Primjena kuta sipanja i utjecaj promjera pri ispitivanju metodom cilindra

Gaura, Antonela

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:857118

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij rudarstva

PRIMJENA KUTA SIPANJA I UTJECAJ PROMJERA PRI ISPITIVANJU METODOM CILINDRA

Diplomski rad

Antonela Gaura

R-173

Zagreb, 2018.

Sveučilište u Zagrebu Diplomski rad

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

PRIMJENA KUTA SIPANJA I UTJECAJ PROMJERA PRI ISPITIVANJU METODOM CILINDRA

ANTONELA GAURA

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Zavod za rudarstvo i geotehniku

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

U ovom radu objašnjena je široka primjena kuta sipanja u raznim područjima. Cilj rada je utvrditi utjecaj promjera cilindra na kut sipanja materijala. Provedena su laboratorijska ispitivanja na 6 različitih promjera cilindra pomoću dvije metode. Prva metoda odnosi se na uvijek istu visinu uzorka, a druga na isti omjer visine i promjera. Nakon ispitivanja rađena je regresijska analiza te usporedba dobivenih grafičkih podataka.

Ključne riječi: rudarsrtvo, kut sipanja, metoda cilindra, promjer cilindra

Diplomski rad sadrži: 39 stranica, 3 tablice, 32 slike, 14 referenci i 1 prilog

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr.sc. Mario Klanfar, docent

Pomoć pri izradi: Mag.ing. Vjekoslav Herceg, asistent RGNF

Ocjenjivači: Dr.sc. Mario Klanfar, docent RGNF

Dr.sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF

Dr.sc. Tomislav Korman, docent RGNF

Datum obrane: 28.9.2018., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Master`sThesis

APPLICATION OF THE ANGLE OF REPOSE AND INFLUENCE OF DIAMETER IN CYLINDER METHOD TESTING

ANTONELA GAURA

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering
Institute of Mining and Geotechnical Engineering
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

This thesis shows various application of the angle of repose. The aim of the thesis is to determine the influence of cylinder diameter on the angle of repose of the material. Laboratory tests were carried out on 6 differenet cylinder diameters using two conditions of research. The first condition applies to constant hight of the sample and the second to constant height and diameter ratio. A regression analysis was performed after the tests and a comparison of the obtained graphical data is shown.

Keywords: mining, angle of repose, cylinder method, cylinder diameter

Thesis contains: 39 pages, 3 tables, 32 figures, 14 references and 1 attachment

Original in: Croatian

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

Supervisor: PhD Mario Klanfar, Assistant Professor

Assistance: Mag. ing. min. Vjekoslav Herceg, Assistant

Reviewers: PhD Mario Klanfar, Assistant Professor
PhD Dubravko Domitrović, Assistant Professor
PhD Tomislav Korman, Assistant Professor

Date of defense: September 28, 2018, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ I
POPIS TABLICA II
POPIS SLIKA III
POPIS PRILOGA III
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA IV
1. UVOD 1
2. METODA CILINDRA 2
2.1 KUT SIPANJA MATERIJALA 2
2.2. METODA CILINDRA 3
3. PRIMJENA KUTA SIPANJA 5
3.1. PRIMJENA KUTA SIPANJA U RUDARSTVU 5
3.1.1.TRANSPORTNE TRAKE 7
3.1.2. DEPONIJI 9
3.1.3. KOEFICIJENT PUNJENJA LOPATE UTOVARIVAČA 10
3.1.4. SANDUK KAMIONA 12
3.1.5. VOLUMEN NOŽA DOZERA 17
3.2. PRIMJENA KUTA SIPANJA U DRUGIM PODRUČJIMA 19
3.2.1. POLJOPRIVREDA 19
3.2.2. ETNOMOLOGIJA 20
3.2.3. GEOTEHNIČKO INŽENJERSTVO 21
3.2.5. TEHNOLOGIJA ČESTICA I ZNANOST O MATERIJALIMA 24
3.2.6. OSTALA PRIMJENA 26
4. STATISTIKA – REGRESIJSKA ANALIZA 28
5. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA 31
6. REGRESIJSKA ANALIZA 35
7. ZAKLJUČAK 37
LITERATURA 38

POPIS TABLICA

Tablica 3-1. Tipični troškovi površinske eksploatacije (Lang R., 2010.) 12
Tablica 3-2. Primjer odnosa volumnih gustoća materijala (Lang R., 2010.) 12
Tablica 3-3. Različiti kutevi sipanja (Lang R., 2010.): 16

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Metoda fiksnog lijevka (a) i metoda fiksnog stošca (b) (Gladyston, 2015)..... 3

Slika 2-2. Metoda nagnute kutije (c) i metoda rotirajućeg cilindra (d) (Gladyston, 2015)... 3

Slika 3-1. Stijenka masa prije i poslije iskopa (Korman, 2009)..... 6

Slika 3-2. a) statički kut sipanja materijala, b) dinamički kut sipanja materijala (Tsakalakis i Micalakopoulos, 2015)..... 7

Slika 3-3. Utjecaj dodatnih karakteristika materijala na sipkost materijala i kapacitet transportne trake (Tsakalakis i Micalakopoulos, 2015)..... 8

Slika 3-4. Buldozer (Zhang i dr., 2014)..... 10

Slika 3-5. Utjecaj kuta sipanja na koeficijent punjenja lopate (Singh i Narendrula, 2006) 11

Slika 3-6. Kut sipanja i udaljenost zahvata lopate (Singh i Narendrula, 2006)..... 11

Slika 3-7. Skeniranje i mjerenje praznih i punih sanduka kamiona (Lang, 2010) 13

Slika 3-8. Prikaz SAE 2:1 volumena (Lang, 2010) 14

Slika 3-9. Prikaz razlike u volumenu s različitim kutovima sipanja (Lang, 2010) 14

Slika 3-10. Utjecaj na istaknuti volumen promjenom kuta sipanja (Lang, 2010)..... 15

Slika 3-11. Prikaz naslaganog materijala (Lang, 2010)..... 15

Slika 3-12. 244 tone u sanduku s ciljanom nosivošću od 240 tona (Lang,2010)..... 16

Slika 3-13. Utjecaj zakrivljenosti noža na volumen utovara (Klanfar i dr., 2014)..... 18

Slika 3-14. Utjecaj sadržaja vlage na kut sipanja različitih vrsta pšenice. (Beakawi Al-Hashemi i Baghabra Al-Amoudi, 2018)..... 19

Slika 3-15. Kut sipanja mravinjaka (Beakawi Al-Hashemi i Baghabra Al-Amoudi, 2018) 20

Slika 3-16. Uloga kuta sipanja u stabilnosti kosina (Beakawi Al-Hashemi i Baghabra Al-Amoudi, 2018)..... 21

Slika 3-17. Ilustracija gubitka mase i odrona kamenja zbog prekoračenja kuta sipanja (Beakawi Al-Hashemi i Baghabra Al-Amoudi, 2018) 22

Slika 3-18. Opravdanost potpornog zida koristeći kut sipanja (Beakawi Al-Hashemi i Baghabra Al-Amoudi, 2018) 22

Slika 3-19. Kut sipanja *barchan* dina (Beakawi Al-Hashemi i Baghabra Al-Amoudi, 2018) 26

Slika 3-20. Rotirajući cilindri smješteni u avionu za mjerenje kuta sipanja pri niskoj gravitaciji. (Beakawi Al-Hashemi i Baghabra Al-Amoudi, 2018)..... 27

Slika 4-1. Pozitivna funkcionalna veza 30

Slika 4-2. Negativna statistička veza..... 31

Slika 4-3. Nema veze među pojavama 31

Slika 5-1. Cilindri za ispitivanje 32
Slika 5-2. Shema uređaja (Kostrić, 2018) 32
Slika 5-3. Formirana hrpa materijala nakon podizanja cilindra 33
Slika 5-4. Prikaz slojnica u Microstationu 34
Slika 5-5. Zatvorena mreža slojnica u tlocrtu i izometričnom pogledu 34
Slika 6-1. Zavisnost kuta sipanja o promjeru cilindra 35
Slika 6-2. Kut sipanja za dvije metode ispitivanja 36

POPIS PRILOGA

Prilog 1 Excel tablica provedenih ispitivanja

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	-
h_1	visina cilindra	m
V_1	volumen cilindra	m^3
V_2	volumen stošca	m^3
r	polumjer cilindra	m
h_s	visina stošca	m
a	veličina zrna	mm
ρ	gustoća neporemećene mase	kg/m^3
ρ_r	naspina gustoća	kg/m^3
k_r	koeficijent rastresitosti	-
V_r	volumen iskopanog materijala	m^3
V_m	volumen materijala u masivu	m^3
V	volumen trostrane prizme	m^3
h	visina noža	m
l	širina noža	m
k	popravni koeficijent	-
c	zakrivljenost noža	m
d	promjer čestice	mm
ρ_t	gustoća nakon potresivanja	kg/m^3

1. UVOD

Osnovna zadaća rudarstva je da proizvodi i dostavlja industriji potrebne količine mineralne sirovine koja se izravno koristi ili se daljnjim postupcima prerađuje u poluproizvode koje druge industrijske grane koriste pri izradi konačnog proizvoda. Za uspješno obavljanje površinske ili podzemne rudarske djelatnosti potrebno je pravilno procijeniti niz parametara koji se odnose na eksploataciju mineralne sirovne. U osnovne tehnološke operacije ubrajamo bušenje, miniranje, otkopavanje bagerima, oplemenjivanje, transport te odlaganje mineralne sirovine i jalovine. Za uspješno određivanje svih parametara u pojedinoj tehnološkoj fazi moraju se odrediti ili poznavati fizikalna svojstva materijala. Najbitnija fizikalna svojstva su prirodni kut sipanja materijala, kut trenja materijala na različitim plohama, masa i rastresitost, granulometrijski sastav, hidrofizička svojstva, te općenito stanje, stupanj abrazivnosti, krtosti i slično. U ovom diplomskom radu najviše pažnje posvetiti će se upravo prirodnom kutu sipanja materijala određivanog pomoću metode cilindra. Svrha i cilj ovog diplomskog rada je nakon provedenih istraživanja u laboratoriju utvrditi zavisnost prirodnog kuta sipanja o promjeru cilindra i dati pregled primjene kuta sipanja.

2. METODA CILINDRA

2.1 KUT SIPANJA MATERIJALA

Kut sipanja granuliranog materijala je najstrmiji kut u odnosu na horizontalnu površinu na koju se materijal može nagomilati bez pojave klizanja materijala. Može iznositi od 0° do 90° te se materijal slaže u gomilu približno stožastog oblika. Različite morfologije materijala utječu na različitost kuta sipanja. Veličina kuta sipanja ovisi o glatkoći, veličini komada, obliku, vlažnosti, temperaturi, sastavu i stanju materijala te načinu sipanja. Kut je manji ukoliko se materijal sipa s veće visine i ako je pokretljivost pojedinih čestica materijala veća.

Prirodni kut sipanja odnosi se na unutarnji kut trenja materijala za vrijeme gibanja materijala ili pri mirovanju. Kada se materijal sipa s veće visine postiže veću brzinu te bolje skliže po površini stošca. U tom slučaju kut odgovara prirodnom kutu sipanja za vrijeme gibanja. Analitički izraz dinamičkog kuta sipanja (2-1):

$$tg\varphi \approx \mu \tag{2-1}$$

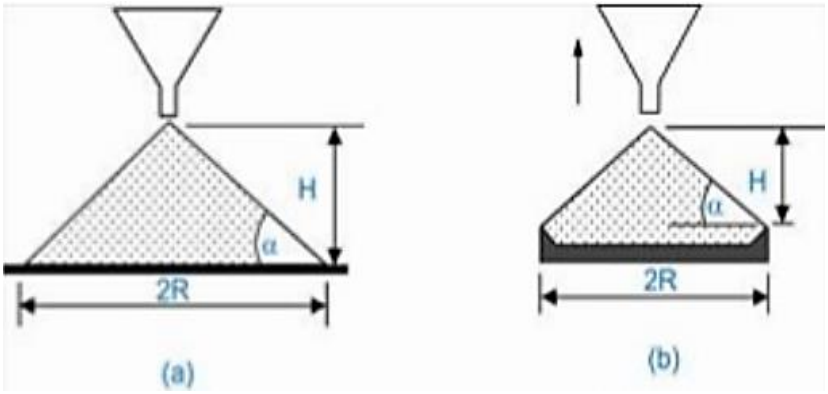
Gdje je μ koeficijent trenja materijala po materijalu.

Obrnuto od toga, ukoliko se materijal sipa s manje visine te ne dolazi do odskakanja materijala na obodu stošca taj kut odgovara koeficijentu trenja čestica materijala pri mirovanju. Analitički izraz statičkog kuta sipanja (2-2) (Kujundžić, 2010)

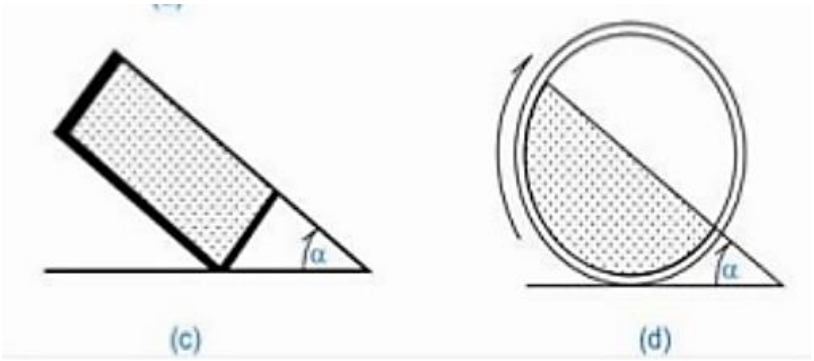
$$tg\varphi_0 \approx \mu_0 \tag{2-2}$$

Gdje je μ_0 statički koeficijent trenja materijala po materijalu.

U metode određivanja statičkog kuta sipanja ubrajamo metodu fiksnog lijevka (a) i metodu fiksnog stošca (b) prikazanih na slici 2-1. Metodu nagnute kutije (c) i metodu rotirajućeg cilindra (d) ubrajamo u metode određivanja dinamičkog kuta sipanja materijala prikazanih na slici 2-2. (Gladyston, 2015)



Slika 2-1. Metoda fiksnog lijevka (a) i metoda fiksnog stošca (b) (Gladyston, 2015)



Slika 2-2. Metoda nagnute kutije (c) i metoda rotirajućeg cilindra (d) (Gladyston, 2015)

2.2. METODA CILINDRA

U cilindar bez dna, visine 1m i površine 1m^2 usipa se materijal. Sljedeći korak je lagano podizanje cilindra prilikom čega materijal postepeno zauzima oblik stošca. Prema formuli G.W.Köhlera prikazujemo izraz za kut nagiba boka:

$$tg\varphi_0 \approx \sqrt{h^3} \tag{2-3}$$

Izvod izraza (2-3):

Volumen cilindra: $V_1 = {r_1}^2 \cdot \pi \cdot h_1 = 1\ m^3$

Volumen stošca: $V_2 = \frac{r^2 \cdot \pi \cdot h_s}{3} = 1\ m^3$

Uz pretpostavku da je gustoća materijala u stošcu i gustoća nasipanog materijala ista vrijedi:

$V_1 = V_2$ $\qquad$ $r_1{}^2 \cdot \pi \cdot h_1 = \frac{r^2 \cdot \pi \cdot h}{3}$

Za $r_1{}^2 \cdot \pi \rightarrow$ površina dna = 1 m^2, visinu h_1 = 1 m $\rightarrow$ volumen cilindra iznosi 1 m^3

Volumen stošca, tj. rasutog materijala je također 1 m^3:

$$\frac{r^2 \pi \cdot h}{3} = 1 \qquad \rightarrow \qquad r^2 \, \pi \cdot h = 3 \tag{2-4}$$

Iz izraza (2-3) vidimo da je:

$$tg\varphi_o = \frac{h}{r} \qquad \rightarrow \qquad r = \frac{h}{tg\varphi_o} \tag{2-5}$$

Uvrštavanjem izraza (2-5) u izraz (2-4) dobije se:

$$\frac{h^2}{tg^2\varphi_o} \cdot \pi \cdot h = 3 \;\rightarrow\; h^3 \cdot \pi = 3\, tg^2\, \varphi_o \;\rightarrow tg^2\varphi_o = \frac{\pi}{3} \cdot h^3 \;\rightarrow\; tg\varphi_o = \sqrt{\frac{\pi}{3}} \cdot \sqrt{h^3}$$

Uzimajući da je zaokruženo $\sqrt{\frac{\pi}{3}} = 1$, (točno 1,0233267) dobije se konačni izraz:

$$tg\varphi_o \approx \sqrt{h^3} \tag{2-6}$$

Odnos dimaničkog i statičkog kuta sipanja dan je izrazom (2-7):

$$\frac{\varphi}{\varphi_o} \approx 0{,}7 \tag{2-7}$$

Iskustveno je utvrđeno da neklasirani materijal čini veći prirodni kut sipanja od klasiranog. Prirodni kut sipanja klasiranog materijala najčešće iznosi od 35º do 45º s time da se veći kut uzima kod stanja mirovanja, a manji pri gibanju materijala. (Kujundžić, 2010)

3. PRIMJENA KUTA SIPANJA

Primjenu kuta sipanja susrećemo u raznim tehničkim, ali i drugim područjima ljudske djelatnosti i same prirode. Kut sipanja primjenuje se u područjima poput transporta i skladištenja dobara, stabilnosti kosina, formacijama dina, kod primjene rasutog tereta, planinarenju, farmaciji, fizici, geologiji, agronomiji, rudarstvu i geotehničkom inženjerstvu. Kut sipanja spada u relativno suvremeno područje istraživanja. Daljnjim istraživanjima želi se doći do što većeg broja točnih podataka o kutu sipanja i njegovoj primjeni.

3.1. PRIMJENA KUTA SIPANJA U RUDARSTVU

Svojstva koja se ispituju pri karakterizaciji rastresitog materijala su granulometrijski sastav, gustoća, prirodan kut sipanja, unutarnje trenje između čestica materijala, statičko i dinamičko vanjsko trenje, tvrdoća, osjetljivost na drobljenje, promjena svojstava uslijed vibracija, temperature, vode ili vlage, adhezija, plastičnost te elektrostatička svojstva.

Od navedenih svojstava, pored kuta sipanja u narednom tekstu biti će detaljnije objašnjena granulacija, nasipna gustoća i koeficijent rastresitosti.

Granulacija je numerička definicija čestica materijala prema njihovoj veličini. Veličina pojedine čestice definirana je maksimalnom vrijednošću dimenzije mjerene dijagonalom kvadra kao konture čestice. Transportirani materijal je sortiran ako je :

$$\frac{a_{max}}{a_{min}} < 2{,}5 \qquad a^* = \frac{a_{max}+a_{min}}{2} \qquad (3\text{-}1)$$

Materijal je nesortiran ako je :

$$\frac{a_{max}}{a_{min}} > 2{,}5 \qquad a^* = a_{\max=} \sqrt[3]{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3} \qquad (3\text{-}2)$$

Gdje je a* prosječna veličina zrna. (Kulinowski i Ksaza, 2014)

Nasipna gustoća je masa jediničnog volumena iskopanog materijala, tj. stijene u rastresitom stanju:

$$\rho_r = \rho / k_r \tag{3-3}$$

Gdje je: ρ – gustoća neporemećene mase

k_r – koeficijent rastresitosti

Koeficijent rastresitosti numerički se prikazuje na sljedeći način:

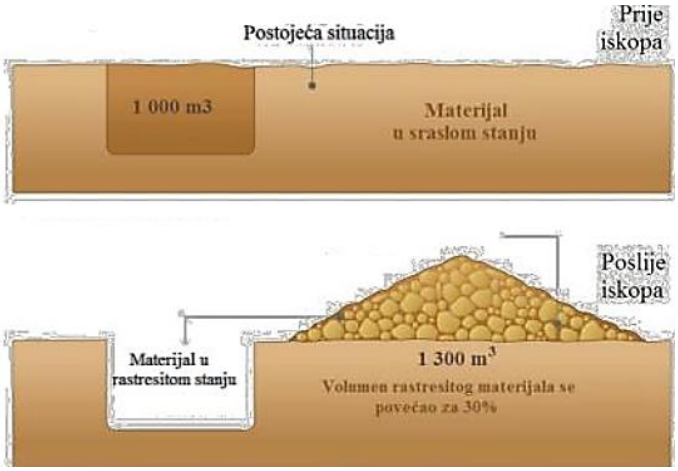
$$k_r = V_r / V_m = \rho / \rho_r \tag{3-4}$$

Gdje je : V_r – volumen iskopanog materijala (u rastresitom stanju)

V_m – volumen materijala u masivu

$V_r > V_m$ (20-60%)

Koeficijent rastresitosti odnosi se na porni prostor materijala kao što je prikazano na slici 3-1. (Korman, 2009)



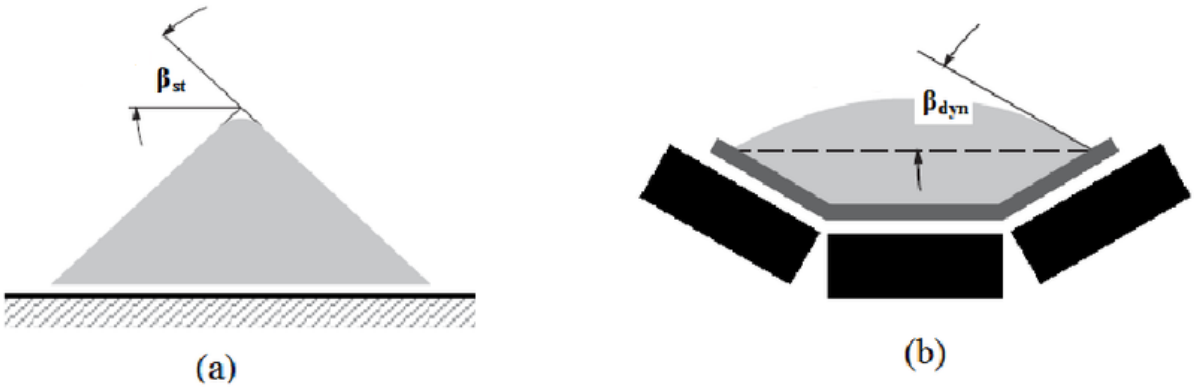
Slika 3-1. Stijenka masa prije i poslije iskopa (Korman, 2009)

3.1.1.TRANSPORTNE TRAKE

Transportne trake koriste se za transport sipkog materijala pretežito horizontalno ili pod kutom. Kut sipanja materijala u mirovanju na pokretnoj transportnoj traci obično je 5-15º manji od prirodnog kuta sipanja. Kod nekih materijala može biti i do 20º manji od prirodnog kuta sipanja.

Prikladno projektiranje transportnih traka zahtjeva poznavanje karakteristika materijala s kojim se radi jer ponašanje istog materijala tijekom transporta znatno utječe na kapacitet i dimenzioniranje transportnih traka. Opći izraz za kapacitet transportnih traka izražen je u tonama po satu (t/h) ili u m^3/h i funkcija je širine trake, kuta nagiba bočnih strana trake i horizontalnog dijela, dinamičkog kuta sipanja β_{din} transportiranog materijala te brzine kretanja trake. Ukoliko se bilo koji od ovih parametara promijeni izravno će utjecati na kapacitet transportne trake.

Ispravno projektiranje transportnog sustava započinje procjenom fizikalno-mehaničkih karakteristika transportiranog materijala te posebno statičkog kuta sipanja β_{st} formirane hrpe materijala i dinamičkog kuta sipanja β_{din} materijala u mirovanju na podlozi koja se kreće prikazanih na slici 3-2.



Slika 3-2. a) statički kut sipanja materijala, b) dinamički kut sipanja materijala (Tsakalakis i Micalakopoulos, 2015)

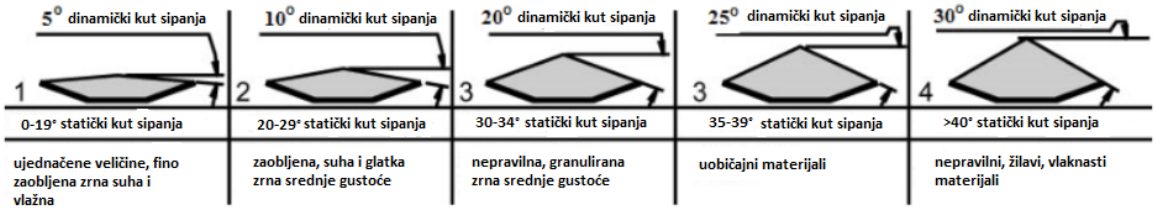
Kut sipanja daje direktne naznake o sipkosti materijala i utjecaju podloge. Što je podloga glađa kut sipanja je manji. Povećani sadržaj vlage povećava i kut sipanja. Dinamički kut sipanja materijala koji se kreće na podlozi ovisi najviše o trenju između materijala i površine trake, načinu na koji je materijal natovaren i geometriji transportne trake.

Približan odnos između statičkog i dinamičkog kuta sipanja prikazan je u izrazu (3-5):

$$\beta_{din} = (0.5\text{-}0.9) \cdot \beta_s \tag{3-5}$$

Druge bitne karakteristike materijala koji se transportira su sadržaj vlage, oblik čestica, hrapavost površine, praškavost, kohezija i adhezija, abrazivnost i kemijska korozivnost. Sadržaj vlage materijala mjeren u postocima po težini ima značajan utjecaj na dinamički kut sipanja, trenje između čestica materijala i trake te na maksimalan kut nagiba transportne trake.

Međutim, najvažnija karakteristika materijala je veličina agregata jer izravno utječe na brzinu i širinu trake. Uobičajna praksa je da je maksimalna veličina agregata jedna petina širine trake pri dinamičkom kutu sipanja od 20° ili jedna desetina širine trake ukoliko je dinamički kut sipanja do 30°. Na slici 3-3. prikazane su karakteristike materijala koje utječu na sipkost materijala i kapacitet transportne trake. (Tsakalakis i Micalakopoulos, 2015)



Slika 3-3. Utjecaj karakteristika materijala na sipkost materijala i kapacitet transportne trake (Tsakalakis i Micalakopoulos, 2015)

3.1.2. DEPONIJI

Različiti radovi istovara materijala na deponijima imaju različita izvedbena i geotehnička rješenja. Na primjer, efikasnost pri istovaru materijala pomoću rotornog bagera s tračnim transporterom i odlagačem je mala. Na odlagalištima pomoću bager-kamion-buldozer sustava prikazanog na slici 3-4. dolazi do velikog slijeganja materijala stoga veliki kamioni ne mogu raditi na takvim područjima. U područjima s radom dreglajna visina etaža je velika te postoji opasnost od klizišta što utječe na sigurnost ljudi i opreme.

Neki od parametara koji su u međusobnoj zavisnosti prilikom odabira sustava za odlaganje su granulacija kapacitet deponija te sigurnosna udaljenost od kotrljajućeg kamenja. Ukoliko postoji opasnost od kotrljajućeg kamenja miniranjem se veličina blokova usitnjava radi veće stabilnosti hrpe materijala i sigurnosti okoline. Kapacitet odlagališta se smanjuje, a sigurnosna udaljenost kotrljajućeg kamenja se povećava s povećanjem veličine čestica materijala. Kapacitet odlagališta je makismalan i sigurnosna udaljenost od kotrljajućeg kamenja je minimalna u sustavima rotorni bager-tračni transporter-odlagač. Učinak bager-kamion-istresač sustava je na srednjoj razini. U operacijama dreglajnom, kapacitet odlagališta je minimalan, a sigurnosna udaljenost maksimalna.

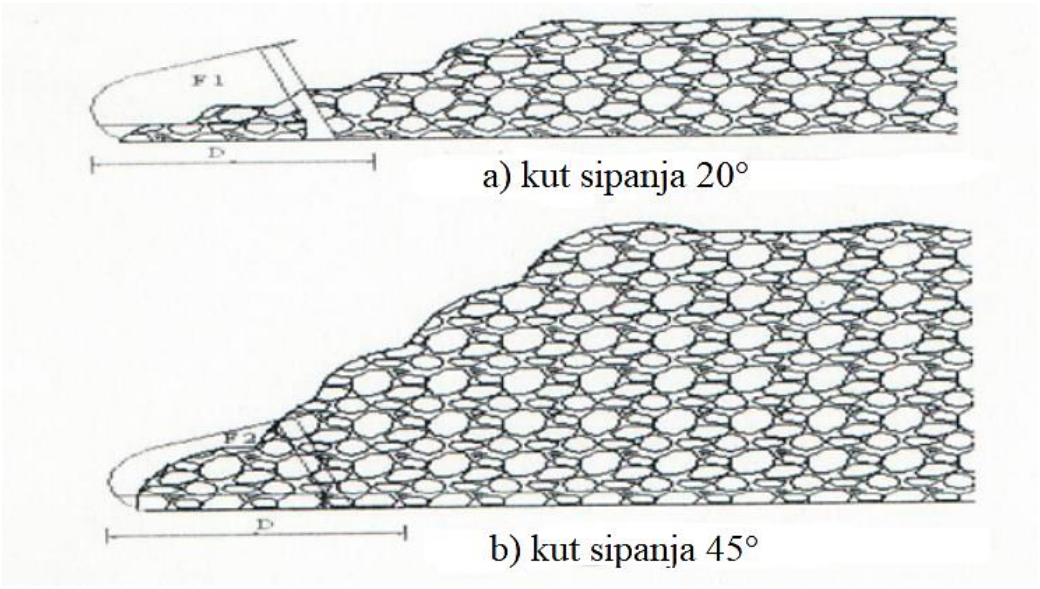
Veličina lopate nema izražen utjecaj na kut sipanja deponiranog materijala, kapacitet deponirane hrpe ni na stabilnost deponija. U postupku odabira područja odlaganja materijala bira se područje s najmanjim nagibom tla. Predlažu se dvije metode za povećanje stabilnosti područja odlaganja. Prva je da se ukloni rastresita zemlja i sva postojeća vegetacija kako bi podloga bila čvrsta. Druga metoda je da površina podloge odlaganja postane gruba miniranjem što može spriječiti tlo da se ponaša kao klizna ploha. (Zhang i dr., 2014)



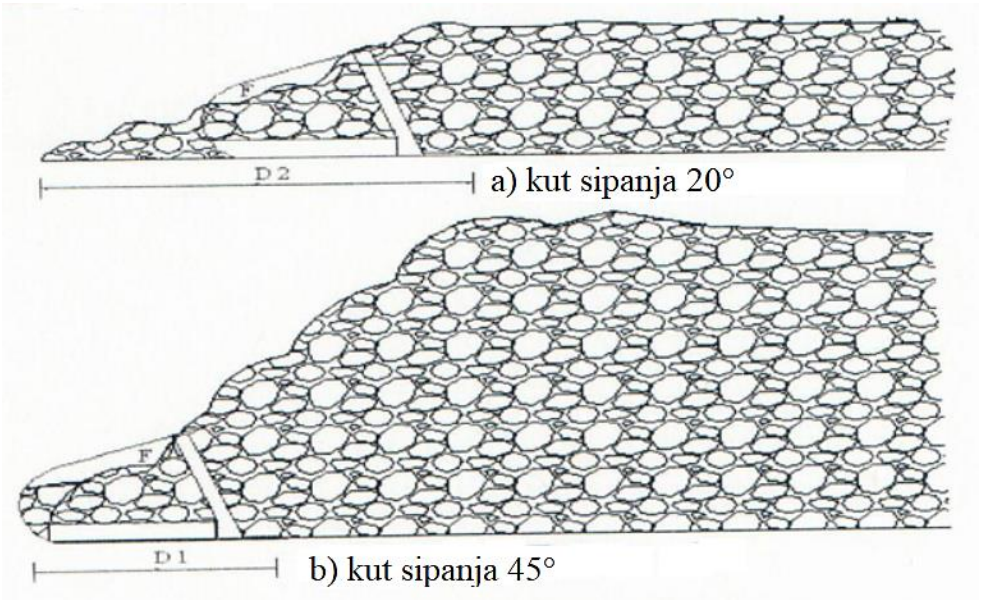
Slika 3-4. Buldozer (Gradbena mehanizacija, 2018)

3.1.3. KOEFICIJENT PUNJENJA LOPATE UTOVARIVAČA

Kut sipanja razrušenog materijala utječe na duljinu punjenja lopate stoga posljedično i na vremenski ciklus utovara, koeficijent punjenja lopate i potrošnju goriva. Kod razdrobljenog materijala s velikim kutom sipanja učinak utovarivača bit će veći jer lopata mora putovati manje da bi postigla visoki koeficijent punjenja. Na mjestima razdrobljenog materijala s manjim kutom sipanja, lopata mora prilično daleko ugrabiti materijal kako bi se ostvario visok koeficijent punjenja. Stroj se kreće naprijed i nazad kako bi se ispunila lopata što povećava vremenski ciklus utovara i negativno utječe na produktivnost. Na slikama 3-5. i 3-6. vidimo učinak kuta sipanja na koeficijent punjenja lopate i na udaljenost zahvata lopate. Utvrđeno je da se kut sipanja mijenja s prosječnom granukacijom materijala. (Singh i Narendrula, 2006)



Slika 3-5. Utjecaj kuta sipanja na koeficijent punjenja lopate (Singh i Narendrula, 2006)



Slika 3-6. Kut sipanja i udaljenost zahvata lopate (Singh i Narendrula, 2006)

3.1.4. SANDUK KAMIONA

Sanduk kamiona mora odgovarati svrsi, a ne biti uređaj za općenitu upotrebu. Mora biti odabran tako da odgovara tehničkom okruženju određenog rudnika. Osnovni kriterij odabira je da sanduk kamiona bude maksimalno iskorišten po nosivosti i volumenu. Transport je znatan trošak u rudarstvu kako je i prikazano u tablici 3-1., stoga je određivanje potrebnog sanduka kamiona veoma važan tehnički, ali i financijski segment.

Tablica 3-1. Tipični troškovi površinske eksploatacije (Lang, 2010)

Tipični troškovi površinske eksploatacije	
Transport	32%
Bušenje i miniranje	25%
Utovar	17%
Ostalo	26%

Proizvođač mora sanduk kamiona napraviti u skladu sa svojstvima utovarnog materijala (abrazivnost i priroda materijala). Vrlo velike utovarne lopate koje pune sanduk kamiona u malom broju ciklusa uzrokovati će veća oštećenja u odnosu na male lopate. Ne preporučuje se ispuštanje tereta s velike visine. Stoga u okruženju gdje je teret abrazivan predlaže se 25 mm podloge za sanduk kamiona. Nije uočena šteta u dijelu utovara provođenjem ove mjere. Za manje abrazivan teret predlaže se podloga od 19 mm.

Važnu ulogu kod odabira sanduka kamiona ima nasipna gustoća materijala. Ukoliko se dobaljaču daju podaci o nasipnoj gustoći koja je utvđena u istražnim radovima, a ista se razlikuje od nasipne gustoće (10%) u trenutku ekspolatacije doći će do pogreške u određivanju ciljane veličine sanduka kamiona. Raspon gustoća od gustoće u sraslom stanju prije miniranja do gustoće u kamionu prikazan je u tablici 3-2.

Tablica 3-2. Primjer odnosa volumnih gustoća materijala (Lang, 2010)

Gustoća u sraslom stanju	2,2 t/m3
Koeficijent rastresitosti	1,30
Nasipna gustoća	1,69
Koeficijent rastresitosti nakon miniranja	1,05
Nasipna gustoća u kamionu	1,61

Precizni brojevi mogu se dobiti pomoću skenera u kombinaciji sa skupom kolnih vaga. Sanduci su skenirani i izvagani prazni i isto se ponovi kada su puni kako je prikazano na slici 3-7. Povećanja omjera težine i volumena doprinosi većoj nasipnoj gustoći materijala u sanduku. Ukoliko rudnik obrađuje različite materijale gustoća se računa za svaki od njih (npr. jalovina i ruda). Poznavanjem izmjerenih volumena i očitanja mase na kolnoj vagi izračunava se nasipna gustoća. Vlažnost tereta treba mjeriti u vrijeme kada se računa gustoća jer je ljeti sadržaj vlage 2%, a zimi oko 6%. Vlaga obično neće povećati mjereni volumen, ali će dodati na težini.



Slika 3-7. Skeniranje i mjerenje praznih i punih sanduka kamiona (Lang, 2010)

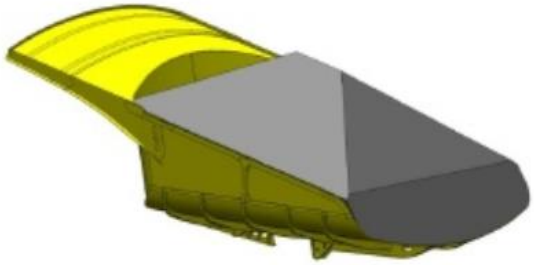
Sanduk se radi prema količini materijala najmanje nasipne gustoće ukoliko rudnik zahtjeva posebne prijevozne flote za svaki materijal. Međutim, to doprinosi obujmu sanduka stoga je potrebno kontrolirati težinu materijala u sanduku da se ne prekorači nosivost kamiona. Ukoliko je količina materijala manje nasipne gustoće relativno mala optimalno rješenje može biti manji sanduk.

Kada se na uzbrdici kamion penje pod nagibom od 10% potrebno je ostaviti malo slobodnog prostora na kraju sanduka kako se kamenje ne bi otkotrljalo nizbrdo. Ovisno o očekivanim varijacijama pri utovaru i gustoći materijala poprilično je bitno promisliti o veličini sanduka koji se naručuje.

Nadalje, na volumen materijala u sanduku utječe kut sipanja materijala. Različiti materijali će se posložiti pod različitim kutovima ovisno o načinu na koji se čestice međusobno povezuju. Pri računanju volumena sanduka treba se pretpostaviti kut sipanja. Mogući su drugačiji podaci o kutu sipanja ovisno o dobavljaču. Standard koji se često upotrebljava u ovoj industriji je SAE J1363.

Računanje volumena sanduka dobiva se pomoću sljedećih parametara:

Potreban je poravnati (geometrijski) volumen koji konceptualno ima sposobnost zadržavanja vode i zatim se doda volumen piramidalnog oblika sa stranama na kosinama 2:1 (ako je to u skladu sa standardom) prikazan na slici 3-8.



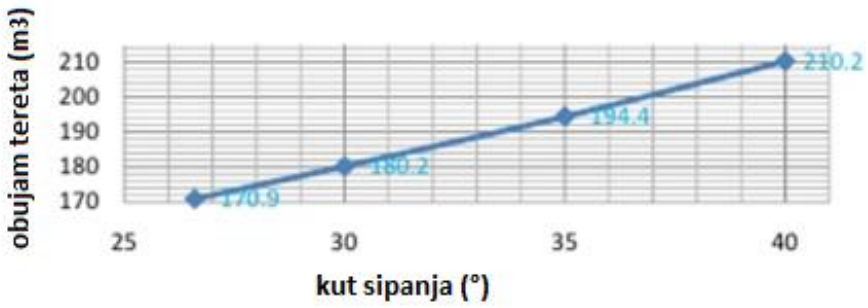
Slika 3-8. Prikaz SAE 2:1 volumena (Lang, 2010)

Slike 3-9. i 3-10. prikazuju opseg promjena volumena. Kutovi na slici 3-9. su stvarni kutovi s terena. Kut prema kojemu je izračunat volumen sanduka proizvođača iznosi 38 stupnjeva dok se linija pod kutom od 26 stupnjeva odnosi na 2:1 kut prema SAE normi.



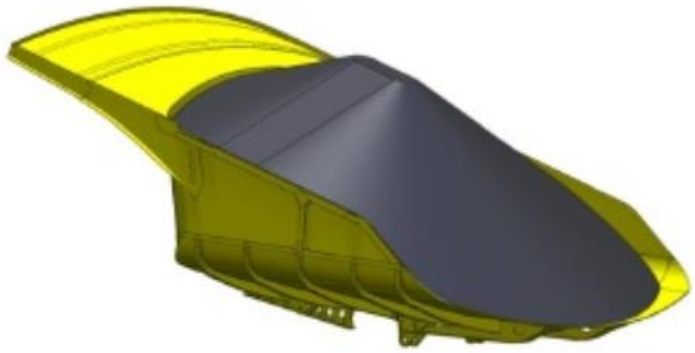
Slika 3-9. Prikaz razlike u volumenu s različitim kutovima sipanja (Lang, 2010)

Dijagram na spomenutoj slici 3-10. ukazuje na linearnu zavisnost kapaciteta sanduka i kuta sipanja materijala. Kapacitet sanduka natovarenog materijalom povećava se s porastom kuta sipanja.



Slika 3-10. Utjecaj kuta sipanja na volumen materijala (Lang, 2010)

Danas se kapacitet sanduka računa pomoću računala (3D modeliranje), a ne koristeći kvadrate na grafikonu papira kako bi izračunali volumen kao nekada. Na slici 3-11. prikazan je 3D model sanduka s nasipanim materijalom.



Slika 3-11. Prikaz nasipanog materijala (Lang, 2010)

Poznavajući volumen, uz pretpostavku da je stupanj zapunjenjosti 90% pomnožen s nasipnom gustoćom dobiva se masa opterećenja. Smatra se da teorija vrlo dobro odgovara stvarnosti kako je prikazano na slici 3-12.



Slika 3-12. Fotografija kamiona za čiji sanduk je napravljen 3D model (Lang,2010)

U tablici 3-3. prikazan je kut sipanja za različite materijale. Rezultati dobiveni SAE kosinama 1:1 i 2:1 mogu biti daleko od stvarnih rezultata. Kut koji bi se trebao koristiti je onaj pod kojim materijal miruje u sanduku nakon miješanja i protresanja koji je blaži od onoga kada se materijal oprezno i polagano slaže na tlo. (Lang, 2010)

Tablica 3-3. Različiti kutevi sipanja prema normi i iskustvu na terenu (Lang, 2010):

kut sipanja	tan	iskustveni kutovi sipanja za različite materijale					
20,0	0,36					pijesak i glina	
22,5	0,41						
25,0	0,47		tla	vlažna tla			
26,6	0,50						SAE kut za gornju hrpu
27,5	0,52						
30,0	0,58				šljunak		
32,5	0,64						
35,0	0,70	ugljen					
37,5	0,77						
40,0	0,84						
42,5	0,92					SAE kut za donju sekciju (poravnati volumen)	
45,0	1,00						
47,5	1,09						
50,0	1,19						

3.1.5. VOLUMEN NOŽA DOZERA

Glavni strojevi za iskop i guranje zemljanog materijala su dozeri. Primjenjuju se kao pomoćni strojevi za skidanje otkrivke, eksploataciju mineralne sirovine, razrahljivanje materijala uporabom rijača te za niveliranje terena. Mogu se koristiti i za izradu nasipa, zasjeka i usjeka, nabijanje materijala na odlagalištima te za izradu prometnica i druge svrhe.

Dozere s obzirom na položaj radnog elementa dijelimo na buldozere, angldozere i tiltdozere. Buldozeri imaju nož okomit na uzdužnu os stroja koji je kruto vezan na noseći okvir. Pomaci su mogući samo u verikalnom smjeru. Kod angldozera moguće je zakretanje noža za određeni kut oko njegove poprečne osi. Shodno tome, mogući položaj noža je okomit ili zakošen u odnosu na smjer kretanja stroja. Tiltdozer je stroj kojemu je nož može zakrenuti za određeni kut oko svoje poprečne osi te u vertiklanoj ravnini.

Odabir dimenzija i tipa noža dozera ovisi o namjeravanoj primjeni stroja. Uz fizikalno-mehanička svojstva materijala jedan od važnijh parametara za odabir određenog tipa noža je odnos raspoložive snage stroja i volumen materijala kojega se može tim istim nožem iskopati te nakon toga i transportirati izraženog u kW/ m^3. Što je iznos navedenog odnosa veći, veća i moguća ostvariva brzina transporta materijala.

Volumen noža dozera općenito se računa pojednostavljivanjem geometrije noža prema obliku prizme ili paralelopipeda. Dimenzije noža ovise o visini i širini noža te o kutu sipanja materijala pomnoženog s određenim koeficijentima za različite tipove i karakteristike materijala.

Prema Slunjskom, volumen se može iskazati izrazom:

$$V = \frac{l \cdot h^2}{2} \tag{3-6}$$

Gdje je *V* volumen trostrane prizme čija je baza pravokutni trokut s dvije strane jednake visini noža *h* i širini noža *l.*

Slijedeći izraz (3-7) je vrlo sličan prethodnom, ali je uvršten koeficijent punjenja noža k_p. Vrijednost koeficijenta punjenja noža za kohezivna tla je između 1,05 ÷ 1,45 i 0,65 ÷ 0,9 za nekoherentna tla.

$$V = \frac{l \cdot h^2}{2} \cdot k_p \tag{3-7}$$

Izraz (3-8) također je baziran na volumenu prizme, ali je duljina donje strane baze izračunata pomoću visine noža *h* i kuta sipanja materijala *φ*

$$V = \frac{l \cdot h^2}{2 \cdot tan\varphi} \tag{3-8}$$

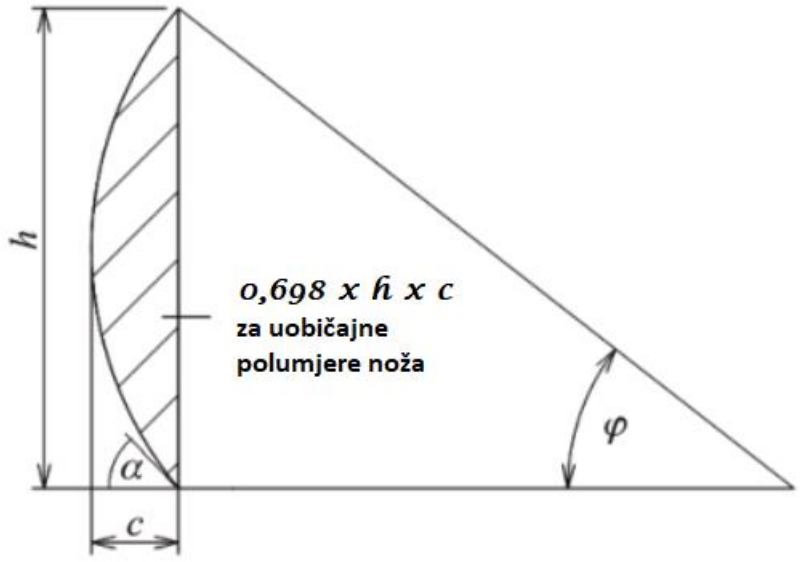
Sljedećem izrazu (3-9) dodan je popravni koeficijent *k* koji uzima u obzir veličinu čestice i koheziju materijala (0,1 ÷ 0,9).

$$V = \frac{l \cdot h^2}{2 \cdot tan\varphi} \cdot k \tag{3-9}$$

Formula (3-10) jednaka je formuli (3-8) uz dodatak volumena unutar noža određenog geometrijskom analizom noža s tipičnim radijusom zakrivljenosti između 0,5 i 2 m.

$$V = l \cdot \left(\frac{h^2}{2 \cdot tan\varphi} + 0{,}698 \cdot h \cdot c\right) \tag{3-10}$$

Gdje je *c* zakrivljesnot noža određena visinom kružnog dijela u centru noža prikazan na slici 3-13. (Klanfar i dr., 2014)

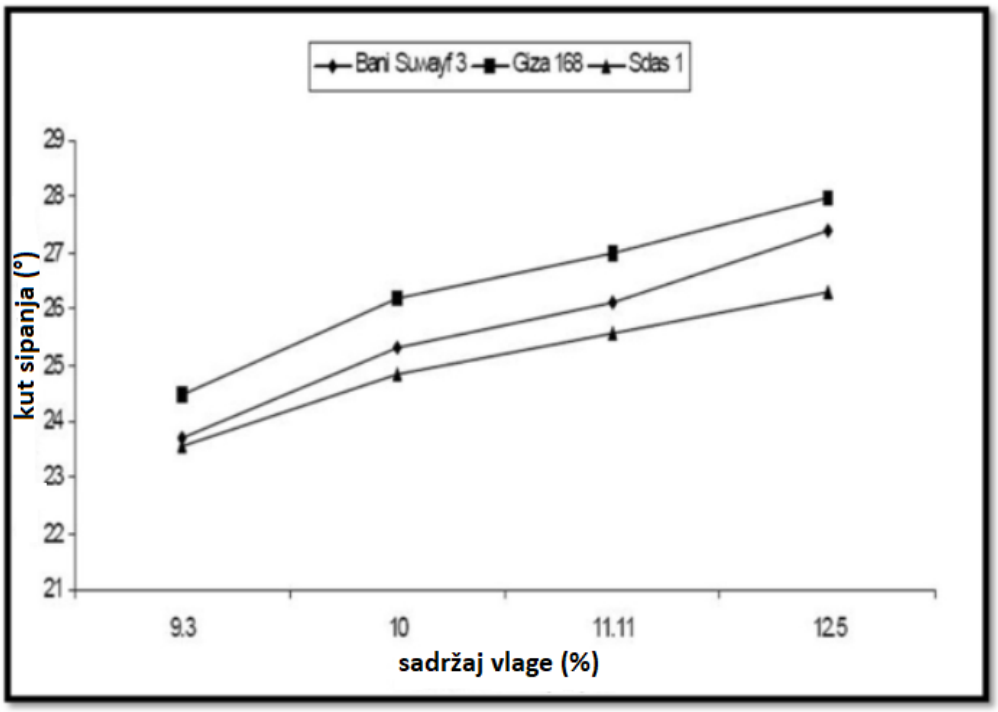


Slika 3-13. Utjecaj zakrivljenosti noža na volumen utovara (Klanfar i dr., 2014)

3.2. PRIMJENA KUTA SIPANJA U DRUGIM PODRUČJIMA

3.2.1. POLJOPRIVREDA

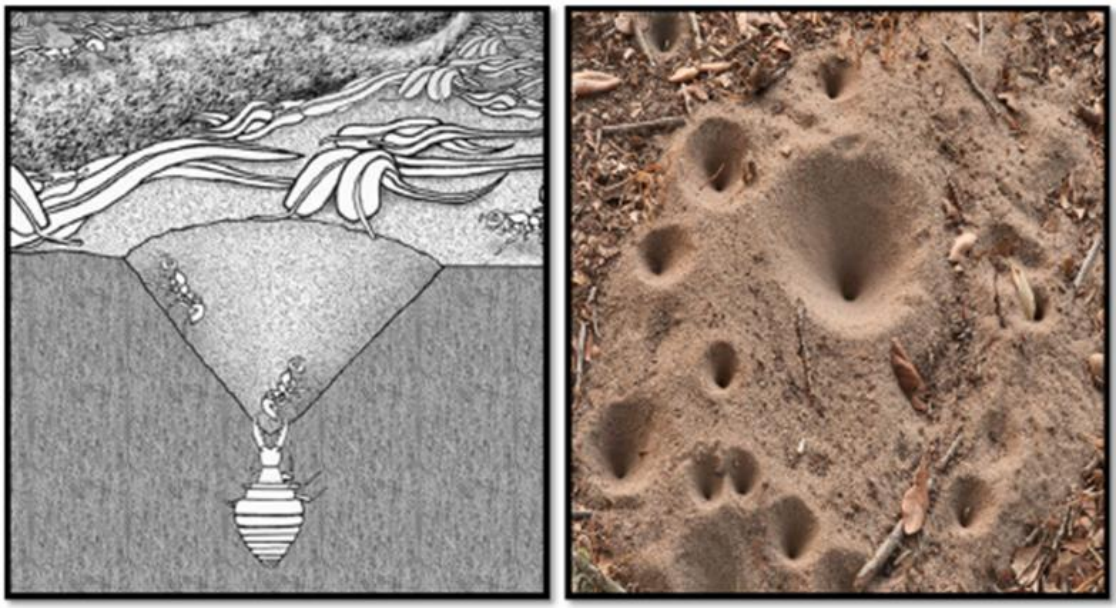
Kut sipanja ima široku primjenu u području poljoprivrede pri projektiranju i dimenzioniranju silosa, spremnika i bunkera za određeni kapacitet i potrebni volumen spremljenih i transportiranih sjemenki, pšenice, riže, brašna itd. U literaturi nekoliko studija je pružilo raspon kuta sipanja za različite poljoprivredne materijale. Na primjer, Zaalouk i Zabady istražili su učinke sadržaja vlage pšenice i hrapavosti baze na kutu sipanja za poljoprivrednu namjenu. Autori su razvili linearne korelacije između kuta sipanja i sadržaja vlage za svaki set uzoraka s obzirom na učinke hrapavosti baze prikazane na slici 3-14. Pokazali su koeficijente korelacije u rasponu od 0,77 do 0,99. (Beakawi i Baghabra, 2018)



Slika 3-14. Utjecaj vlažnosti na kut sipanja različitih vrsta pšenice. (Beakawi i Baghabra, 2018)

3.2.2. ETNOMOLOGIJA

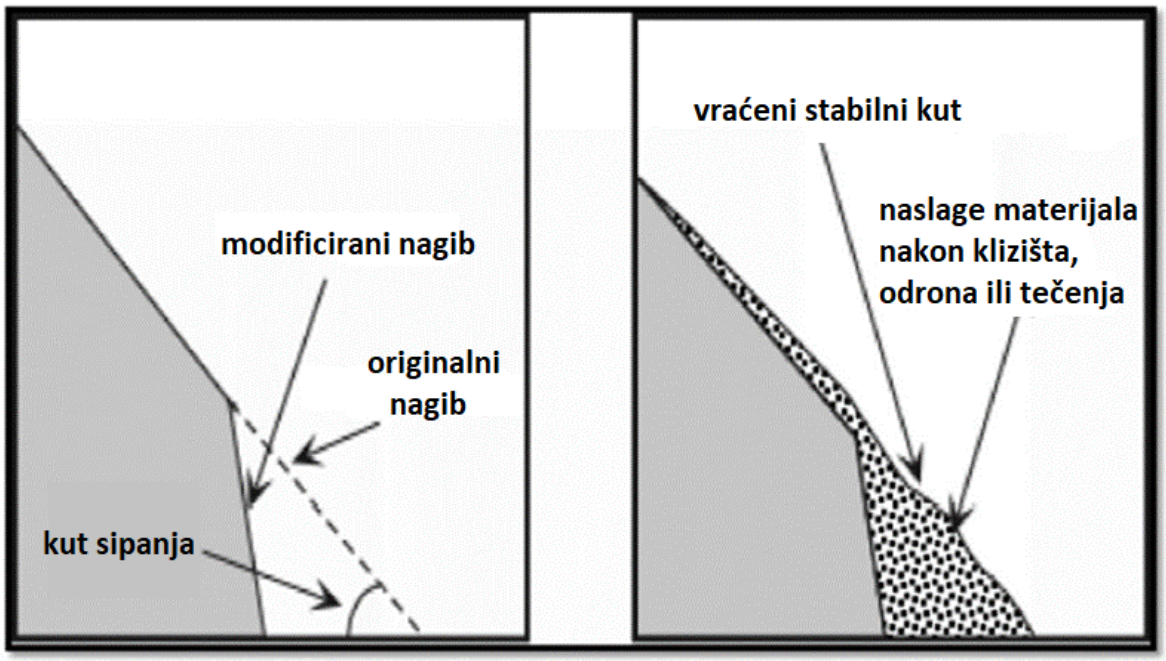
Botz i suradnici proučavali su pješčenjake koje grade mravi (mravinjake) prikazane na slici 3-15. Metodom rotirajućeg cilindra mjeren je kut sipanja uzorka pijeska, a laserkom tehnologijom izmjeren je kut sipanja mravinjaka. Također su obavljene opsežne fizikalne, opažajne, kemijske i statističke analize. Donešen je zaključak da su mravinjaci građeni pod kutovima nagiba koji se ne razlikuje značajno od kuta sipanja. Usput je proučavana i stabilnost mravi pri kretanju na padini te je utvrđeno da će veći mravi prije pasti niz padinu nego manji. (Beakawi i Baghabra, 2018)



Slika 3-15. Kut sipanja mravinjaka (Beakawi i Baghabra, 2018)

3.2.3. GEOTEHNIČKO INŽENJERSTVO

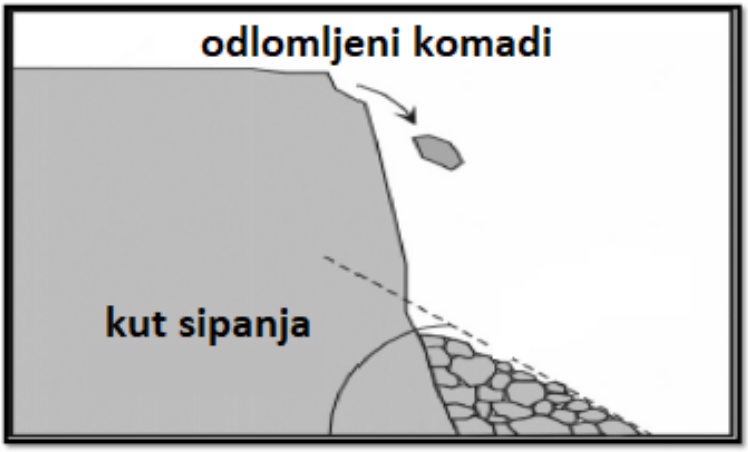
Primjena kuta sipanja u geotehnologiji je skoro pa beskrajna. U ovom području, korištenje kuta sipanja i određivanje njegova odnosa s drugim inženjerskim svojstvima i dalje se proučava. Privlačnost kuta sipanja prikazana je u problemima stabilnosti kosina kod kojih nagib tla ili granuliranog materijala postaje nestabilan kada njihov kut nagiba bude veći od kuta sipanja materijala kao što je prikazano na slici 3-16. (Beakawi i Baghabra, 2018)



Slika 3-16. Uloga kuta sipanja u stabilnosti kosina (Beakawi i Baghabra, 2018)

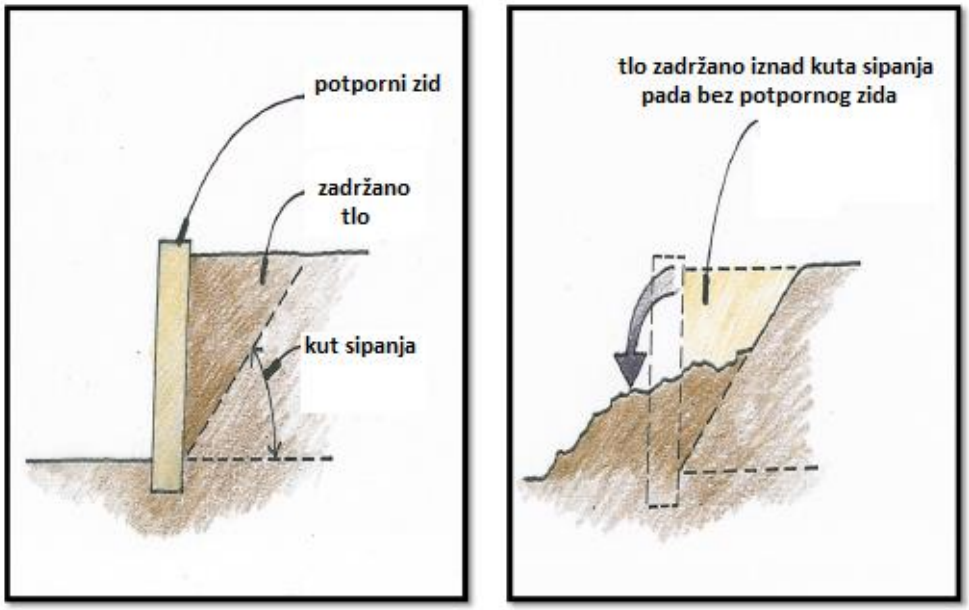
Shodno tome, kada se kosina podreže pri dnu ili modificira pod kutom koji premašuje kut sipanja, nanosi materijala će otklizati niz padinu kako bi se opet postigao stabilan kut nagiba, tj. kut sipanja.

Jednako tako se pojava odrona i gubitka mase prikazana na slici 3-17. javlja kako bi se ponovno postigao stabilni nagib kosine.



Slika 3-17. Ilustracija gubitka mase i odrona kamenja zbog prekoračenja kuta sipanja (Beakawi i Baghabra, 2018)

U nekim slučajevima kao što je nasipavanje ako kut nagiba tla prijeđe kut sipanja potrebno je podgrađivanje za održavanje stabilnosti kosine. Stoga se kut sipanja tla može jednostavno koristiti kao opravdanost je li potreban potporni zid ili struktura kao što je prikazano na slici 3-18.



Slika 3-18. Opravdanost potpornog zida koristeći kut sipanja (Beakawi i Baghabra, 2018)

Metcalf (1966) je istraživao odnos između unutarnjeg kuta trenja i kuta sipanja razrušenih stijena na temelju fizičkih pokusa. Zaključio je da generalno gledajući kut sipanja nije jednak unutarnjem kutu trenja hrpe materijala, ali da je jednak kutu unutarnjeg trenja za isti materijal u njegovom najrastresitijem stanju (namanje zbijen).

Evesque i Rajchenbach (1989) istraživali su čimbenike koji utječu na stabilnost kosine hrpe granuliranog materijala podvrgnutog nisko-frekvencijskim vertikalnim vibracijama dovoljno velike amplitude. Zaključili su da stabilnost kosine ovisi o kutu sipanja, amplitudi vibracija, konvekcijskom transportu unutar samog materijala i akceleraciji vibracija.

Lee i Herrmann (1993) proučavali su kut sipanja završnih kosina granuliranog materijala koristeći simulaciju 2D molekularne dinamike. Međutim oni su odredili kut marginalne stabilnosti koji predstavlja maksimalni stabilni kut hrpe, ali nije nužno jednak kutu sipanja materijala. Utvrdili su da je kut marginalne stabilnosti veći od kuta sipanja te su razvili teorijski izraz za kut marginalne stabilnosti uz pretpostavku određene raspodjele naprezanja. U svome modelu uzeli su sferične, homogene čestice pijeska uz povoljna fizikalna svojstva i pretpostavke. Od ispitanih parametara, kut sipanja je značajnije ovisio samo o kutu unutarnjeg trenja između čestica. Međutim, za krupnozrnate materijale utvrđeno je da završna kosina miruje pod kutom manjim od kuta sipanja.

Ghazavi, Hosseini i Mollanouri (2008.) predstavili su metodu modificiranog lijevka za mjerenje kuta sipanja pijeska. Na tri različita uzorka pijeska ispitan je kut sipanja i kut unutarnjeg trenja smicanjem pri istoj gustoći zbijanja. Za svaki pijesak generirana je linearna korelacija između kuta sipanja i kuta unutarnjeg trenja s visokim koeficijentom korelacije od 0,96. Međutim, korelacije između kuta sipanja i kuta unutarnjeg trenja vrijede pod vrlo ograničenim uvjetima, kao što je istaknuto ranije. (Beakawi i Baghabra, 2018)

3.2.4. HIDRODINAMIKA I SEDIMENTOLOGIJA

Tečni sedimenti na koritima potoka, rijeka i brana, kao i na oceanskim jarcima usko su vezani uz kut sipanja sedimentnog materijala poput pijeska, mulja i gline. Kut sipanja sedimenata ispitan je teoretski i eksperimentalno. Yang i suradnici (2009) ispitivali su kut sipanja neujednačenih sedimenata za proučavanje kosina korita i transporta sedimenata. Kut sipanja sedimenata ispitivan je korištenjem zraka i vode pomoću metode slične metodi rotirajućeg cilindra. Istraživan je utjecaj brzine rotacije, stupanja punjenja i omjera mase

sedimenata na kut sipanja. Izrađena je empirijska jednadžba za predviđanje kuta sipanja koja je testirana na širokom rasponu laboratorijskih podataka o kutu sipanja te se ispostavila razumno prihvatljivom. (Beakawi i Baghabra, 2018)

3.2.5. TEHNOLOGIJA ČESTICA I ZNANOST O MATERIJALIMA

Sipkost granuliranog materijala obično je povezana s kutom sipanja kao što je ranije spomenuto. Ispitivanje konzistencije betona može izravno utvrditi kut sipanja slično kao kod metode šupljeg cilindra. Studije segregacije materijala, posebice za čelične i agregatne mlinove i cementne peći, ubrajamo u metode izravnog određivanja dinamičkog kuta sipanja na način sličan metodi rotirajućeg cilindra. U nedavnoj studiji koja koristi staklene i polipropilenske granule dokazano je da se indeks segregacije smanjuje kada se povećava dinamički kut sipanja.

Riley i Mann (1972) istražili su kut sipanja i Hausnerov omjer za različite oblike staklenih čestica. Hausnerov omjer opisuje sipkost praškastih i granuliranih materijala. Izračunava se kao omjer vrijednosti gustoće nakon potresivanja (ρ_T) i nasipne gustoće (ρ_B):

$$H = \frac{\rho_T}{\rho_B} \tag{3-11}$$

Ispitivane su i sferične i nesferične čestice, uz dodatak mješavine oblika čestica. Odnos između kuta sipanja i Hausnerova omjera je nepredvidljiv. Autori su preporučili korištenje Hausnerovog omjera kao općeg indeksa za svojstva trenja zbog jednostavnog pristupa mjerenju.

Zou i suradnici (2002) proučavali su kut sipanja krupnih, sferičnih, staklenih kuglica numerički pomoću modificiranog DEM-a i eksperimentalno pomoću metode lijevka. Iz njihovog modela razvili su empirijsku formulu kuta sipanja za inženjersku primjenu koju su potvrdili rezultatima svojih eksperimenata. Tvrdili su da kut sipanja ovisi o trenju kotrljajućih čestica i veličini čestica, a ne ovisi o prigušenju, Poissonovom koeficijentu, Youngovom modulu ili koeficijentu restitucije. Također su generirali prediktivnu formulu za početni kut sipanja iz veličine čestica, a zatim su je upotrijebili u jednadžbi korekcije kako bi se dobio kut sipanja s maksimalnom pogreškom procjene od 3°. Međutim, kada je kut sipanja mali, očekuje se velika relativna pogreška. Prediktivna formula primjenjiva je samo

za uvjete materijala koje su testirali Zhou i suradnici kako bi utvrdili kut sipanja prikazano u jednadžbi (3-1). Statički kut trenja pozitivno je koreliran s koeficijentom trenja klizanja i valjanja čestica međusobno i čestica s kućištem, a negativno koreliran s veličinom čestica. Međutim, valja napomenuti da je njihova jednadžba važeća za predviđeni raspon parametara, metode mjerenja i ispitivanog materijala, a daljnja poboljšanja odgovarajućih parametara u jednadžbama potrebna su za pokrivanje šireg raspona veličina i vrsta čestica.

Procjena kuta sipanja pomoću DEM simulacije:

$$AOR = 68.61 \times \mu_{S,PP}^{0.27} \times \mu_{S,PW}^{0.22} \times \mu_{R,PP}^{0.06} \times \mu_{R,PW}^{0.12} \times d^{-0.2} \ldots \quad (3\text{-}1)$$

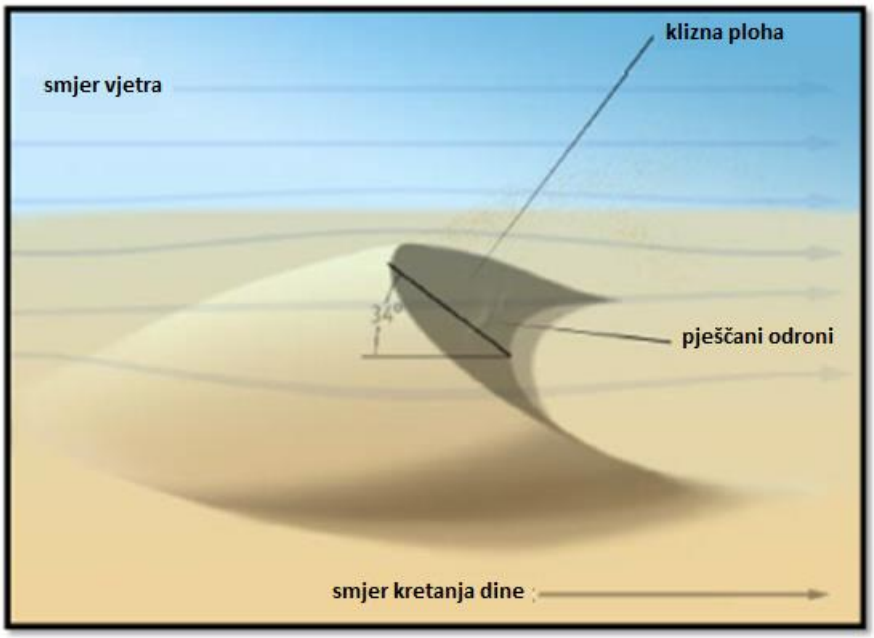
gdje je:

- AOR = angle of repose (kut sipanja),
- $\mu_{S,PP}$ = klizni ili statički koeficijent trenja (čestica-čestica, 0-0.6)
- $\mu_{S,PW}$ = klizni ili statički koeficijent trenja (čestica-kućište, 0-0.6)
- $\mu_{R,PP}$ = kotrljajući koeficijent trenja (čestica-čestica, 0-0.1 mm)
- $\mu_{R,PW}$ = kotrljajući koeficijent trenja (čestica-kućište, 0-0.2 mm)
- d = promjer čestice (2-10 mm)

Li i suradnici (2017) eksperimentalno su istraživali statički kut sipanja čestica željezne rude (koristeći metodu lijevka) i numerički pomoću DEM simulacije. Dali su visoko pozitivne linearne odnose između kuta sipanja i kliznog i kotrljajućeg koeficijenta trenja te duboko negativan linearan odnos sa srednjom veličinom čestica. (Beakawi i Baghabra, 2018)

3.2.6. OSTALA PRIMJENA

Gornji pregled ukazuje na to da se kut sipanja koristi za razne primjene i u različite svrhe. Kut sipanja također mogu koristiti planinari kako bi odredili padine koje su sigurne za njihove aktivnosti. U geologiji, kut sipanja se koristi za ilustraciju i predviđanje najstrmije padine „barchan“ dina , tj. pješčanih dina u obliku polumjeseca kao što je vidljivo na slici 3-19.



Slika 3-19. Kut sipanja *barchan* dina (Beakawi i Baghabra, 2018)

Pješčani vulkani konusnog su oblika i oblikuju se kada se pijesak izbacuje na površinu od slabe središnje točke. Ova obilježja su nagnuta zbog kuta sipanja pijeska. Nadalje, vulkanski pijesci povezani su s fenomenom likvefakcije tla koji se javlja tijekom potresa.

U transportu i skladištenju robe, kao što su zrnca kave, kokos, sjemenke i gume, kut sipanja se koristi za projektiranje kontejnera i spremnika kako bi se utvrdio njihov potreban kapacitet i visina.

U farmaciji, kut sipanja se koristi za određivanje sipkosti granuliranih prahova koji se koriste u proizvodnji i premazivanju lijekova. Train (1958) je mjerio kut sipanja pomoću različitih metoda (kutija s nagibom, fiksni i podignuti lijevak te metode rotirajućeg cilindra) za različite prahove, uključujući srebrni pijesak. Prema njegovim mjerenjima kut sipanja

srebrnog pijeska kretao se od 31° do 34°. Predložio je da ukoliko se koristi bilo koja metoda za određivanje kuta sipanja, praktični uvjeti moraju biti strogo definirani kako bi se dobili usporedivi podaci.

Kut sipanja ne koristi se samo za zemaljsku primjenu već i za izvanzemaljsku. Granulirani materijali ruše se kada njihov nagib prekorači statički kut sipanja i zaustavljaju se pri dinamičkom kutu sipanja. Pretpostavlja se da se ovaj fenomen javlja neovisno o gravitaciji. Međutim, Kleinhaus i suradnici (2011) istraživali su smanjeni učinak gravitacije na dinamičke i statičke kutove sipanja kako bi pokazali ponašanje lavina granuliranog materijala na Marsu i asteroidima. Koristili su instrumente rotirajućeg cilindra smještene u točno kontroliranom zrakoplovu i proveli su 33 parabolička leta prema efektivnim gravitacijama manjim od 1.0, 0.38 (Mars) i 0.1 puta od zemaljske gravitacije kao što je prikazano na slici 3-20.



Slika 3-20. Rotirajući cilindri smješteni u avionu za mjerenje kuta sipanja pri niskoj gravitaciji. (Beakawi i Baghabra, 2018)

Različite veličine i oblici čestica proučavane su u vodi ili zraku, koji su korišteni kao fluidi za „podmazivanje“, tj. smanjenje trenja između čestica granuliranog materijala. Općenito, kut sipanja se povećao za 5° sa smanjenom gravitacijom, dok se dinamički kut sipanja smanjio za 10°, posljedično veličina odrona se povećala. Stoga su autori zaključili da su granulirani materijali s blagim nagibima na Marsu mogli nastati u suhim uvjetima bez fluida

koji smanjuje trenje. Kleinhaus i ostali pokazali su da kut sipanja ovisi o gravitaciji no s obzirom na sve ostale parametre preporučili su daljnja istraživanja.

Daljinska istraživanja i analize geografskog informacijskog sustava (GIS) omogućili su znanstvenicima mjerenje dinamičkog kuta sipanja pravih marsovskih pješčanih dina i usporedbu tih rezultata s zemaljskim pješčanim dinama. Utvrđeno je da marsovske i zemaljske pješčane dine imaju slične dinamičke kutove sipanja, nagovješćujući da je kut sipanja neovisan o gravitaciji; međutim, ovaj rezultat se razlikuje od rezultata eksperimenta Kleinhausa i suradnika.

U rudarskim aktivnostima poput bušenja ili miniranja kut sipanja se smatra bitnim čimbenikom u izradi sabirnog područja i nagibima bušenja. Hancock i suradnici (2008) nadgledali su i simulirali vodotoke koje tvore kosine pod kutom sipanja. Koristili su lasersku tehnologiju i model erozije SIBERIA da simuliraju formiranje vodotoka na rudarskim kopovima i poljoprivrednim poljima, pri čemu bi kiša ili otjecanje mogli stvoriti nove vodotoke i utjecati na ta polja. Model erozije SIEBERIA mogao je odrediti ponašanje vodotoka u vremenu i prostoru od odgovarajućih ulaznih parametara, od kojih je jedan i kut sipanja. (Beakawi i Baghabra, 2018)

4. STATISTIKA – REGRESIJSKA ANALIZA

Za dvije ili više varijabli među kojima se želi utvrditi neka zavisnost ili korelacija koristi se regresijska analiza. Cilj ovog statističkog postupka je utvrditi statističku ovisnost i pokazatelje jakosti te ovisnosti. Postoje dva tipa odnosa među pojavama. Prvi se odnosi na funkcionalne (determinističke) odnose koji su postojani, izražavaju zakonitosti koje se iskazuju analitički, tj. formulom ili jednadžbom. U izrazu (4-1) vidljivo je da svakoj varijabli jedne pojave odgovara točno određena vrijednost druge pojave.

$$Y = f(X) \tag{4-1}$$

Drugi tip su statistički (stohastički) odnosi koji su slabiji od funkcionalnih i češći su u praksi. Jednoj vrijednosti jedne pojave odgovara više različitih vrijednosti druge pojave kao što je prikazano izrazom (4-2). (Štambuk i Biljan-August, 2013)

$$Y = f(X) + e \tag{4-2}$$

Gdje je:

- *f(X)* – funkcionalna (deterministička) komponeneta
- *e* – stohastička varijabla koja predočuje nesistematske utjecaje na zavisnu varijablu.

Nezavisna varijabla je ona čiju vrijednost određuje osoba koja provodi pokus, a zavisna varijabla je ona čije vrijednosti ovise o vrijednosti nezavisne varijable. Ona fiziklana veličina koju se može najtočnije izmjeriti uzima se kao nezavisna varijabla. Regresijska analiza uključuje mnoge tehnike za modeliranje i analizu varijabli, gdje se fokus stavlja na odnos između zavisne i jedne ili više nezavisnih varijabli. Dobiva se uvid kako se vrijednost zavisne varijable mijenja kada bilo koja nezavisna varijabla varira, a ostale su fiksne. Najčešće se procjenjuje vrijednost zavisne varijable kada su nezavisne varijable fiksne. Ciljana procjena je funcija nezavisnih varijabli, tj. regresijska funkcija.

Ova statistička metoda često se koristi za predviđanje i prognoziranje te za razumijevanje odnosa varijabli i istraživanje oblika tih odnosa. U tehnike regresijske analize ubrajamo jednostavnu, višestruku, linearnu i nelinearnu. Najpoznatije su linearna regresija i metoda najmanjih kvadrata. Kod metode najmanjih kvadrata regresijka funkcija definirana je preko konačnog broja nepoznatih parametara koji se procjenjuju na temelju podataka.

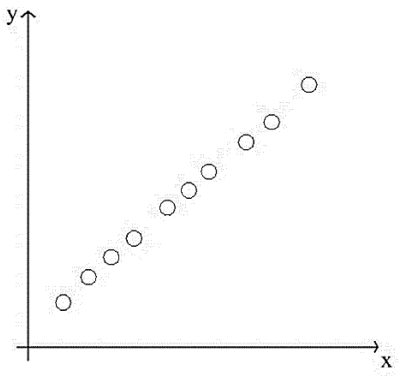
U metodi linearne regresije pretpostavka je da postoje koeficijenti *a* i *b* takvi da se za svaku vrijednost neovisne varijable *x*, ovisna varijabla može napisati kao izraz (4-3):

$$y = bx + a + e \tag{4-3}$$

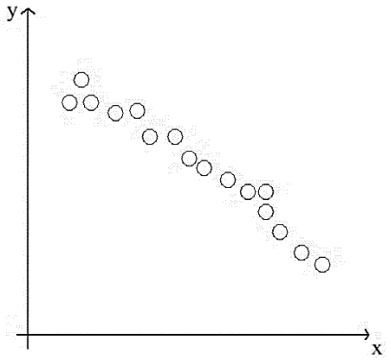
Koeficijenti a i b najčešće se određuju metodom najmanjih kvadrata. Metoda najmanjih kvadrata minimizira vrijednosti kvadrata udaljenosti između opaženih podataka i regresijske krivulje (pravca). Iako kvadrati odstupanja omogućuju da se rezidui tretiraju kao kontinuirana veličina, daju veće težinske faktore točkama koje jako odstupaju od linearnog modela što u nekim slučajevima otežava interpretaciju rezultata („outlieri“). Nužan uvjet za korištenje klasičnih regresijskih metoda je da broj parametara traženih regresijom (*a* i *b* u slučaju pravca) bude manji (ili jednak) od broju mjerenja (*x*,*y*) na raspolaganju.

Linearni korelacijski koeficijent r^2 goori o korelaciji i smjeru linearne povezanosti između dvije varijable. Pozitivna korelacija označava se s +1, negativna korelacija s -1 te ako nema korealcije stavlja se 0. (Pivac i Šego, 2014)

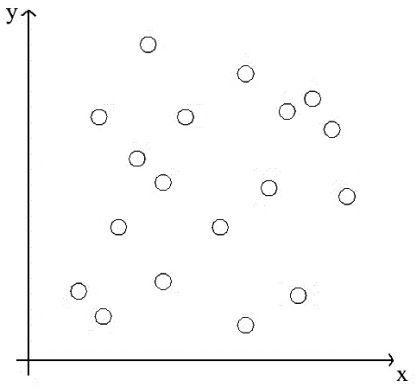
Prikaz parova vrijednosti dviju promatranih numeričkih varijabli u pravokutnom koordinatnom sustavu točaka naziva se dijagram rasipanja. Različite veze dviju promatraih numeričkih varijabli prikazane su na sljedećim slikama (4-1.,4-2. i 4-3.). (Štambuk i Biljan-August, 2013)



Slika 4-1. Pozitivna funkcionalna veza



Slika 4-2. Negativna statistička veza



Slika 4-3. Nema veze među pojavama

5. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

Laboratorijska ispitivanja provedena su na način da je svaki promjer cilindra ispitan tri puta te se nakon svaka tri ispitivanja računala srednja vrijednost kuta sipanja za pojedini promjer cilindra. U ispitivanjima je korišteno 6 različitih promjera cilindra – 46,5, 69,5, 103, 118,5, 153 i 191 mm prikazanih na slici 5-1. Brzina podizanja cilindra bila je jednaka za sva mjerenja i iznosila je 4,05 mm/s.



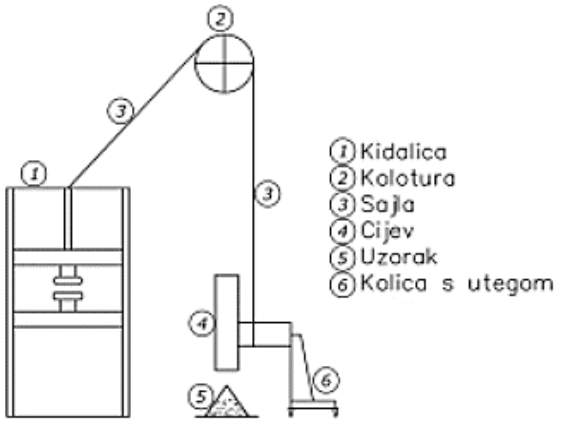
Slika 5-1. Cilindri za ispitivanje

Ispitivanja su provedena na dva načina:

1. konstantna visina uzorka
2. konstantan omjer visine i promjera

Masa uzorka je izvagana i usipana u svaki cilindar te je metrom rađena provjera visine stupca uzroka u svakom cilindru. Visina stupca uzorka mjerena je na 4 nasuprotne strane oboda cilindra te se uzimala srednja vrijednost visine.

Na slici 5-2. prikazana je shema uređaja za mjerenje kuta sipanja pomoću metode cilindra.



Slika 5-2. Shema uređaja (Kostrić, 2018)

Nakon svakog podizanja cilindra, formirana hrpa materijala poput ove na slici 5-3. fotografirala se s četiri strane i na vrhu hrpe te su ti podaci kasnije obrađeni pomoću softvera PhotoModeler. PhotoModeler je softverska aplikacija koja izrađuje 3D modele i mjerenja iz fotografija pomoću fotogrametrije. Izrađeni 3D model eksportiran je u obliku slojnica u dxf formatu zatim importiran i obrađen u Microstationu.



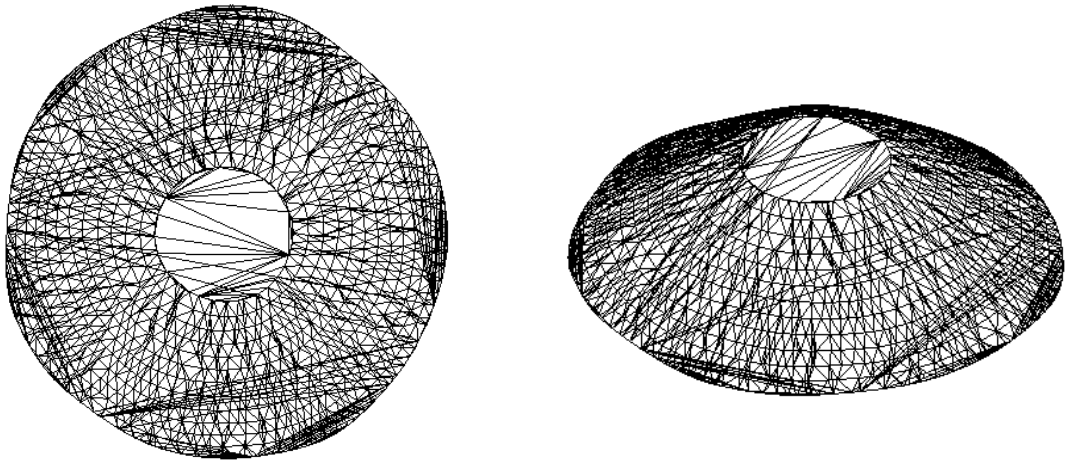
Slika 5-3. Formirana hrpa materijala nakon podizanja cilindra

U Microstationu uklonjene su donje slojnice i vrh hrpe kako bi podaci o kutu sipanja bili što točniji kao što je prikazano na slici 5-4. U suprotnom rezultat bi bio blaži kut sipanja te se stoga u proračunu koristio krnji stožac. Nakon uklanjanja nepotrebnih slojnica izmjerene su površine donje (P1) i gornje (P2) slojnice. Potom se formirala zatvorena mreža slojnica prikazana na slici 5-5. kako bi se dobio volumen (V). U izrazu (5-1) prikazan je proračun kuta sipanja iz podataka o površinama gornje i donje slojnice te volumena krnjeg stošca:

$$\tan\alpha = \frac{3V\sqrt{\pi}}{\sqrt{P_1^3} - \sqrt{P_2^3}} \tag{5-1}$$



Slika 5-4. Prikaz slojnica u Microstationu

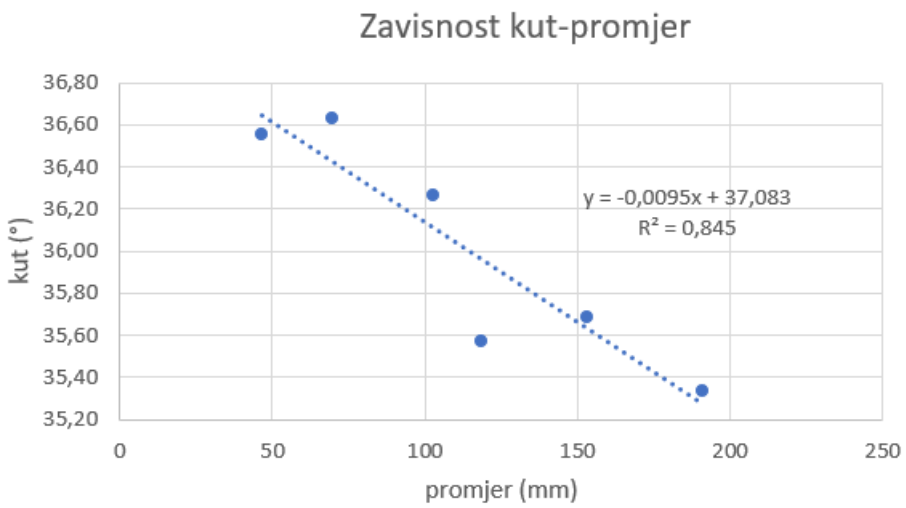


Slika 5-5. Zatvorena mreža slojnica u tlocrtu i izometričnom pogledu

6. REGRESIJSKA ANALIZA

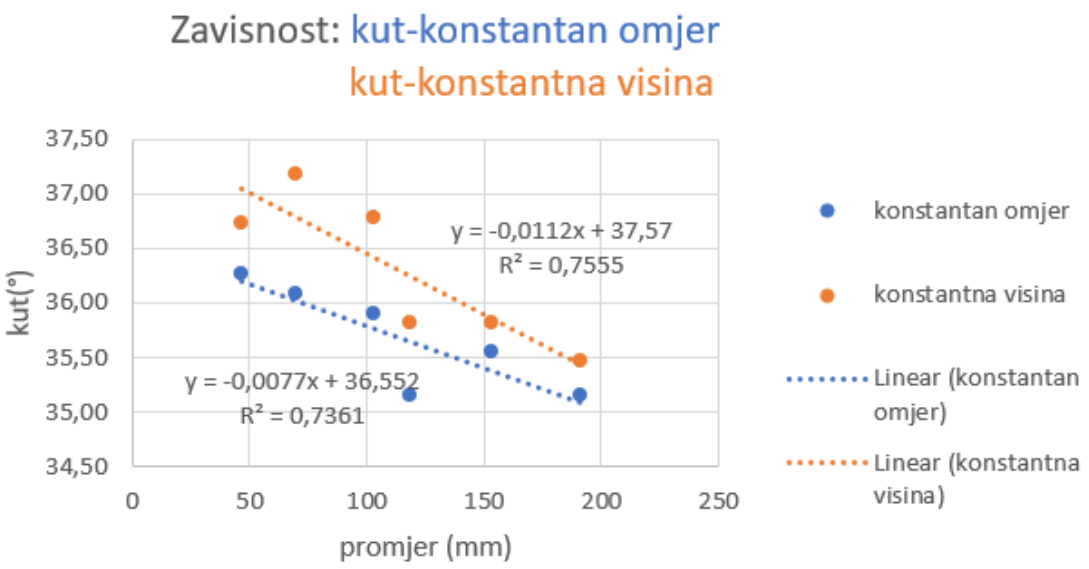
Podaci za kut sipanja dobiveni izračunom površina slojnica te volumena krnjeg stošca unešeni su Excel tablicu prikazanu u prilogu 1 te je iz toga napravljena regresijska analiza. Ukupno je provedeno 51 ispitivnaje. Ponovljena su ispitivanja za točke koje su odstupale od srednjih vrijednosti. Podaci za regresijsku analizu dobiveni su usrednjavanjem triju vrijednosti kuta sipanja pri jednakim uvjetima za oba navedena načina istraživanja.

Iz dijagrana na slici 6-1. lako se uočava utjecaj promjera cilindra na kut sipanja materijala. Odnos između promatranih numeričkih varijabli (kuta sipanja i promjera cilindra pri različitim uvjetima) vidljivo je negativna statistička veza. Povećanjem promjera cilindra dolazi do smanjena kuta sipanja materijala. Shodno tome, kut sipanja materijala je veći ukoliko je promjer korištenog cilindra manji.



Slika 6-1. Generalna zavisnost kuta sipanja o promjeru cilindra

Ranije spomenuta dva načina provođenja ispitivanja uz zadržavanje uvjeta konstantne visine uzorka te konstantnog omjera visine i promjera grafički su prikazana na slici 6-2. Iz prikazanih linearnih zavisnosti zaključuje se da ispitivanje pri konstantnoj visini uzorka više utječe na promjenu kuta sipanja jer je nagib pravca veći. Korelacijski koeficijent (R^2) kod ispitivanja s konstantnom visinom uzorka materijala u cilindru iznosi 0,7555 što konkretno znači bolja zavisnost promatranih numeričkih varijabli. U slučaju drugog načina istraživanja s konstantnim omjerom visine i promjera prisutna su veća odstupanja od pravca linearne regresije s iznosom korelacijskog koeficijenta (R^2) od 0,7361.



Slika 6-2. Zavisnost kuta sipanja o promjeru pri konstantnim uvjetima

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisana je široka primjena kuta sipanja kako u rudarstvu, tako i u raznim drugim područjima ljudske djelatnosti te u samoj prirodi. Kut sipanja u rudarstvu koristi se za projektiranje transportnih traka, prilikom odabira sustava za odlaganje, za računanje koeficijenta punjenja lopate utovarivača, u proračunima kapaciteta sanduka kamiona te volumena noža dozera i sl. Ostala primjena kuta sipanja odnosi se na područje poljoprivrede, etnomologije, geotehničkog inženjerstva, hidrodinamike i sedimentologije, planinarenja, farmacije i dr.

Provedena su laboratorijska ispitivanja za 6 različitih promjera cilindra kontroliranjem dvaju uvjeta. U prvom uvjetu zadržana je konstantna visina uzorka u cilindru, a u drugom je zadržan konstantan omjer visine uzorka i promjera cilindra. Generalno promjer cilindra utječe na kut sipanja stoga je pri ispitivanju potrebno navesti s kojim promjerom cilindra se vršilo ispitivanje. Radi usklađenosti ispitivanja poželjno je da postoji norma koja definira promjer cilindra.

Formirana hrpa materijala fotografirala se pa zatim obradila pomoću softvera PhotoModeler. Dobiveni 3D model fotografije eksportiran je u dxf formatu te importiran i obrađen pomoću Microstationa. Rezultati proračuna krnjeg stošca unešeni u Excel tablicu dali su regresijsku analizu ispitivanja. Pri ispitivanju s konstantnom visinom uzorka promjer cilindra značajnije utječe na rezultat ispitivanja nego pri konstantnom omjeru visine i promjera. Iz tog razloga je poželjnije u ispitivanjima zadržati uvjet konstantnog omjera visine uzorka i promjera cilindra. Generalno je koeficijent korelacije zadovoljavajući kod zavisnosti prosječnog kuta (Slika 6-1) dok je nešto niži u slučaju s konstantim uvjetima visine i omjera (Slika 6-2). Također, određena ispitivanja su ponovljena zbog velikih odstupanja rezultata od srednje vrijednosti te je primjećena mala ponovljivost ispitivanja. Stoga je u nastavku ispitivanja poželjno sve ponoviti s većim brojem podataka za usrednjavanje.

LITERATURA

BEAKAWI AL-HASHEMI H.M., BAGHABRA AL-AMOUDI O.S., 2018. *A review on the angle of repose of granular materials,* pdf , Powder technology, 330 (2008), str. 397-417.

GLADYSTON N., 2015. *Preformulation studies: Pgysicochemical characterization of new drug molecules*. URL: https://www.slideshare.net/GladystonNetto/preformulation-studies-61784366 (6.7.2018.)

GRADBENA MEHANIZACIJA, 2018. *Buldozer*. URL: https://sites.google.com/site/gradbenamehanizacija1/home/buldozer (18.9.2018.)

KLANFAR M., KUJUNDŽIĆ T., VRKLJAN D., 2014. *Analiza proračuna učinka dozera pri gravitacijskom transportu na površinskim kopovima*. Tehnički vjesnik 21, 3(2014), str. 517-523.

KORMAN T., 2009. *Svojstva i klasifikacije stijena*, 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.

KULINOWSKI P., KASZA P., 2014. *Properties Bulk Solids*. URL: www.kmg.agh.edu.pl/sites/default/files/pdf_BulkMaterialsProperties_eng.pdf (4.3.2018.)

LANG R., 2010. *Increasing mine productivity with an appropriate mine truck body*. URL: https://www.slideshare.net/rdl6058/177-selecting-haul-truck-bodies (17.4.2018.)

PIVAC S., ŠEGO B.,2014. *Statistika*, Zagreb: Alka skript.

SINGH S.P., NARENDRULA R., 2006. *Factors affecting the productivity of loaders in surface mines*. International Journal of Minig, Reclamation and Environment 20, 1(2006), str. 20-32.

ŠTAMBEK A., BILJAN-AUGUST M., 2013. *Regresijska i korelacijska analiza*, Rijeka.

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), str. 161-175.

Prilog 1 Excel tablica provedenih ispitivanja

									3D model							
datum	Oz.	R.b.	Mjerenje kuta	RH (%)	Brzina cilindra (mm/s)	Masa uzorka (g)	Visina stupca (mm)	promjer cilindra (mm)	Fotografije 3D	V	P1	P2	Kut sipanja	Prosjek	Isti omjer	Ista visina
2.05.2018.	aa	1		Na zraku s	4.05	1283	102	103	2307-2309	495556.857	23914.958	2826.537	36.60	36.26	35.89	
2.05.2018.	aa	2		Na zraku s	4.05	1283	102	103	2310-2312	476766.103	24234.142	4279.241	35.97			
2.05.2018.	aa	3		Na zraku s	4.05	1283	102	103	2314-2316	631610.785	29095.269	5602.638	36.47			
9.05.2018.	aa	1	a	Na zraku s	4.05	1283	102	103	2903-2907	2140148.44	64287.507	2907.369	35.18			
9.05.2018.	aa	1	b	Na zraku s	4.05	1283	102	103	2908-2912	2135798.031	62517.526	1378.773	36.09			
9.05.2018.	aa	2	a	Na zraku s	4.05	1283	102	103	2913-2917	1761235.78	56891.865	2482.23	34.86			
9.05.2018.	aa	2	b	Na zraku s	4.05	1283	102	103	2918-2922	1676337.559	53447.558	2370.093	36.06			
2.05.2018.	ab	1	a	Na zraku s	4.05	2266	185	103	2317-2319	1062935.636	40192.314	6109.522	36.71			36.78
2.05.2018.	ab	1	b	Na zraku s	4.05	2266	185	103	2317-2319	1053378.082	40136.358	5899.712	36.43			
2.05.2018.	ab	1	c	Na zraku s	4.05	2266	185	103	2317-2319	871353.245	34778.245	6102.232	37.63			
2.05.2018.	ab	2		Na zraku s	4.05	2266	185	103	2320-2322	368739.318	19558.560	3043.070	37.37			
2.05.2018.	ab	3		Na zraku s	4.05	2266	185	103	2323-2325	461667.086	23855.505	4245.525	35.77			
3.05.2018.	ba	1		Na zraku s	4.05	123	50	46.5	2485-2493	281601.846	17524.407	300.890	32.90	36.56	36.27	
3.05.2018.	ba	2		Na zraku s	4.05	123	50	46.5	2494-2500	249001.847	14921.889	2772.216	38.29			
3.05.2018.	ba	3		Na zraku s	4.05	123	50	46.5	2501-2507	275534.214	16298.756	3179.977	37.61			
3.05.2018.	bb	1		Na zraku s	4.05	462	190	46.5	2508-2514	261502.793	15569.480	2750.651	37.71			36.73
3.05.2018.	bb	2		Na zraku s	4.05	462	190	46.5	2515-2521	439173.282	22351.139	4243.068	37.30			
3.05.2018.	bb	3		Na zraku s	4.05	462	190	46.5	2522-2528	301619.115	22666.229	3250.451				
9.05.2018.	bb	1	a	Na zraku s	4.05	462	190	46.5	2860-2864	777993.336	33192.01	2570.795				
9.05.2018.	bb	1	b	Na zraku s	4.05	462	190	46.5	2865-2870	1118291.152	41267.881	2157.153	35.67			
9.05.2018.	bb	2	a	Na zraku s	4.05	462	190	46.5	2871-2875	461937.653	22889.145	2623.876	36.43			
9.05.2018.	bb	2	b	Na zraku s	4.05	462	190	46.5	2876-2880	523172.68	25002.178	3400.187	36.53			
3.05.2018.	ca	1		Na zraku s	4.05	394	65	69.5	2442-2449	358817.167	20966.817	3227.543	33.78	36.63	36.08	
3.05.2018.	ca	2		Na zraku s	4.05	394	65	69.5	2450-2456	366763.073	19569.805	2989.214	37.15			
3.05.2018.	ca	3		Na zraku s	4.05	394	65	69.5	2457-2463	368165.070	19582.962	3093.399	37.32			
3.05.2018.	cb	1		Na zraku s	4.05	1032	185	69.5	2464-2470	466626.393	23952.420	4366.292	35.97			37.18
3.05.2018.	cb	2		Na zraku s	4.05	1032	185	69.5	2471-2477	319924.284	18031.994	4069.167	38.20			
3.05.2018.	cb	3		Na zraku s	4.05	1032	185	69.5	2478-2484	272206.846	17184.560	5035.654	37.37			
3.05.2018.	da	1		Na zraku s	4.05	1955	125	118.5	2389-2401	404639.047	22257.255	2916.922	34.23	35.57	35.16	
3.05.2018.	da	2		Na zraku s	4.05	1955	125	118.5	2402-2409	386038.835	21749.796	2721.511				
3.05.2018.	da	3		Na zraku s	4.05	1955	125	118.5	2410-2419	362019.306	19839.899	2692.078	35.95			
9.05.2018.	da	1		Na zraku s	4.05	1955	125	118.5	2881-2885	1180010.606	43154.973	2184.367	35.30			
9.05.2018.	da	2		Na zraku s	4.05	1955	125	118.5	2886-2891	1412899.796	50449.709	3569.576				
3.05.2018.	db	1		Na zraku s	4.05	3000	185	118.5	2420-2434	393135.036	21516.393	2956.234	34.91			35.82
3.05.2018.	db	2		Na zraku s	4.05	3000	185	118.5	2428-2434	374859.878	20724.506	5510.411	37.75			
3.05.2018.	db	3		Na zraku s	4.05	3000	185	118.5	2435-2441	443315.998	22207.800	4679.230	38.26			
9.05.2018.	db	1		Na zraku s	4.05	3000	185	118.5	2892-2896	1873043.519	59351.0113	4416.848	35.11			
9.05.2018.	db	2		Na zraku s	4.05	3000	185	118.5	2897-2902	1840017.113	61628.909	4155.974	33.06			
3.05.2018.	ea	1		Na zraku s	4.05	4208	152.5	153	2349-2354	1886092.460	60889.100	4491.555	34.26	35.69	35.55	
3.05.2018.	ea	2		Na zraku s	4.05	4208	152.5	153	2355-2359	1713775.374	56601.300	6100.399	35.05			
3.05.2018.	ea	3		Na zraku s	4.05	4208	152.5	153	2360-2366	409377.353	22238.578	5987.275	37.34			
3.05.2018.	eb	1		Na zraku s	4.05	5001	185	153	2368-2374	385217.985	21925.100	4792.432	35.10			35.82
3.05.2018.	eb	2		Na zraku s	4.05	5001	185	153	2357-2381	447105.244	22883.800	4194.276	36.70			
3.05.2018.	eb	3		Na zraku s	4.05	5001	185	153	2382-2388	531079.883	25681.791	3208.132	35.67			
2.05.2018.	fa	1		Na zraku s	4.05	8187	195	191	2335-2338	364296.364	20450.131	2375.011	34.59	35.33	35.15	
2.05.2018.	fa	2		Na zraku s	4.05	8187	195	191	2339-2341	544162.000	25492.000	1793.000	35.92			
2.05.2018.	fa	3		Na zraku s	4.05	8187	195	191	2343-2345	379579.624	20896.526	2579.541	34.93			
2.05.2018.	fb	1	a	Na zraku s	4.05	7793	185	191	2326-2328	525981.808	26258.639	5682.396	36.16			35.47
2.05.2018.	fb	1	b	Na zraku s	4.05	7793	185	191	2326-2328	476302.646	24227.983	4628.215	36.23			
2.05.2018.	fb	2		Na zraku s	4.05	7793	185	191	2329-2331	432067.068	22950.055	3609.795	35.17			
2.05.2018.	fb	3		Na zraku s	4.05	7793	185	191	2332-2334	328078.569	19764.114	3680.490	34.32			