke primjene, potrebno je govoriti kao o zasebnom tipu simulacije. Glavni faktor koji govori o složenosti scene je broj vlasi. Pojedinačna vlas ima i svoje segmente čijim se povećanjem dobije prirodniiji i zaobljeniji oblik, ali nema znatan utjecaj premda razlika između najmanje i najveće vrijednosti nije velika (Tab. 4.19.).

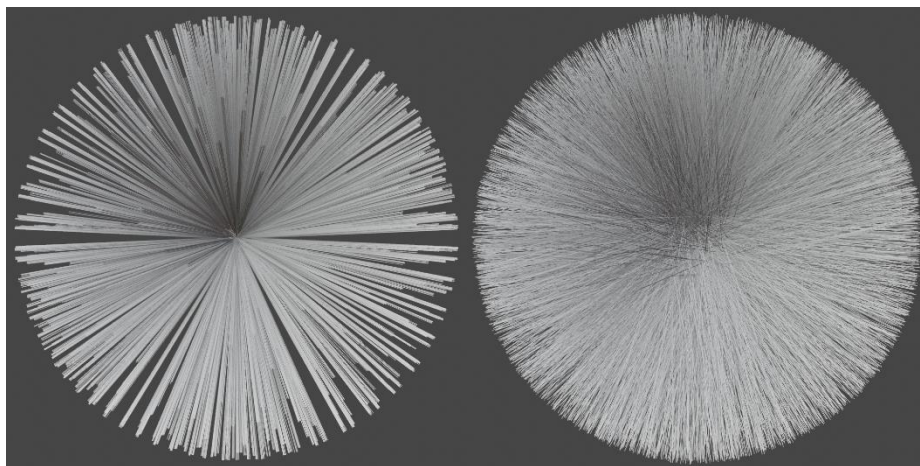
Početni uvjeti:

- *Number* = 10000
- *Hair Length* = 1m
- Omogućena dinamika kose
- *Strand steps* = 7
- Dodana turbulencija

**Tablica 4.19.** *Utjecaj rezolucije vlasi na složenost simulacije*

|                         | CPU | RAM   | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|-------------------------|-----|-------|-------|----------|----------|---------|
| <i>Strand steps</i> = 7 | 13% | 900MB | 58°C  | 4000 MHz | 2200 RPM | 45s     |
| <i>Strand steps</i> = 2 | 13% | 900MB | 67°C  | 3950 MHz | 2190 RPM | 44s     |

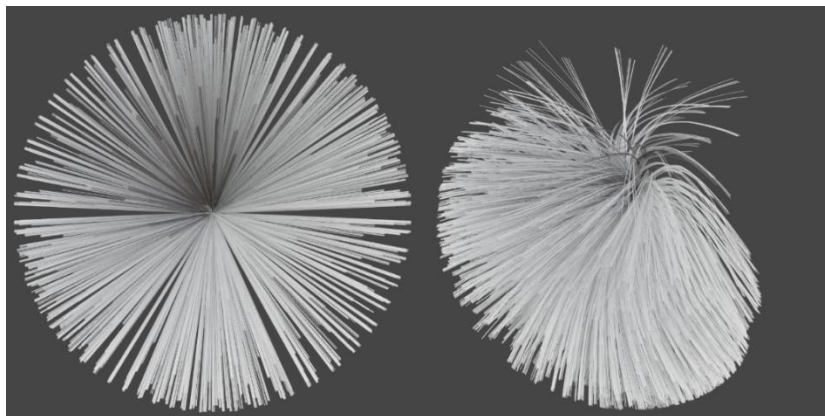
Razlika između jednostavne (Tab. 4.20.) (Sl. 4.17.) i složene simulacije (Tab. 4.21.) (Sl. 4.18.) u ovom slučaju je približavanje stvarnoj situaciji, odnosno dodavanje objekta kolizije, povećanja broja vlasi i dodavanje interpolacije kose. Povećanje broja vlasi neće dovesti do realističnog izgleda jer se vlasi krenu grupirati premda je smjer svake zadan smjer lica poligona objekta iz kojeg izlaze. Također povećanje broja poligona nije rješenje, jer se tako unosi nepotrebna količina poligona u simulaciju. Rješenje predstavlja korištenje interpolacije (Slika 4.16.)



**Slika 4.16.** *Usporedba 10000 vlasi (lijevo) i 1000 vlasi zajedno s interpolacijom 10 (desno)*

**Tablica 4.20.** Rezultati simulacije scene s  $1 \times 10^4$  vlasi i trajanja 60 frameova

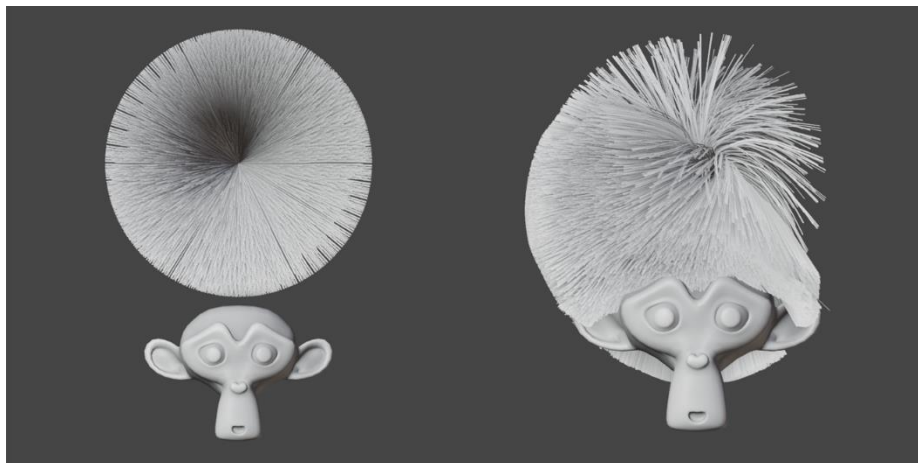
|                              | CPU | RAM     | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|------------------------------|-----|---------|-------|----------|----------|---------|
| Početni uvjeti               | 13% | 900 MB  | 58°C  | 4000 MHz | 2200 RPM | 45 s    |
| <i>Number = 20000</i>        | 15% | 1200 MB | 59°C  | 4000 MHz | 2300 RPM | 93 s    |
| <i>Hair Length = 0.5m</i>    | 14% | 750 MB  | 57°C  | 4000 MHz | 2200 RPM | 45 s    |
| <i>Segments = 10</i>         | 14% | 1000 MB | 58°C  | 4050 MHz | 2300 RPM | 114 s   |
| <i>Quality Steps = 10</i>    | 14% | 800 MB  | 63°C  | 3950 MHz | 2350 RPM | 79 s    |
| <i>Pin Goal Strength = 1</i> | 14% | 850 MB  | 57°C  | 4000 MHz | 2250 RPM | 45 s    |
| <i>Vertex Mass = 1kg</i>     | 14% | 750 MB  | 58°C  | 3975 MHz | 2250 RPM | 41 s    |
| <i>Stiffness = 1</i>         | 13% | 900 MB  | 58°C  | 3950 MHz | 2200 RPM | 44 s    |
| <i>Random = 1</i>            | 13% | 900 MB  | 58°C  | 3950 MHz | 2300 RPM | 50 s    |
| <i>Damping = 1</i>           | 14% | 900 MB  | 58°C  | 3975 MHz | 2250 RPM | 45 s    |
| <i>Air Drag = 2</i>          | 13% | 850 MB  | 57°C  | 4000 MHz | 2250 RPM | 44 s    |
| <i>Internal Friction = 1</i> | 14% | 1000 MB | 58°C  | 4000 MHz | 2300 RPM | 139 s   |
| <i>VGCS = 1</i>              | 14% | 920 MB  | 57°C  | 3975 MHz | 2250 RPM | 45 s    |
| <i>Density Target = 1</i>    | 14% | 900 MB  | 59°C  | 4050 MHz | 2250 RPM | 45 s    |
| <i>Density Strength = 1</i>  | 14% | 850 MB  | 60 °C | 4000 MHz | 2400 RPM | 140 s   |
| <i>Path Steps = 5</i>        | 14% | 900 MB  | 57°C  | 4000 MHz | 2300 RPM | 45 s    |
| <i>Children Simple</i>       | 16% | 970 MB  | 59°C  | 4000 MHz | 2250 RPM | 65 s    |



**Slika 4.17.** Rezultati jednostavnije simulacije kose

**Tablica 4.21.** Rezultati simulacije scene s 300000 vlasi i trajanja 60 frameova

|                 | CPU | RAM    | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|-----------------|-----|--------|-------|----------|----------|---------|
| Radna stanica 1 | 19% | 4200MB | 65°C  | 4100 MHz | 2500 RPM | 1050 s  |
| Radna stanica 2 | 27% | 2400MB | 59°C  | 2400 MHz | n/a      | 2280s   |



**Slika 4.18.** Rezultati složenije simulacije kose

#### 4.2.8. Dinamičko bojanje

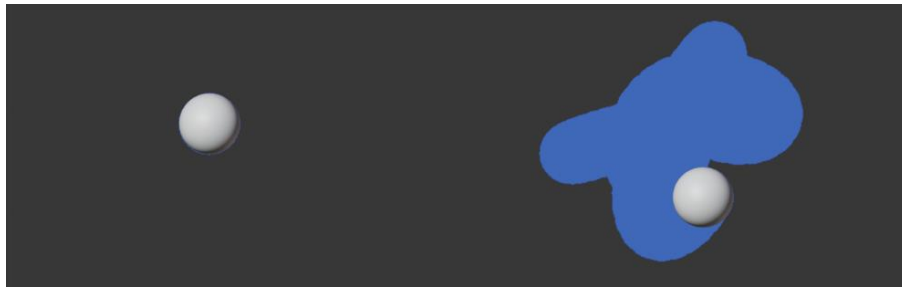
Dinamičko bojanje je simulacija koja je zasnovana na računanju udaljenosti između objekata i primjenjivanje odabranog efekta na osnove spomenute udaljenosti. Iako ima nekoliko potkategorija, one se uglavnom svode na spomenuti princip udaljenosti. Glavni faktor koji definira složenost simulacije je broj poligona platna i kista simulacije. Broj poligona platna predstavlja detaljnije bojanje i detaljnije valove iako je kod jako detaljnog bojanja praktičnije uzeti sekvencu slika (engl. *Image Sequence*) kao rezultat bojanja, nego boju točkaka (engl. *Vertex Color*).

Korišteni početni uvjeti su svi standardni uvjeti koji su dobiveni pri dodjeljivanju simulacije objektu. Jednostavna scenu sadrži ravnu plohu (platno) i kuglu (kist). Ploha je podijeljena nekoliko puta kako bi se dobio veći broj poligona za detaljniji prikaz boje na platnu. (Tab.4.22.) (Sl. 4.19.).

**Tablica 4.22.** Rezultati simulacije scene s 250000 poligona i trajanja 100 frameova

|                          | CPU | RAM    | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|--------------------------|-----|--------|-------|----------|----------|---------|
| Početni uvjeti           | 35% | 450 MB | 63°C  | 3900 MHz | 2400 RPM | 11 s    |
| <i>Format = IS (512)</i> | 37% | 460 MB | 63°C  | 3900 MHz | 2400 RPM | 20 s    |

|                             |     |        |      |          |          |      |
|-----------------------------|-----|--------|------|----------|----------|------|
| <i>Surface Type = Waves</i> | 45% | 470 MB | 64°C | 3900 MHz | 2400 RPM | 14 s |
| <i>Dissolve</i>             | 37% | 430 MB | 65°C | 3850 MHz | 2300 RPM | 11 s |
| <i>Spread</i>               | 36% | 450 MB | 63°C | 3950 MHz | 2350 RPM | 11 s |
| <i>Drip</i>                 | 36% | 450 MB | 63°C | 4000 MHz | 2350 RPM | 11 s |
| <i>Shrink</i>               | 37% | 450 MB | 63°C | 3975 MHz | 2350 RPM | 11 s |

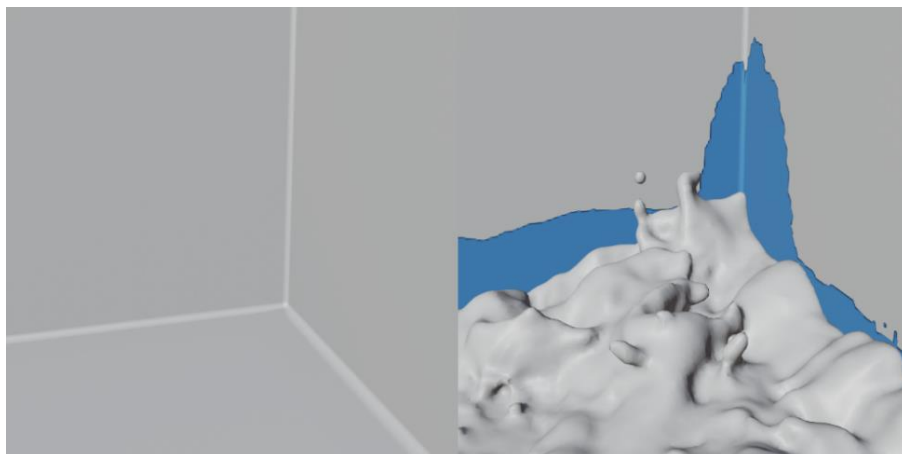


**Slika 4.19.** Rezultati jednostavnije simulacije kose

Složena scena (Tab. 4.23.) (Sl. 4.20.), unatoč kratkom trajanju i dalje predstavlja generalno složen zadatak koji se sastoji od simulacije tekućine koja boja okolne plohe posude u kojoj se nalazi. Scena bi mogla biti složenija ako bi se koristila detaljnija tekućina, ali se onda ulazi u probleme razlučivanja koji je dio iskorištene radne memorije potrošen na tekućinu, a koji na bojanje.

**Tablica 4.23.** Rezultati scene rezolucije tekućine 96, rezolucije platna 1080 i trajanja 60 frameova

|                 | CPU | RAM    | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|-----------------|-----|--------|-------|----------|----------|---------|
| Radna stanica 1 | 70% | 4100MB | 80°C  | 3900 MHz | 3600 RPM | 72 s    |
| Radna stanica 2 | 27% | 2400MB | 59°C  | 2400 MHz | n/a      | 2280s   |



**Slika 4.20.** Rezultati složenije simulacije dinamičkog bojanja

### 4.3. Rezultati

Iako ne postoji službeni način kako bi se simulacije međusobno uspoređivale ili pojedinačno vrednovale, dobro je poznavati prednost i nedostatke i pri tome usmjeriti kreativnu direkciju ili projekt u smjeru druge simulacije ili čak promjene alata ako simulacije ne zadovoljava vremenske resurse ili zahtjeve projekta. Glavni problem uspoređivanja je oslanjanje simulacija na različite faktore. Faktori mogu biti broj tijela i poligona (kruta tijela, čestice), samo broj poligona (meko tijelo, tkanina, dinamičko bojanje) i rezolucija domene (tekućina, dim).

Kruto tijelo je simulacija s najboljim rezultatima. Stabilna je i nije računalno zahtjevna. Složena scena iako sadrži milijune poligona i dalje ne dovodi do pregrijavanja procesora ili do gašenja programa uslijed popunjenosti radne memorije. Aktivnost procesora ostaje gotovo netaknuta pri povećanju poligona u sceni (Tablica 4.24.). Iako simulacija znatno ovisi o obliku koji okružuje svaki objekt i dalje se dolazi do brojki koje ujedno ulaze u područje gdje se uočava ograničenost Blendera pri rukovanju velikim brojem poligona tako da problem nije do rješavača simulacije.

**Tablica 4.24.** Rezultati složene scene krutih tijela na radnoj stanici 1 pri povećanju broja poligona

|  | CPU | RAM    | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|--|-----|--------|-------|----------|----------|---------|
| Početni uvjeti ( $1 \times 10^6$ poligona) | 18% | 1600MB | 67°C  | 3950 MHz | 2450 RPM | 608 s   |
| Početni uvjeti ( $2 \times 10^6$ poligona) | 18% | 2250MB | 67°C  | 3950 MHz | 2420 RPM | 900s    |
| Početni uvjeti ( $4 \times 10^6$ poligona) | 19% | 3700MB | 68°C  | 4000 MHz | 2410 RPM | 1200s   |

Čestice kao i kruto tijelo sadrže znatan broj instanci objekata u sceni i pri tome aktivnost procesora ostaje gotovo netaknuta. Aktivnost procesora kod čestica je najmanja od svih simulacija gdje ona za složene scene ne prelazi ni 15%. Također omogućuje njihovo kreiranje, a da se pri tome ne potroši puno vremena. Kao i kod navedenih simulacija, aktivnost ventilatora ostaje pri nižim vrijednostima jer ne dolazi do prevelikog zagrijavanja računala. Iskorištenost radne memorije je vjerojatno jedini faktor koji odstupa od nižih vrijednosti ostalih komponenti. Složena scena je poprilično jednako teško izvediva na lošijem i boljem računalu.

Radna memorija postaje znatno veći problem pri simulaciji tekućine gdje za relativno složenu scenu zna doći do gašenja programa zbog nedostatka prostora (Tablica 4.25.). Aktivnost procesora i ventilatora vrlo lagano poprima veće vrijednosti, gdje na trenutke iskoristivost procesora bude i preko 90%. Tekućine su simulacije gdje uglavnom radi o složenim scenama jer je realističan prikaz teško dobiti bez velike rezolucije, ali je rezultat opravdava taj dugotrajan proces.

**Tablica 4.25.** *Rezultati složene scene tekućine za različite rezolucije na radnoj stanici 1*

|                  | CPU | RAM     | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|------------------|-----|---------|-------|----------|----------|---------|
| Rezolucija = 250 | 75% | 9350MB  | 73°C  | 4075 MHz | 3200 RPM | 3100 s  |
| Rezolucija = 400 | 75% | 25000MB | 75°C  | 4100 MHz | 3600 RPM | 18000 s |

Suprotno tome su meka tijela kod kojih relativno jednostavna scena od svega 10000 poligona rezultira dugim vremenima simulacije. Iako ta vremena nisu kao kod tekućine i dalje se radi o poprilično dugotrajnom procesu za rezultat koji se dobije. Također aktivnost procesora i ventilatora je najveća od svih simulacija. Do sada navedene simulacije pri složenim scenama su bile usko vezane uz veliki broj poligona, instanciranih objekata ili čestica, što opravdava njihovo vrijeme potrebno za obradu. Meko tijelo postiže dugačka vremena obrade pri simulacijama gdje broj poligona u sceni nije velik (desetak tisuća) što govori o problemima s rješavačem i čini simulaciju vrlo je nepraktičnom za korištenje.

Kao alternativno rješenje može poslužiti tkanina, naročito njen zatvoren tip objekta. To je simulacija koja ima vrlo široku primjenu i dobro optimiziranu iskorištenost računala. Za znatno složenu scenu (Slika 4.8.) komponente ostaju na niskim vrijednostima. Navedeni primjer je čak nepotrebno složen premda se u stvarnim primjerima nastoji da objekt kolizije ima što manji broj poligona, a ne što više. Aktivnost procesora je stabilna i rijetko kad raste iznad 20%. Temperatura je jedino što ima malo veću vrijednost, ali je i dalje niža od temperature kod drugih simulacija.

Kao i tkanina, dim je simulacija s vrlo širokom primjenom, ali simulacija dima je znatno zahtjevnija gdje gotovo sve komponente u složenijoj sceni poprime veću vrijednost. Temperatura rijetko pada ispod 70°C, a aktivnost procesora ispod 80%. Ventilator seže i do 3500 RPM što simulaciju čini poprilično glasnom. Kao i kod tekućina, radna memorija može stvoriti probleme pri većim rezolucijama (Tablica 4.26.).



**Tablica 4.26.** *Rezultati složenu scene dima za različite rezolucije na radnoj stanici 1*

|                  | CPU | RAM     | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|------------------|-----|---------|-------|----------|----------|---------|
| Rezolucija = 250 | 80% | 5200MB  | 73°C  | 4075 MHz | 3500 RPM | 1900 s  |
| Rezolucija = 400 | 80% | 19000MB | 77°C  | 4000 MHz | 3500 RPM | 14400s  |

Kosa, slično kao i čestice, ima poprilično nisku vrijednost komponenti osim radne memorije. Aktivnost procesora i za zahtjevnu scenu ne prelazi 20%, s tim i brzina ventilatora uglavnom stoji na 2400 – 2500 RPM. Iako radna memorije pri složenijem objektu može predstavljati problem s radnom memorijom, kombinacijom broja vlasi i interpolacije (Tablica 4.27.) se može dobiti rezultat koji je manje zahtjevan i ujedno realističnijeg izgleda (Slika 4.16.).

**Tablica 4.27.** *Rezultati složene scene kose sa sveukupno  $2 \times 10^5$  vlasi u sceni*

|   | CPU | RAM    | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|---|-----|--------|-------|----------|----------|---------|
| Number = $2 \times 10^4$ , Interpolacija = 10 | 19% | 4200MB | 65°C  | 4100 MHz | 2500 RPM | 1050 s  |
| Number = $2 \times 10^5$                      | 20% | 7540MB | 66°C  | 4075 MHz | 2400 RPM | 900 s   |

Dinamičko bojanje je simulacija koja nije zahtjevna za komponente računala, jedino aktivnost procesora ima nešto veće vrijednosti. Premda se često koristi u kombinaciji s drugim oblicima animacije i simulacije teško je ukazati koliko resursa je potrošeno na koji dio tog procesa. Najveći problem mogu stvoriti velike scene jer je onda potrebna veća rezolucija platna ili veći broj poligona platna. Tada raste znatno temperatura i aktivnost ventilatora.

## 5. USPOREDBA S DRUGIM RJEŠENJIMA

Simulacija je standardni dio većine 3D alata za digitalnu kreaciju sadržaja (engl. *Digital Content Creation, DCC*) [8] jer omogućuje oblikovanje objekata, a da pri tome nije uključena ljudska intervencija. Cijeli proces se svodi na parametre, tako da je svaku akciju moguće precizno ponoviti i u potpunosti izmijeniti po želji u nekoliko koraka. Koraci su uglavnom jednaki neovisno koji alat se koristi, izmjena udaljenosti kolizije, broja čestica, detaljnost simulacije itd. Rezultati će također biti slični, ako se ne uzme u obzir rukovanje samog programa s velikim scenama. Tako da glavnu razliku predstavlja vrijeme potrebno za izvođenje simulacije, unikatnost pristupa i korištena tehnologija. Alati kao što su Cinema 4D, Maya, 3ds Max i mnogi drugi uglavnom pristupaju simulacijama na isti način kao i Blender tako da se objašnjavanjem njih ne bi dobila puno šira slika. Objasniti će se *softveri* čiji se način rada i pristup simulaciji znatno razlikuje od Blendera i sami po sebi predstavljaju predstavnike specifičnih područja primjene simulacija.

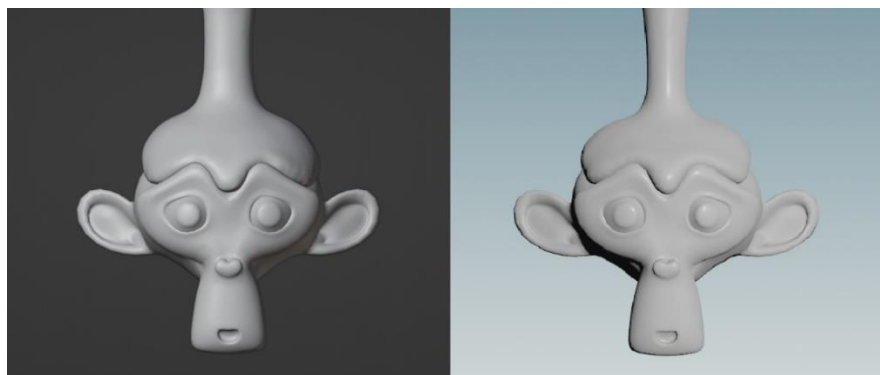
### 5.1. Houdini

U svijetu 3D-a pojam simulacije je uglavnom povezivan s Houdini *softverom*. Houdini je aplikacija za 3D animaciju koja postoji gotovo od 1987. Dio je industrijskog standarda koje koriste najpoznatije produkcijske VFX kuće kao što su Walt Disney Animation Studio, Pixar, DreamWorks i mnogi drugi. Sadrži sve standardne alata kao i ostali DCC alati poput modeliranja, teksturiranja, iscrtavanje itd [9]. Houdini je dugo vremena smatran alatom za pravljenje drugih alata zbog svoje proceduralne naravi moguće je na generativan način modelirati objekte i scene. Korištenjem njegovog VEX programskog jezika omogućen je pristup i najmanjim dijelovima svakog procesa, tako da je moguće ovladati svim parametrima i postići vrlo specifične rezultate. Naravi je bliže ID okruženju nego DCC [10]. Spojivši navedena svojstva s kvalitetnim rješavačima za simulacije i mogućnosti rukovanja velikim scenama, Houdini je alat čija se puna snaga može vidjeti tek u složenijim zadacima.

Kako bi se uvidjelo kako Blender stoji naspram alata koji je industrijski priznat za izvođenje simulacija, odradit će se dva testa kao i do sada, za jednostavnu (Tablica 5.1.) i složenu scenu (Tablica 5.2.).

**Tablica 5.1.** *Usporedba jednostavne simulacije Blendera i Houdinija*

| Software | CPU | RAM    | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|----------|-----|--------|-------|----------|----------|---------|
| Blender  | 45% | 1000MB | 64°C  | 3800 MHz | 2350 RPM | 32s     |
| Houdini  | 80% | 800MB  | 68°C  | 3850 MHz | 2500 RPM | 7s      |

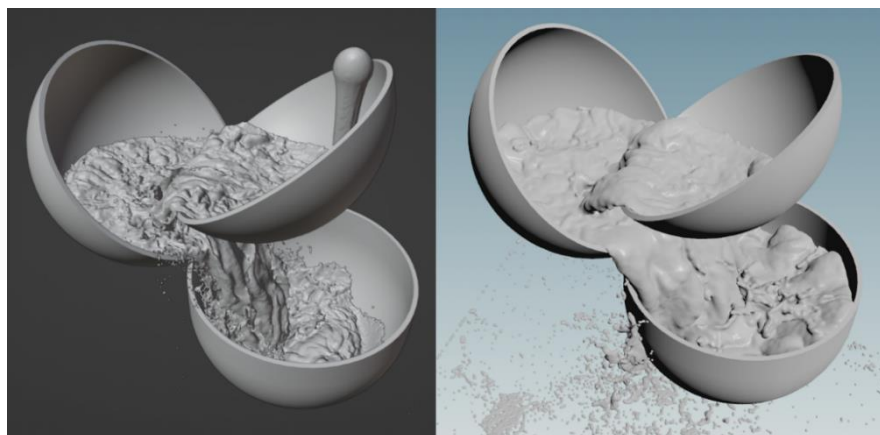


**Slika 5.1.** *Usporedba jednostavne simulacije Blendera (lijevo) i Houdinija (desno)*

Na slikama 5.1. i 5.2. može se vidjeti usporedba Blendera i Houdinija. Premda se radi o različitim *softwerima*, parametri su se otprilike procijenili kako bi dali jednak rezultat s istim brojem čestica u jednakom broju *frameova*. Unatoč jednostavnosti zadatka razlika je i znatna, ali ne kolika je pri složenom zadatku (Tablica 5.2.).

**Tablica 5.2.** *Usporedba složene simulacije Blendera i Houdinija*

| Software | CPU | RAM     | Temp. | Clock    | Fan      | Vrijeme |
|----------|-----|---------|-------|----------|----------|---------|
| Blender  | 75% | 25000MB | 75°C  | 4100 MHz | 3600 RPM | 18000s  |
| Houdini  | 95% | 10000MB | 78°C  | 4150 MHz | 3700 RPM | 600s    |




**Slika 5.2.** *Usporedba složene simulacije Blendera (lijevo) i Houdinija (desno)*

Za Blender se koristila 400 rezolucija tekućine, veće vrijednosti dovodile bi do iznenadnog gašenja programa, zbog nedostatka radne memorije i zbog  $3,5 \times 10^6$  čestica. Taj broj nije maksimalan doseg čestica za Blender, ali naknadnim povećanjem se gotovo približava maksimumu i neiskoristivosti pri korištenju prozora za prikaz. Navedene brojke predstavljaju relativno jednostavnu scenu za Houdini jer može simulirati više od 100 puta veći broj čestica [11] [12].

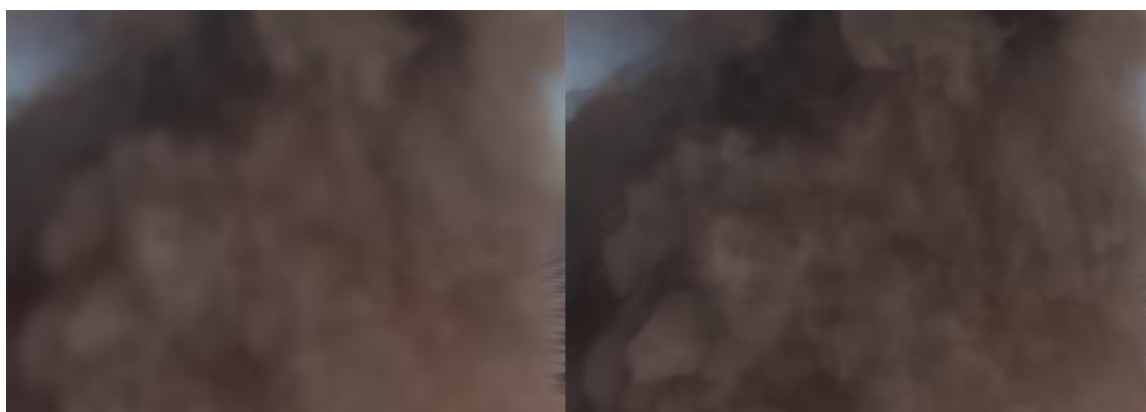
## 5.2. Embergen

Embergen je alat za simulaciju tekućina koji radi u stvarnom vremenu. Služi za kreiranje vatre, dima i eksplozija [13]. Za razliku od prethodno spomenutih alata, Embergen koristi potpunu snagu grafičke kartice i gotovo da se ni ne oslanja na procesor što se može vidjeti na slici 5.3.

| Top Processes  | CPU ▾ | GPU | RAM   | Download | Upload... |
|--|-------|-----|-------|----------|-----------|
|  EmberGenBeta.exe | 0%    | 98% | 340MB | 0B/s     | 0B/s      |

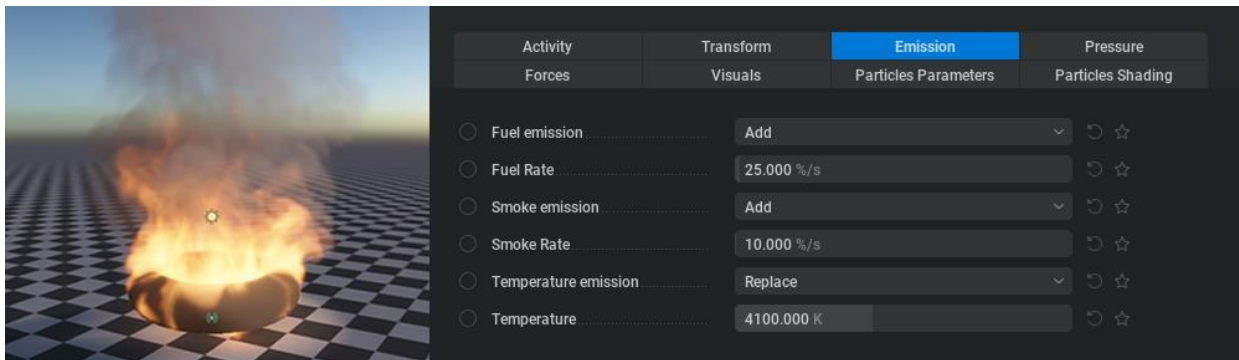
**Slika 5.3.** Prikaz korištenja snage grafičke kartice za izvođenje simulacije

Brzina *softwera* neosporiva i neusporediva s ostalim DCC alatima, čak i s Houdinijom, aplikacija vrlo brzo prestaje raditi u stvarnom vremenu čim se uvedu zahtjevniji elementi u scenu poput više *emitera*, kolizije, složenijih efekata, povećanja scene i rezolucije. Neki od navedenih parametara utječu znatnije od drugih. Iako prestaje biti u „stvarnom vremenu“ i dalje je brzina pri zahtjevnijim scenama u najgorem slučaju 1 *fps*. Najveći problem predstavlja vjerodostojnost simulacije kada se pažnja obrati na detalje. Svojim izgledom je trenutno bliže stilu igara ili pozadinskim elementima realističnih animacija (Slika 5.4.).



**Slika 5.4.** Usporedba dima bez povećanja rezolucije (lijevo) i povećanju za 4 puta (desno)

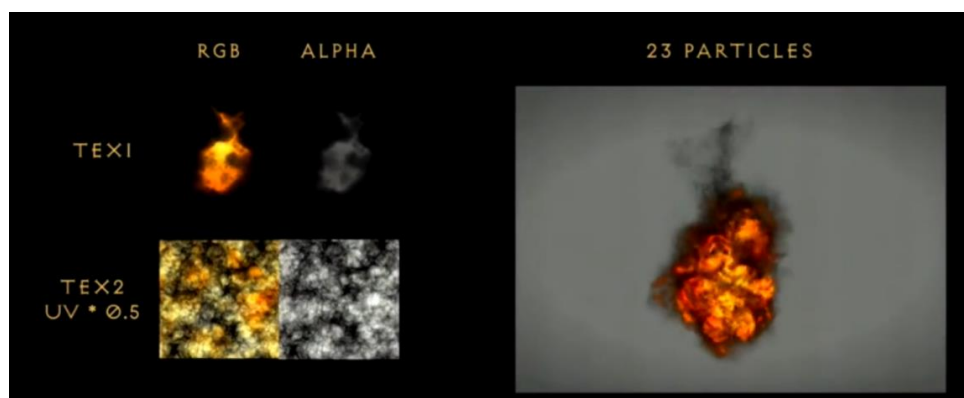
Velika prednost Embergena predstavlja jednostavnost programa. U poglavlju 5.3. će biti spomenuta slična rješenja koja primjenjuju GPU tehnologiju, ali Embergen omogućava da se bez ikakvog predznanja postignu odlični rezultati (Slika 5.5.). Pri otvaranju programa se pokreće osnovna simulacija, nju se pomoću kliznih parametara izmjenjuje do željenog izgleda. Premda se izravno dolazi do rezultata, dobro je rješenje za portfelj s ostalim alatima za daljnju primjenu.



**Slika 5.5.** Osnovna scena pri otvaranju program i primjer kliznih parametara

### 5.3. Simulacije u igrama

Simulacije u igrama su zakoni fizike koji su definirani unutar simulacije, stila igre i programskog jezika kojim je igra definirana. Fizika u igrama može znatno varirati jer se ne mora bazirati na stvarnosti. Postoje uglavnom dva tipa simulacije, a to su kruta i meka tijela. Njima se nastoje prikazati ostali tipovi simulacija, kao što su tkanina i tekućina. Fizika se u igrama često oslanja na estimacije, prečace, unaprijed definirane elemente i teksture [14]. Raznim se trikovima nastoji dobiti naizgled realistična scena uz što manje uloženi resursa (Sl. 5.6.). Primjer je korištenje 2D prikaza za 3D efekt (dodavanje valova vodi pomoću *voronoi* i *noise* teksture ili mape toka).



**Slika 5.6.** Kreiranje efekta vatre pomoću dvije teksture, pomaka UV mape i množenja [15]

Igre se znatno oslanjaju na broj poligona dinamičkih objekata u sceni, tako da je fizika u stvarnom vremenu uglavnom ograničena na jednostavne objekte. Objekti su često definirani ograničavajućim prostorom (engl. *bounding box*), a to znači da su pri simulacijama estimirani jednostavnijim oblicima.

Kao i u slučaju Embergena, sve popularnije postaje korištenje akceleracije pomoću grafičke kartice. To je odnedavno korišteno i u igrama, a najpoznatiji primjer toga je Nvidijin PhysX [16]. Premda su igre uglavnom optimizirane za igranje na konzolama sve simulacije se i dalje odvijaju na CPU, a GPU akceleracija predstavlja dodatne efekte, poput interakcije s dimom, kidanje tkanine, koji se samo mogu odvijati samo na računalnim verzijama nekih od igara (Slika 5.7).



**Slika 5.7.** Usporedba izgleda igre prije i nakon korištenja GPU akceleracije[17]

Alati kao što su Unity i Unreal Engine su uglavnom korišteni za igre, ali zbog mogućnosti rada u stvarnom vremenu, sve realističnijeg izgleda, korištenja GPU akceleracije pomoću Niagara[18] tehnologije i praktično rukovanje simulacijama počinju se koristiti i u ostale svrhe. Na slici 5.8. se može vidjeti korištenje Unreal Engina u filmu za iscrtavanje, osvjetljenje i simulaciju krutih tijela.



**Slika 5.8.** Isječak iz kratkog filma Irradiation [19]

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu su navedene i objašnjene sve simulacije dostupne u Blender paketu. Za svaku simulaciju provedeni su zasebni testovi. Testovi su ukratko opisani i za svaku simulaciju su navedene prednosti i mane ovisno o područjima primjene. Spomenuti su i drugi alati kojima se mogu dobiti slični rezultati.

Navedeni su i objašnjeni glavni alati ovog rada, Blender i NZXT CAM. Blender je omogućio izvođenje simulacija, a NZXT CAM u obliku postotaka i vrijednosti je prikazao aktivnosti računala u stvarnom vremenu. Radi boljeg razumijevanja, mogućnosti izvođenja simulacija, testovi su provedeni na dva računala znatno različitih performansi. Svaka simulacija je opisana i kroz slike su prikazani jednostavni tipovi primjene. Cilj opisa je bio dati širu sliku svake simulacije bez da se ulazi u detalje i definira uloga i utjecaj svakog parametra. Parametri su po potrebi naknadno opisani kroz rad na mjestima gdje je njihovo poznavanje bilo ključno.

Provedeni su testovi za svaku simulaciju. Testovi su podijeljeni u dvije skupine, jednostavnu i složenu scenu. Jednostavna scena je poslužila kao uvid u općeniti utjecaj promjene parametara na performanse računala. Definirani su početni uvjeti od koji se odstupalo izmjenom pojedinačnih parametara dok su drugi bili fiksirani. Složena je scena pokazala kako se simulacije ponašaju u konkretnim složenijim primjerima čije su primjene vrlo učestale. Tijekom svih testova mjerile su se aktivnosti procesora i ventilatora, temperatura, iskorištenost radne memorije i vrijeme potrebno da se zadatak izvede. Nakon provedenih testiranja simulacije su ukratko protumačene i uspoređene na temelju potrošnje resursa računala.

Premda Blender nije jedini alat za simulacije niti je alat poznat po simulacijama navedene su i druge dostupne aplikacije kojima se dobije slično rješenje, a da se pri tome njihovi pristupi razlikuju. Houdini je najpoznatiji alat i ujedno industrijski standard za simulacije. Nakon usporedbe s Blenderom pokazao je znatnu prednost naročito u području složenih scena. Spomenut je Embergen, relativno nov alat koji koristi GPU akceleraciju. Premda su simulacije u Blender zasnovane za snazi procesora, teško ih je usporediti. Također su objašnjene simulacije u igrama koje zamagljuju granicu između već spomenutih standardnih simulacija i trikova pomoću matematike, tekstura i unaprijed definiranih elemenata, sve to u svrhu postizanja efekta u stvarnom vremenu.

## LITERATURA

- [1] „Blender, Wikipedia“ [https://en.wikipedia.org/wiki/Blender\\_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Blender_(software)) [13.09.2022]
- [2] „Development Fund, Blender“ <https://fund.blender.org/> [13.09.2022]
- [3] „Software, NZXT“ <https://nzxt.com/software/cam> [13.09.2022]
- [4] „Physics, Blender“ <https://docs.blender.org/manual/en/latest/physics/index.html> [13.09.2022]
- [5] „Chocolate floods the metro - Blender animation - Flip fluids simulation, Youtube“  
[https://www.youtube.com/watch?v=ii2c4SIiq\\_s](https://www.youtube.com/watch?v=ii2c4SIiq_s) [13.09.2022]
- [6] „Twelve basic principles of animation, Wikipedia“  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Twelve\\_basic\\_principles\\_of\\_animation](https://en.wikipedia.org/wiki/Twelve_basic_principles_of_animation) [13.09.2022]
- [7] „Windows vs Linux, Wikipedia“  
<https://www.youtube.com/watch?v=cpE2B2QSSa0> [13.09.2022]
- [8] „Cineversity“ [https://www.cineversity.com/wiki/Digital\\_Content\\_Creation\\_-\\_DCC/](https://www.cineversity.com/wiki/Digital_Content_Creation_-_DCC/)  
[13.09.2022]
- [9] „Houdini (software), Wikipedia“ [https://en.wikipedia.org/wiki/Houdini\\_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Houdini_(software)) [13.09.2022]
- [10] „Integrated Development Environment, Wikipedia“  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Integrated\\_development\\_environment](https://en.wikipedia.org/wiki/Integrated_development_environment) [13.09.2022]
- [11] „H15 Distributed Simulations, Vimeo“ <https://vimeo.com/142517418> [13.09.2022]
- [12] „12.000.000 Fluid Particles (4K60fps), Youtube“  
<https://www.youtube.com/watch?v=ygUev6Ecl4M> [13.09.2022]
- [13] „Embergen, JangaFX“ <https://jangafx.com/software/embergen/> [13.09.2022]
- [14] „Physics Engine, Wikipedia“ [https://en.wikipedia.org/wiki/Physics\\_engine](https://en.wikipedia.org/wiki/Physics_engine) [13.09.2022]
- [15] „Technical Artist Bootcamp: The VFX of Diablo, Internet Archive“  
<https://archive.org/details/GDC2013Love> [13.09.2022]
- [16] „PhysX, Wikipedia“ <https://en.wikipedia.org/wiki/PhysX> [13.09.2022]
- [17] „A look at PhysX in Mirror’s Edge, Techreport“  
<https://techreport.com/review/16392/a-look-at-physx-in-mirrors-edge/> [13.09.2022]
- [18] „Niagara Fluids in Unreal Engine, Unreal Engine“  
<https://docs.unrealengine.com/5.0/en-US/niagara-fluids-in-unreal-engine/> [13.09.2022]
- [19] „Irradiation – Process, Vimeo“ <https://vimeo.com/585806244> [13.09.2022]



## SAŽETAK

U ovom radu opisan je Blender i sve simulacije koje dolaze u programskom paketu. Simulacije su testirane kako bi se uvidjela povezanost između parametara, složenosti scene, vrste simulacije i komponenata računala koje utječu na njihov rad. Vrste simulacija su protumačene i uspoređene na temelju njihove potrošnje resursa. Navedeni su i drugi alati za izradu simulacija čiji se pristup, korištene tehnologije i performanse znatno razlikuju od Blendera.

Ključne riječi: Blender, fizika, performanse računala, simulacija, testiranje

## **ABSTRACT**

This thesis describes Blender and all the simulations that come in the software package. Simulations were tested to see the relationship between parameters, complexity of the scene, type of simulation and the computer components that affect their operation. Simulations are interpreted and compared based on their resource consumption. Other tools for creating simulations are listed, whose approach, used technologies and performance are significantly different from Blender.

Key words: Blender, physics, computer performance, simulation, testing

## **ŽIVOTOPIS**

Marin Čosić rođen je 22. siječnja 1998. godine u Zagrebu. Od 2004. do 2012. pohađa Osnovnu školu Blaž Tadijanović u Slavonskom Brodu. Godine 2012. upisuje opću gimnaziju Matija Mesić u Slavonskom Brodu koju završava 2016. polaganjem ispita državne mature. Godine 2016. upisuje Elektrotehnički fakultet na Sveučilištu Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku na sveučilišni studij računarstva. Nakon završetka preddiplomskog studija upisuje diplomski studij, smjer, Robotika i umjetna inteligencija.

## **PRILOG**