

Metode mjerenja i primjena prirodnog kuta sipanja materijala

POZNAVANJE PRIRODNOG KUTA SIPANJA IMA VELIKU VAŽNOST U ODABIRU RUDARSKE I GRAĐEVINSKE MECHANIZACIJE, PROJEKTIRANJU RUDARSKIH RADOVA I OPLEMENJIVAČKIH POSTROJENJA. PRIRODNI KUT SIPANJA MATERIJALA (ENG. ANGLE OF REPOSE) PREDSTAVLJA KUT IZMEĐU MATERIJALA KOJI JE SIPAN NA HRPU I HORIZONTALNE PODLOGE. OBLIK I VELIČINA ČESTICA, VLAŽNOST MATERIJALA, UNUTARNJI KUT TRENJA I VISINA SIPANJA UTJEČU NA VELIČINU KUTA SIPANJA. KONVENCIONALNE METODE ZA MJERENJE KUTA SIPANJA OBUHVATAJU IZRAVNE METODE MJERENJA POMOĆU KUTOMJERA I NEIZRAVNE METODE PRORAČUNOM KUTA SIPANJA IZ GEOMETRIJSKIH VELIČINA HRPE. SUVREMENE METODE OMOGUĆUJU PRECIZNIJE I OBJEKTIVNIJE MJERENJE NA TEMELJU MODELA DOBIVENIH IZ DIGITALNIH FOTOGRAFIJA.

TEKST // Tomislav Korman¹, Trpimir Kujundžić¹, Mario Klanfar¹, Dubravko Domitrović¹
 Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva ul. 6, 10000, Zagreb, tomislav.korman@rgn.hr

Uvod

Kut sipanja je jedno od tehničkih svojstava sipkih odnosno iskopanih ili izminiranih materijala te danas ima važnu primjenu kako u rudarstvu tako i u graditeljstvu, strojarstvu itd. Prirodni kut sipanja moguće je definirati kao kut koji nasipana hrpa nekog materijala tvori u odnosu na vodoravnu ravninu te predstavlja najveći kut nagiba pri kojemu nasipana hrpa miruje. Ukoliko kut prelazi vrijednosti kuta pri kojem hrpa miruje tada materijal počinje teći dok je ispod te vrijednosti materijal stabilan. Kut sipanja se teoretski može kretati od 0° (visoko tekući ili nekohezivni granulirani materijal) do 90° (visoko kohezivni granulirani materijal). U praksi, kod granuliranih materijala vrijednosti kuta sipanja kreću se najčešće od 20° do 50° . Kut sipanja se najčešće koristi u proračunu transportnih sredstava, rudarske mehanizacije, silosa te pri planiranju odlagališta mineralnih sirovina i jalovine. Danas se koristi i za numeričko kalibriranje modela u DEM (metoda diskretnih elemenata) simulacijama u rudarskoj i farmaceutskoj industriji, gdje omogućuje procjenu parametara međučestica zrnatog materijala.

Prirodni kut sipanja materijala mijenja se u određenim granicama, ovisno o načinu sipanja. Sipanjem materijala s male visine, pri čemu ne dolazi do odskakanja materijala po obodu stošca postiže se maksimalni kut sipanja materijala. Taj kut odgovara koeficijentu

trenja čestica materijala pri mirovanju i označava statički kut sipanja.

Ako se materijal sipa s veće visine imat će znatnu brzinu i bolje će sklizati po površini stošca. Taj kut predstavlja prirodni kut sipanja za vrijeme gibanja, i označava dinamički kut trenja. Generalno, dinamički kut sipanja je 0,5 – 0,7 puta manji od statičkog kuta sipanja. Vrijednosti kuta sipanja ovise o brojnim čimbenicima među kojima su ključni: oblik i veličina čestica, sadržaj vlage, unutarnji kut trenja i visina sipanja (Dunda et al., 2020).

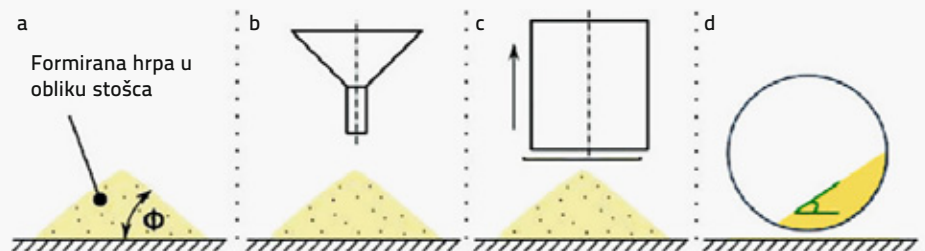
Metode ispitivanja kuta sipanja

Određivanje kuta sipanja sastoji se od dvije faze od kojih prva uključuje metodu formiranja hrpe, a druga faza uključuje mjerenje kuta formirane hrpe (slika 1a). U metode određivanja

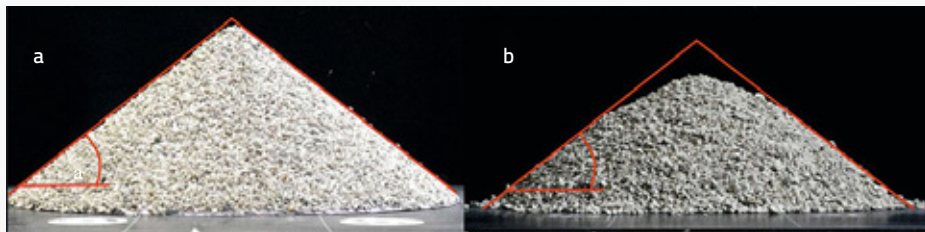
statičkog kuta sipanja ubrajamo metodu cilindra i metodu lijevka dok se za određivanje dinamičkog kuta sipanja koristi metoda rotirajućeg cilindra.

U metodi lijevka materijal se nasipa u lijevku koji je fiksiran na unaprijed određenoj visini (slika 1b). Također može biti pomičan, odnosno izlaz lijevka kroz koji prolazi materijal mora se nalaziti što bliže hrpi koja se formira kako bi se smanjio utjecaj kotrljanja čestica. Kod metode cilindra formiranje hrpe postiže se kontinuiranim podizanjem cilindra unutar kojeg se nalazi materijal (slika 1c). Brzina dizanja mora biti spora i kontinuirana kako bi se mogla formirati hrpa pri statičkom kutu sipanja.

Kod metode rotirajućeg cilindra materijal se sipa u valjak određenog promjera čija je čelna strana načinjena od prozirnog materijala, naj-



Slika 1. Metode ispitivanja materijala a) Formirana hrpa u obliku stošca b) metoda lijevka c) metoda cilindra d) metoda rotirajućeg cilindra (Rackl et al., 2017)



Slika 2. Mjerenje kuta sipanja a) na idealnom stošcu b) na stvarnoj hrpi

češće plastike. Valjak se rotira konstantnom brzinom, te se promatra materijal koji se giba unutar valjka. Materijal uslijed rotacije zauzima određeni kut kako je prikazano na slici 1d.

Neovisno od metode formiranja hrpe, problem kod mjerenja kuta sipanja predstavlja neravnomjernost hrpe (slika 2b). Odstupanje oblika hrpe od idealnog stošca (slika 2a) može značajno utjecati na točnost mjerenja. Upravo zato postoje različite metode za mjerenje kuta te su i dalje predmet brojnih istraživanja.

Konvencionalne metode mjerenja kuta sipanja

Konvencionalne metode koje se primjenjuju za mjerenje mogu biti izravne i neizravne. Izravne metode uključuju upotrebu kutomjera. Kod upotrebe kutomjera potrebno je izmjeriti kut na više mjesta s obzirom da oblik hrpe može značajno odstupati od idealnog stošca. Nedostatak ove metode očituje se u mjerenju odnosno mogućnosti pogreške kod očitavanja kuta i postavljanja kutomjera zbog subjektivnosti opažanja.

Umjesto izravnog mjerenja, kut sipanja moguće je odrediti indirektno korištenjem trigonometrijskih funkcija uz prethodno mjerenje vrijednosti promjera i visine hrpe materijala. Mjerenjem navedenih parametara iz presjeka ravnine okomite na bazu stošca, dobiju se dva pravokutna trokuta uz pretpostavku da je hipotenuza trokuta pravac koji najbolje opisuje plašt stožaste hrpe. Kutovi koje hipotenuze zatvaraju sa katetama predstavljaju kut sipanja.

Suvremene metode mjerenja kuta sipanja

Kod suvremenih metoda kut sipanja određuje se iz digitalnih fotografija. Veća točnost i objektivnost glavne su prednosti suvremenih metoda. Kako bi se odredio kut sipanja iz digitalnih fotografija potrebno je kreirati dvoimenzionalne ili trodimenzionalne modele.

Za kreiranje dvodimenzionalnog modela hrpe materijala iz digitalne fotografije potrebno je snimiti dvije fotografije za svaku hrpu. Princip ove metode je da se iz digitalne fotografije konstruira 2d model te prepozna rub odnosno kontura realne hrpe kao skup točaka te ih se pohrani kao koordinate u datoteku. Provlačenjem pravaca regresije kroz točke konture hrpe moguće je iz nagiba pravaca odrediti kut sipanja materijala. Blok shema ispitivanja prikazan je na slici 3.

U novije vrijeme sve više se koriste metode koje se baziraju na trodimenzionalnim modelima. Ova je metoda temeljena na stereofotogrametriji, odnosno obliku fotogrametrije koja predstavlja tehniku dobivanja prostornih informacija nekog objekta na temelju snimanja i obrade stereoparova koji su dobiveni na različitim mjestima snimanja istog objekta. Pri fotografiranju s više različitih stajališta, princip je da se na svakoj fotografiji prepoznaju zajedničke točke te se triangulacijom pomoću

projekcijskih linija procjenjuju 3D koordinate točaka, odnosno njihova lokacija. Kod fotografiranja je potrebno obuhvatiti objekt na sljedećoj slici tako da određeni detalji budu prisutni na ostalim fotografijama u omjeru 60-80% (Wojcik et al., 2017). Iz digitalnih fotografija program pronalazi položaj kamere, određuje orijentaciju za svaku fotografiju i izrađuje model oblaka točaka te u konačnici mrežu koja je



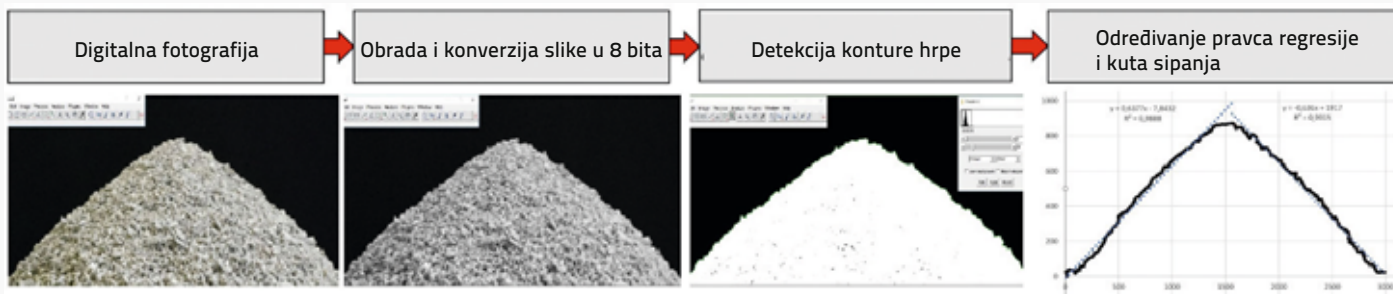
Slika 4. Određivanje kuta sipanja iz 3D modela

sačinjena od mnogokuta kao što je vidljivo na slici 4. Kut sipanja određuje se izradom stošca upisanog u dobivene 3D modele.

Primjena kuta sipanja

Kut sipanja ima vrlo široku primjenu, a koristi se pri projektiranju i odabiru transportnih sredstava, rudarskih strojeva, projektiranja oplemenjivačkih postrojenja, odlagališta mineralne sirovine i jalovine. Transport predstavlja znatan trošak u rudarstvu, stoga je za uspješno rješavanje transportnih problema potrebno poznavati ili odrediti fizikalna svojstva materijala koji će se prevoziti. Kut sipanja značajno utječe na izbor tipa i vrste prijevoznih sredstava, odnosno njihovo dimenzioniranje, pogonske troškove, troškove održavanja, na mogućnost ili nemogućnost primjene te konačno, na njihovu učinkovitost.

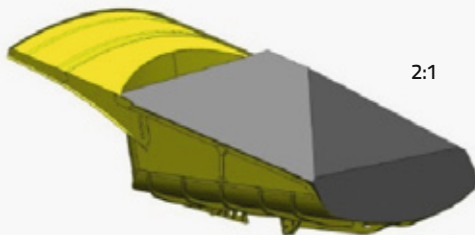
Jedan od kriterija pri proračunu transporta kamionima je svakako iskorištenje kamiona po nosivosti i obujmu sanduka kamiona. Pri računanju volumena sanduka treba poznavati kut sipanja s obzirom da će različiti materijali formirati hrpu pod različitim kutovima ovisno o na-



Slika 3. Određivanje kuta sipanja iz 2D modela

činu na koji se čestice međusobno povezuju. Proračun obujma punog sanduka prema SAE J363 standardu računa se na temelju geometrijskog obujma sanduka kamiona na koji se nadodaje obujam piramidalnog oblika sa stranama na kosinama 2:1 pretpostavljajući nasisani kut od 26,6 stupnjeva (slika 5). Prema podacima iz prakse obujam punog sanduka kamiona može biti i do 15% manji u odnosu na proračun prema SAE standardu (Lang, 2010).

U tablici 1. prikazan je kut sipanja za različite materijale. Iz tablice je također vidljivo koliko stvarne vrijednosti kuta sipanja mogu odstu-



Slika 5. Formiranje hrpe u sanduku kamiona prema SAE standardu

pati od pretpostavljenih kutova 1:1 i 2:1 prema SAE Standardu.

Ukoliko se krivo pretpostavi kut sipanja, tada proračun sanduka kamiona može značajno odstupati od stvarnog obujma materijalu u sanduku kamiona, što u konačnici može rezultirati odabirom neodgovarajućeg tipa kamiona. Na slici 6. prikazana je razlika u obujmu kod kuta sipanja od 38° prema priručniku proizvođača i stvarnoga kuta sipanja od 26° mjenenog na terenu.

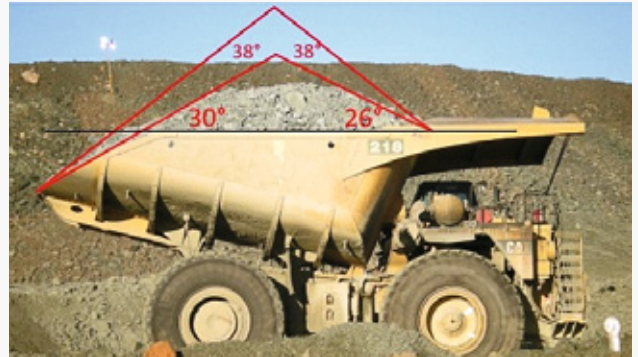
Proračun kapaciteta bagera proporcionalan

je obujmu napunjene lopate bagera i obrnuto proporcionalan trajanju ciklusa. Obujam materijala u lopati bagera značajno ovisi o kutu sipanja, a za određivanje obujma najčešće se koriste sljedeći standardi:

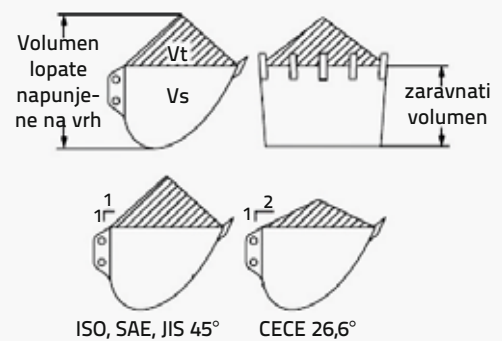
- ISO – 7451 (International Organization for Standardization)
- CECE – SECTION VI (Committee for European Construction Equipment)
- SAE International – J296/J742b (Society of Automotive Engineers)
- JIS – A8401-1976 (Japanese Industrial Standard)

Prema ISO, SAE i JIS standardu, kut sipanja je pretpostavljen u iznosu od 45° stupnjeva dok se jedino prema europskom CECE standardu pretpostavlja kut sipanja od približno 26,565° stupnjeva kako je prikazano na slici 7. Kod materijala s manjim kutom sipanja za proračun učinka bagera prikladniji je CECE standard, dok su kod materijala s većim kutom sipanja primjenjiviji ostali standardi. Kod utovarača, razlika u proračunu obujma lopate između pojedinih standarda je još i veća zbog njene dužine. Najveću točnost pri određivanju obujma pune lopate moguće je postići na temelju terenskih mjerenja kuta sipanja primjenom fotogrametrijskih metoda slika 8.

Kut sipanja razrušenog materijala utječe na trajektoriju punjenja lopate, a posljedično i na vremenski ciklus utovara, koeficijent punje-



Slika 6. Pretpostavljeni i mjereni kut sipanja materijala u sanduku kamiona (Lang, 2010).



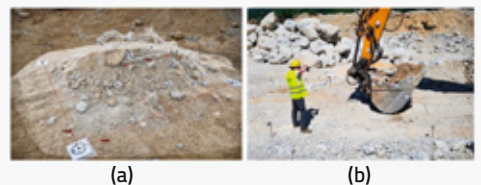
Slika 7. Promjena obujma lopate i kuta sipanja, ovisno o primijenjenom standardu

nja lopate i potrošnju goriva. Kod odminiranog materijala s velikim kutom sipanja učinak bagera bit će veći jer je trajektorija lopate kraća.

Odabir dozera kao i dimenzije i tipa noža prvenstveno ovisi o namjeni stroja. Osim zahtjeva konkretnog radnog zadatka, potrebno je

Tablica 1. Različiti kutovi sipanja prema normi i iskustvu na terenu (Lang, 2010)

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



Slika 8. Terensko mjerenje obujma materijala i kuta sipanja u lopati bagera

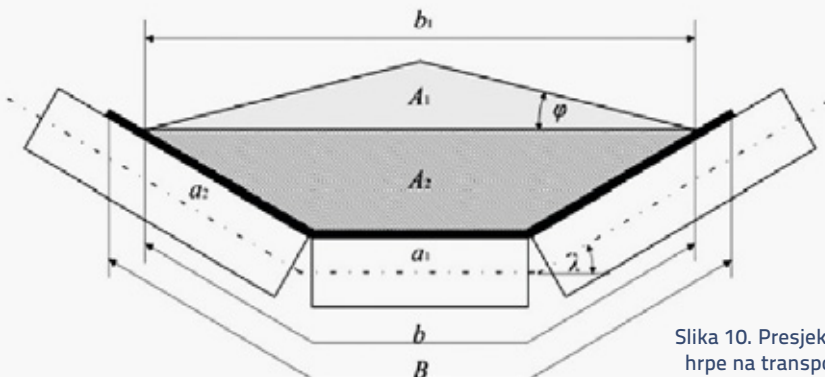
razmotriti cijelo mnoštvo ostalih čimbenika prije odabira stroja određenih radnih karakteristika. Učinak dozera ovisi o trajanju ciklusa dozera i obujmu materijala ispred dozerskog noža, odnosno vučne prizme. Obujam vučne prizme općenito se računa pojednostavljuvanjem geometrije noža prema obliku prizme ili paralelograma. Obujam prizme određen je visinom i dužinom dozerskog noža te širinom vučne prizme koja izravno ovisi o kutu sipanja (slika 9).



Slika 9. Formiranje vučne prizme ispred dozerskog noža (Zitzman, 2019)

Transportne trake koriste se za transport sipkog materijala pretežito horizontalno ili pod nekim kutom. Kut sipanja materijala u mirovanju na pokretnoj transportnoj traci obično je $5-15^\circ$ manji od prirodnog kuta sipanja. Kod nekih materijala može biti i do 20° manji od prirodnog kuta sipanja. Kvalitetno projektiranje transportnog sustava započinje procjenom fizikalno – mehaničkih karakteristika transportiranog materijala te posebno statičkog kuta sipanja formirane hrpe materijala i dinamičkog kuta sipanja materijala u mirovanju na podlozi koja se kreće prikazanih na slici 10. Pri odabiru elemenata trake, širina i oblik trake izravno ovise o kutu sipanja.

Kut sipanja ima značajnu ulogu pri projektiranju odlagališta mineralne sirovine i jalovine kao i oplemenjivačkih postrojenja (slika 11). Površina odlagališta ovisi prvenstveno o količini jalovine koja nastaje tijekom eksploatacije kao i prirodnom kutu sipanja jalovine. Jalovina se na odlagalište odlaže nasipanjem pa će površina odlagališta ovisiti od projektirane visine, ali svakako i od kuta sipanja jalovine. Kod projektiranja separacijskog postrojenja potrebno je izračunati površinu prostora koji će deponije separiranog materijala zauzeti. Površina deponija pojedinih klasa materijala ovisit će od visine sipanja, ali opet najviše o kutu sipanja dotične



Slika 10. Presjek formirane hrpe na transportnoj traci



Slika 11. Odlagalište a) neklasirane mineralne sirovine b) klasirane mineralne sirovine (Urbano, 2011)



klase materijala, ovisno o veličini čestica unutar te klase. Iskustvo pokazuje da neklasirani materijal čini veći prirodni kut sipanja nego klasirani.

Zaključak

Svaka greška u izboru i organizaciji prijevoznog sustava ili sredstva, kao i odabira strojeva teško se ispravlja, pa izbor ne smije biti slučajna ili isključivo na temelju tehničkih karakteristika strojeva, već je potrebno poznavati tehnička i fizikalno - mehanička svojstva materijala. Kut sipanja je tehničko svojstvo materijala koje je nužno poznavati pri odabiru i proračunu kamiona, transportnih traka, bagera, utovarača, dozera i mnogih drugih strojeva. Podaci o kutu sipanja dostupni su u znanstvenoj

literaturi te priručnicima proizvođača strojeva. Na kut sipanja utječu brojni čimbenici od kojih su granulacija i vlažnost ključni. Stoga, za preciznije podatke ipak je najpouzdanije provesti laboratorijska i terenska mjerenja kuta sipanja. Greške koje se javljaju pri mjerenju kuta sipanja posljedica su neravnomjernosti hrpe odnosno odstupanje oblika hrpe od idealnog stošca. Upravo zato, danas se uz konvencionalne metode mjerenja upotrebljavaju sve više suvremene metode bazirane na modelima dobivenim iz digitalnih fotografija. Primjenom dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih modela u mjerenju kuta sipanja izbjegava se subjektivnost mjeritelja, a dobiveni podaci su pouzdaniji i precizniji.

Literatura

- Dunda, S., Kujundžić, T., Korman, T. (2020): Nastavni materijali za predavanja i vježbe iz kolegija Rudarski i geotehnički strojevi i Transport i izvoz. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb. (Neobjavljeno)
- Committee for European Construction Equipment. About CECE. URL: <https://www.cece.eu/about> (16.1.2021.)
- Japanese Industrial Standards Committee, (2017): Our roles. URL: http://www.jisc.go.jp/eng/jisc/index_e.html (18.1.2021.)
- Lang, R. (2010): Increasing mine productivity with an appropriate mine truck body.
- Rackl, M., Grötsch, F. E., Rusch, M., & Fottner, J. (2017): Qualitative and quantitative assessment of 3D-scanned bulk solid heap data. Powder Technology, 321, 105-118.
- SAE International, (2018): About SAE International. URL: <https://www.sae.org/about/history> (17.1.2021.)
- Urbano L. (2011): Limestone Quarry / Url <https://montessorimuddle.org/category/chemistry-2/page/8/>
- Wojcik, P. Klapa, B. Mitka, J. Sladek, (2017): The use of the photogrammetric method for measurement of the repose angle of granular materials, Measurement. (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.10.005>)
- Zitzman L. (2019): Bulldozer Types, Parts and Their Uses ■