

Utjecaj veličine zrna na kut sipanja materijala

Lastrić, Robert

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:442151>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-04**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij geotehnike

UTJECAJ VELIČINE ZRNA NA KUT SIPANJA MATERIJALA

Diplomski rad

Robert Lastrić

R210

Zagreb, 2020.



KLASA: 602-04/20-01/39
URBROJ: 251-70-03-20-2
U Zagrebu, 12.10.2020.

Robert Lastrić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/20-01/39, UR. BROJ: 251-70-03-20-1 od 02.03.2020. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

UTJECAJ VELIČINE ZRNA NA KUT SIPANJA MATERIJALA

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu doc. dr. sc. Dubravko Domitrović, docent Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditelj

(potpis)

Doc. dr. sc. Dubravko
Domitrović

(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite**

(potpis)

Doc. dr. sc. Dubravko
Domitrović

(titula, ime i prezime)

**Prodekan za nastavu i
studente**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor
Kuhinek

(titula, ime i prezime)

UTJECAJ VELIČINE ZRNA NA KUT SIPANJA MATERIJALA

Robert Lastrić

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Cilj rada je metodom podiznog cilindra na četiri različita uzorka (kvarcni pijesak, riječni šljunak, mramor i dolomit) provesti ispitivanje kuta sipanja u laboratoriju za arhitektonsko građevni kamen i rudarsku mehanizaciju. Formirana hrpa se fotografira iz više pozicija, fotografije se upisuju u program „Agisoft PhotoScan“, te se dobivaju trodimenzionalni modeli. Dobiveni trodimenzionalni modeli poslužili su za određivanje vrijednosti kuteva sipanja, te utjecaja veličine zrna na kut sipanja materijala.

Ključne riječi: rudarstvo, kut sipanja, metoda cilindra, utjecaj oblika zrna,
3D model, kut unutarnjeg trenja, brzina podizanja

Diplomski rad sadrži: 44 stranice, 5 tablica, 31 slika i 31 reference

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr.sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF

Pomagao pri izradi: Vjekoslav Herceg, mag.ing.min.

Ocjenjivači: Dr.sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF
Dr.sc. Mario Klanfar, docent RGNF
Dr.sc. Tomislav Korman, docent RGNF

INFLUENCE OF PARTICLE SIZE ON ANGLE OF REPOSE OF GRANULAR MATERIAL

Robert Lastrić

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering
Institute of Mining and Geotechnical Engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

The aim of the Thesis is to test the angle of repose in a laboratory for architectural building stone and mining machinery using the lifting cylinder method on four different samples (quartz sand, river gravel, marble and dolomite). The formed heap is photographed from several positions, the photos are uploaded into the "Agisoft PhotoScan" program, and three-dimensional models of the heap are obtained. The three-dimensional models were used to determine the values of angle of repose and the influence of grain size on the angle of repose of granular material.

Keywords: lifting speed, angle of repose, cylinder method, particle shape influence,
3D model, internal friction angle, mining

Thesis contains: 44 pages, 5 tables, 31 figures i 31 references

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: Dr.sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF

Tech. assistance: Vjekoslav Herceg, mag.ing.min.

Reviewers: Dr.sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF
Dr.sc. Mario Klanfar, docent RGNF
Dr.sc. Tomislav Korman, docent RGNF

Defence date: October 16, 2020., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPĆENITO O KUTU SIPANJA.....	2
2.1. Primjena kuta sipanja.....	5
2.2. Utjecaj oblika zrna.....	9
3. ODREĐIVANJE KUTA SIPANJA METODOM PODIZNOG CILINDRA	16
3.1. Dosadašnje metode i istraživanja	19
3.1.1. Metoda nagibne kutije.....	19
3.1.2. Metoda valjka	19
3.1.3. Metoda lijevka	20
3.1.4. Metoda fiksnog lijevka.....	21
3.1.5. Metoda fiksnog postolja stošca	22
3.2. Laboratorijsko mjerenje (oprema i izvedba).....	24
3.3. Korišteni materijali i proračun mjerenja.....	27
3.3.1. Kvarcni pijesak (0,7 - 1,2 mm).....	27
3.3.2. Riječni šljunak (4 – 8 mm).....	28
3.3.3. Mramor (8 – 16 mm).....	28
3.3.4. Drobljeni dolomit (4 – 8 mm)	29
3.3.5. Proračun	30
4. ISPITIVANJA	32
4.1. Prikaz rezultata.....	37
5. ZAKLJUČAK.....	42
6. LITERATURA	43

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Statička, dinamička i polu statička faza (Lumay i dr., 2012)	2
Slika 2.2 Prikaz poprečnog presjeka transportnog sredstva s beskonačnom trakom (Korman, n.d.)	6
Slika 2.3 Prikaz statičkog kuta sipanja (a) i dinamičkog kuta sipanja (b) (Tsakalakis i Micalakopoulos, 2015).....	7
Slika 2.4 Prikaz rudarske mehanizacije (buldozer) (Gradbena mehanizacija, 2018)	8
Slika 2.5 Ovisnost mjerila o obliku čestice, (Mitchell i Soga, 2005)	9
Slika 2.6 Utjecaj uglatosti čestice na kut sipanja materijala (Zheng and Hryciw, 2015)	10
Slika 2.7 Dijagram utjecaja zaobljenosti na čestice materijala (Krumbein i Sloss, 1963) ..	10
Slika 2.8 Definicija: a) zaobljenost, b) sferičnost (Beakawi Al-Hashemi i Baghabra, 2018)	12
Slika 2.9 Usporedba stereografije i metode sitima (Zheng and Hryciw, 2015)	13
Slika 2.10 Viskozno trenje uzrokovano hrapavošću čestica koje se kotrljaju (Beakawi i Al-Hashemi, 2018).....	14
Slika 3.1 Metoda podiznog cilindra (Liu, 2008)	16
Slika 3.2 Prikaz metode podiznog cilindra (Kujundžić, 2010)	17
Slika 3.3 Metoda nagibne kutije (Kostrić, 2018).....	19
Slika 3.4 Metoda rotiranja valjka (Schulze, 2006)	20
Slika 3.5 Aparatura za metodu promjenjive visine lijevka (AraChem, 2018)	21
Slika 3.6 Shematski prikaz metode fiksnog lijevka (Bodhmage, 2006)	22
Slika 3.7 Metoda fiksnog postolja stošca (Montanari i dr., 2017).....	23
Slika 3.8 Shema metode cilindra (Kostrić, 2018).....	24
Slika 3.9 Korištena oprema u laboratoriju za kamen.....	25
Slika 3.10 Slika mjerenja podiznim cilindrom.....	26
Slika 3.11 Uzorak kvarcnog pijeska	27
Slika 3.12 Uzorak riječnog šljunka.....	28
Slika 3.13 Uzorak mramora.....	29
Slika 3.14 Uzorak drobljenog dolomita	29
Slika 4.1 Prikaz izrade 3D modela u programu Agisoft PhotoScan.....	34
Slika 4.2 Prikaz konačnog rezultata i izgladene mreže 3D modela.....	35
Slika 4.3 Prikaz "Dense Cloud" situacije	36
Slika 4.4 Prikaz izrađene mreže na pojedinom materijalu	36

Slika 4.5 Prikaz gotovih 3D modela	37
Slika 4.6 Prikaz srednjih vrijednosti kuteva sipanja	40
Slika 4.7 Prikaz odnosa standardne devijacije prema granulaciji.....	41

POPIS TABLICA

Tablica 2.1 Utjecaj vlažnosti na kut sipanja materijala (Kujundžić, 2010)	4
Tablica 2.2 Wadell-ova klasifikacija zaobljenosti (Beakawi Al-Hashemi i Baghabra., 2018)	12
Tablica 3.1 Ulazne i izračunate vrijednosti na početku mjerenja.....	30
Tablica 3.2 Izračunate vrijednosti nakon 15 mjerenja	31
Tablica 4.1 Rezultati kuta sipanja.....	38

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Opis	Jedinica
φ	dinamički kut sipanja	°
μ	dinamički koeficijent trenja	-
φ_0	statički kut sipanja	°
μ_0	statički koeficijent trenja	-
φ_r	dinamički kut unutarnjeg trenja	°
φ_{0r}	statički kut unutarnjeg trenja	°
D_{max}	maksimalni promjer zrna	mm
D_{min}	minimalni promjer zrna	mm
V	obujam materijala ispred noža dozera	m ³
l	širina noža dozera	m
h_d	visina noža dozera	m
c	dubina noža dozera	m
β_{din}	dinamički kut sipanja kod transportera	°
β_s	statički kut sipanja kod transportera	°
R_2, R_3	tipovi zaobljenosti	-
d_c	polumjer zakrivljenosti maksimalnog konveksnog djela čestice	mm
D_L	najdublji promjer kroz konveksni dio čestice	mm
D_{av}	srednji polumjer	mm
R_{cox}	zaobljenost	-
A_{PR}	predviđeno područje čestice	mm
P	ukupni opseg projekcije	mm
DEM	Discrete Element Model	-
V_1	obujam cilindra	m ³
V_2	obujam stošca	m ³
r_1	radijus baze cilindra	m
r	radijus baze stošca	m
h	visina stošca	m
h_c	visina cilindra	m
H_{max}	maksimalna visina stošca	m
r_s	polumjer baze stošca	m
V_m	visina materijala u cilindru	cm

V_D	brzina dizanja cilindra	mm/s
V_a	visina cilindra od vrha do materijala u cilindru	cm
V_c	visina cilindra	cm
m_p	masa posude	g
m_{p+u}	masa posude sa uzorkom	g
m_u	masa uzorka	g
\bar{X}_i	srednja vrijednost uzorka	-
n	ukupan broj podataka u uzorku	-
X_i	pojedina vrijednost u n očitanju	-
σ	standardna devijacija	-
d	promjer nasipanog stošca	cm
d_1	prvi mjereni promjer nasipanog stošca	cm
d_2	drugi mjereni promjer nasipanog stošca	cm
d_i	devijacija za svako očitavanje	-
X_n	brojevni niz podataka	-

1. UVOD

Osnovna zadaća rudarske djelatnosti je oplemenjivanje i prijevoz potrebne mineralne sirovine koja se trenutno koristi ili prerađuje, ovisno o industriji. Također, rudarstvo se bavi pronalaženjem i eksploatacijom korisnih mineralnih sirovina iz ležišta u Zemljinoj kori. Tehnološke rudarske operacije su otkopavanje, bušenje, miniranje, oplemenjivanje i odlaganje mineralne sirovine i jalovine. Dio geotehnike koji se bavi projektiranjem i izvođenjem objekta u tlu i stijeni naziva se mehanika tla. Projektiranje u rudarstvu koristi se u svrhu određivanja optimalnog rješenja, pri tome pazeći na racionalnost, sigurnost i zaštitu okoliša. Da bi se uspješno projekti mogli izrađivati, potrebno je znati fizičke i kemijske parametre, fizičko-mehanička svojstva, geološke karakteristike i dr. Potrebni parametri određuju se laboratorijskim metodama, te prilikom izvođenja potrebno je poznavati svojstva materijala kao što su gustoća, tvrdoća, čvrstoća, krtost, rastresitost, žilavost i prirodni kut sipanja materijala. Prirodni kut sipanja (eng. angle of repose) materijala predstavlja pravac što ga nasipani materijal zatvara sa ravninom podloge. Također je to kut kod kojeg je nasipani materijal statičan, iznad tog kuta počinje teći, a ispod tog kuta je stabilan. Nasipani materijal simulira izgled stožastog oblika, dok se kut sipanja razlikuje ovisno o vrsti nasipanog materijala. Vrijednost kuta sipanja može iznositi između 0° i 90° , ovisno o parametrima (kut unutarnjeg trenja, veličina zrna, glatkoća, sastav i stanje materijala, oblik, temperatura, vlažnost te način sipanja) uzorka u ispitivanju. Vrijednosti kuta unutarnjeg trenja usko je povezana s vrijednosti prirodnog kuta sipanja nezbijenog materijala. Kut unutarnjeg trenja karakterističan je za sve materijale, te se definira kao posljedica trenja među česticama na koje djeluje gravitacijska sila. Vrijednosti kuta unutarnjeg trenja nisu iste za različite vrste materijala ili granulaciju, te na njega utječu parametri prirodnog kuta sipanja.

Cilj diplomskog rada je metodom podiznog cilindra provesti ispitivanja kuta sipanja u laboratoriju na četiri različita uzorka: uzorak kvarcnog pijeska granulacije od 0,7 do 1,2 mm, riječni šljunak granulacije od 4 do 8 mm, mramor granulacije zrna od 8 do 16 mm i drobljeni dolomit granulacije od 4 do 8 mm. Formirane hrpe uzoraka fotografiraju se te upisuju u program „Agisoft PhotoScan“ nakon čega je moguće dobiti trodimenzionalne modele. Cilj ovog rada je pomoću trodimenzionalnih modela dobiti vrijednosti kuteva sipanja, te vidjeti kakav utjecaj ima veličina zrna na kut sipanja materijala.

2. OPĆENITO O KUTU SIPANJA

Prilikom obavljanja rudarskih poslova, fizikalna svojstva materijala imaju veliku važnost. Utječu na izbor transportnog sredstva, troškove, isplativost te ostale bitne parametre. Bitnija fizička svojstva su kut sipanja, kut trenja, rastresitost, masa, hidrofizička svojstva, stupanj abrazivnosti, granulometrijski sastav i krtost. Ovaj rad ima naglasak na prirodni kut sipanja. Zrnati materijal je sustav koji ovisi o stanju naprezanja. U trenutku kada se materijal zasipa u posudu i formira hrpu, može se usporediti sa krutinom. Takvo stanje materijala naziva se statička faza. U trenutku naginjanja posude, materijal izlazi iz statičke faze i počinje teći. Obzirom da je hrpa u tom trenutku van statičke i van dinamičke faze, može se reći da se nalazi u kvazi-statičkoj fazi (slika 2.1). Ako se nasipana hrpa izloži vibriranju, zrna bolje popunjavaju pore, te se volumen nasipane hrpe smanjuje. U slučaju jakog naginjanja posude dolazi do interakcije (sudara) između zrna materijala i zrna sa stijenkom posude. U toj fazi materijal se ponaša kao disipativni plin, te se nalazi u dinamičkoj fazi (Lumay i dr. 2012).



Slika 2.1 Statička, dinamička i polu statička faza (Lumay i dr., 2012)

Pod nazivom prirodni kut sipanja (eng. angle of repose) misli se na kut kojeg materijal tvori sa horizontalnom ravninom, prilikom sipanja na hrpu. Hrpa se formira u stožasti oblik, te se za različite materijale formira različit kut na površini stošca. Maksimalan kut plašta stošca pri kojem materijal miruje. Iznad te vrijednosti materijal teče prema dolje, dok ispod te vrijednosti je statičan. Osim visine postoje i drugi utjecajni parametri, a to su hrapavost, veličina i oblik zrna, vlažnost, temperatura, sastav i stanje materijala i način sipanja. Prirodni kut sipanja dobro korelira sa unutarnjim kutem trenja materijala, što znači da će se sa promjenom načina sipanja taj kut mijenjati u izvjesnim granicama. Sipanjem materijala s veće visine dobiva se veća brzina, što za rezultat daje bolje klizanje materijala po površini stošca. Kut dobiven zasipavanjem je prirodni kut sipanja pri gibanju, φ što se može nazvati dinamički kut. Izraz za dinamički kut sipanja je:

$$\operatorname{tg} \varphi \sim \mu \quad (2.1)$$

U priloženom analitičkom izrazu μ predstavlja dinamički koeficijent trenja. U analitičkom izrazu znak \sim je prikazan zbog toga što se prirodni kut materijala neznatno razlikuje, ovisno o međusobnom zahvaćanju čestica. Također kod zasipavanja materijala s manje visine, moguće je postići maksimalnu vrijednost kuta φ_0 , statički kut sipanja materijala. Obzirom da prilikom zasipavanja ne dolazi do odskakivanja zrna izvan maksimalnog promjera stošca, može se reći da je dobiveni kut sipanja zapravo statički kut sipanja. Analitički izraz je:

$$\operatorname{tg} \varphi_0 \sim \mu_0 \quad (2.2)$$

U izrazu (2.2) μ_0 predstavlja koeficijent trenja čestica materijala u stanju mirovanja. Također je izveden izraz (2.5) koji prikazuje omjer dinamičkog i statičkog kuta sipanja. Kut trenja između materijala je kut pri kojemu čestice materijala prelaze iz statičkog stanja u dinamičko, te kližu prema dolje. Obzirom da se kod kuta sipanja spominje statičko i dinamičko stanje, također je potrebno spomenuti kut trenja i koeficijent trenja u dinamičkom stanju (ρ, μ) i statičkom stanju (ρ_0, μ_0). Izraz za kut trenja u dinamičkom stanju je:

$$\tan \varphi_r = \mu \quad (2.3)$$

Gdje je:

φ_r - kut trenja materijala u dinamičkom stanju ($^\circ$)

U statičkom stanju:

$$\tan \varphi_{0r} = \mu_0 \quad (2.4)$$

Gdje je:

φ_{0r} - kut trenja materijala u statičkom stanju ($^\circ$).

Samoodrživost kao karakteristika materijala, na ravnoj plohi formira hrpu u obliku stošca koja ovisi o sadržaju vlage u česticama, sastavu, krupnoći i obliku. Sitne frakcije materijala su glavni nositelji vlage, te utječu na veličinu vrijednosti kuta sipanja mjenog materijala. Tablica 2-1 prikazuje veličine kuta sipanja materijala obzirom na vlažnost (Kujundžić, 2010).

Tablica 2.1 Utjecaj vlažnosti na kut sipanja materijala (Kujundžić, 2010)

Materijal	Suh	Vlažan	Saturiran
Zrna različite veličine	32 °- 45 °	36 °- 48 °	30 °- 40 °
Pijesak	28 °- 35 °	30 °- 40 °	22 °- 27 °
Glina	40 °- 45 °	35 °	15 °- 20 °

Prethodna iskustva pokazuju da se korištenjem neklasiranih materijala dobiva veći kut nasipavanja nego korištenjem klasiranih materijala. U tu svrhu koristi se izraz za odnos između dinamičkog i statičkog kuta sipanja. Izraz glasi :

$$\frac{\varphi}{\varphi_0} \sim 0,7 \quad (2.5)$$

Svrstavanje materijala u neklasiranu skupinu dobiva se odnosom maksimalnih i minimalnih veličina zrna prema izrazu (2.6), dok za klasirani materijal vrijedi izraz (2.7)

$$\frac{D_{max}}{D_{min}} \geq 2,5 \quad (2.6)$$

$$\frac{D_{max}}{D_{min}} \leq 2,5 \quad (2.7)$$

Gdje je:

- D_{max} – maksimalni promjer zrna (mm)
- D_{min} – minimalni promjer zrna (mm)

Općenito za klasirani materijal kut sipanja iznosi 35 ° do 45 °. Veći kut sipanja javlja se u statičkom stanju (mirovanje), dok se manji kut sipanja javlja kod dinamičkog stanja (gibanje). Srednji kut sipanja za drobljeni vapnenac te željeznu i bakrenu rudu iznosi 37 °, dok kod ugljena iznosi od 35 ° do 37 °, koksa 40 °, antracita 27 °, glinastog sitnog pijeska 37 °, čistog pijeska 34 ° i mokrog pijeska 22 ° (Kujundžić, 2010).

2.1. Primjena kuta sipanja

Mjerenje kuta sipanja je široko rasprostranjeno, te ga nalazimo u raznim ljudskim djelatnostima poput transporta, skladištenja sirovine i dobara, planinarenju, farmaciji, primjeni rasutog tereta, geologiji, fizici, agronomiji, geotehničkom inženjerstvu. Obzirom da je to polje istraživanja novo, daljnjim istraživanjem pokušavaju se razvijati nove metode sa što točnijim rezultatima.

Transport materijala ima bitnu ulogu kod eksploatacije mineralne sirovine. Nakon istražnih radova i miniranja stijenske mase, mineralna sirovina se prebacuje s radne na utovarne etaže te se raznim sustavima transporta vodi u oplemenjivačka postrojenja. Najjednostavniji, a ujedno i najekonomičniji sustav transporta je gravitacijski transport kod kojeg se mineralna sirovina prebacuje s više na nižu etažu djelovanjem gravitacijske sile teže. Najviše se upotrebljava kod površinskih kopova tehničko-građevnog kamena djelovanjem bagera ili dozera.

Kut sipanja materijala se često koristi kod proračuna volumena materijala ispred noža dozera. Također je kasnije potreban proračun satnog učinka dozera. Izraz za volumen (2.8) (Klanfar, 2014):

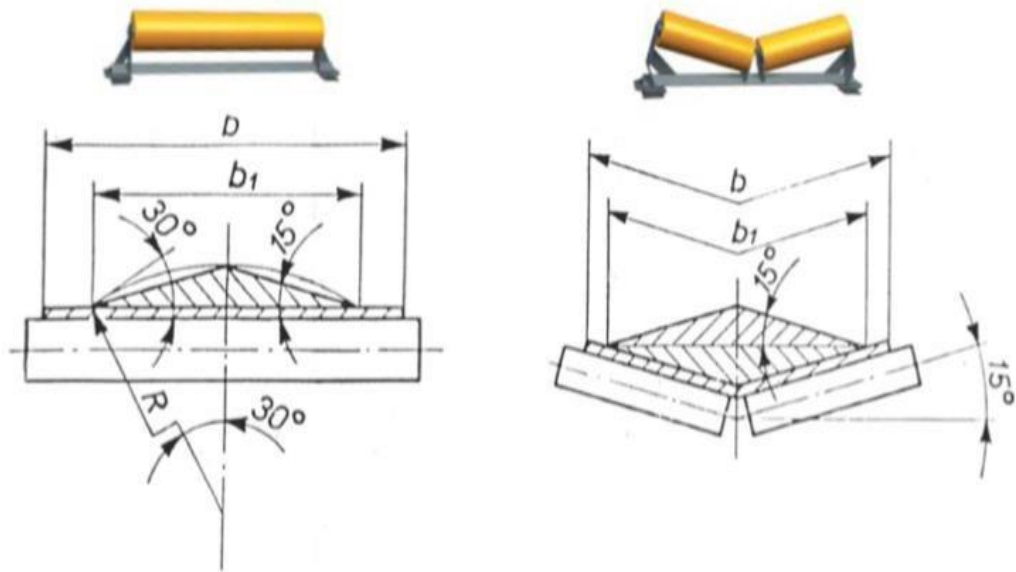
$$V = l \cdot \left(\frac{h_d^2}{2 \tan \varphi} + 0,698 \cdot h_d \cdot c \right) \quad (2.8)$$

Gdje je:

- V – volumen materijala ispred noža dozera (m^3)
- l – širina noža dozera (m)
- h_d – visina noža dozera (m)
- φ – kut sipanja materijala (°)
- c – visina kružnog odsječka, dubina noža (m).

Kut sipanja materijala je također važan i kod projektiranja transportnih traka, čije projektiranje započinje procjenom fizikalno-mehaničkih karakteristika materijala. Prilikom

zadržavanja materijala na transportnoj traci u stanju mirovanja, kut sipanja materijala je 5° do 15° manji u odnosu na prirodni kut sipanja materijala. Količina materijala koju transportna traka može preuzeti, tj. kapacitet ovisi o bočnom i horizontalnom kutu nagiba transportne trake, širini transportne trake, brzini trake i dinamičkom kutu sipanja. Dinamički kut najviše ovisi o geometriji transportne trake (Slika 2.2), načinu nasipavanja na transportnu traku te o trenju između materijala i same trake (Gaura, 2018).



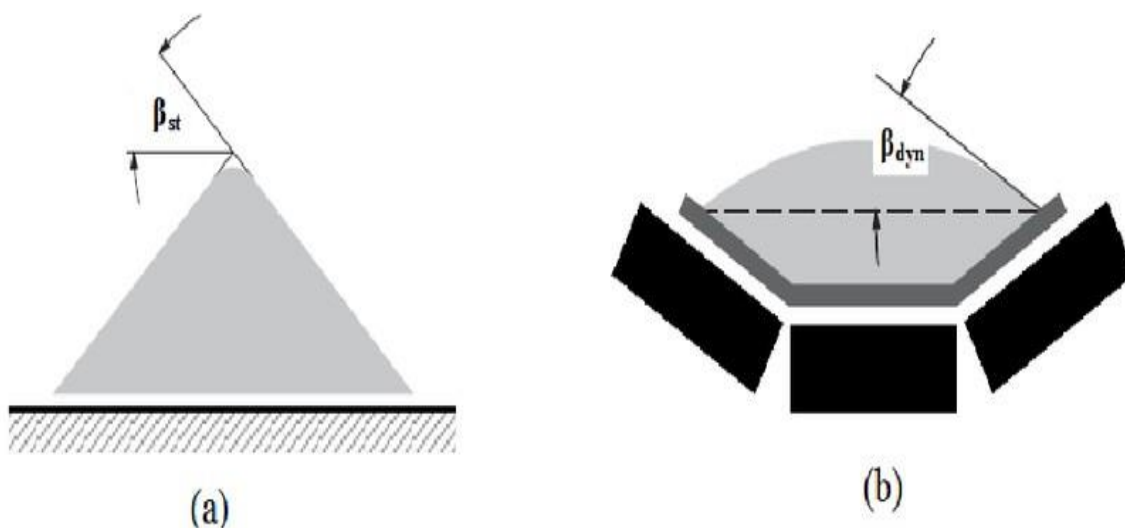
Slika 2.2 Prikaz poprečnog presjeka transportnog sredstva s beskonačnom trakom (Korman, n.d.)

Odnos dinamičkog i statičkog kuta sipanja kod korištenja transportnih traka nalazi se u izrazu (2.9):

$$\beta_{din} = (0,5 - 0,9) \cdot \beta_s \quad (2.9)$$

Gdje je:

- β_{din} – dinamički kut sipanja materijala ($^\circ$)
- β_s – statički kut sipanja materijala ($^\circ$)



Slika 2.3 Prikaz statičkog kuta sipanja (a) i dinamičkog kuta sipanja (b) (Tsakalakis i Micalakopoulos, 2015)

Ostali bitni parametri i karakteristike transportiranog materijala su kohezija, praškavost, hrapavost površine, oblik čestice, količina vlage, adhezija, kemijska korozivnost i abrazivnost. Također brzina i širina transportne trake su povezane sa veličinom čestice. U praksi je najveća veličina agregata jednaka jednoj petini širine trake uz kut sipanja prilikom gibanja (dinamički) 20° . Druga mjera je jedna desetina agregata u odnosu na širinu transportne trake uz uvjet da je kut sipanja prilikom gibanja materijala 30° . Sadržaj vlage se mjeri u postocima te ima veliku ulogu u promjeni kuta sipanja prilikom gibanja materijala (Slika 2.3). Sadržaj vlage također utječe na kut nagiba transportne trake i trenje između čestica (Tsakalakis i Micalakopoulos, 2015).

Prilikom odlaganja mineralnih sirovina i jalovina, također važan parametar je kut sipanja materijala u stanju mirovanja (statički). Obzirom da kut sipanja pri stanju mirovanja (statički) utječe na deponijsku stabilnost, predlažu se dvije metode za povećanje deponijske stabilnosti. Prva metoda je uklanjanje sve postojeće vegetacije da bi podloga bila što čvršća. Druga metoda je miniranje kako bi podloga na koje se odlaže bila što grublja i na taj način spriječila tlo da djeluje kao klizna ploha. Osim statičkog kuta sipanja, parametri koji još utječu na stabilnost deponija su sigurna udaljenost od postojećih kosina, kapacitet deponija te granulacija materijala. Također veličina lopate utovarnog stroja (Slika 2.4) nema utjecaj na kut sipanja odloženog materijala, veličinu hrpe, kao ni na stabilnost odloženog materijala (deponija) (Zhang i dr., 2014).



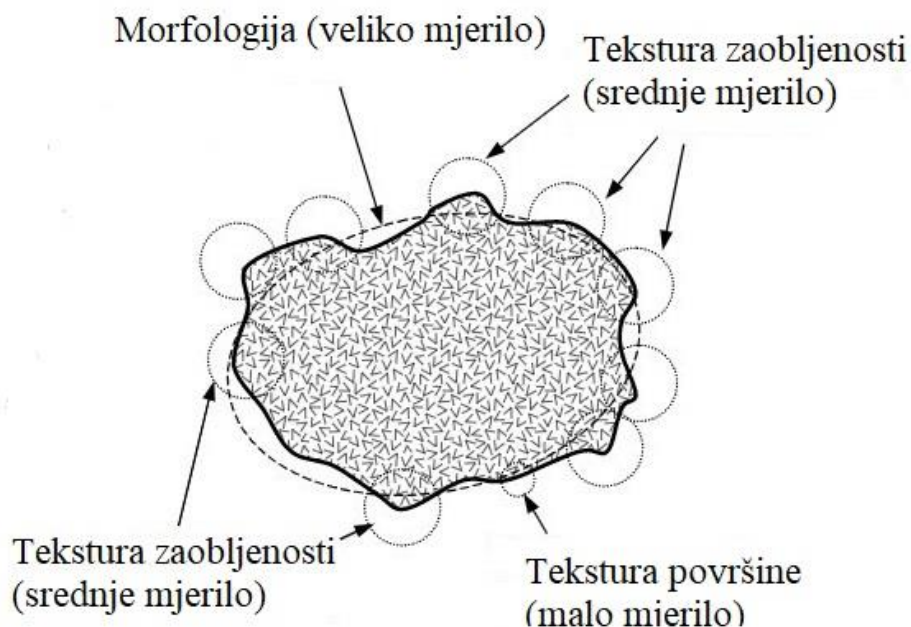
Slika 2.4 Prikaz rudarske mehanizacije (buldozer) (Gradbena mehanizacija, 2018)

Kut sipanja koristi se i kod koeficijenta punjenja lopate utovarivačem. Ostvaruje se veći učinak kod materijala s većom vrijednosti kuta sipanja. Razlog tome je utovarna lopata buldozera, kojoj je potrebno manje ponavljanja za veći koeficijent punjenja odnosno potrebno je manje vrijeme utovara, iskoristivost će biti veća, a troškovi prijevoza manji (Gaura, 2018).

Kut sipanja materijala se ne primjenjuje samo u svrhu rudarstva, već i u poljoprivredi. Koristi se u svrhu projektiranja i dimenzioniranja silosa, bunkera i spremnika za veliki volumen sjemenki, pšenice, riže, itd. Problematika i istraživanja vezana uz kut sipanja u poljoprivredi najčešće su vezana uz transport i skladištenje žitarica te utjecaj vlažnosti žitarica na kut sipanja. Kut sipanja materijala koristi se i u etnomologiji gdje se metodom rotirajućeg cilindra mjeri kut sipanja uzorka pijeska, dok se laserskom tehnologijom mjeri kut sipanja mravinjaka. Rezultat metode pokazuje da se kutovi nagiba mravinjaka ne razlikuju puno od kuta sipanja istog materijala. Također još ima velike primjene u geotehničkom inženjerstvu u svrhu stabilnosti kosina, hidrodinamici i sedimentologiji. Kut sipanja sedimenata ispituje se teoretski i eksperimentalno. Metoda za ispitivanje kuta sipanja sedimenata približno je slična metodi rotacijskog cilindra, gdje se ispituje stupanj punjenja, utjecaj rotacijske brzine i omjer mase sedimenata na kut sipanja (Beakawi Al-Hashemi i Baghabra, 2018).

2.2. Utjecaj oblika zrna

Na kut sipanja materijala značajno utječe oblik čestica i njezina veličina. Oblik čestica često se definira faktorima oblika. Ovi faktori su ovisni o mjerilu u kojem su čestice opisane pri čemu možemo promatrati česticu, oblik njezine površine i hrapavost same površine čestice (Slika 2.5).



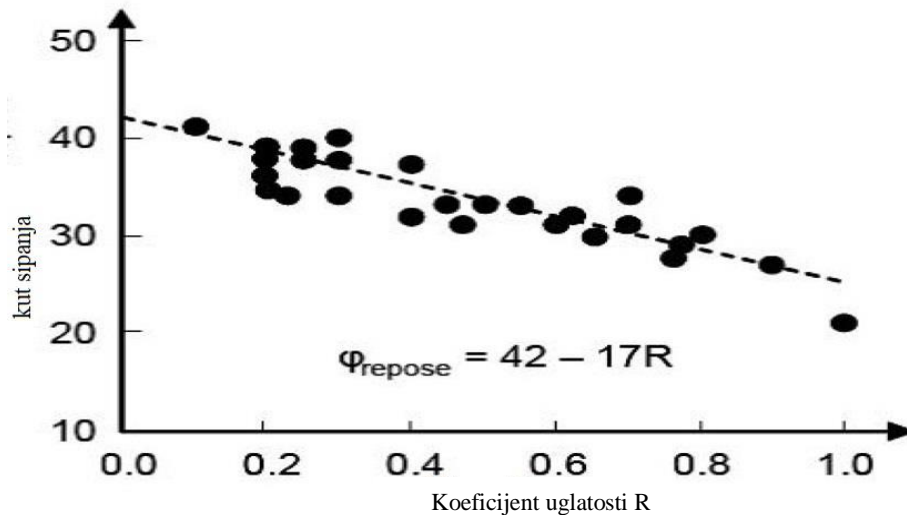
Slika 2.5 Ovisnost mjerila o obliku čestice, (Mitchell i Soga, 2005)

Najčešće korišteni faktori oblika čestica su faktori oblika koji utječu na geometrijske osobine materijala:

- zaobljenost čestica
- sferičnost čestice
- hrapavost čestice

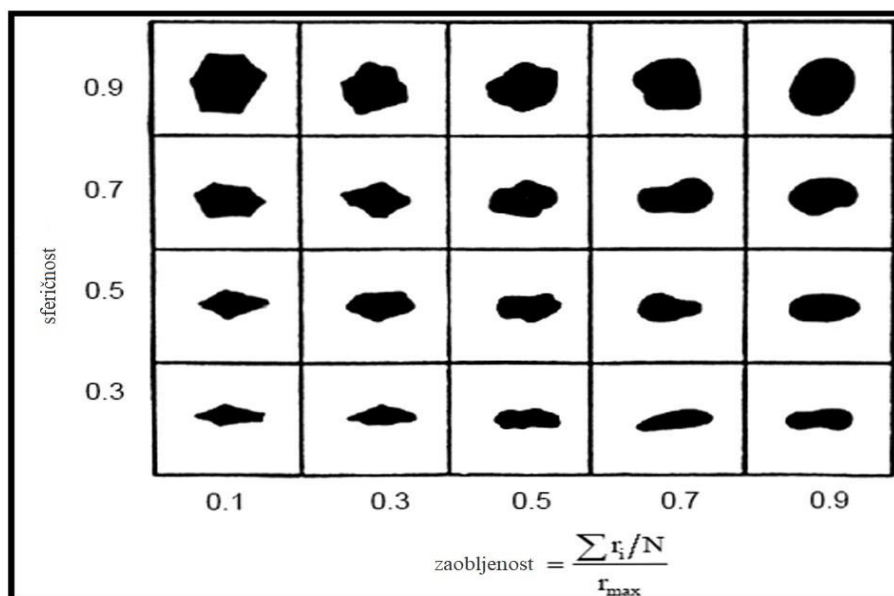
Ovdje se dodatni problem javlja u činjenici da faktori oblika nisu standardizirane veličine pa je teško jednoznačno odrediti njihove veličine.

Iz slike 2.6 može se vidjeti da smanjenjem uglatosti čestice kut sipanja materijala raste. Obzirom na takav zaključak i iscrtani pravac na grafu (trendline), za vrijednost koeficijenta uglatosti čestica 0,6 kut sipanja znatog materijala iznosi oko 33° . Za koeficijent uglatosti 0,2 kut sipanja materijala bi iznosio oko 39° , što je značajni porast.



Slika 2.6 Utjecaj uglatosti čestice na kut sipanja materijala (Zhang and Hryciw, 2015)

Postoje različite definicije za 2D i 3D zaobljenost čestice. Povezanost kuta sipanja i zaobljenosti je u definiranju zaobljenosti zrna i korištenoj metodi određivanja kuta sipanja. Zaobljenost također ovisi o uglatosti čestice i povezana je sa brojem kutova tj. geometrijom čestice. Wadell-ova općenita definicija zaobljenosti je omjer prosječnog radijusa zakrivljenosti rubova, kutova čestica i radijusa upisane kugle. Razvijena je i tablica zaobljenosti i sferičnosti (Slika 2.7) u svrhu da se zaobljenost može odrediti vizualnim putem.



Slika 2.7 Dijagram utjecaja zaobljenosti na čestice materijala (Krumbein i Sloss, 1963)

Sa Wadell-ovom teorijom zaobljenosti, Powers (1953) je napravio klasifikaciju temeljenu na zaobljenosti koja se prikazuje u Tablici 2.2. Također je moguće odrediti zaobljenost čestice pomoću tri izraza (Beakawi Al-Hashemi i Baghabra, 2018).

$$R_2 = \frac{2 \cdot d_c}{D_L} \quad (2.10)$$

$$R_3 = \frac{d_c}{D_{av}} \quad (2.11)$$

$$R_{Cox} = \frac{4\pi \cdot A_{PR}}{P^2} \quad (2.12)$$

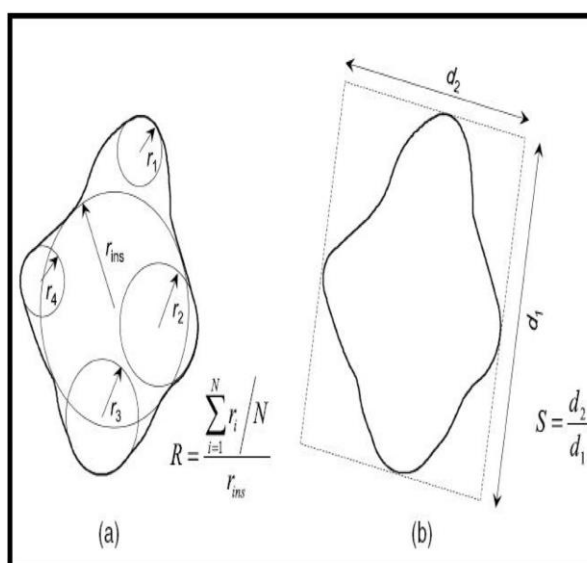
Gdje je:

- R_2 i R_3 – tipovi zaobljenosti
- d_c – polumjer zakrivljenosti maksimalnog konveksnog dijela čestice
- D_L – najdulji promjer kroz konveksni dio čestice
- D_{av} – srednji radijus
- R_{Cox} – zaobljenost ili kružnost
- A_{PR} – predviđeno područje čestice
- P – ukupni opseg projekcije

Tablica 2.2 Wadell-ova klasifikacija zaobljenosti (Beakawi Al-Hashemi i Baghabra., 2018)

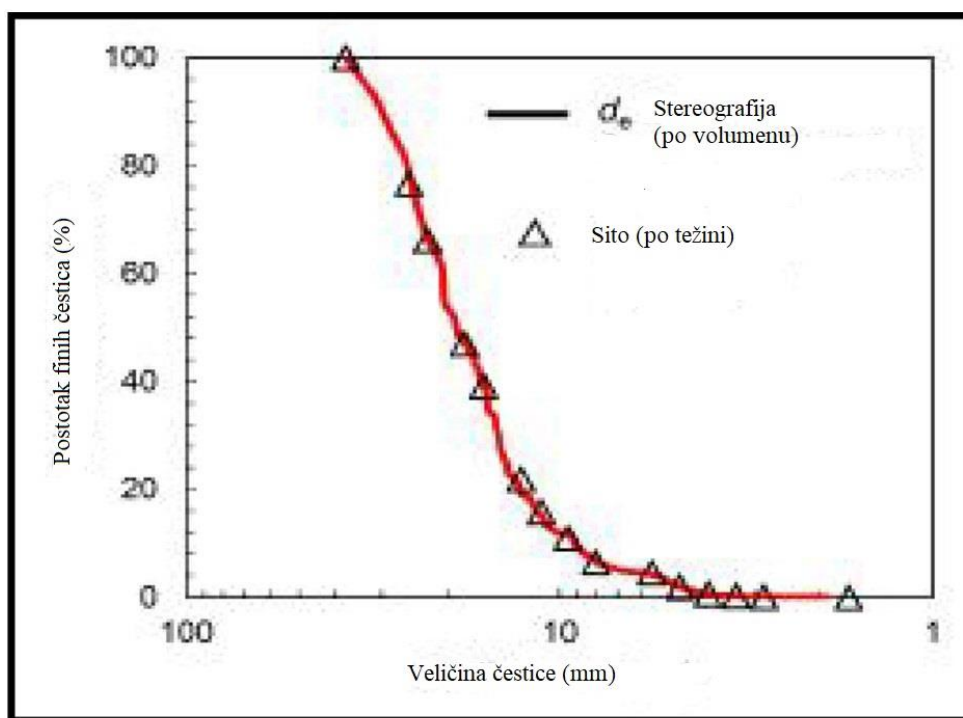
Wadell-ova klasifikacija zaobljenosti	
Opis	Zaobljenost
Jako uglat	$\leq 0,17$
Uglat	0,17 – 0,25
Polu uglat	0,25 – 0,35
Polu zaobljen	0,35 – 0,49
Zaobljen	0,49 – 0,70
Jako zaobljen	$\geq 0,70$

Zheng i Hryciw (2015) predložili su numeričku metodu računске geometrije koja pomoću slika određuje zaobljenost tla, hrapavost i sferičnost. Izračunali su srednju površinu provodeći lokalno regresijsku analizu potvrđenu s K-vrijednosti. Zaobljenost se određuje iz srednje površine čestice na temelju Wadell-ove (1932) definicije. Usporedili su rezultate njihove numeričke metode računalne geometrije s rezultatima ručne Wadell-ove metode zaobljenosti i sferičnosti, koja je definirana kao omjer promjera ekvivalentne kružnice projicirane površine i minimalnog promjera ograničavajuće kružnice (Slika 2.8). Nakon toga, njihova se metoda uspoređuje s Krumbeinovom i Slossovom tablicom. Rezultat je dobro slaganje između dvije metode (Beakawi Al-Hashemi i Baghabra, 2018).



Slika 2.8 Definicija: a) zaobljenost, b) sferičnost (Beakawi Al-Hashemi i Baghabra, 2018)

Nakon toga odlučili su se za korištenje stereografije. Kod stereografije se rade analize slike u svrhu poboljšanja procjene oblika i veličine čestice uzimajući u obzir tri osnovne dimenzije čestica tla i šljunka. Zheng i Hryciw (2015) usporedili su svoje rezultate stereografije s ručnim mjerenjima. Kod ručnog mjerenja korištena su sita, te su dobiveni rezultati bili dobri. Rezultat i poklapanje metode prikazan je na slici 2.9.



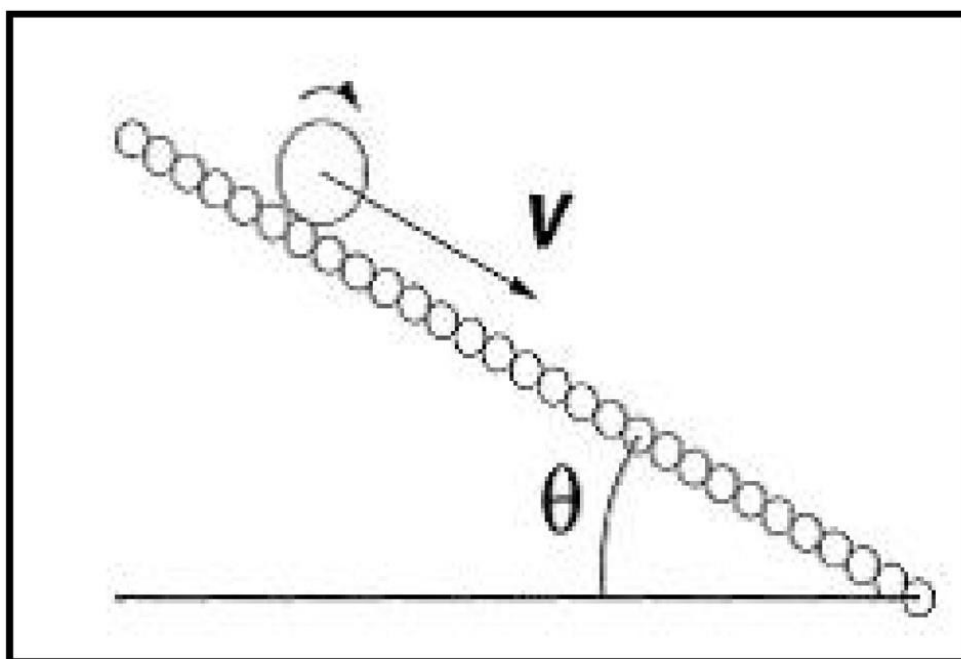
Slika 2.9 Usporedba stereografije i metode sitima (Zheng and Hryciw, 2015)

Prikazuje se odnos i ponovljivost rezultata dvije različite metode. Također se prikazuje odnos postotka finih čestica dobivenih metodom sita i veličine čestica dobivene metodom stereografije.

Kao i zaobljenost, sferičnost se koristi kao faktor oblika čestica. Postoje razne definicije utvrđene različitim metodama. Najučestalija korištena definicija je postavljena od strane Wadell-a koji je sferičnost definirao kao omjer promjera ekvivalentne kugle i promjera opisane kugle. Barrios (2013) je pomoću Discrete Element Method (DEM) simulirao kut sipanja pomoću željeznih peleta koristeći sferne čestice i čestice nastale kombinacijom sfernih oblika. Kut sipanja dobiven numeričkim modelom za sferične čestice bio je veći od eksperimentalno dobivenog kuta, dok je kut sipanja čestica nesferičnog oblika usko odgovarao eksperimentalnim rezultatima. Osim toga, kutovi nagiba dobro su se slagali kada je smanjen samo statički koeficijent trenja sfernih čestica. Nakon toga, Dai (2017) je

pokazao da se kut sipanja smanjuje kada se poveća zaobljenost, te kad se poveća sferičnost (Beakawi Al-Hashemi i dr., 2018).

Hrapavost samih čestica i oblik odnosno hrapavost klizne površine po kojoj se čestice kotrljaju utječu na kut sipanja i koeficijent trenja čestica. Hrapavost čestice opisuje teksturu u odnosu na njezin radijus, koristeći skalu koja je mnogo manja od promjera čestice. Direktno mjerenje hrapavosti je naporno, pa se obično mjeri u odnosu na duljinu kontaktnog područja među česticama. Za čestice na kliznoj površini istog ili različitog materijala, hrapavost kontrolira viskozno trenje kao što je pokazano na (Slika 2.10). Senetakis, Coop i Todisco (2013) izmjerili su hrapavost kvarcnog pijeska pomoću interferometrije bijelog svjetla i laserskog skenera Sympatec QicPic. Utvrđena je prosječna hrapavost $0,38 \pm 0,19 \mu\text{m}$.



Slika 2.10 Viskozno trenje uzrokovano hrapavošću čestica koje se kotrljaju (Beakawi i Al-Hashemi, 2018)

Miura i dr. (1997) zaključuju da se povećanjem hrapavosti osnovice, povećao i kut sipanja materijala. Posljedično tome, formiranje hrpe na bazi bez trenja gotovo je nemoguće.

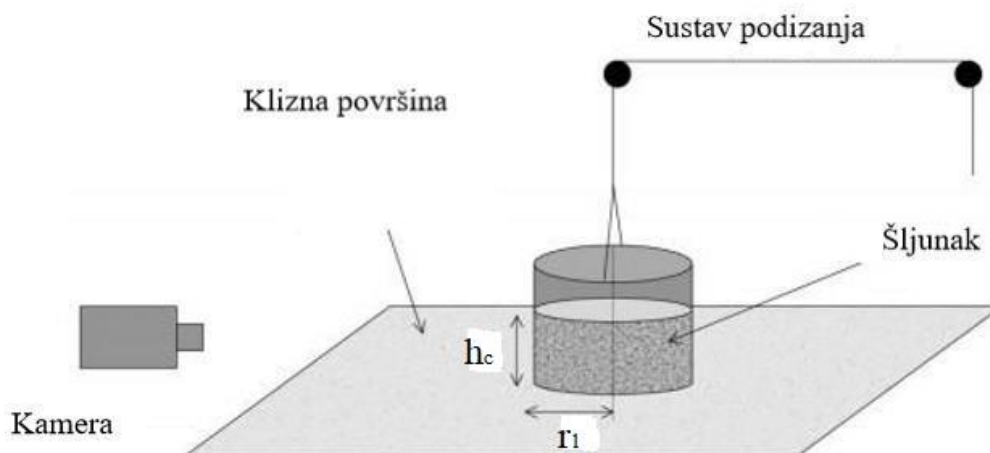
Osim oblika same čestice i veličina čestice znatno utječe na kut sipanja materijala. Dosadašnja saznanja ukazuju da se kut sipanja smanjuje povećanjem sferičnih promjera čestica. Botz i dr. (2003) pokazali su slične rezultate za pijesak gdje se kut sipanja smanjio kad se povećala veličina čestice pijeska. Lumay i dr. (2012) pokazuju da kada su čestice riže, brašna i abraziva manje od $50 \mu\text{m}$, kohezija između čestica ima tendenciju utjecati na kut

sipanja. Kako se kohezija povećava, kut sipanja se povećava (Beakawi Al-Hashemi i Baghabra, 2018).

Nakon istraživanja zaključuje se da vrijednost kuta sipanja raste povećanjem hrapavosti podloge na kojoj se ispitivanje radi. Također kut sipanja raste kod povećanja koeficijenta trenja podloge pri klizanju i kotrljanju, te odstupanju od zaobljenosti. S druge strane, kut sipanja pada sa smanjenjem količine materijala koji se koristi u mjerenju. Također kut sipanja pada s povećanjem brzine podizanja šupljeg cilindra, te se povećava smanjenjem veličine zrnatih čestica. Istraživanjem sferičnosti i zaobljenosti čestica može se zaključiti da smanjenjem zaobljenosti i sferičnosti čestica kut sipanja materijala raste. Kohezija također utječe na kut sipanja materijala, te je istraživanje pokazalo da povećanjem kohezije čestice povećava se kut sipanja. Sukladno tome, smanjenjem kohezije čestica, kut sipanja pada.

3. ODREĐIVANJE KUTA SIPANJA METODOM PODIZNOG CILINDRA

Metoda podiznog cilindra je često primjenjivana laboratorijska metoda, te se koristi za određivanje statičkog kut sipanja materijala. U cilindar se zasipava ispitni materijal. Cilindar se postavlja uspravno, tako da jedan od otvora dodiruje podlogu. Hrapavost podloge na koju će se zasipavati utječe na kut rasipavanja materijala. Pretpostavka je da će zasipani materijal imati veću hrpu na hrapavijoj podlozi, a samim tim će i kut biti oštiji i veći. Brzina podizanja cilindra s podloge je jednolika, te se formira hrpa materijala u obliku stošca. Nakon provedenog ispitivanja potrebno je izmjeriti nagib plašta formiranog stošca, čiji rezultat predstavlja kut sipanja za vrijeme mirovanja materijala (statički) (Slika 3.1) (Liu, 2008).



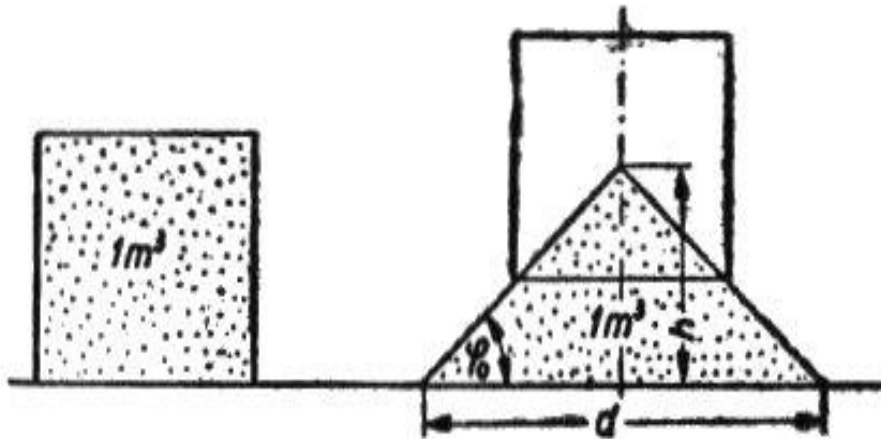
Slika 3.1 Metoda podiznog cilindra (Liu, 2008)

Postoje razne metode pomoću kojih se može izmjeriti kut nasipane hrpe. Najjednostavnije je mjerenje pomoću geometrijskog kutomjera pomoću kojeg se dobivaju prihvatljiva rješenja laboratorijskog mjerenja.

Kut nasipane hrpe koji formira stožac može se izmjeriti metodom dvodimenzionalne fotografije dobivene fotoaparatom ili kamerom. Fotografija se uslika pod pravim kutem na vertikalnu os hrpe, te se obradi u programu predviđenom za obradu fotografije. Rezultat je kut hrpe koji predstavlja kut sipanja u stanju mirovanja (statički). Suvremenija metoda je mjerenje kuta sipanja trodimenzionalnom metodom stereoskopije, pri čemu se koristi kamera i program predviđen za obradu podataka. Potrebno je napraviti nekoliko fotografija sa svih strana hrpe, čime se dobije trodimenzionalni prikaz. Prednost trodimenzionalne

metode je rezultat kojim se dobiva kut sipanja hrpe, te je moguće mjerenje kutova stvarnih hrpa (Kostrić, 2018).

Jednostavniji način dobivanja rezultata kuta sipanja materijala je prikazan na (Slika 3.2). Cilindar površine 1 m^2 i visine 1 m , bez dna, napuni se materijalom. Cilindar se polako podigne, te se materijal zasipa i formira stožac. Kut površine stošca može se izračunati analitičkim izrazom, s tim da je h visina vrha stošca (Kujundžić, 2010).



Slika 3.2 Prikaz metode podiznog cilindra (Kujundžić, 2010)

Kut nagiba plašta stošca računa se prema sljedećem izvodu.

Volumen cilindra :

$$V_1 = r_1^2 \cdot \pi \cdot h_c = 1 \text{ m}^3 \quad (3.1)$$

Volumen stošca:

$$V_2 = \frac{r^2}{3} \cdot \pi \cdot h = 1 \text{ m}^3 \quad (3.2)$$

Gdje je :

- V_1 – obujam cilindra (m^3),
- V_2 – obujam stošca (m^3),
- r_1 – radijus baze cilindra (m),
- r – radijus baze stošca (m),
- h – visina stošca (m),
- h_c – visina cilindra (m).

Pretpostavka da su gustoće nasipnog materijala i materijala u cilindru jednake:

$$V_1 = V_2 \quad (3.3)$$

$$r_1^2 \cdot \pi \cdot h_c = \frac{r^2}{3} \cdot \pi \cdot h \quad (3.4)$$

Obzirom da je visina stošca 1 m i površina poprečnog presjeka cilindra 1 m² vrijedi jednakost:

$$\frac{r^2}{3} \cdot \pi \cdot h = 1 \quad (3.5)$$

Prema pravilu arc(tg) vrijedi:

$$\tan \varphi_0 = \frac{h}{r} \rightarrow r = \frac{h}{\tan \varphi_0} \quad (3.6)$$

Uvrštavanjem se dobije:

$$\left(\frac{h_s}{\tan \varphi_0}\right)^2 \cdot \pi \cdot h = 3 \quad (3.7)$$

$$(\tan \varphi_0)^2 = \frac{\pi}{3} \cdot h^3 \quad (3.8)$$

$$\tan \varphi_0 = \sqrt{\frac{\pi}{3}} \cdot \sqrt{h^3} \quad (3.9)$$

Vrijednost $\sqrt{\frac{\pi}{3}}$ iznosi 1,0233267, te je zaokružena na 1. Izraz za kut nagiba plašta stošca prikazan je jednačbom (3.10)

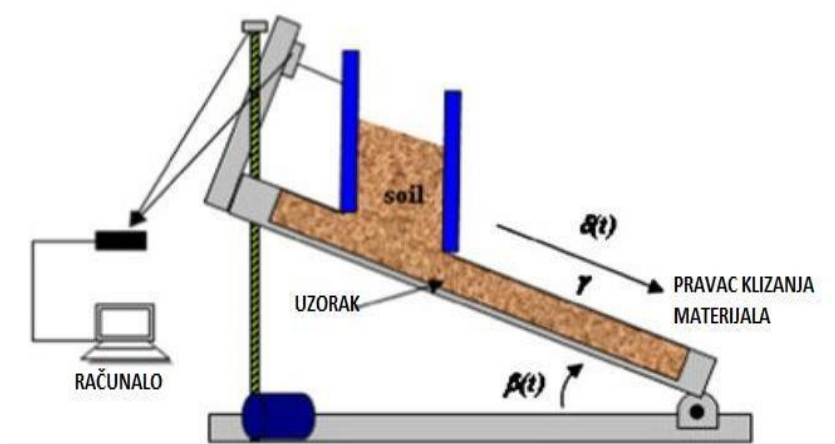
$$\tan \varphi_0 \sim \sqrt{h^3} \quad (3.10)$$

3.1. Dosadašnje metode i istraživanja

Obzirom da je istraživanje kuta sipanja materijala relativno novo područje istraživanja, razvijene su različite metode istraživanja. Najutjecajniji parametar je način sipanja materijala, pri kojem se stvara hrpa i formira oblik stošca. Do sad su se razvile različite laboratorijske metode, u svrhu dobivanja što točnijeg rezultata kuta sipanja materijala

3.1.1. Metoda nagibne kutije

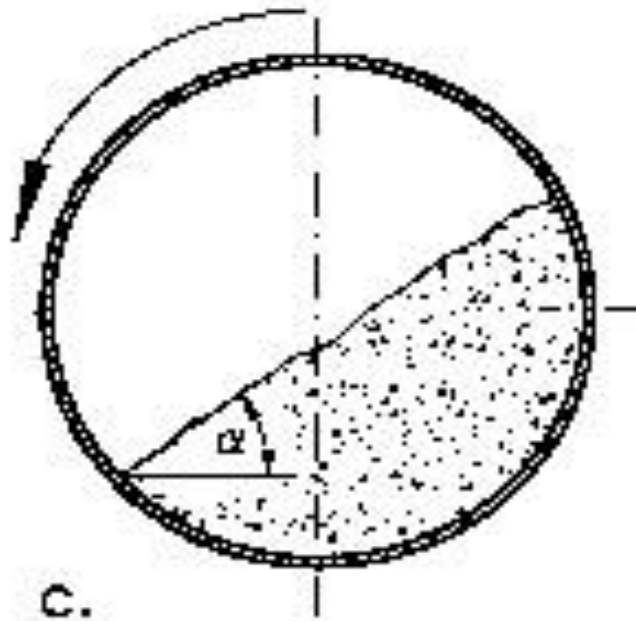
Metoda nagibne kutije (Slika 3.3) se koristi na sitnozrnatim materijalima, te se koriste razne granulacije manje od 10 mm. Izvođenje metode je jednostavno, pa se materijal nasipava u prozirnu kutiju sa poroznim stranicama da se mogu pratiti promjene u klizanju tijekom pokusa. Kutija se nalazi na mehanizmu sa zglibom na jednoj strani i navojem na drugoj strani. Pokus se izvodi na način da se kutija počinje podizati na navojnom dijelu brzinom od 18 °/min. dok se materijal u kutiji ne počne zasipavati u jednu stranu (klizanje). Početkom klizanja, senzor koji je spojen na računalo registrira pomak i zabilježi. Na taj način se dobiva kut sipanja materijala u kutiji (Beakawi Al-Hashemi i Baghabra, 2018).



Slika 3.3 Metoda nagibne kutije (Kostrić, 2018)

3.1.2. Metoda valjka

Metoda valjka (Slika 3.4) je metoda određivanja kuta sipanja u stanju gibanja (dinamički kut sipanja). Postupak mjerenja se izvodi na način da se materijal zasipava u valjak određenog promjera koji s jedne strane mora biti zatvoren prozirnim materijalom. Nakon toga se valjak pomiče konstantnom brzinom. Zaustavljanjem, materijal se zasipava na određeni dinamički kut (Beakawi Al-Hashemi i Baghabra, 2018).



Slika 3.4 Metoda rotiranja valjka (Schulze, 2006)

3.1.3. Metoda lijevka

Metoda lijevka (Slika 3.5) je nešto kompliciranija metoda od prethodne dvije navedene. Mjerenje se provodi na način da se u uređaj koji ima lijevak na prethodno postavljenoj visini nasipava materijal, te taj materijal pada gravitacijskom silom na postavljeni bijeli papir na dnu uređaja. Na taj način formira hrpu u obliku stošca. Lijevak na određenoj visini je pomičan, te je potrebno da bude što više približen hrpi koja se stvara nasipavanjem da ne bi došlo do rasipanja materijala. Nakon formiranja stošca, po bijelom papiru se iscrtavaju rubovi nasipane hrpe, te se određuju promjeri d_1 i d_2 . Aritmetičkom sredinom dobiva se srednja vrijednost promjera d , te se mjeri maksimalna visina hrpe. Jednostavnom trigonometrijskom funkcijom tanges izračunava se statički kut sipanja materijala. Također uređaj za izvođenje ovog laboratorijskog pokusa može biti improviziran, iako u današnje vrijeme postoje uređaji (Ph.Ashwaq, 2014).

Gdje su:

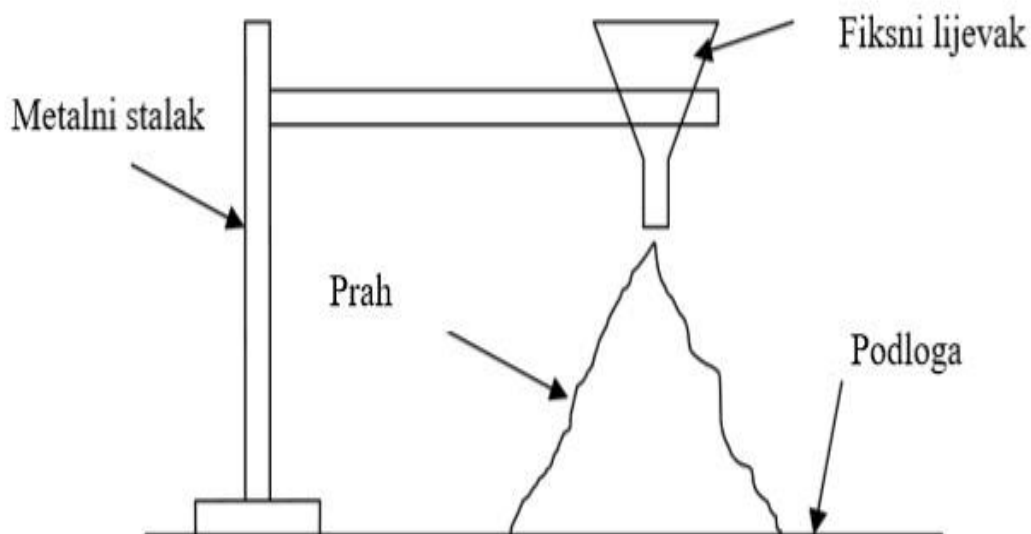
- d_1 – prvi mjereni promjer nasipanog stošca
- d_2 – drugi mjereni promjer nasipanog stošca
- d – promjer nasipanog stošca



Slika 3.5 Aparatura za metodu promjenjive visine lijevka (AraChem, 2018)

3.1.4. Metoda fiksnog lijevka

Metoda fiksnog lijevka (Slika 3.6) je metoda pomoću koje se određuje kut sipanja u stanju mirovanja (statički kut sipanja). Uređaj se sastoji od metalnog stalka na koji je pričvršćen stakleni konusni lijevak. Promjer otvora konusnog lijevka iznosi 0,9 cm s tim da je otvor konusnog lijevka udaljen od podloge 6 cm. Te udaljenosti određene su prema standardu ISO 3435/1 (eng. International Organization for Standardization). Pokus započinje zatvaranjem ispusta konusnog lijevka, te se u njega zasipava 200 g materijala. Nakon otvaranja ispusta,, materijal gravitacijskom silom pada na podlogu i tvori oblik stošca.



Slika 3.6 Shematski prikaz metode fiksnog lijevka (Bodhmage, 2006)

U ravnini lijevka se postavlja kamera, koja nakon svakog mjerenja fotografira stožasto nasipani materijal (hrpu). Kasnije se slike obrađuju u programu za izračunavanje kuta sipanja materijala „Scion image“. Pokus se ponavlja četiri puta, te se koriste aritmetičke sredine vrijednosti (Bodhmage, 2006).

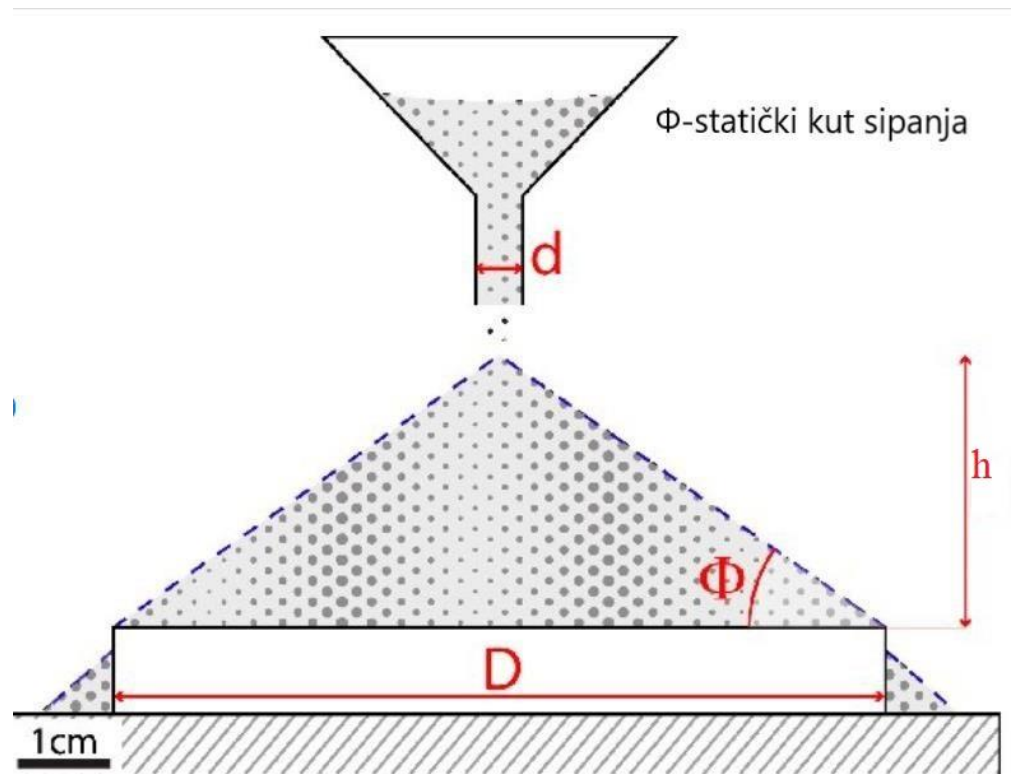
3.1.5. Metoda fiksnog postolja stošca

Metoda fiksnog postolja stošca (Slika 3.7) je metoda pomoću koje se određuje kut sipanja u stanju mirovanja (statički kut sipanja). Mjerenje se provodi na način da se materijal nasipava u lijevak, te slobodno pada gravitacijskom silom na podlogu poznatih svojstava i hrapavosti. Lijevak može biti fiksni ili promjenjive visine u svrhu formiranja konusnog ispuštanja materijala na podlogu. Sa završetkom ispuštanja, potrebno je izmjeriti promjer i visinu nasipane hrpe oblika stošca, te trigonometrijskom funkcijom inverznog tangensa izračunati kut plašta stošca što je ujedno i kut sipanja zrnatog materijala (statički) (Beakawi Al-Hashemi i Baghabra, 2018).

$$\tan^{-1} \varphi_0 = \frac{h}{r} \quad (3.11)$$

Gdje je:

- φ_0 – statički kut sipanja materijala ($^\circ$),
- h – maksimalna visina stošca (m),
- r – radijus baze stošca (m).



Slika 3.7 Metoda fiksnog postolja stošca (Montanari i dr., 2017)

Kod izrade pokusa masa materijala je standardizirana na približno 454 g. Također udaljenost ispusta od podloge je standardizirana na 3,81 cm. Pokus se ponavlja tri puta, te se za izračun i konačan rezultat uzimaju aritmetičke sredine mjerenja.



Slika 3.9 Korištena oprema u laboratoriju za kamen

Na samom početku mjerenja pomoću velikog plastičnog lijevka materijal se nasipava u plastični cilindar. Korištenjem kamenog valjka materijal se poravnava u cilindru, te se metrom mjeri visina od materijala do vrha cilindra. Izvode se tri mjerenja, te se aritmetičkom sredinom dobiva srednja vrijednost. Pomoću laboratorijske vage mjeri se masa plastične kutije u koju se kasnije zasipava materijal iz cilindra. Kutija sa materijalom se ponovno važe, te se razlikom dobiva masa uzorka u cilindru.



Slika 3.10 Slika mjerenja podiznim cilindrom

Na stolić sa iscrtanom mrežom i fotomarkerima se postavlja cilindar koji se pomoću vijaka centrira u sredinu. Ponovnim korištenjem plastičnog lijevka se materijal vraća u cilindar, te se korištenjem kamenog valjka površina uzorka u cilindru poravnava. Prenamijenjena kidalica sa kolotutom i elektromotorom podiže cilindar konstantnom brzinom sve dok se uzorak iz plastičnog cilindra ne zasipa na stolić formirajući hrpu. Nakon ručnog zaustavljanja uređaja za podizanje cilindra, dodatno se podižu i podupiru vratašca koja omogućuju dodatno podizanje cilindra i odvajanje od hrpe. To odvajanje omogućuje slikanje hrpe fotoaparatom iz različitih kutova 10-15 puta prilikom svakog mjerenja. Mjerenje se ponavlja petnaest puta za četiri različita uzorka.

Nakon svakog petnaestog mjerenja ponovno se mjeri visina od materijala do vrha cilindra, te se aritmetičkom sredinom dobiva srednja vrijednost udaljenosti. Također se nakon navedenog broja mjerenja važe materijal sa posudom, te se na temelju razlike dobiva masa materijala. Daljnje obrada kuta sipanja materijala odrađuje se na računalu korištenjem programa Agisoft PhotoScan.

3.3. Korišteni materijali i proračun mjerenja

3.3.1. Kvarcni pijesak (0,7 - 1,2 mm)

Kvarcni pijesak (Slika 3.11) je rastresita stijena nastala trošenjem i transportom silikatnih sastojaka bazičnih stijena. Glavni sastojak je mineral kvarc, a može sadržavati još i minerale glina, feldspate, muskovit, teške minerale i karbonate. Kvarcni pijesak se kao sirovina koristi u industriji (npr. industrija stakla, industrija keramike, kemijska industrija, ljevarstvo), građevinarstvu i agronomiji. Osnovna je sirovina za proizvodnju izolacijskog materijala (staklena vuna, fiberglas), vatrostalnih opeka, emajla i glazura te kemikalija na bazi silicija (silikoni). Koristi se kao punilo u proizvodnji boja i polimernih materijala te kao filtarsko sredstvo za filtraciju vode u crpnim bunarima, bazenima, pri pročišćavanju otpadne vode iz industrije, u naftnoj industriji i slično.

Ovisno o potrebi postoje razne vrste granulacija, te se za ovo ispitivanje koristila granulacija 0,7-1,2 mm. Korišteni kvarcni pijesak je opran i spaljen te se koristi za pročišćavanje vode i filtera u bazenu. Prednost mu je nepostojanje organske nečistoće, te neutralnost pH-vrijednosti (Grbeš, 2014).



Slika 3.11 Uzorak kvarcnog pijeska

3.3.2. Riječni šljunak (4 – 8 mm)

Šljunak (Slika 3.12) je akumulacija zaobljenih do dobro zaobljenih nevezanih zrna stijene ili minerala, promjera čestica od 2 do 64 mm. Također zrna šljunka (krupnozrnato tlo) mogu imati sferičan (izometričan), plosnat ili izdužen oblik. Šljunci mogu između zrna sadržavati promjenjive količine praha ili gline, te također mogu biti vezani u konglomerat (Benac, 2016).

Kod ovog mjerenja korištena je frakcija riječnog šljunka granulacije 4 – 8 mm, isprana od sitnih čestica s vodom.



Slika 3.12 Uzorak riječnog šljunka

3.3.3. Mramor (8 – 16 mm)

Mramor (Slika 3.13) je vrsta kamena koji spada u metamorfne stijene nastale kompleksnim geološkim procesima u dubinama zemljine kore. Mramorni oblutci 8-16 mm korišteni u ispitivanju se najčešće koriste za uređenje staza vrtova te uređenje terarija i ukrasnih posuda. Osim vizualnog efekta imaju i funkcionalni učinak. Smanjuje se pojavljivanje korova i sprječava gubitak vlage iz tla.



Slika 3.13 Uzorak mramora

3.3.4. Drobljeni dolomit (4 – 8 mm)

Dolomit (Slika 3.14) je kalcijsko-magnezijska karbonatna sedimentna stijena. Dolomiti nastaju u slanim sredinama iznad 100° , dok uz organizme mogu nastati u moru na velikim dubinama. U Hrvatskoj se koriste kao sirovina za građevinski materijal, magnezijev oksid, u prehrani (nedostatak kalcija i magnezija), izradi nakita, gradnji geotehničkih objekata, punila u industriji, metalurgiji.

U ovom radu koristi se drobljeni dolomit granulacije 4 – 8 mm ispran sa vodom.



Slika 3.14 Uzorak drobljenog dolomita

3.3.5. Proračun

Tablica 3.1 prikazuje ulazne vrijednosti i rezultate izračuna prije laboratorijskog mjerenja metodom podiznog cilindra. Brzina podizanja v_D konstantna je tokom cijelog mjerenja, dok se visina od vrha cilindra do materijala v_a dobiva jednostavnim izračunom aritmetičke sredine iz tri mjerenja. Visina cilindra v_c se također dobiva aritmetičkom sredinom iz tri mjerenja. Visina materijala u cilindru v_m dobiva se oduzimanjem visine od vrha cilindra do materijala v_a od visine cilindra v_c . Masa posude m_p je ulazni parametar koji se dobiva vaganjem na laboratorijskoj vagi kao i m_{p+u} . Masa uzorka dobiva se matematičkom operacijom oduzimanja, gdje se od mase posude sa uzorkom m_{p+u} oduzima masa posude m_p .

Tablica 3.1 Ulazne i izračunate vrijednosti na početku mjerenja

Početno mjerenje									
	v_D (mm/s)	v_a (cm)		v_c (cm)		v_m (cm)	m_p (g)	m_{p+u} (g)	m_u (g)
Kvarcni pijesak 0,7 – 1,2mm	4,05	13,6	13,57	40	40,33	26,76	374,8	3552,9	3178,1
		13,5		40					
		13,6		41					
Riječni šljunak 4 - 8 mm		12,0	12,1	40	40,33	28,23	374,8	4098,9	3724,1
		12,0		40					
		12,3		41					
Mramor 8 - 16 mm		13,5	13,07	40	40,33	27,26	374,8	3995,4	3620,6
		12,9		40					
		12,8		41					
Dolomit 4 - 8 mm		13,0	13,03	40	40,33	28,00	652,6	3599,5	3224,7
		13,0		40					
		13,1		41					

Nakon petnaest mjerenja (tablica 3.2) ponavljaju se mjerenja i izračuni visine od vrha cilindra do materijala v_a , visina cilindra v_c i visina materijala v_m . Također se ponavljaju mjerenja i izračuni za masu posude m_p , masu posude sa uzorkom m_{p+u} i masu uzorka m_u .

Tablica 3.2 Izračunate vrijednosti nakon 15 mjerenja

Nakon 15 mjerenja								
	v_a (cm)		v_c (cm)		v_m (cm)	m_p (g)	m_{p+u} (g)	m_u (g)
Kvarcni pijesak 0,7 – 1,2 mm	13,6		40		26,76	374,8	3551,4	3176,6
	13,6	13,57	40	40,33				
	13,5		41					
Riječni šljunak 4 - 8 mm	11,6		40		28,20	374,8	4090,6	3715,8
	12,3	12,13	40	40,33				
	12,5		41					
Mramor 8 - 16 mm	13,3		40		26,88	374,8	3910,2	3535,4
	12,9	13,45	40	40,33				
	12,8		41					
Dolomit 4 - 8 mm	12,0		40		28,00	652,6	3590,2	3215,4
	12,3	12,33	40	40,33				
	12,7		41					

4. ISPITIVANJA

Agisoft PhotoScan je napredno rješenje 3D modeliranja temeljeno na slikama, te usmjereno na stvaranje profesionalnog 3D sadržaja iz nepomične slike. Na temelju najnovije 3D tehnologije za rekonstrukciju s više prikaza, program radi s proizvoljnim slikama, te je učinkovit u kontroliranim i nekontroliranim uvjetima. Fotografije mogu biti uslikane iz bilo kojeg položaja, pod uvjetom da je objekt za rekonstrukciju vidljiv na najmanje dvije fotografije. Poravnavanje obje slike i rekonstrukcija 3D modela su potpuno automatizirani.

Krajnji cilj obrade fotografija pomoću Agisoft PhotoScan-a je izgradnja 3D površine, ortomozaika i DEM-a. Postupak obrade uključuje nekoliko koraka koji će kasnije biti detaljnije objašnjeni u četiri faze izrade.

- učitavanje slika u program
- vizualna provjera učitanih slika, te uklanjanje (gašenje) neuspješnih i mutnih slika
- poravnavanje
- izrada gustog oblaka točaka
- izrada mreže i generiranje teksture
- izrada plošnog modela, te digitalnog elevacijskog modela
- izrada ortomozaika
- izdavanje rezultata

Faze izrade:

1) Prva faza izrade je poravnavanje kamere. U prvoj fazi program traži zajedničke točke na fotografijama i podudara se s njima. Također pronalazi položaj kamere za svaku sliku i pročišćava kalibracijske parametre kamere. Kao rezultat se formira rijetki oblak točaka i skup položaja fotoaparata. Rijetki oblak točaka predstavlja rezultate poravnavanja fotografija i ne koristi se izravno u daljnjoj obradi modela (osim u metodi rekonstrukcije temeljenoj na rijetkom oblaku, što se ne preporučuje). Bez obzira što se ta metoda ne koristi, rijetki oblak se može izdvojiti za upotrebu u vanjskim programima (npr. u 3D uređivaču kao referenca). Također skup položaja kamera potreban je za daljnju 3D rekonstrukciju površine u Agisoft PhotoScan-u.

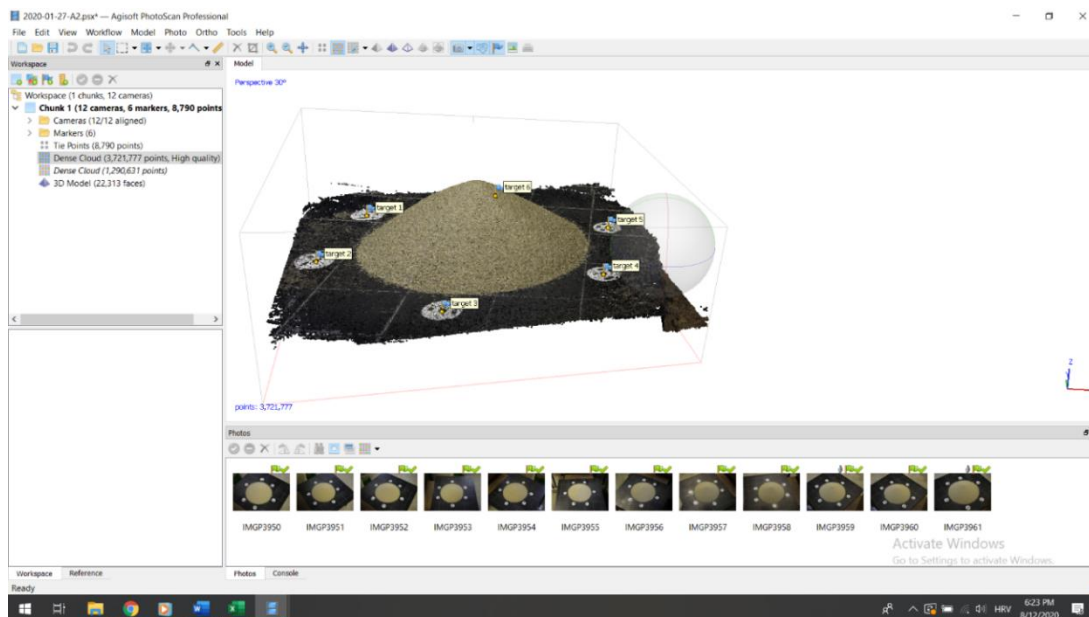
2) Druga faza je stvaranje gustog oblaka točaka koji program gradi na temelju procijenjenog položaja kamere i same slike. Gusti oblak točaka može se uređivati i klasificirati prije izdvajanja ili prelaska na sljedeću fazu.

3) Treća faza je stvaranje površine „Mesh“ i/ili „DEM“. 3D model poligonalne mreže predstavlja površinu objekta koja se temelji na gustom ili rijetkom oblaku točaka. Takva vrsta površinskog prikaza nije uvijek potrebna, te korisnik može preskočiti taj korak izrade mrežnog modela. „DEM“ je digitalni model nadmorske visine koji se može ugraditi u „Geographic, Planar ili Cylindrical Projections“ ovisno o zahtjevima korisnika. Ako je gusti oblak točaka bio klasificiran u prošloj fazi, moguće je koristiti određenu točku klase za generiranje DEM-a.

4) Nakon što se površina rekonstruira može biti teksturirana (mrežasti model) ili se može generirati ortomozaik. Ortomozaik se projicira na površini prema izborniku korisnika (DEM ili Mesh model). Korištenjem punog potencijala programa, rezultati obrade slika mogu se spremirati u bilo kojoj fazi kao datoteke i kasnije koristiti (Agisoft PhotoScan 2018).

Izrada 3D modela u programu Agisoft PhotoScan

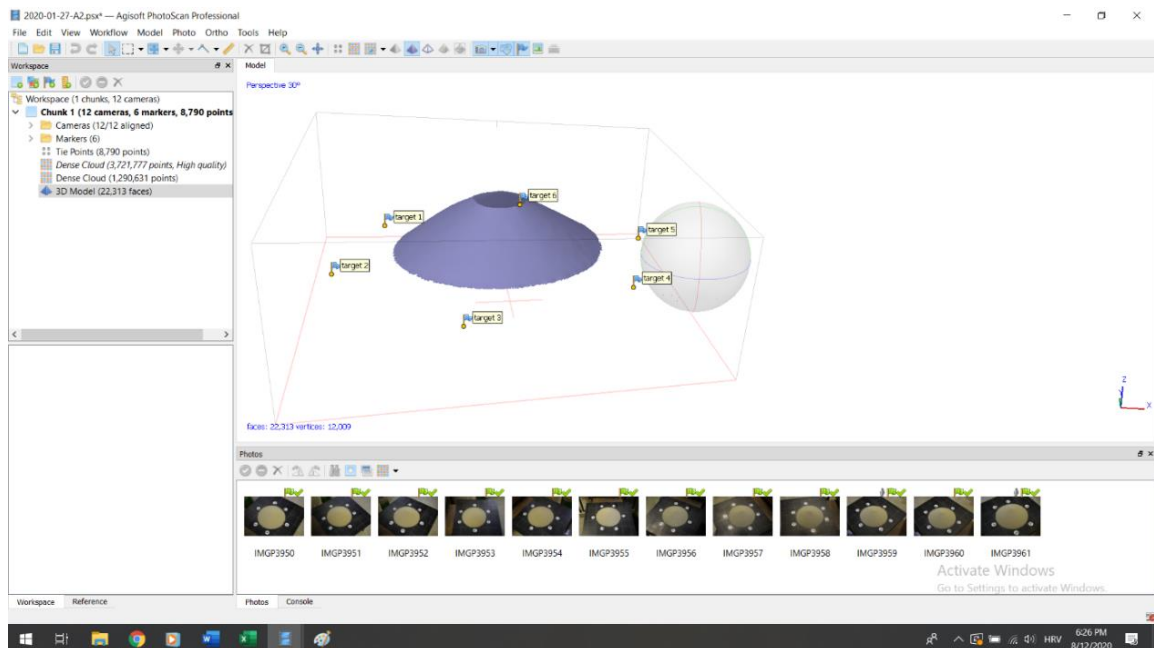
Da bi se dobila što točnija vrijednost kuta sipanja materijala, nakon laboratorijskog ispitivanja koristi se program „Agisoft PhotoScan“. Kod otvaranja programa primjećuje se radna površina, te razne alatne trake sa funkcijama. Na početku izrade 3D modela koristi se funkcija „add photo“, te se pomoću nje dodaju slike prethodno napravljene u laboratoriju. Nakon učitavanja fotografija u program, također se učitavaju i koordinate markera prethodno označenih na stoliću za slikanje. Naredba „workflow“, „align photos“ omogućuje i određuje poziciju te orijentaciju kamere za svaku učitavanu fotografiju. Fotografije je također moguće uključivati i isključivati kod poravnavanja, ovisno o dobivenom rijetkom oblaku točaka. Oblak se formira u obliku stošca, te nakon poravnavanja može biti pravilan i nepravilan, ovisno o kvaliteti prethodno učitanih fotografija. Nakon dobivenog pravilnog rijetkog oblaka točaka, potrebno je napraviti gusti oblak točaka (Slika 4.1). To se dobiva korištenjem naredbe „workflow“, te „Built Dense Cloud“. Biranjem naredbe, može se birati rezolucija i kvaliteta dobivenog oblaka.



Slika 4.1 Prikaz izrade 3D modela u programu Agisoft PhotoScan

Naredbom „model“ na alatnoj traci potrebno je izabrati opciju „top view“. Nakon toga naredbom „retriangle selection“ bira se opcija „circle selection“, te se klikom miša u sredinu oblaka radi kružnica do granice simulirane hrpe. Naredbom „crop“ se simulirana hrpa izrezuje iz ostatka. Skraćivanje gornjeg i donjeg dijela simulirane hrpe radi se zbog mogućih odstupanja točaka prilikom izrade „Dense Cloud“. Ta odstupanja nastaju zbog nepravilnosti slika koje se ubacuju u program, te se točkice mogu nalaziti iznad vrha simuliranog stošca ili ispod simuliranog dna stošca. Ponovnim biranjem naredbe „model“, te funkcije „predefined view“ i opcije „right“ dobiva se bočni prikaz simulirane hrpe. Pritiskom na desni klik miša na „Dense Cloud“ bira se opcija „duplicate“ pomoću koje se radi kopija simulirane hrpe materijala. Ponovnim desnim klikom bira se opcija „Export Dense Cloud“ i sprema u obliku „.txt“ dokumenta. Korištenjem „Python“ skripte izvan programa pokreće se simulacija u koju se dodaje „.txt“ kopirani i spremljeni „Dense Cloud“. Rješenje „Python“ skripte je „.xyz“ datoteka koja se u program dodaje naredbom „File – Import – Import Points“ u obliku „.obj“ datoteke. Na radnoj površini se prikazuju markeri i bočni prikaz simulirane hrpe, skraćene u gornjem i donjem dijelu. Hrpa se skraćuje kako bi se iz proračuna kuta sipanja uklonili dijelovi hrpe koji su nepravilni i time znatno utječu na rezultate mjerenja. Izrada mreže započinje naredbom „workflow“ i funkcijom „Build Mesh“. Na lijevoj strani zaslona „workspace“ pojavljuje se ikona „3D model“. Dobiveni 3D model je relativno neravan, te je potrebno izabrati naredbu „Tools – Mesh – Smooth Mesh“ i promijeniti veličinu opcije „strength“. Rezultat je naizgled glatka površina. Dobiveni 3D

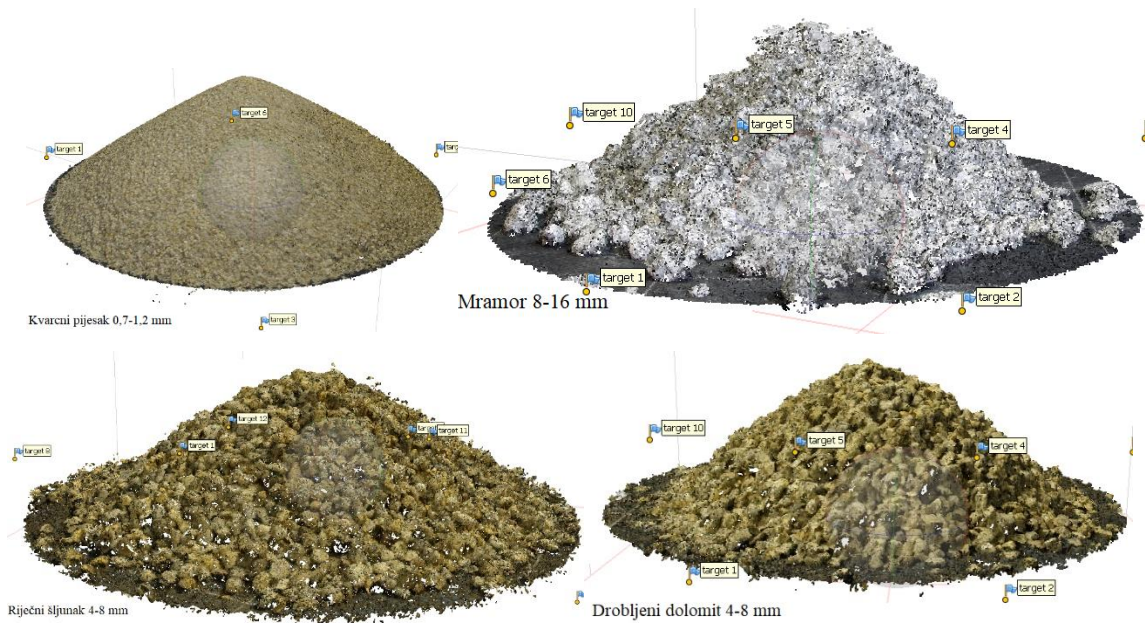
model (Slika 4.2) je potrebno spremeni, a to se postiže desnim klikom miša na „3D model“ i funkcijom „Export Model“ u obliku „.stl“ datoteke. Za vrijeme spremanja, potrebno je ugasiti opciju „Binary encoding“.



Slika 4.2 Prikaz konačnog rezultata i izgladene mreže 3D modela

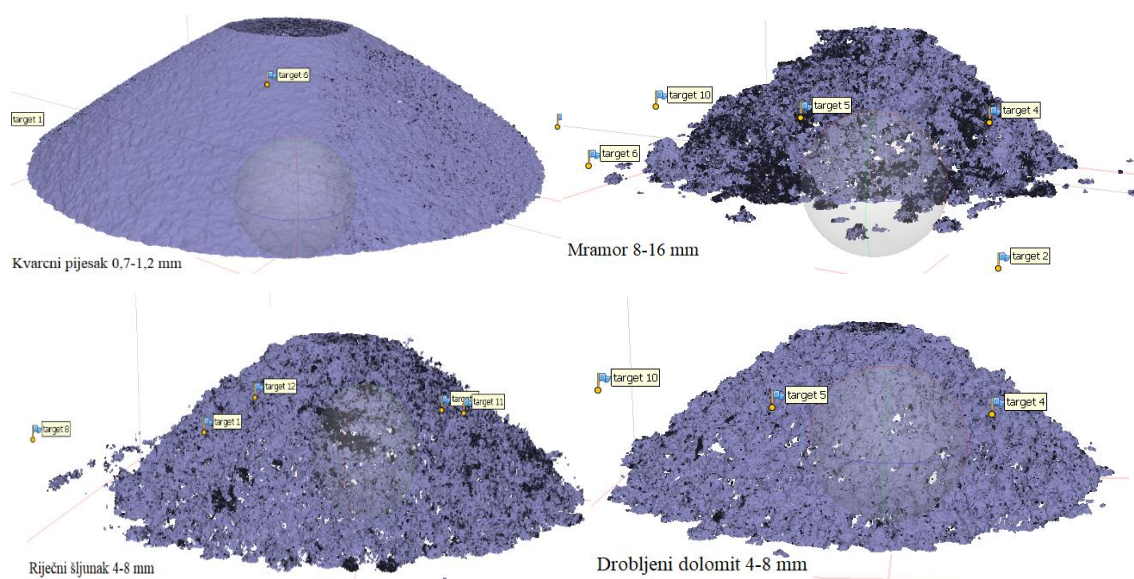
Opisano ispitivanje ponavlja se petnaest puta za četiri različita uzorka. Nakon petnaest ispitivanja pokreće se „Python“ skripta za izračunavanje kuta sipanja materijala u koju se dodaje petnaest „.stl“ datoteka. Rješenje skripte je petnaest izračunatih kuteva sipanja na osnovu petnaest dobivenih 3D modela u programu Agisoft PhotoScan.

Slika 4.3 prikazuje „Dense Cloud“ situaciju izrade 3D modela. Može se vidjeti razlika između granulacije materijala, pri čemu kvarcni pijesak ima najmanju granulaciju dok mramor ima najveću. Također se može vidjeti da su promjeri rasipanosti materijala različiti kod pojedinog materijala. Promjer rasipanosti materijala kod kvarcnog pijeska je odmah uz hrpu, dok kod mramora se materijal veće granulacije tj. većeg oblika zrna rasipava oko hrpe. Drobljeni dolomit i riječni šljunak prikazuju podjednaku rasipnost, iako se može zaključiti da je kod riječnog šljunka zbog zaobljenosti i sferičnosti zrna rasipnost malo veća.



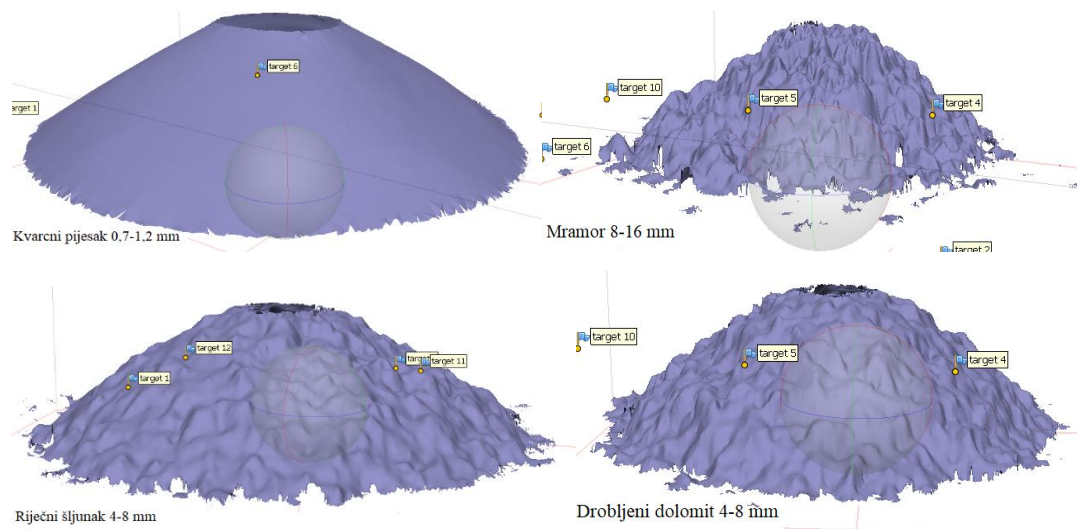
Slika 4.3 Prikaz "Dense Cloud" situacije

Slika 4.4 prikazuje „Mesh“ situaciju kod izrade 3D modela. Iz slike se može zaključiti da je mreža različito izražena na pojedinom materijalu. Kod kvarcnog pijeska se dobiva skoro pravilan stožasti oblik sa malo izraženom hrapavosti na plaštu, dok se kod mramora dobiva suprotan učinak. Mreža je nepravilna s izbočinama u plaštu, te je potrebna korekcija. Kod riječnog šljunka i drobljenog dolomita može se vidjeti forma nepravilnog stošca sa blagim izbočinama. Drobljeni dolomit i riječni šljunak pokazuju bolji oblik od mramora, ali lošiji od kvarcnog pijeska. Sa manjom granulacijom postiže se bolji izgled i forma mreže.



Slika 4.4 Prikaz izrađene mreže na pojedinom materijalu

Slika 4.5 prikazuje gotove 3D modele. Na slici se vidi je da kod kvarcnog pijeska sa najmanjom granulacijom moguće postići glatku površinu u području plašta, te je najlakše odrediti kut sipanja materijala. Potpuna suprotnost dobiva se kod mramora sa najvećom granulacijom. 3D model je potpuno neravan, iako se koristila „Smooth Mesh“ naredba kod izrade. Nešto bolje rezultate pokazuje riječni šljunak i drobljeni dolomit sa srednjim granulacijama, pri čemu se ne može vizualno odrediti koji od navedena dva je bolji. Najbolje rješenje se dobiva za malu granulaciju kvarcnog pijeska.



Slika 4.5 Prikaz gotovih 3D modela

4.1. Prikaz rezultata

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.1. Ispitivanja su provedena na četiri uzorka s tim da je na svakom uzorku ispitivanje kuta sipanja ponovljeno petnaest puta. Na temelju rezultata provedena je i statistička obrada podataka odnosno proračunata je maksimalna vrijednost kuta sipanja za svaki uzorak, *Max.*, minimalna vrijednost kuta sipanja za svaki uzorak, *Min.*, aritmetička sredina ili srednja vrijednost rezultata kuta sipanja za svaki uzorak, *Ars.*, standardna devijacija kuta sipanja za pojedini uzorak, *St.Dev.* i odstupanja maksimuma, $\Delta Max.$ i minimuma, $\Delta Min.$ Iz rezultata se vidi da povećanjem veličine čestica povećava se i kut sipanja materijala.

Tablica 4.1 Rezultati kuta sipanja

	Kvarcni pijesak	Riječni šljunak	Mramor	Dolomit
1.	32,70	37,48	49,97	48,59
2.	29,81	38,10	43,57	39,07
3.	33,45	32,84	46,64	44,91
4.	30,42	36,87	44,41	44,73
5.	33,20	38,91	44,57	45,97
6.	31,73	42,22	47,97	43,93
7.	32,62	39,28	47,70	43,78
8.	33,90	42,48	51,54	44,24
9.	32,79	38,67	35,99	45,53
10.	31,54	41,85	50,04	43,27
11.	32,87	39,15	41,57	42,01
12.	31,38	36,45	42,95	43,51
13.	30,35	38,03	43,15	45,36
14.	33,56	38,89	45,78	43,00
15.	32,13	40,19	44,11	39,88
<i>Max.</i>	33,90	42,48	51,54	48,59
<i>Min.</i>	29,81	32,84	35,99	39,07
<i>Ars.</i>	32,16	38,76	45,33	43,85
<i>St.Dev.</i>	1,26	2,46	3,91	2,35
Δ <i>Max.</i>	1,74	3,72	6,21	4,74
Δ <i>Min.</i>	2,35	5,92	9,34	4,78

Statistički pojam aritmetička sredina ili srednja vrijednost je suma svih podataka podijeljena s ukupnim brojem podataka (Papić, 2008).

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

Gdje je:

- \bar{x} – srednja vrijednost uzorka
- n – ukupan broj podataka u uzorku
- x_i – svaka pojedino očitana vrijednost u n očitavanja

Standardna devijacija je prosječno srednje kvadratno odstupanje vrijednosti neke veličine od njegove aritmetičke sredine. Da bi se povećala točnost mjerenja provedeno je petnaest mjerenja. Izraz za standardnu devijaciju je (Papić, 2008):

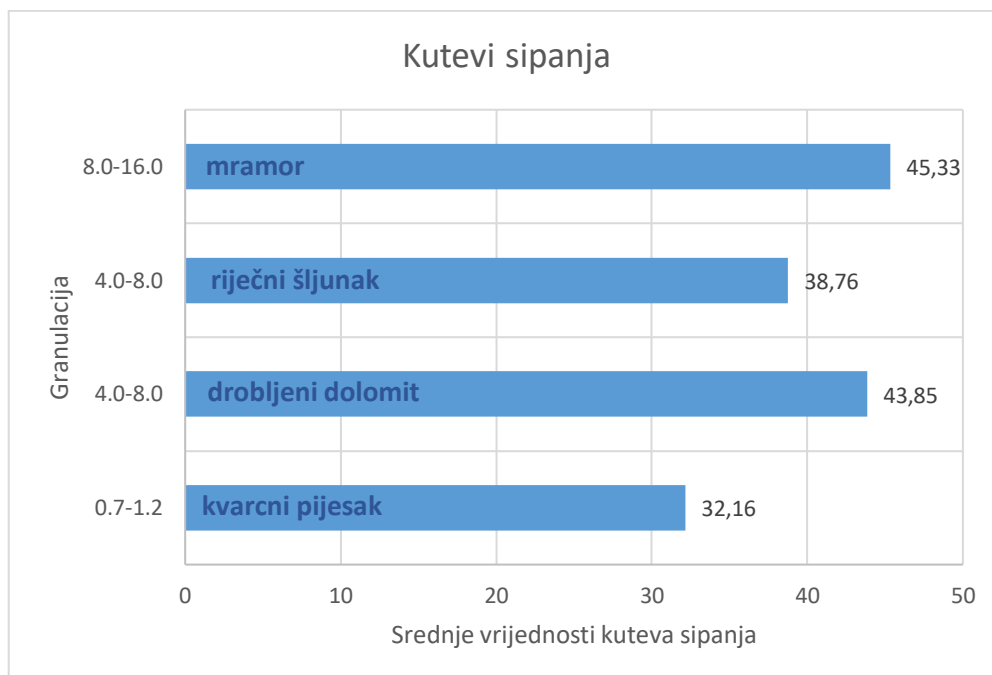
$$\sigma = \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2 \right)^{1/2} = \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^{1/2} \quad (4.2)$$

Gdje je:

- σ – standardna devijacija
- d_i – devijacija za svako očitavanje
- x_n – brojevni niz podataka

Na početku ispitivanja, prvi dio rezultata su slike zasipanog materijala dobivene u laboratoriju. Drugi dio rezultata su podaci dobiveni obradom u programu i „Python“ skripti, te priloženi u Tablica 5. Prvi materijal ispitivanja je kvarcni pijesak granulacije 0,7 – 1,2 mm opran i spaljen, te srednji kut sipanja materijala iznosi 32,16°. Drugi materijal je riječni šljunak granulacije 4 – 8 mm ispran s vodom, te srednji kut sipanja materijala iznosi 38,76°. Treći materijal ispitivanja je mramor granulacije 8 – 16 mm koji nije ispran, te srednji kut sipanja materijala iznosi 45,33°, što je ujedno i najveći kut sipanja kod ovog ispitivanja. Četvrti i zadnji materijal ispitivanja je drobljeni dolomit granulacije 4 – 8 mm ispran s vodom, te srednji kut sipanja materijala iznosi 43,85°.

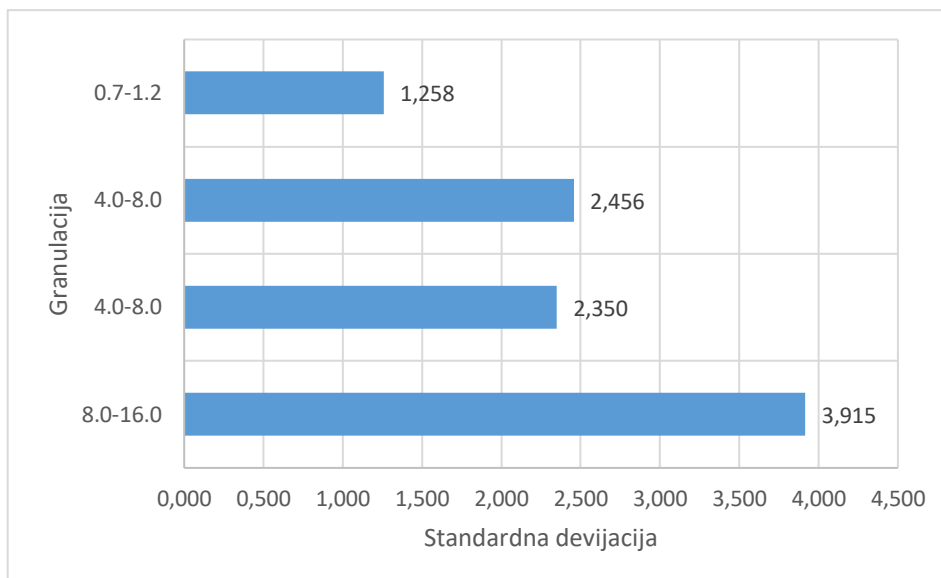
Na slici 4.6 se vidi da riječni šljunak i drobljeni dolomit imaju različit prosječan kut sipanja dok je granulacija materijala ista. Razlika između ta dva materijala je u obliku pojedinog uzorka.



Slika 4.6 Prikaz srednjih vrijednosti kuteva sipanja

Riječni šljunak ima više sferični oblik zrna, dok drobljeni dolomit ima više uglati oblik zrna. Iz tog razloga za vrijeme testiranja u laboratoriju, metodom podiznog cilindra, zrna riječnog šljunka tvore blaži srednji kut sipanja materijala ($38,76^\circ$) od srednjeg kuta sipanja drobljenog dolomita ($43,85^\circ$). Također na taj rezultat utječe i ostali parametri koji ovise o obliku zrna materijala.

Na slici 4.7 je grafički prikaz odnosa standardne devijacije prema granulaciji. Iz grafa se može vidjeti da mramor koji ima najveću granulaciju ima najveće srednje kvadratno odstupanje od srednje vrijednosti, tj. standardnu devijaciju i iznosi 3,915. Suprotno tome, kvarcni pijesak ima najmanju granulaciju u priloženom ispitivanju, te pokazuje najmanje srednje kvadratno odstupanje od srednje vrijednosti, tj. najmanju standardnu devijaciju i iznosi 1,258. Također za istu granulaciju drobljeni dolomit pokazuje standardnu devijaciju od 2,350, a riječni šljunak 2,456. Razlika između uzoraka iste granulacije je u obliku zrna, te uzorak koji ima više izraženu zaobljenost i sferičnost pokazuje veću standardnu devijaciju što je u ovom ispitivanju riječni šljunak. Obzirom da drobljeni dolomit ima više izraženu uglatost, pokazuje manje srednje kvadratno odstupanje od srednje vrijednosti tj. manju standardnu devijaciju.



Slika 4.7 Prikaz odnosa standardne devijacije prema granulaciji

5. ZAKLJUČAK

Osnovna zadaća rudarske djelatnosti je oplemenjivanje i prijevoz potrebne mineralne sirovine koja se trenutno koristi ili prerađuje, ovisno o industriji. Ovaj diplomski rad bazirati će se na fizikalnom svojstvu kuta sipanja materijala. Prirodni kut sipanja (eng. angle of repose) materijala predstavlja pravac što ga nasipani materijal zatvara sa ravninom podloge. Također je to kut kod kojeg je nasipani materijal statičan, iznad tog kuta počinje teći, a ispod tog kuta je stabilan. Hipoteza priloženog laboratorijskog diplomskog rada je metodom podiznog cilindra na četiri različita uzorka (kvarcni pijesak, riječni šljunak, mramor i dolomit) izvršiti ispitivanje u laboratoriju. Uzorci se slikaju sa različitih strana, te se kasnije rezultati laboratorijskog ispitivanja upisuju u program „Agisoft PhotoScan“ i dobivaju se trodimenzionalni modeli. Cilj ovog rada je pomoću trodimenzionalnih modela dobiti vrijednosti kuteva sipanja, te vidjeti kakav utjecaj ima oblik zrna na kut sipanja materijala.

Istraživanja različitih autora pokazala su da oblik zrna ima veliki utjecaj na kut sipanja materijala. Parametri oblika zrna koji imaju najveći utjecaj na kut sipanja su zaobljenost, sferičnost, koeficijent trenja prilikom kotrljanja, brzina podizanja cilindra. Sukladno tome kut sipanja raste povećanjem koeficijenta trenja, smanjenjem zaobljenosti i sferičnosti te povećanjem kohezije čestice. S druge strane kut sipanja materijala pada smanjenjem količine materijala, povećanjem brzine podizanja šupljeg cilindra.

6. LITERATURA

- AGISOFT LLC, 2018. Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.4
- B.-B. Dai, J. Yang, C.-Y. Zhou 2017., Micromechanical origin of angle of repose in granular materials, *Granul. Matter* 19 (2017), 24. <https://doi.org/10.1007/s10035-0170709-6>
- BEAKAWI AL-HASHEMI H.M., BAGHABRA AL-AMOUDI O.S., 2018. A review on the angle of repose of granular materials, pdf, *Powder technology*, 3(2018.)
- BENAC, Č., 2016. Riječnik pojmova u općoj i primijenjenoj geologiji
- BODHMAGE, A., 2006., *Correlation between physical properties and floability indicators for fine powders*. Master of Science, Saskatoon: University of Saskatchewan.
- CVITKOVIĆ, M.2018. Utjecaj visine uzorka na kut sipanja dolomita metodom cilindra. Diplomski rad, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- G.K.P. Barrios, R.M. de Carvalho, A. Kwade, L.M. Tavares 2013., Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling, *Powder Technol.* 248 (2013) 84–93, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.063>
- GAURA, A. 2018. *Primjena kuta sipanja i utjecaj promjera pri ispitivanju metodom cilindra*. Diplomski rad, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- GRADBENA MEHANIZACIJA, 2018. *Buldozer*. URL: <https://sites.google.com/site/gradbenamehanizacija1/home/buldozer>
- GRBEŠ, A. 2014., *Analiza ciklusa eksploatacije kvarcnog pijeska u Hrvatskoj, Doktorski rad*, Rudarsko geološko naftni fakultet, Zagreb
- GLADYSTON N., 2015. *Preformulation studies: Pgyiscochemical characterization of new drug molecules*. URL: <https://www.slideshare.net/GladystonNetto/preformulation-studies61784366>
- H. WADELL 1932., Volume, shape, and roundness of rock particles, *J. Geol.* 40 (1932) 443–451, <https://doi.org/10.1086/623964>
- HRVATSKA ENCIKLOPEDIJA. 2018., *Stereofotogrametrija.*, URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=58027>
- J.T. Botz, C. Loudon, J.B. Barger, J.S. Olafsen, D.W. Steeples 2003., Effects of slope and particle size on ant locomotion: implications for choice of substrate by antlions, *J. Kansas Entomol. Soc.* 76 (2003) 426–435, <http://www.jstor.org/stable/25086130>
- J. Zheng, R.D. Hryciw 2015., Traditional soil particle sphericity, roundness and surface roughness by computational geometry, *Géotechnique* 65 (2015) 494–506, <https://doi.org/10.1680/geot.14.P.192>

K. Miura, K. Maeda, S. Toki 1997., Method of measurement for the angle of repose of sands, *Soils Found.* 37 (1997) 89–96, <http://ci.nii.ac.jp/naid/110003946069/en/>

KLANFAR M., KUJUNDŽIĆ T., VRKLJAN D., 2014. *Analiza proračuna učinka dozera pri gravitacijskom transportu na površinskim kopovima.* (2014)

KOPUNIĆ, M.2019. Metode ispitivanja kuta sipanja i ponvljivost rezultata metodom cilindra. Diplomski rad, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

KORMAN T., n.d., *Proračun transportera s beskonačnom trakom.* Vježbe, Rudarski i geotehnički strojevi, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

KOSTRIĆ S., 2018. *Određivanje kuta stošca pri ispitivanju kuta sipanja metodom cilindra.* Diplomski rad, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

KUJUNDŽIĆ, T., 2010. *Fizikalna svojstva materijala.* Predavanja: Transport i izvoz, Zagreb: Rudarsko geološko naftni fakultet

LIU, Z. 2008. *Measuring the angle of repose of granular systems using hollow cylinders.* Master Thesis, University of Pittsburgh, Pennsylvania, USA.

LUMAY, G., BOSCHINI, F., TRAINA, K., BONTEMPI, S., REMYR, J.-C., CLOOTS, R., VANDEWALLE, N. 2012. *Measuring flowing properties of powders and grains*

M.C. POWERS 1953., A new roundness scale for sedimentary particles, *SEPM J. Sediment. Res.* 23 117–119, <https://doi.org/10.1306/D4269567-2B26-11D78648000102C1865D>

MITCHELL.J, SOGA.K. 2005., *Fundamentals of Soil Behavior (Third Edition)*

MONTANARI, D., AGOSINI, A., BONINI, M., CORTI, G., DEL VENTISETTE, C., 2017. *The Use of Empirical Methods for Testing Granular Materials in Analogue Modelling*

PAPIĆ, M.,2008, *Primijenjena statistika u MS Excelu:* Naklada Zoro, Zagreb, 2008.

K. SENETAKIS, M.R. COOP, M.C. TODISCO 2013., The inter-particle coefficient of friction at the contacts of Leighton Buzzard sand quartz minerals, *Soils Found.* 53 746–755, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.08.012>.

SREMEC, J. *Tehnički kamen i druge nemetalne mineralne sirovine,* Predavanje: Primjenjena paeontologija, Prirodoslovno matematički fakultet, Zagreb, URL: http://geol.pmf.hr/~jsremac/predavanja/primijenjena_paeontologija/12_tehnicki_kamen.pdf

TSAKALAKIS K.G., MICALAKOPOULOS TH., 2015. *Mathematical modeling of the conveyor belt capacity.* National Technical University of Athens

ZHANG D., INOUE N., SASAOKA T., SHIMADA H., HAMANAKA A., MATSUI K., 2014. Study of formation mechanism od dumping piles on dumping area stability. *Open Journal of Geology*, 4(2014)