

Utjecaj značajki stijenskoga materijala na učinak i optimalne radne veličine hidrauličkoga bagera

Herceg, Vjekoslav

Doctoral thesis / Disertacija

2023

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:169:273045>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-11**



Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Vjekoslav Herceg

**UTJECAJ ZNAČAJKI STIJENSKOGA
MATERIJALA NA UČINAK I OPTIMALNE
RADNE VELIČINE HIDRAULIČKOGA
BAGERA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2023.



Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Vjekoslav Herceg

**UTJECAJ ZNAČAJKI STIJENSKOGA
MATERIJALA NA UČINAK I OPTIMALNE
RADNE VELIČINE HIDRAULIČKOGA
BAGERA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Mario Klanfar

Zagreb, 2023.



University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Vjekoslav Herceg

**THE INFLUENCE OF ROCK MATERIAL
PROPERTIES ON EXCAVATOR
PRODUCTIVITY AND OPTIMAL
OPERATING PARAMETERS**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor:

Assoc. Prof. Mario Klanfar, PhD

Zagreb, 2023.

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Mario Klanfar

Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Doktorski rad sadrži: 118 stranica teksta, 67 slika, 38 tablice i 8 priloga.

ZAHVALA

Ovaj rad ne bi bio završen bez nesebične pomoći mnogih dobrih kolega i prijatelja, stoga izražavam iskrenu zahvalnost svima njima.

Posebno mentoru izv. prof. dr. sc. Mariju Klanfaru, na poticajima, savjetima i pomoći u okviru istraživanja, angažmanu oko pripreme i izvođenja terenskih mjerenja te velikom strpljenju i moralnoj podršci.

Predsjedniku povjerenstva izv. prof. dr. sc. Tomislavu Kormanu i članovima povjerenstva prof. dr. sc. Trpimiru Kujundžiću i doc. dr. sc. Petru Ilinčiću na primjedbama i sugestijama koje su doprinijele kvaliteti ovog rada.

Djelatnicima Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, a posebno upravi na čelu s dekanom prof. dr. sc. Vladislavom Brkićem i članovima Zavoda za rudarstvo i geotehniku na čelu s predstojnikom izv. prof. dr. sc. Vinkom Škrlecom na pruženoj velikoj podršci.

Kolegama: izv. prof. dr. sc. Dubravku Domitroviću na pomoći oko izvođenja terenskih mjerenja te korisnim savjetima, prof. dr. sc. Biljani Kovačević Zelić, prof. dr. sc. Gordanu Bedekoviću i izv. prof. dr. sc. Tomislavu Kormanu na ustupanju laboratorija za izvođenje laboratorijskih mjerenja.

Kolegama iz privrede: Aniti Brezović-Isabegović, dipl. ing. rud. i upravi tvrtke Arkada d.o.o., Mati Juraju Kaliniću, mag. ing. min., direktoru tvrtke Makromehanika d.o.o., Vladi Dusperu, dipl. ing. rud., direktoru tvrtke TRG d.o.o., Miri Labašu, mag. ing. min. i upravi tvrtke Kamen Sirač d. d., Tomislavu Nemčeviću, dipl. ing. rud., direktoru tvrtke Kaming d.d., te Dejanu Mačku, dipl. ing. rud. i upravi tvrtke Samoborka d. d., na ustupanju strojeva i radilišta za izvođenje terenskih mjerenja u okviru izrade ovog rada.

Svim prijateljima i rođacima, obiteljima: Herceg, Cesarec, Vuković, Truhan, Golubić, Gradiški, Horvat, Bezjak, Genc, Križanić, Križan, Kukec, a posebno Ivanu Horvatu, Ivanu Hodaku i Anji Sever koji su mi bili najveća podrška.

Mojim roditeljima, Marijanu i Biserki koji su me odgojili i usmjerili da danas budem to što jesam, te sestri Ivani i bratu Miljenku s obitelji koji su mi oduvijek velika podrška.

Najveću zahvalu dugujem svojoj obitelji, supruzi Karolini i kćerima Heleni i Elizabeti, na pruženoj potpori i velikom strpljenju. Dio vremena utrošenog na ovaj doktorat trebao je pripasti njima.

SAŽETAK

Hidraulički bager jedan je od najčešće korištenih strojeva u rudarstvu te zbog toga postoji veliki interes istraživača za proučavanjem njegovoga učinka i optimizacije rada. Istraživanje u okviru ovog rada zasniva se na detaljnom proučavanju rada bagera u realnim uvjetima. Takva su istraživanja, prema dostupnoj literaturi, relativno skromna te postoji veliki prostor za napredak. Kako bi se pristupilo podacima koji pružaju uvid u realni rad bagera potrebno je kontinuirano mjerenje produljenja i tlakova na hidrauličkim cilindrima. To je ostvareno pomoću specifičnoga mjernog sustava kojim se izvodi simultano mjerenje većeg broja parametara na bageru pri radu u realnim uvjetima. Izmjereni podatci obrađeni su pomoću računalnoga programa napisanoga u programskom jeziku Python. Pomoću standardnih kinematičkih i dinamičkih modela bagera dobivene su vrijednosti dinamičkih veličina rada (sila, snaga i utrošak energije pri kopanju) te geometrijskih veličina kopanja (kut upada zuba, duljina i površina reza). Terenska mjerenja izvedena su na pet različitih modela bagera te ukupno trinaest materijala. Laboratorijskim i terenskim ispitivanjima utvrđene su značajke materijala (granulacija, sadržaj vlage i nasipna gustoća). U radu je proračunat učinak kopanja koji predstavlja masu ili volumen iskopanog materijala u vremenu koje je bilo potrebno za izvođenje kopanja. U okviru statističke obrade podataka izvedene su višestruke regresijske analize utjecaja značajki materijala na dinamičke veličine rada bagera i geometriju kopanja. Regresijskom analizom također je prikazan utjecaj karakteristika materijala i geometrije kopanja na učinak. Utvrđeno je da granulometrijski sastav rastresitih materijala predstavlja najutjecajnije svojstvo na učinak kopanja, dok je duljina trajektorije kopanja najutjecajnija geometrijska veličina. Detaljnom analizom zasebnih ciklusa rada bagera utvrđena je razlika optimalne trajektorije kopanja u različitim materijalima. Predložena je klasifikacija učinka kopanja bagera u različitim materijalima. Također je predložen model za procjenu značajki materijala na temelju dinamičkih veličina rada bagera.

Ključne riječi: rudarstvo, bager, učinak, površinski kop, dinamičke radne veličine, fizikalno-mehaničke značajke stijena.

ABSTRACT

The hydraulic excavator is one of the most commonly used machines in mining. Because of this, researchers have a great interest in studying its productivity and optimization of work. The research within this work is based on a detailed study of the operation of an excavator in real conditions. According to the available literature, such research is relatively modest and there is a lot of room for improvement. In order to access the data that provides insight into the real operation of the excavator, it is necessary to continuously measure the extension and pressures on the hydraulic cylinders. This is achieved by using a specific measuring system that can perform a simultaneous measurement of several parameters on the excavator during its work in real conditions. The measured data was processed using a computer program written in the Python programming language. Using standard kinematic and dynamic models of excavators, values of dynamic parameters of work (force, power, and energy consumption during digging) and geometric parameters of digging (tooth angle, length, and cutting area) were obtained. The field measurements were performed on 5 different machines and a total of 13 materials. Laboratory and field measurements determined the characteristics of the material (granulation, moisture content, and bulk density). In the paper, the productivity of digging was calculated, which represents the mass or volume of the excavated material in the time it took to perform the digging. In the frame of the statistical processing of data, multiple regression analyses have been performed on the influence of the characteristics of the material on the dynamic parameters of the excavator and the digging geometry. By regression analysis, the influence of the characteristics of the rocks and the geometry of digging on the productivity of digging are also shown. The size distribution has been found to be the most influential property of non-cohesive materials on the productivity of digging, while the length of the digging trajectory is the most influential geometric size. Through detailed analysis of the separate work cycles of the excavators, the difference in optimal digging trajectory in different materials has been determined. The classification of productivity of excavators digging in different materials is proposed. A model for assessing the characteristics of the materials based on the dynamic working parameters of the excavator is also proposed.

Keywords: mining, excavator, productivity, open pit mine, dynamic working parameters, rocks characteristics.

PROŠIRENI SAŽETAK

Rudarstvo kao jedna od temeljnih grana industrije posljednjih se godina ubrzano razvija u korak s globalnim trendom razvoja gospodarstva. Nagli razvoj donosi velike izazove s kojima se rudarska struka treba nositi. Jedan od izazova svakako je prilagodba tehnologije i mehanizacije na tražene kapacitete, ali i regulative. Stoga je istraživanje i razvoj učinkovitosti rudarskih strojeva vrlo aktualna tema. Hidraulički bager s dubinskom lopatom jedan je od najčešće korištenih strojeva kako u rudarstvu tako i građevinarstvu, geotehnici i srodnim područjima. Multifunkcionalnost i robusnost čine ga nezamjenjivim pri obavljanju različitih radova na površinskim kopovima mineralne sirovine.

Pregledom dostupne literature vezane uz učinak i optimizaciju rada bagera utvrđeno je da velika većina autora svoja istraživanja zasniva na laboratorijskim ispitivanjima rada bagera ili provedbi računalnih simulacija. Rezultati takvih ispitivanja teško se mogu primijeniti u praksi. Istraživanja u sklopu ovoga rada zasnivaju se na terenskim mjerenjima u realnim radnim uvjetima pri radu bagera u različitim materijalima. Prema literaturi, takva su ispitivanja vrlo rijetko provedena. Rezultati mjerenja u realnim uvjetima mogu biti znatno lakše primjenjivi u proračunu učinka i optimizaciji rada bagera u praksi. Kako bi se ostvario pristup podacima realnoga rada potrebno je kontinuirano mjerenje tlakova i pomaka na hidrauličnim cilindrima koji su zaduženi za pokretanje radnoga mehanizma bagera. To je ostvareno pomoću specifičnoga mjernog sustava razvijenog na RGN fakultetu. Sustav se sastoji od tri mjerna pretvornika linearnoga pomaka, četiri mjerna pretvornika tlaka i jedinice za pohranu podataka.

Terenska mjerenja u realnim uvjetima izvedena su na četiri različita kamenoloma u ukupno trinaest materijala. S obzirom na to da su kamenolomi najzastupljeniji površinski kopovi te u pravilu posjeduju bager, odabrani su kao najpogodnije lokacije za izvođenje mjerenja. Materijali koji se najčešće pojavljuju na kamenolomu su odminirana stijenska masa i otkrivka, no mogu se pojaviti također u različitoj granulaciji te međusobno pomiješani u određenom omjeru. Materijali u kojima su izvedena mjerenja podijeljeni su u pet različitih skupina: odminirani stijenski materijal, otkrivka, blokovi, frakcija i frakcija pomiješana s otkrivkom. Na uzorcima materijala laboratorijskim i terenskim ispitivanjima utvrđena je nasipna gustoća, sadržaj vlage i granulometrijski sastav.

Rezultati mjerenja obrađeni su pomoću programa za obradu podataka koji je napisan u programskom jeziku Python. Program omogućuje selekciju, obradu i grafički prikaz podataka. Za proračun kinematike potrebne su detaljne i precizne dimenzije bagera koje su dobivene

izradom trodimenzionalnog modela bagera fotogrametrijskom metodom u programu Agisoft PhotoScan. Pomoću podataka o kretanju cilindra, poznatih dimenzija bagera i kinematičkog modela u programu za obradu podataka proračunata je trajektorija kretanja radnog alata. Na temelju podataka tlaka hidrauličnog ulja i dimenzija cilindra izračunate su efektivne sile na cilindrima. Korištenjem izraza dinamičkog modela bagera izračunate su sila, snaga i utrošak energije na radnom alatu, kao dinamičke veličine rada bagera.

Cilj je ovoga rada istražiti utjecaj značajki stijenskoga materijala na učinak i optimalne radne veličine hidrauličkoga bagera, stoga je potrebno izdvojiti dijelove ciklusa rada bagera u kojem je radni alat u kontaktu s materijalom. To je postignuto algoritmom koji za svaku proračunatu veličinu zasebno razdvaja dijelove ciklusa u kojima se izvodi kopanje. Uz dinamičke radne veličine na taj su način izdvojene i geometrijske veličine kopanja odnosno duljina reza, površina reza te vrijeme trajanja kopanja. Geometrijske veličine kopanja i dinamičke veličine rada bagera zajedno predstavljaju radne veličine bagera. Posebni algoritam u programu zadužen je za proračun mase materijala u lopati na temelju sila na cilindrima i položaja lopate. Koristeći masu materijala u lopati u pojedinom ciklusu te vrijeme trajanja kopanja u tom ciklusu proračunat je učinak kopanja.

U okviru obrade podataka izvedene su višestruke regresijske analize utjecaja značajki materijala kao nezavisnih varijabli na dinamičke veličine rada bagera, učinka i geometriju kopanja kao zavisne varijable. Provođenjem linearne regresije utvrđena je slaba linearna zavisnost između varijabli. Nakon uvođenja kategoričkih varijabli koje grupiraju rastresite i koherentne materijale u regresijskoj analizi, koeficijenti korelacije i značajnosti modela ukazuju na veću linearnu zavisnost između varijabli. Taj podatak ukazuje na specifičnost dinamičkih radnih veličina, učinka i geometrije kopanja u različitim materijalima. Regresijskom analizom utvrđeno je da granulometrijski sastav kod rastresitih materijala predstavlja najutjecajnije svojstvo na učinak kopanja, dok je duljina trajektorije kopanja najutjecajnija geometrijska veličina. Usporedbom trajektorija kopanja kod kojih je u različitim materijalima postignut slični učinak utvrđena je značajna razlika u duljini trajektorije. Na temelju toga je prikazan je jedinični učinak po metru kopanja za različite materijale. Zaključeno je da postoji tendencija postizanja većega jediničnog učinka u sitnijim materijalima. Na temelju regresijske analize utjecaja snage stroja i svojstva materijala predložen je model klasifikacije učinka kopanja bagerom u različitim materijalima. Također je predložen model za procjenu granulacije materijala na temelju dinamičkih radnih veličina kopanja.

EXTENDED ABSTRACT

Mining, as one of the fundamental branches of industry, has been developing rapidly in recent years in step with the global trend of economic development. Rapid development brings great challenges that the mining profession must deal with. One of the challenges is certainly the adaptation of technology and mechanization to the required capacities and regulations. Therefore, research and development of the productivity of mining machines is a very current topic. The hydraulic shovel excavator is one of the most widely used machines in both mining and construction, geotechnics, and related occupations. Multifunctionality and robustness make it irreplaceable while performing various works on open pit mines.

A review of the available literature related to the productivity and optimization of excavator work revealed that the vast majority of authors base their research on laboratory tests of excavator work or computer simulations. The results of such tests can hardly be applied in practice. Research as part of this work is based on field measurements in real working conditions during excavator work in different materials. According to the literature, such tests are rarely conducted. The results of measurements in real conditions can be much easier to apply in the calculation of performance and optimization of excavator operation in practice.

In order to gain access to the data of real work, it is necessary to continuously measure the pressures and displacements on the hydraulic cylinders that are responsible for starting the working element of the excavator. In order to gain access to the data of real work, it is necessary to continuously measure the pressures and displacements on the hydraulic cylinders that are responsible for starting the working element of the excavator. This was achieved using a specific measurement system developed at the RGN Faculty. The system consists of three linear draw wire sensors, four pressure sensors and a data logger.

Field measurements in real conditions were performed at four different quarries in a total of thirteen materials. Given that quarries are the most common open pit mines and as a rule have an excavator, they were chosen as the most suitable locations for carrying out measurements. The materials that most often appear at the quarry are blasted rock mass and overburden, but they can also appear in different granulations and mixed with each other in a certain ratio. The materials in which the measurements were performed were divided into five different groups: blasted rock material, overburden, boulders, fraction, and fraction mixed with overburden. The bulk density, moisture content and size distribution of the material samples were determined by laboratory and field measurements.

The measurement results were processed using a data processing program written in the Python programming language. The program enables the selection, processing, and graphical representation of data. For the calculation of kinematics, detailed and precise dimensions of the excavator are required, which were obtained by creating a three-dimensional model of the excavator using the photogrammetric method in the Agisoft PhotoScan program. Using the data on the movement of the cylinders, the known dimensions of the excavator and the kinematic model in the data processing program, the trajectory of the movement of the working tool was calculated. Based on hydraulic oil pressures and cylinder dimensions, the effective forces on the cylinders were calculated. By using the equations of the dynamic model of the excavator, the force, power, and energy consumption of the working tool was calculated, as dynamic parameters of the excavator's work.

The aim of this work is to research the influence of the characteristics of the rock material on the performance and optimal working size of the hydraulic excavator, therefore it is necessary to separate the parts of the excavator's work cycle in which the working tool is in contact with the material. This was achieved with an algorithm that separates the individual parts of the cycle in which digging is performed for each calculated size. In addition to the dynamic working sizes, the geometric sizes of the digging, i. e., the length of the cut, the area of the cut and the duration of the digging, are also separated in this way. A special algorithm in the program is responsible for calculating the mass of material in the shovel based on the forces on the cylinders and the positions of the shovel. Using the mass of material in the shovel in each cycle and the duration of digging in that cycle, the productivity of digging was calculated.

Multiple regression analyses of the influence of material characteristics as independent variables on the dynamic dimensions of excavator work, performance, and digging geometry as dependent variables were performed within the data processing framework. By conducting a linear regression, a weak linear dependence between the variables was determined. After the introduction of categorical variables that group loose and coherent materials in the regression analysis, the correlation and significance coefficients of the model indicate a greater linear dependence between the variables. This data indicates the specificity of dynamic working parameters, digging productivity, and geometry of digging in different materials. Regression analysis determined that the size distribution of loose materials is the most influential property of the digging productivity, while the length of the digging path is the most influential geometric parameter. A comparison of the digging trajectory in which similar productivity was achieved in different materials revealed a significant difference in the length of the trajectory. Based on

this, the unit productivity per meter of digging for different materials is shown. It was concluded that there is a tendency to achieve a higher unit effect in finer materials. Based on the regression analysis of the influence of machine power and material properties, a classification model of the digging productivity with an excavator in different materials has been proposed. A model for estimating the material granulation based on dynamic working parameters of digging has also been proposed.

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	POVRŠINSKI KOP	4
2.1.	Tehnološki proces na kamenolomu TG kamena	5
2.2.	Materijali dostupni na kamenolomu	6
2.3.	Značajke stijenskoga materijala.....	6
2.3.1.	Nasipna gustoća materijala.....	7
2.3.2.	Granulometrijski sastav	8
2.3.3.	Sadržaj vlage	9
3.	HIDRAULIČNI BAGER S DUBINSKOM LOPATOM	11
3.1.	Učinak bagera	13
3.2.	Kinematika bagera	14
3.2.1.	Trajektorija kretanja lopate	23
3.2.2.	Radni ciklus.....	24
3.2.3.	Geometrija kopanja	26
3.3.	Dinamika rada bagera.....	28
3.3.1.	Dinamičke radne veličine.....	29
3.3.2.	Masa materijala u lopati	34
3.3.3.	Učinak kopanja.....	35
4.	PROVEDENA MJERENJA.....	37
4.1.	Mjerni sustav	37
4.1.1.	Linearni mjerni pretvornik položaja.....	38
4.1.2.	Mjerni pretvornici tlaka.....	39
4.1.3.	Jedinica za pohranu podataka.....	40
4.1.4.	Umjeravanje sustava	41

4.1.5.	Dinamometar	42
4.2.	Izvođenje terenskih mjerenja	43
4.2.1.	Preliminarna terenska istraživanja i probna terenska mjerenja	45
4.2.2.	Terenska mjerenja u realnim uvjetima	48
4.2.3.	Mjerenje nasipne gustoće materijala na terenu	55
4.3.	Određivanje dimenzija bagera	56
4.4.	Laboratorijska ispitivanja	58
4.4.1.	Određivanje sadržaja vlage	58
4.4.2.	Određivanje granulometrijskoga sastava	59
4.5.	Određivanje granulometrijskoga sastava pomoću računalnoga programa „WipFrag“	60
5.	OBRADA PODATAKA	65
5.1.	Programski jezik Python.....	65
5.2.	Programska skripta	66
5.3.	Koordinate vrha lopate	67
5.3.1.	Putanja kretanja lopate	69
5.4.	Tlak hidrauličnoga ulja u cilindrima	70
5.4.1.	Efektivna sila na cilindrima.....	72
5.4.2.	Sile na zube lopate	73
5.5.	Razdvajanje ciklusa i proračun dinamičkih radnih veličina	75
5.5.1.	Sila kopanja	77
5.5.2.	Utrošak energije	79
5.5.3.	Snaga	80
5.5.4.	Masa materijala u lopati	81
5.6.	Geometrija kopanja.....	84
6.	VALIDACIJA IZMJERENIH VRIJEDNOSTI	89

7.	ANALIZA PODATAKA I DISKUSIJA.....	92
7.1.	Višestruka regresijska analiza	92
7.1.1.	Zavisnost dinamičkih radnih veličina i učinka kopanja o značajkama materijala	94
7.2.	Utjecaj značajki materijala na učinak kopanja	99
7.3.	Korelacije veličina u rastresitom i koherentnom materijalu.....	102
7.4.	Klasifikacija učinka kopanja bagera u različitim materijalima	107
7.5.	Analiza predviđanja parametra granulacije materijala u ovisnosti o dinamičkim i radnim veličinama bagera.....	110
7.6.	Analiza predviđanja trajanja kopanja u ovisnosti o značajkama materijala	113
8.	ZAKLJUČAK	116

POPIS LITERATURE

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

POPIS OZNAKA I SIMBOLA

PRILOZI

ŽIVOTOPIS

OBJAVLJENI RADOVI

1. UVOD

Rudarstvo se u svijetu posljednjih godina ubrzano razvija prateći globalni trend razvoja gospodarstva. Potražnja za pojedinim mineralnim sirovinama raste velikom brzinom, dok prirodni, tehnološki, pravni i društveni uvjeti uvelike mogu ograničavati kapacitete. Stoga je jedan od najvećih izazova modernoga rudarenja biti ukorak s vremenom. Da bi se to postiglo, uz kvalitetan kadar i društvenu podršku, svakako je moderna i učinkovita tehnologija jedan od ključnih faktora uspjeha. Trenutni tehnološki napredak u svijetu usmjeren je prema što većem smanjenju korištenja fosilnih goriva s ciljem smanjenja emisija ugljičnog dioksida u atmosferu. U rudarskoj industriji tehnologija je najvećim dijelom vezana za mobilne strojeve pogonjene pretežno motorima s unutarnjim izgaranjem, tako da smanjenje emisija ugljičnog dioksida ima velik utjecaj. Električni strojevi, koji nalaze sve veću primjenu u rudarstvu, također nisu pošteđeni utjecaja smanjenja emisije ugljičnog dioksida iz razloga što se u današnje vrijeme još uvijek vrlo veliki postotak električne energije dobiva iz fosilnih goriva. Stoga se razvoj tehnologije bazira na što većoj učinkovitosti koja izravno utječe na smanjenje potrošnje energije a samim time i emisije ugljičnog dioksida. Učinak bilo kojeg stroja korištenoga u rudarstvu jest vrlo važan podatak koji je neophodan u organizaciji rada, planiranju kapaciteta i troškova eksploatacije. Točnost proračuna učinka jamči dobru organizaciju radnih procesa i optimalnu raspodjelu resursa što je u današnje vrijeme s obzirom na cijenu energenata vrlo veliki čimbenik rentabilnosti koji čak može postati i presudan.

Učinak svakoga rudarskog stroja u osnovi možemo promatrati kroz tri glavna čimbenika. Prvi čimbenik jest sama tehnička konstrukcija i karakteristike stroja te karakteristike materijala u kojem stroj radi. Na samu tvorničku izvedbu stroja se iz rudarskoga aspekta ne može utjecati kao ni na prirodne fizikalno-mehaničke značajke materijala u kojem stroj radi. No ovaj čimbenik vrlo je značajan u smislu optimalnoga odabira stroja. Važno je stroj pravilno iskoristiti, odnosno njegova konstrukcija i performanse moraju odgovarati uvjetima u kojima radi. Posebna se pozornost mora pridati održavanju stroja kako bi što duže zadržao što bolje stanje i performanse. Sljedeći je čimbenik optimalna organizacija rada. Kod organizacije rada treba što više izbjegavati prazan hod stroja, premještanja i zastoje koji negativno utječu na učinak. Treći čimbenik za koji neki tvrde da je najutjecajniji jest ljudski faktor, odnosno sposobnost operatera na stroju. Ovaj čimbenik može se poboljšati edukacijom, usavršavanjem i stimulacijom radnika koji rade na strojevima. Svaki od ovih čimbenika može biti presudan te se pri predviđanju učinka ni jedan od njih ne bi trebalo zanemariti.

Cilj ovoga rada bio je istražiti učinak i optimalne radne veličine bagera prema značajkama stijenskoga materijala na površinskom kopu. Materijali na površinskom kopu mogu biti rastresiti (šljunak, pijesak, drobina), koherentni (glina, tlo) te kombinacija rastresitih i koherentnih materijala. Kako bi bilo moguće detaljno istražiti učinak u takvim materijalima nastojalo se provesti istraživanja u materijalima koji se razlikuju po određenim značajkama.

Nakon detaljnoga pregleda literature vezane uz učinak i optimalne radne veličine strojeva zaključeno je da su mjerenja dinamičkih veličina bagera kao što su: sila, snaga i utrošak energije u realnim uvjetima vrlo rijetka te da postoji veliki prostor za istraživanje u tom području. Mjerenja u realnim uvjetima mogu dati rezultate koji su znatno pouzdaniji za proračun učinka od rezultata dobivenih mjerenjem u idealnim ili određenim specifičnim uvjetima. Realne uvjete rada karakterizira nehomogeni materijal i različita putanja kretanja lopate u svakom ciklusu. Zbog toga je potrebno izmjeriti što više radnih ciklusa kako bi se statističkom obradom podataka mogli dobiti korisni rezultati. Odabrana su svojstva stijenskoga materijala koja će biti utvrđena na svakom uzorku te će se istražiti njihov utjecaj na radne veličine bagera. Odabrana svojstva materijala su: nasipna gustoća, sadržaj vlage i granulacija.

Na temelju razmatranja dosadašnjih istraživanja i mogućih rezultata ovog rada, postavljene su tri hipoteze. Prva hipoteza glasi:

„Optimalna trajektorija i dinamičke radne veličine kopanja bagerom specifične su u različitim vrstama stijenskoga materijala.“

Optimalna trajektorija kopanja u određenom materijalu može se izdvojiti iz ciklusa u kojem je uz najmanje utrošene energije postignut najveći učinak kopanja. Utrošenu energiju kopanja moguće je izračunati pomoću sila interakcije radnoga alata i stijene. Stoga se kao mogući doprinos ističe klasifikacija učinka bagera pri radu u različitim vrstama stijenskoga materijala temeljena na različitim silama interakcije radnog alata i stijene.

Druga hipoteza glasi:

„Na učinak hidrauličnog bagera najutjecajnija značajka je granulometrijski sastav kod rastresitih te vlažnost kod koherentnih stijenskih materijala.“

Granulometrijski sastav materijala prema mnogim je autorima definiran kao utjecajna značajka materijala na učinak. U ovom je radu promatran kroz više parametara s ciljem određivanja najutjecajnijeg. Kako bi se usporedio učinak bagera u različitim materijalima potrebno je promatrati isključivo dio ciklusa u kojem je lopata bagera u kontaktu s materijalom. Takav učinak možemo preciznije nazvati učinkom kopanja te istražiti njegovu vezu s pojedinim karakteristikama materijala. Pomoću ovih podataka moguće je razviti model za procjenu

fizikalno-mehaničkih značajki stijenskoga materijala tijekom iskopa bagerom na temelju korelacija istih s dinamičkim veličinama rada bagera.

Treća hipoteza glasi:

„Simultanim opažanjem dinamičkih radnih veličina bagera kroz dulje razdoblje moguće je unaprijediti modele proračuna učinka bagera.“

Opažanjem dinamičkih radnih veličina bagera tijekom rada u realnim uvjetima dostupni su detaljni podatci o utrošenom vremenu za pojedini dio ciklusa. Analizom utjecaja značajki materijala na vrijeme trajanja kopanja u ciklusima dobije se model zavisnosti pomoću kojeg je moguće procijeniti trajanje kopanja u različitim materijalima te uključiti dobiveni rezultat u proračun učinka.

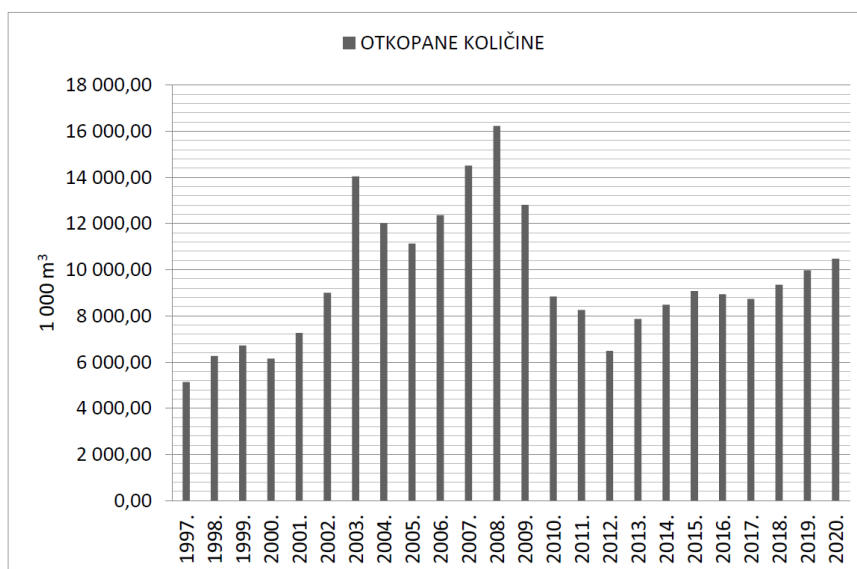
Mjerenja u sklopu ovoga rada obavljena su na četiri kamenoloma u ukupno trinaest materijala. Prije glavnih mjerenja obavljeno je nekoliko preliminarnih mjerenja u svrhu usavršavanja sustava za mjerenje te postupka spajanje sustava na bager. Korišten je specifični mjerni sustav razvijen na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, koji omogućava simultano mjerenje i spremanje podataka s više mjernih pretvornika. Sustav posjeduje autonomno napajanje što omogućuje jednostavno spajanje na bager te mjerenje bez ometanja rada.

Analitičkom obradom podataka dobivenih terenskim mjerenjem uz korištenje kinematičkih i dinamičkih modela bagera, izračunati su rezultati dinamičkih radnih veličina i geometrije kopanja. Fizikalno-mehaničke značajke materijala utvrđene su terenskim i laboratorijskim analizama. Statističkom obradom svih dobivenih rezultata utvrđen je utjecaj značajki stijenskoga materijala na učinak i optimalne radne veličine hidrauličnoga bagera.

2. POVRŠINSKI KOP

Površinski kop je rudarski objekt na kojem se određenim rudarskim metodama izvodi površinsko pridobivanje mineralne sirovine. Ovakvi su oblici rudarenja danas u svijetu kao i u Hrvatskoj najzastupljeniji. Prednosti površinskog rudarenja očituju se u većoj produktivnosti, većem iskorištenju te sigurnijim uvjetima rada u odnosu na podzemno rudarenje. Nedostatci su potreba za rješavanjem imovinsko-pravnih odnosa, ovisnost o atmosferskim prilikama, troškovi raskrivanja rudnoga tijela i ograničenja vezana uz stroge zahtjeve za očuvanjem okoliša (Hrvatska enciklopedija, 2021.).

U Republici Hrvatskoj prema izvješću Ministarstva gospodarstva i održivog razvoja u 2020. godini bilo je registrirano 335 aktivnih eksploatacijskih polja od čega je čak 144 eksploatacijskih polja tehničko-građevnog kamena i 92 arhitektonsko-građevnog kamena. Građevni pijesak i šljunak vadio se na 53 eksploatacijska polja, ciglarska glina na 13, te karbonatne mineralne sirovine za industrijsku preradbu na 13 aktivnih eksploatacijskih polja. Na ostalih dvadesetak eksploatacijskih polja vadi se: tuf, silikatne mineralne sirovine za industrijsku preradu, morska sol, kremenij pijesak, keramička i vatrostalna glina, mineralne sirovina za proizvodnju cementa, gips i boksit (Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja RH, 2022).



Slika 2.1. Otkopane količine tehničko građevnog kamena u RH (Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja RH, 2022)

Eksploatacijska polja tehničko-građevnog (TG) i arhitektonsko-građevnog kamena još nazivamo i kamenolomima. Kamenolomi TG kamena kao najbrojnija eksploatacijska polja u Hrvatskoj imaju i najveći gospodarski značaj s ukupnom proizvodnjom preko 10 milijuna m³ godišnje (slika 2.1.). Istraživanje u ovom radu bazirat će se na mjerenjima obavljenim upravo na kamenolomima TG kamena jer su najdostupniji, a rezultati će pronaći najširu primjenu.

Metode otkopavanja mineralnih sirovina na površinskim kopovima ponajprije ovise o fizikalno-mehaničkim značajkama stijenske mase. Tako se u kamenolomima TG kamena u pravilu koristi bušenje i miniranje kao metoda otkopavanja zbog čvrstoće stijenske mase. Vrlo rijetko postoje iznimke gdje se TG kamen primarno odvaja strojnim metodama.

Slične fizikalno-mehaničke značajke stijenske mase posjeduju i karbonatne mineralne sirovine za industrijsku preradu, te se također u pravilu primjenjuje otkopna metoda bušenjem i miniranjem. Građevinski šljunak i pijesak u Hrvatskoj najčešće se pojavljuje u riječnim nanosima u rastresitom stanju te se otkopava podvodno, u pravilu plovnim bagerima. Sirovine glina pojavljuju se u uslojenim ili neuslojenim ležištima, a pogodne su za primjenu strojne metode otkopavanja, najčešće hidrauličnim bagerom.

2.1. Tehnološki proces na kamenolomu TG kamena

Otvaranje ležišta TG kamena kao i karbonatnih mineralnih sirovina za industrijsku preradu u pravilu se zasniva na formiranju etaža na otvorenom dijelu ležišta. Etaže se sastoje od etažnih kosina i bermi, a njihova geometrija ovisi o karakteristikama stijenske mase i tehnološkom procesu otkopavanja.

Tehnološki proces otkopavanja u osnovi se najčešće sastoji od pet faza koje se ciklički ponavljaju. Prva faza je uklanjanje otkrivke ukoliko je prisutna na ležištu. Izvodi se najčešće strojno pomoću bagera ili buldozera uz prethodno plitko miniranje. U sljedećoj fazi slijedi bušenje i miniranje korisne mineralne sirovine. Nakon miniranja slijedi faza utovara i transporta sirovine. Utovar odminirane stijenske mase izvodi se bagerom ili utovaračem. Tijekom utovara odvajaju se vangabaritni blokovi koji se naknadno, u sljedećoj fazi, sekundarno usitnjavaju. Utovar se može obaviti u kamione ili dampere koji transportiraju sirovinu do stacionarnoga oplemenjivačkog postrojenja ili izravno u mobilno drobilično postrojenje. Nakon oplemenjivanja koje se sastoji od drobljenja, sijanja i klasiranja na standardne frakcije, sirovina je spremna za daljnju distribuciju.

2.2. Materijali dostupni na kamenolomu

Na kamenolomu TG kamena najčešće se susreće dvije osnovne vrste materijala. To su korisna mineralna sirovina i otkrivka. U vrlo rijetkim slučajevima pojave se ležišta bez otkrivke, no njihov je broj zanemariv. Na kamenolomima se također javljaju i materijali koji nisu korisni, te takve nazivamo jalovinom. U slučaju TG kamena, velik udio jalovine, zbog relativno niske cijene sirovine, može činiti ležište nerentabilnim. Iz toga se razloga na kamenolomima TG kamena obično ne susreće značajnija količina jalovine.

Najzastupljenije vrste stijena za proizvodnju TG kamena u Republici Hrvatskoj su sedimentne stijene; vapnenci i dolomiti te rjeđe eruptivna stijena dijabaz. Korisnu mineralnu sirovinu na kamenolomu susrećemo u više oblika. Prvo kao sraslu stijensku masu koju je potrebno miniranjem primarno odvojiti. Nakon miniranja sirovina se pojavljuje kao odminirani stijenski materijal iz kojeg se odvajaju vangabaritni blokovi kao posebni materijal. Nakon usitnjavanja i klasiranja, materijal se može pojaviti u standardnim građevinskim frakcijama te u raznim drugim kombinacijama granulacije.

Otkrivka se može sastojati od humusa, gline, lapora, pijeska, praha, a najčešće je to kombinacija više komponenti iako često prevladava glina. Također, u otkrivci se u pravilu nalazi određeni udio fragmenata čvrste stijene. Udio komponenata može biti različit te samim time fizikalno-mehaničke značajke otkrivke mogu značajno varirati. Ako je udio čvrste stijene u nekom dijelu otkrivke zadovoljavajući, drobljenjem takvog materijala može se dobiti pogodna frakcija za određene građevinske namjene. U tom slučaju raspolažemo s kombinacijom materijala koja ima specifične fizikalno-mehaničke značajke.

U sklopu ovoga rada izvedena su mjerenja u ukupno trinaest različitih materijala grupiranih u pet skupina. Izdvojene skupine materijala su: odminirani stijenski materijal, otkrivka, blokovi, frakcija i frakcija s otkrivkom.

2.3. Značajke stijenskoga materijala

Različiti materijali koji se susreću na kamenolomu posjeduju različite značajke. Kako bi se odabrala svojstva koja će biti mjerena, potrebno je detaljno analizirati literaturu. Nekoliko autora istraživalo je povezanost parametara materijala sa silama kopanja bagerom. Tako su na primjer Zhao i sur. (2017) predložili sljedeće parametre: gustoću, koheziju, kut unutarnjeg trenja i adheziju između lopate bagera i tla. Rad se bazirao na razvoju metoda identifikacije parametara tla i predviđanje sile kopanja pri autonomnom radu bagera. Njihovo je ispitivanje

bilo provedeno u laboratoriju na posebno pripremljenim homogenim uzorcima pijeska, glinovitoga pijeska, ilovače, praškaste ilovače i teške gline. Manyele i sur. (2017) ističu utjecaj granulometrijskoga sastava stijenske mase kao vrlo važan parametar odminiranoga stijenskog materijala pri utovaru i transportu. Ur Rehman (2021) dokazuje u svojoj disertaciji da veličina zrna značajno utječe na učinak utovarača. Nikkhah i sur. (2021) u svom radu procjene utjecaja usitnjenosti rude miniranjem na proces rudarenja dokazuju značajnu korelaciju granulacije materijala s učinkom utovarnih strojeva. U literaturi nije pronađen rad koji bi predstavio mjerenja dinamičkih radnih veličina bagera u rastresitim i koherentnim materijalima te ih usporedio s učinkom. Stoga su u svrhu ovoga istraživanja odabrana svojstva koja je moguće odrediti u svim vrstama materijala. Na taj način prošireno je istraživanje, odnosno povezani su svi dostupni materijali na površinskom kopu kroz jedinstveni model utjecaja parametara materijala na učinak. U svim materijalima određena je nasipna gustoća, granulometrijski sastav i sadržaj vlage.

2.3.1. Nasipna gustoća materijala

Nasipna gustoća je fizikalno svojstvo rastresitih stijenskih materijala i tala koje uzima u obzir poroznost. Kada bi poroznost bila jednaka nuli nasipna gustoća bila bi ista kao i gustoća zrna. Razlikujemo ukupnu i prividnu poroznost. Ukupna poroznost uzima u obzir sve pore između zrna materijala i pore unutar samih zrna, dok prividna poroznost uzima u obzir samo pore između zrna materijala (Manger i sur., 1963). Nasipna gustoća (ρ_n) može se odrediti koristeći izmjereni volumen (V_m) i masu materijala (m) pomoću izraza 2.1. Ovisi o vrsti materijala, granulometrijskom sastavu, obliku zrna, zbijenosti, sadržaju vlage i drugim svojstvima materijala koja više ili manje utječu na samu nasipnu gustoću. Materijali na kamenolomu često su nehomogeni te je vrlo važno uzimanje reprezentativnoga uzorka za određivanje nasipne gustoće.

$$\rho_n = \frac{m}{V_m} [\text{t/m}^3] \quad (2.1)$$

Gdje je: ρ_n - Nasipna gustoća materijala [kg/m^3],

m - Masa uzorka [kg],

V_m - Volumen materijala [m^3].

Važnost određivanja nasipne gustoće materijala u sklopu izrade ovoga rada očituje se na dva načina. Prilikom kopanja materijala bagerom koji na sebi ima pričvršćenu lopatu određenog volumena, uz promjenu nasipne gustoće materijala za isti volumen u lopati promijenit će se masa. Promjena mase materijala u lopati izravno utječe na generiranje različitih sila na cilindrima odnosno različiti utrošak energije. Stoga možemo zaključiti da nasipna gustoća materijala u teoriji nedvojbeno utječe na dinamičke radne veličine bagera. Poznavanjem nasipne gustoće materijala i mase materijala u lopati, transformacijom izraza 2.1 proračunava se volumen iskopanog materijala koji je važan za prikazivanje učinka.

2.3.2. Granulometrijski sastav

Granulometrijski sastav materijala opisuje relativni udio čestica različitog promjera u ukupnoj masi uzorka (Mulabdić, 2018). U praksi, to je vrlo važna veličina jer se već na temelju samoga granulometrijskog sastava materijala mogu odrediti određene fizikalne karakteristike kao što su: vodopropusnost, stišljivost, filtarska svojstva, osjetljivost na smrzavanje, uporabljivost određene mehanizacije itd. Prvi i najvažniji korak prije granulometrijske analize je pripremanje reprezentativnog uzorka materijala, a to podrazumijeva da su u uzorku zastupljene sve veličine zrna koje su i u originalnom materijalu i da taj odnos odgovara originalnom materijalu. Nakon što se pripremi reprezentativan uzorak granulometrijski sastav materijala određuje se jednom od tri metode: sijanjem za čestice veće od 0,06 mm, areometriranjem za čestice manje od 0,06 mm ili kombinacijom sijanja i areometriranja. Sijanje uzorka može se provoditi suhim ili mokrim postupkom, a odabir metode ovisi o tome postoje li sitna zrna koja su nalijepljena na krupna zrna. Kod oba se postupka za sijanje koristi niz sita standardnih dimenzija čiji se otvori smanjuju sa svakim sljedećim sitom, a dimenzije otvora i postupak sijanja propisan je normom (ASTM D 422-63(2007)e1, 2014). Kod suhoga postupka uzima se određena masa uzorka koja se određuje na temelju maksimalnoga promjera zrna i uzorak se usipava na najgrublje sito u setu. Cijeli set smješta se na tresilicu i uzorak se trese 10 do 15 minuta. Nakon sijanja važe se masa svakoga sita s uzorkom koji je ostao na pojedinom situ pri čemu je bitno da je kroz najgrublje sito prošao sav materijal kako bi se odredio maksimalni promjer zrna dok je na dnu seta posuda u koju se skuplja sav uzorak koji je prošao kroz najfinije sito. Mokri postupak sijanja jednak je kao i suhi samo što se kod toga postupka uzorak na svakom ispiru, zatim se suši i važe. Rezultati sijanja prikazuju se granulometrijskim dijagramima u kojima je na apscisi veličina zrna u mm u logaritamskom mjerilu, dok je na ordinati koeficijent prolaza mase u % logaritamskom mjerilu (Kvasnička i Domitrović, 2007).

Za materijale koji sadrže čestice manje od 0,06 mm koje nije moguće sijati granulometrijska analiza provodi se metodom areometriranja. Kod ove metode veličina i postotak pojedine frakcije određuje se indirektno mjerenjem gustoće suspenzije, pomoću umjerenog plovka koji se zove areometar, u određenim vremenskim intervalima, primjenjujući tzv. Stockesov zakon. Suspenzija se sastoji od materijala tla i destilirane vode u kojoj je otopljen antikoagulans koji sprječava nakupljanje manjih čestica u veće. Kombinirana metoda primjenjuje se kad je više od 10% zrnaca prošlo kroz sito s najmanjim otvorom pa se granulometrijska krivulja dobivena sijanjem nastavlja s areometriranjem.

U okviru ispitivanja vezanih za ovaj rad određen je granulometrijski sastav materijala kako bi se dokazala druga hipoteza u kojoj je pretpostavljeno da granulometrijski sastav predstavlja najutjecajniju značajku rastresitih materijala na učinak hidrauličnoga bagera. Granulometrijski sastav također ima utjecaj i na nasipnu gustoću i ostale značajke te na taj način dodatno utječe na učinak i optimalne radne veličine kopanja.

2.3.3. Sadržaj vlage

Sadržaj vlage ili vlažnost materijala (w) je pokazatelj relativnoga masenog udjela vode (m_w) koja se nalazi u porama materijala i mase čvrstih čestica (m_d), izražen u postocima (%) (izraz 2.3). Ispituje se i na koherentnim i na nekoherentnim vrstama tla. Postupak određivanja provodi se po normi (HRN EN ISO 17892-1:2015 i/ili ASTM D2216-10, 2010) na način da se uzorak izvaže prije i nakon sušenja. Razlika između mase uzorka (m_m) prije i nakon sušenja (m_d) daje nam masu vode (m_w) koju je uzorak sadržavao kao što je navedeno u izrazu 2.2. (Mulabdić, 2018).

$$m_w = m_m - m_d \text{ [g]} \quad (2.2)$$

$$w = \frac{m_w}{m_d} * 100 \text{ [%]} \quad (2.3)$$

Gdje je: m_w – Masa vode [g],

m_m – Masa uzorka prije sušenja [g],

m_d – Masa uzorka nakon sušenja [g],

w - Sadržaj vlage [%].

Voda je prisutna u porama tla gotovo uvijek te može bitno utjecati na fizikalna i mehanička svojstva tla. Iz tog je razloga određen sadržaj vlage na uzorcima u kojima je provedeno terensko mjerenje. Kod koherentnih uzoraka materijala, gdje je dominantno prisutna glina, povećanjem sadržaja vlage značajno se mijenjaju svojstva. Također se javljaju i adhezijske sile između lopate bagera i materijala koje vrlo nepovoljno utječu na učinak i optimalne radne veličine kopanja bagerom. Adhezijske sile povećavaju otpor kopanja te uzrokuju lijepljenje materijala za stijenu lopate (Swick i Perumpral, 1988). Kod rastresitih materijala krupnijih frakcija kao što su odminirana stijenska masa i blokovi sadržaj vlage ne utječe značajno na promjenu svojstava.

3. HIDRAULIČNI BAGER S DUBINSKOM LOPATOM

Tridesetih godina 19. stoljeća William Smith Otis, mladi inženjer iz Philadelphije, patentirao je takozvanu „parnu lopatu“, odnosno prvi autonomni stroj za zemljane radove. Bio je korišten na izgradnji željezničke pruge u Bostonu. Stroj je u to vrijeme predstavljao revolucionaran izum kao jedan od prvih primjera opreme za zemljane radove na vlastiti pogon. Lopata je bila pokretana pomoću užadi, a zaokretanje se izvodilo ručno. Stroj je dijelio mnoge karakteristike sa suvremenim bagerom. Stoga se Otisa naziva „djedom hidrauličnoga bagera“. Stroj je 1839. godine usavršen i patentiran kao bager s dizalicom na parni pogon. Prodaja u početku nije bila značajna, ponajprije zbog jeftine migrantske radne snage u to doba. Bageru je zbog toga trebalo dosta vremena da postane popularan. Tek je početkom 20. stoljeća implementiran u izgradnji Panamskog kanala. Prvi bager koji je koristio isključivo hidraulični pogon bez užadi i lanaca izrađen je 1897. godine. Izgradila ga je tvrtka Kilgore Machine Company ne ostvarujući značajnu prodaju. Masovno korištenje bagera započelo je tek nakon Drugoga svjetskog rata pojavom prvoga masovno proizvedenoga hidrauličnog bagera braće Carla i Marija Bruneri iz 1948. godine. No, za pravi zamah u proizvodnji bagera zaslužna je francuska tvrtka Sicam 1954. godine. Nakon toga razvila se proizvodnja u Engleskoj, SAD-u, Španjolskoj i Japanu.

Danas je industrija radnih strojeva u izrazito velikom zamahu te se zbog sve većih potreba tržišta razvijaju i dizajniraju bageri za razne specijalne namjene. Ipak, najčešće primjenjivan je upravo hidraulični bager s dubinskom lopatom (slika 3.1.).



Slika 3.1. Hidraulični bager s dubinskom lopatom (Flickr, 2023)

Hidraulični bager s dubinskom lopatom također je i jedan od najčešće korištenih strojeva općenito kako u rudarstvu tako i u građevinarstvu i geotehnici. Zbog svoje robusnosti, multifunkcionalnosti i preciznosti nezamjenjiv je na površinskim kopovima mineralne sirovine. U kamenolomima se najčešće koristi pri utovaru odminirane stijenske mase, uklanjanju otkrivke i gravitacijskom transportu. Ostali poslovi koje također obavlja bager jesu doziranje drobilice, usitnjavanje izvangabaritnih blokova, izrada rampi i ostalo. Na površinskim kopovima šljunka, pijeska ili gline hidraulični se bager s dubinskom lopatom može koristiti i za iskop odnosno dobivanje mineralne sirovine. Suvremeni bager s dubinskom lopatom predstavlja relativno složeni sustav mehaničkih, hidrauličnih, električnih i elektroničkih komponenti (slika 3.1.). U mehaničkoj osnovi sastoji se od podvozja (1), gornjega okretnog dijela ili kupole (2) i radne konzole za manipuliranje na kojoj je ovješena radni alat (5). Podvozje bagera odnosno konstrukcija koja je zadužena za mobilnost stroja najčešće je izvedena s gusjenicama koje zadovoljavaju robusnost i stabilnost na vrlo nepristupačnim terenima. Gusjenice su svaka zasebno pogonjene hidrauličnim motorima. Pneumatici također mogu biti opcija, no oni se koriste pretežno u graditeljstvu i to na urbanim gradilištima zbog prednosti pri kretanju po uređenim površinama bez da ih oštete. Gornji okretni dio ili kupola pričvršćen je za podvozje preko rotirajućega ležaja koji osigurava neograničeno okretanje oko vertikalne osi. Kupola jest glavni dio stroja na kojem su smješteni pogonski agregat, hidraulične pumpe i razvodnici, upravljačka kabina i svi ostali sustavi potrebni za rad. Radna konzola pričvršćena je na kupolu koja joj rotacijom omogućava 360° slobode oko vertikalne osi. Katarka (3), ruka ili držalica (4) i radni alat (najčešće lopata (5)) dijelovi su radne konzole međusobno povezani zglobovima i hidrauličnim cilindrima. Izvlačenjem i uvlačenjem cilindra dolazi do rotacije u zglobovima odnosno pomicanja radnog alata u vertikalnoj ravnini. Na taj se način postiže određena trajektorija kretanja radnoga alata i obavljanje određenoga rada.

3.1. Učinak bagera

Opća definicija učinka bagera, kao i svakoga drugog stroja, omjer je ulaznih i izlaznih vrijednosti u određenom kontekstu (Park i sur., 2006). Osnovna ulazna vrijednost kod učinka bagera je vrijeme obavljanja nekog posla dok su izlazne vrijednosti masa ili volumen materijala koji je iskopan ili premješten u sklopu toga posla. Stoga se učinak bagera najčešće izražava u jedinici metar kubni po satu (m^3/h) ili rjeđe u tonama po satu (t/h). Uključimo li u razmatranje učinka i potrošnju goriva, kao rezultat možemo dobiti potrošnju goriva po toni (l/t) ili po metru kubnom (l/m^3) materijala. (Elazouni i Basha, 1996; Solazzi i sur., 2010).

Veliki broj autora proučavao je učinak bagera te svi navode izraze za teoretski i za efektivni učinak. Teoretski učinak (Q_t) računa se prema izrazu 3.1 te je kod svih autora jednak, dok se efektivni razlikuje.

$$Q_t = \frac{3600}{t_c} * V_0 [m^3/h] \quad (3.1)$$

Gdje su: Q_t – teoretski učinak bagera [m^3/h],
 t_c – trajanje radnoga ciklusa [s],
 V_0 – volumen lopate [m^3].

Pod pojmom teoretski učinak autori obično podrazumijevaju kapacitet bagera u određenim standardnim uvjetima odnosno pri kutu zakretanja od oko 90° , tvornički pretpostavljenom trajanju ciklusa pri tom kutu, koeficijentu punjenja lopate od 1 te konstantnim ponavljanjem ciklusa bez stajanja. U realnosti je takve uvjete vrlo teško postići pa autori u proračun efektivnoga učinka uvode popravne koeficijente kako bi što realnije proračunali učinak. Popravni koeficijenti koji se koriste za korekciju teoretskoga učinka odnose se na faktore koje autori smatraju najutjecajnijima. A to su npr. vrsta materijala za iskop, uvjeti rada, sposobnost operatera, koeficijent punjenja lopate, kut zakretanja, organizaciju posla, stanje stroja i dr. Istraživanje u sklopu ovoga rada bazira se na detaljnom proučavanju trajektorije kretanja lopate bagera i sila koje se javljaju uslijed toga. Pomoću podataka o poziciji lopate i silama kroz cijeli ciklus utvrđen je početak i završetak dijela ciklusa rada bagera u kojemu je lopata u kontaktu s materijalom. Taj segment ciklusa nazivamo kopanjem. Selektiranjem podataka trajektorije i sila kopanja proračunate su dinamičke radne veličine (snaga i potrošnja energije) te geometrijske

veličine (duljina, površina i kut) kopanja. Utvrđen je utjecaj značajki materijala na dobivene veličine te učinak kopanja.

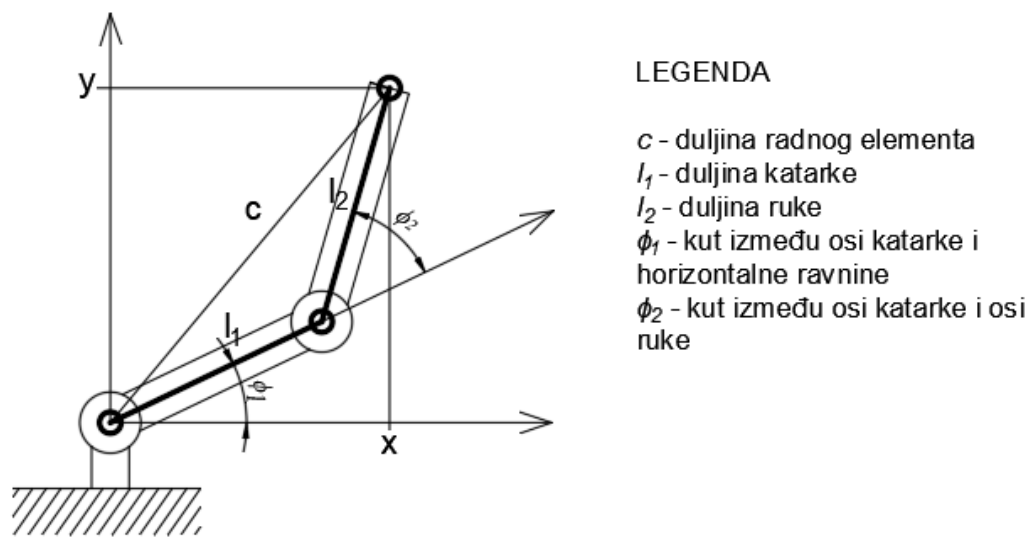
U sklopu istraživanja literature o dosadašnjim dostignućima vezanim uz učinak bagera proučeno je 50-ak radova što uključuje znanstvene članke, knjige, studije i priručnike. Radovi čiji je sadržaj najviše u doticaju s planom istraživanja u sklopu ove disertacije pregledno su prikazani u prilogu 1. Iz tablice je vidljivo da se najveći broj znanstvenika kao Koivo (1994); Assenov i sur. (2003) bavio kinematikom bagera kao osnovom detaljnijega proučavanja učinka. Dinamika rada bagera i trajektorija kretanja najčešće se proučavaju zajedno s kinematikom zbog uske povezanosti (Bundy i sur., 2003; Kim i sur., 2013). Uključivanjem sila u kinematički model dobiva se dinamika, dok se uključivanjem duljina dobiva trajektorija kretanja lopate (Do i sur., 2008). Poznavanjem dinamike rada bagera mogu se proračunati sile kopanja, odnosno sile koje se javljaju na zubima lopate prilikom prolaza kroz materijal. Proračun sila kopanja i trajektorija kretanja lopate obrađeni su u 50 % radova, na primjer Kim i sur. (2013) i Li i sur. (2017).

Za provjeru primjenjivosti teoretskih navoda većina se autora odlučila izvesti računalnu simulaciju. Njih nešto manje usporedilo je teoretske rezultate s realnima u vidu laboratorijskih ili terenskih ispitivanja kao Feng i sur. (2017) i Jovanović i sur. (2014).

3.2. Kinematika bagera

Kinematika bagera skup je standardnih matematičkih izraza koji detaljno opisuju mehanizam kretanja i rada bagera te omogućavaju proračun pozicije pojedine točke bagera u ovisnosti o dimenzijama sustava. U nastavku je spomenuto nekoliko značajnijih autora koji su proučavali različite matematičke modele izračuna kinematike bagera. Neki od njih izradili su modele za proračun kinematike samo za katarku i ruku, dok ih je većina uključila i lopatu u proračun kinematike.

Hanh i sur. (2009) istražuju primjenjivost modernijih hidrauličkih regulatora na bageru prilikom automatskoga upravljanja na temelju usporedbe s konvencionalnim regulatorima. Kako bi pojednostavnili algoritam upravljanja predložili su model proračuna kinematike korištenjem sustava s dva stupnja slobode odnoseći se na katarku i ruku bagera (slika 3.2.). Nakon provedenoga testiranja zaključili su da moderniji regulatori pokazuju bolje performanse od konvencionalnih te je model s dva stupnja slobode dovoljan da se to dokaže. Ovakav model može predstaviti osnovu za proračun kinematike koristeći tri ili više stupnjeva slobode.

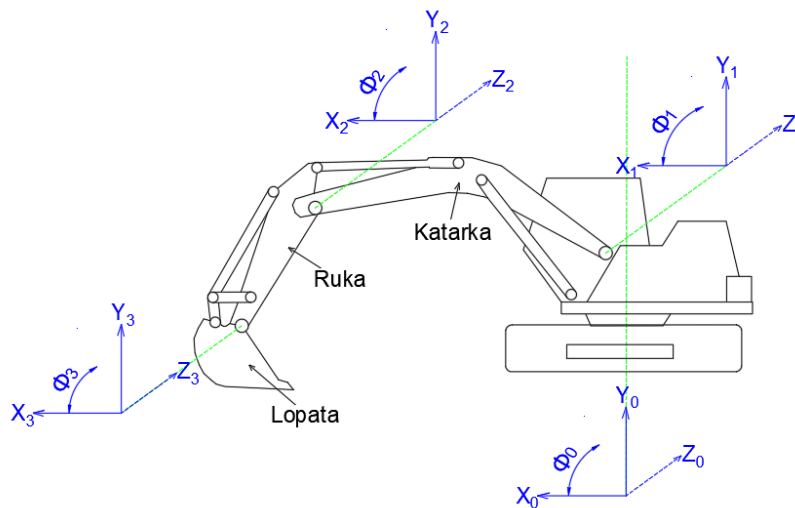


LEGENDA

- c - duljina radnog elementa
- l_1 - duljina katarke
- l_2 - duljina ruke
- ϕ_1 - kut između osi katarke i horizontalne ravnine
- ϕ_2 - kut između osi katarke i osi ruke

Slika 3.2. Proračun kinematike s dva stupnja slobode (Hanh i sur., 2009)

Koivo (1994) je predstavio kinematiku strojeva koji se koriste u građevinarstvu s ciljem uspostavljanja temelja za automatsko računalno upravljanje. Postupak je prikazan kao dodjela pravokutnih kartezijskih koordinatnih sustava u svaki od zglobova stroja. Ovaj model objašnjava kinematički lanac od tri dijela odnosno u proračun uključuje kataraku, ruku i lopatu. Skica kinematike bagera prema tom modelu prikazana je na slici 3.3. Jednadžbe koje su predložene zahtijevaju poznavanje duljine hidrauličnih cilindara i kutove na konstrukciji bagera kako bi se dobile koordinate vrha lopate.

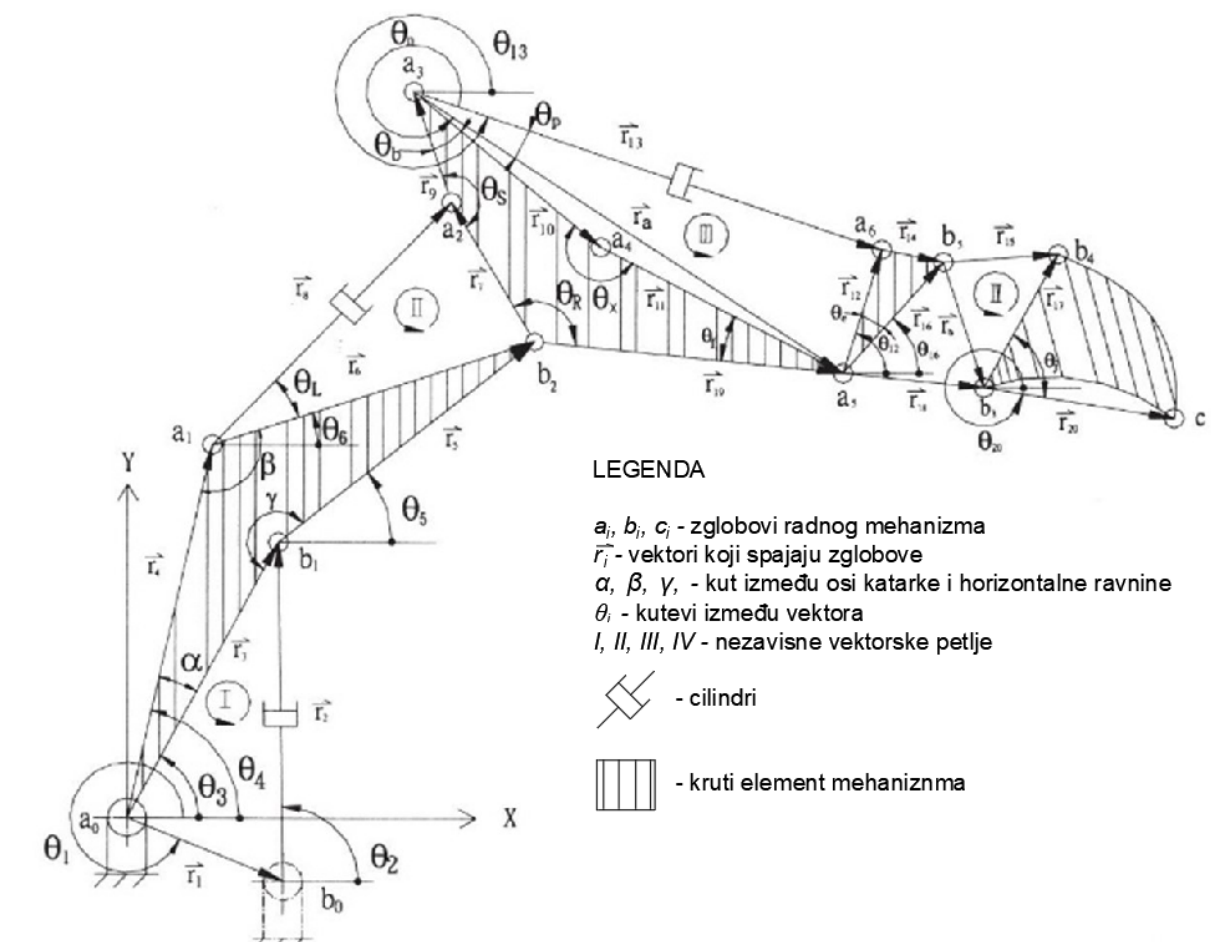


LEGENDA

- X_i, Y_i, Z_i - osi postavljenih koordinatnih sustava
- ϕ_i - kut između horizontalne ravnine i osi katarke ruke ili lopate.

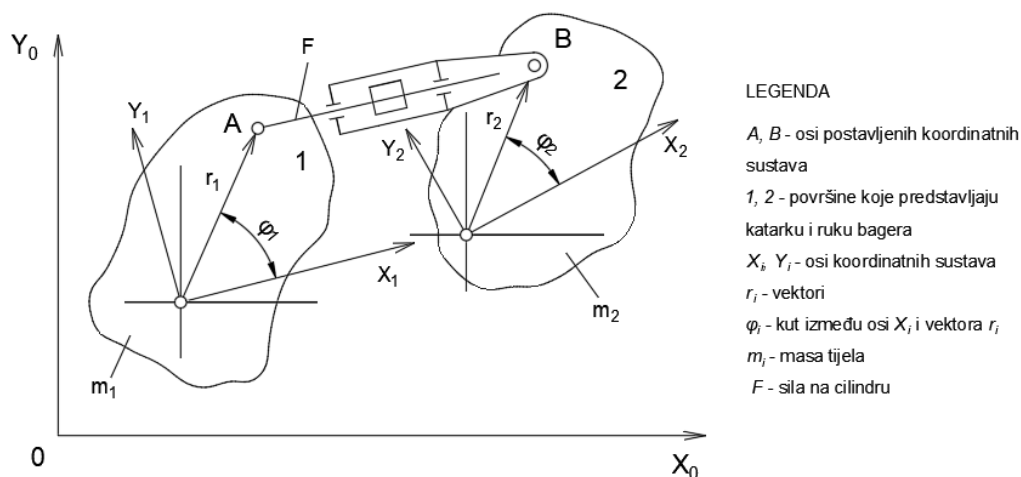
Slika 3.3. Kinematika bagera (Koivo, 1994)

Lee i sur. (2004) konstruirali su prototip pneumatskoga mehanizma bagera u svrhu dopunskoga nastavnog alata za izučavanje praktičnoga projektiranja mehanizama. Kinematika mehanizma opisana je kao skup vektora koji se međusobno povezuju u petlje (slika 3.4.). Fiksne udaljenosti na mehanizmu povezuju se u zatvorene petlje koje predstavljaju katarku, ruku i lopatu bagera. Vektori između kojih je kut promjenjiv međusobno tvore nezavisne vektorske petlje (I, II, III, IV).



Slika 3.4. Kinematika mehanizma bagera (Lee i sur., 2002)

Assenov i sur. (2003) proveli su studiju kinematike i dinamike radnoga mehanizma bagera. Radni mehanizam promatran je kao zglojni spoj katarke, ruke i lopate povezan i hidrauličnim cilindrima. Skica pristupa proračunu modela prikazana je na slici 3.5. Površina I prikazuje kataraku a površina 2 ruku bagera koje su međusobno povezane cilindrom u točkama A i B. Za proračun kinematičkoga i dinamičkoga modela između njih potrebne su poznate vrijednosti koordinate zglobova (x_i, y_i), kutovi (φ_i), vektori (r_i) te sile na cilindru (F).

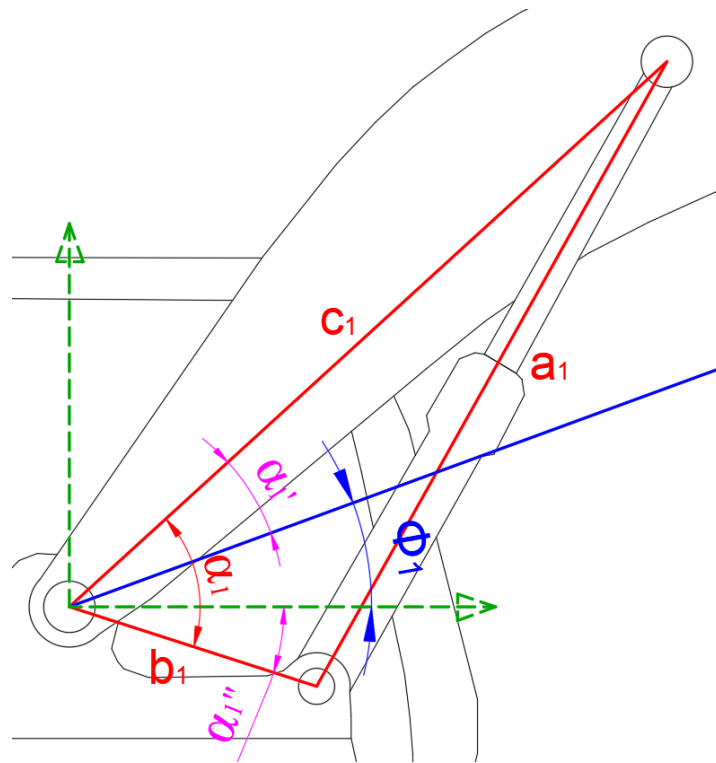


Slika 3.5. Model mehanizma ruke i katarke (Assenov i sur., 2003)

Kinematika bagera daje nam uvid u mehanizam gibanja radnoga elementa bez obzira na sile koje ga pokreću. Većina istraživača koji se bave kinematikom bagera predstavila je analitički pristup Denavit-Hartenberga s matricom transformacije kao odnos koordinatnih sustava smještenih u zglobovima (Koivo, 1994; Xu i Yoon, 2016; Spong i sur., 2006). U ovom radu koristit će se isto načelo smještanja zamišljenih koordinatnih sustava u zglobove katarke ruke i lopate. U nastavku je detaljno objašnjeno načelo proračuna putanje na temelju poznatih dimenzija sustava i kinematike. Kako bi bilo moguće proračunati kretanje sustava tijekom rada bagera potrebno je izvesti mjerenja na određenim ključnim mjestima na samom stroju. Postoji mogućnost mjerenja kutnoga zakretanja u zglobovima katarke, ruke i lopate kao što su Kwon i sur. (2008) izveli na svojem eksperimentu razvijanja simulatora bagera te Feng i sur. (2017). U tu svrhu koriste se mjerni pretvornici kutnoga pomaka. Sljedeća mogućnost je mjerenje produljenja cilindra koje se najčešće izvodi pomoću mjernih pretvornika linearnoga pomaka kao što su koristili Lee i Chang (2012) te Xu i Yoon (2016). U ovom će radu biti korištena ista metoda.

Poznavanjem produljenja cilindra i dimenzija bagera pomoću matematičkih relacija za kinematiku bagera dobiju se koordinate vrhova katarke, ruke i lopate. Postupak proračuna započinje formiranjem trokuta (Li i sur., 2017) koji zatvara os promatranoga cilindra s osima susjednih poveznica (katarke, ruke i lopate), (slika 3.6.-3.8.).

Formirani trokut na spoju katarke s kupolom bagera prikazan je na slici 3.6. Trokut (a_1, b_1, c_1) čine tri dužine od kojih su b_1 i c_1 fiksne udaljenosti zglobova na bageru dok je a_1 duljina cilindra katarke koji se mijenja tijekom rada bagera. Iz ovoga trokuta pomoću izraza (3.2) izračuna se kut α_1 . Kada se od kuta α_1 oduzmu α_1' i α_1'' prema izrazu (3.3), koji su fiksni kutovi na konstrukciji bagera, dobije se kut ϕ_1 koji zatvara os katarke s horizontalnom ravninom.



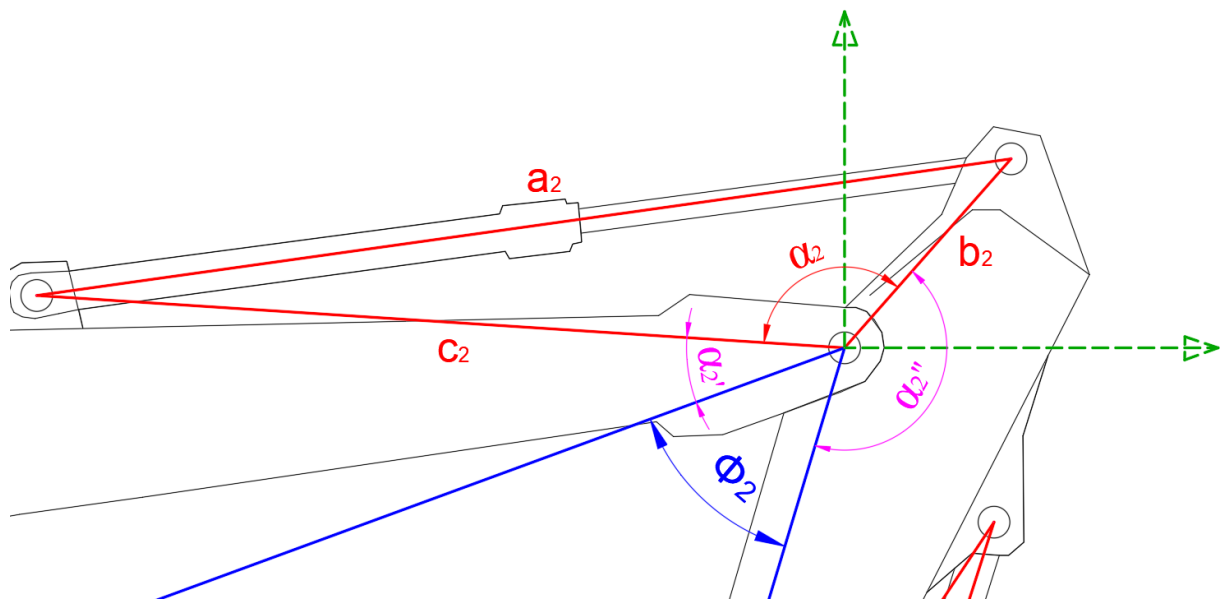
Slika 3.6. Kinemtika katarke bagera

$$\cos(\alpha_1) = \frac{b_1^2 + c_1^2 - a_1^2}{2 \cdot b_1 \cdot c_1} \quad (3.2)$$

$$\phi_1 = \alpha_1 - (\alpha_1' + \alpha_1'')[^\circ] \quad (3.3)$$

Gdje su: a_1 - Duljina cilindra katarke bagera [m],
 b_1 - Udaljenost zglobova na kupoli [m],
 c_1 - Udaljenost zglobova na katarci [m],
 α_1 - Kut između osi c_1 i b_1 [°],
 α_1' - Kut između osi c_1 i osi katarke [°],
 α_1'' - Kut između horizontalne ravnine i osi b_1 [°],
 ϕ_1 - Kut između osi katarke i horizontalne ravnine [°].

Na slici 3.7. prikazan je spoj katarke i ruke bagera. Na njoj su označeni kutovi i dužine koje ulaze u proračun kinematike bagera. Trokut (a_2, b_2, c_2) čine tri dužine od kojih su b_2 i c_2 fiksne udaljenosti zglobova na bageru dok je a_2 duljina cilindra ruke koja se mijenja tijekom rada bagera. Iz prikazanoga trokuta pomoću izraza 3.4 izračuna se kut α_2 . Prema izrazu 3.5 kutu α_2 pribroji se α_2' i α_2'' , koji su fiksni kutovi na konstrukciji bagera, te se od punoga kuta (360°) oduzme dobiveni zbroj kutova prema izrazu 3.5, rezultat je kut ϕ_2 koji zatvara os katarke s osi ruke, a potreban je u daljnjem proračunu.



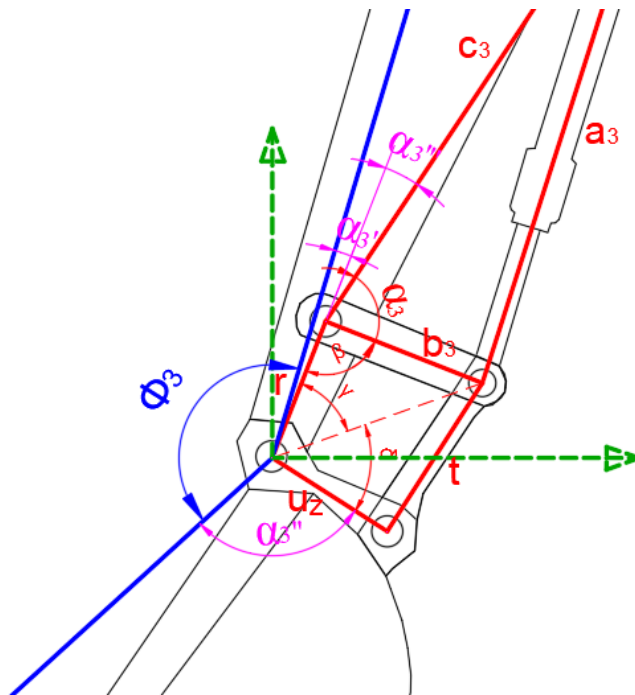
Slika 3.7. Kinematika ruke bagera

$$\cos(\alpha_2) = \frac{b_2^2 + c_2^2 - a_2^2}{2 \cdot b_2 \cdot c_2} \quad (3.4)$$

$$\phi_2 = 360 - (a_2 + \alpha_2' + \alpha_2'')[^\circ] \quad (3.5)$$

- Gdje su: a_2 - Duljina cilindra katarke bagera [m],
 b_2 - Udaljenost zglobova na kupoli [m],
 c_2 - Udaljenost zglobova na katarci [m],
 α_2 - Kut između osi c_1 i b_1 [$^\circ$],
 α_2' - Kut između osi c_1 i osi katarke [$^\circ$],
 α_2'' - Kut između horizontalne ravnine i osi b_1 [$^\circ$],
 ϕ_2 - Kut između osi katarke i horizontalne ravnine [$^\circ$].

Na slici 3.8. prikazan je spoj ruke i lopate bagera. Trokut (a_3 , b_3 , c_3) čine tri dužine od kojih su b_2 i c_2 fiksne udaljenosti zglobova na bageru dok je a_2 duljina cilindra lopate koja se mijenja tijekom rada bagera. Iz ovoga trokuta pomoću izraza (3.6) izračuna se kut α_3 . Na spoju ruke i lopate specifična je izvedba prijenosa između cilindra i lopate gdje postoje dodatne dvije poveznice t i b_3 koje s razmakom između zglobova lopate p i vršnim dijelom ruke r čine četverokut. Prema izrazu (3.8) izračuna se (e) kao dijagonala unutar četverokuta te nakon toga izrazima (3.9) i (3.10) kutovi γ i δ koji su potrebni za proračun kuta ϕ_3 prema izrazu (3.11). Kut ϕ_3 je kut koji zatvara os ruke s osi lopate.



Slika 3.8. Kinematika lopate bagera

$$\cos(\alpha_3) = \frac{b_3^2 + c_3^2 - a_3^2}{2 \cdot b_3 \cdot c_3} \quad (3.6)$$

$$\beta = 180 - (\alpha_3 + \alpha_3'') \quad (3.7)$$

$$e = \sqrt{r^2 + b_3^2 - 2 \cdot r \cdot b_3 \cdot \cos(\beta)} \quad (3.8)$$

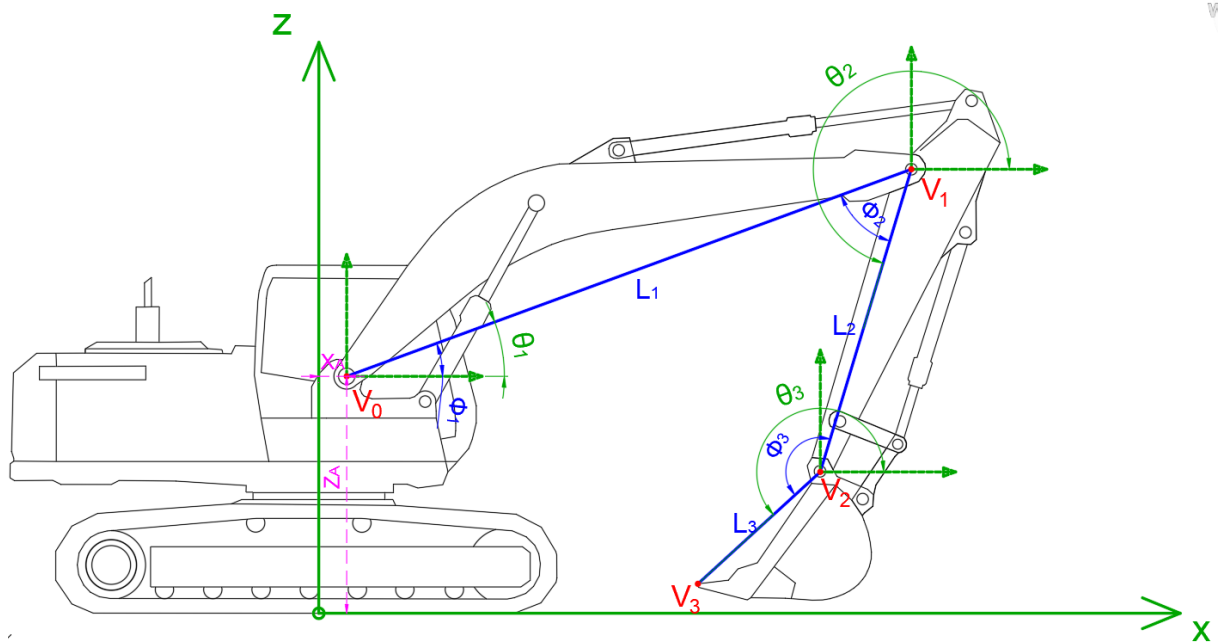
$$\cos(\gamma) = \frac{e^2 + r^2 - b_3^2}{2 \cdot e \cdot r} \quad (3.9)$$

$$\cos(\delta) = \frac{e^2 + u_2^2 - t^2}{2 \cdot e \cdot p} \quad (3.10)$$

$$\phi_3 = 360 - (\gamma + \delta + \alpha_3' + \alpha_3'') \quad (3.11)$$

Gdje je: a_3 - Duljina cilindra lopate bagera [m],
 b_3 - Dužina poprečne poluge na mehanizmu za pokretanje lopate [m],
 c_3 - Udaljenost zglobova na lopati [m],
 α_3 - Kut između osi b_3 i osi c_3 [°],
 α_3' - Kut između osi ruke i osi r [°],
 α_3'' - Kut između osi r i osi c_3 [°],
 α_3''' - Kut između osi lopate i osi p [°],
 ϕ_3 - Kut između osi lopate i osi ruke [°],
 u_z - Udaljenost zglobova na lopati [m],
 r - Udaljenost zglobova na ruci [m],
 e - Duljina dijagonale u mehanizmu za pokretanje lopate [m],
 t - Duljina uzdužne poluge u mehanizmu za pokretanje lopate [m],
 γ - Kut između osi r i osi e [°],
 δ - Kut između osi e i osi p [°].

Na slici 3.9. prikazana je skica bagera s relativnim kutovima ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 koji zatvaraju osi katarke ruke i lopate a proračunati su prethodnim izrazima. Zelenom bojom označen je ishodišni koordinatni sustav i pomoćni koordinatni sustavi u svakom od zglobova između katarke, ruke i lopate. Pomoćni koordinatni sustavi služe za proračun apsolutnih kutova θ_1 , θ_2 , θ_3 koji zatvaraju pojedine osi s horizontalnom ravninom. Kutovi θ_1 , θ_2 , θ_3 računaju se prema izrazima (3.12), (3.13) i (3.14). Koordinate zglobova i vrha (V_0 do V_3) računaju se prema formulama (3.15) i (3.16).



Slika 3.9. Pomoćni koordinatni sustavi

$$\theta_1 = \phi_1 \quad (3.12)$$

$$\theta_2 = \theta_1 + \phi_2 + 180 \quad (3.13)$$

$$\theta_3 = \theta_2 - 180 + \phi_3 \quad (3.14)$$

$$XV_i = XV_{i-1} + \cos(\theta_i) * l_i \quad (3.15)$$

$$ZV_i = ZV_{i-1} + \sin(\theta_i) * l_i \quad (3.16)$$

Gdje je: θ_1 - Kut koji zatvara os katarke s horizontalnom ravninom [°],

θ_2 - Kut koji zatvara os ruke s horizontalnom ravninom [°],

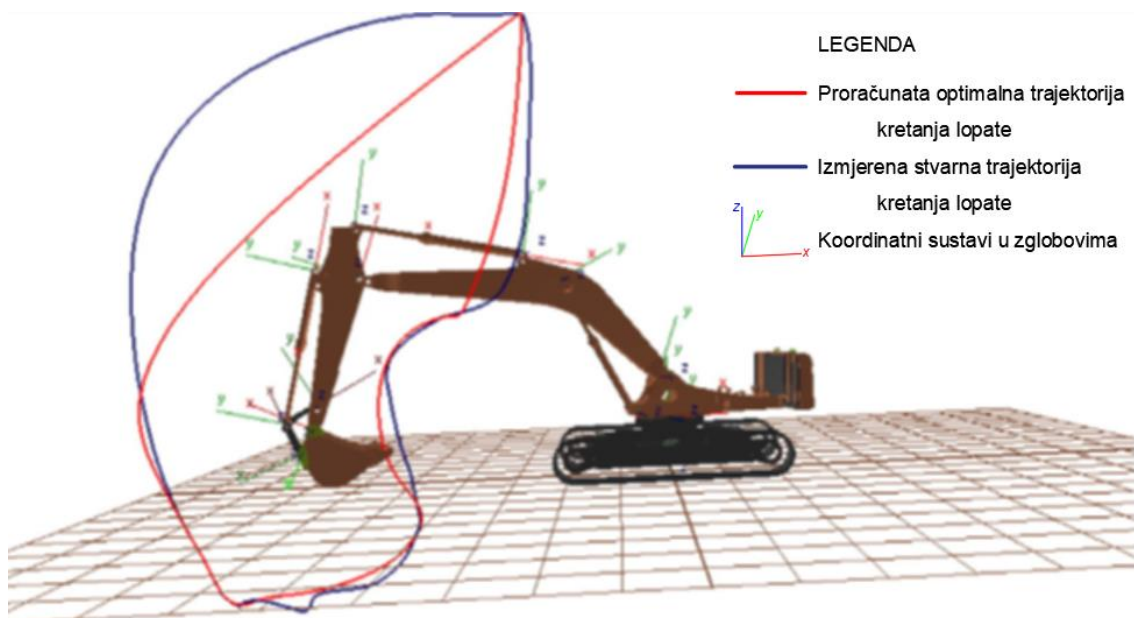
θ_3 - Kut koji zatvara os lopate s horizontalnom ravninom [°],

XV_i - X - koordinata promatranog zgloba ili vrha lopate [m],

ZV_i - Z - koordinata promatranog zgloba ili vrha lopate [m].

3.2.1. Trajektorija kretanja lopate

Trajektorija kretanja lopate predstavlja krivulju koja prati koordinate pozicije vrha lopate tijekom izvođenja ciklusa. Nekolicina autora istraživala je moguća poboljšanja učinka rada bagera optimizacijom trajektorije kretanja lopate. Neki od njih promatraju trajektoriju kroz cijeli ciklus, dok se neki koncentriraju samo na dio ciklusa u kojem je radni alat u kontaktu sa stijenom odnosno gdje se izvodi samo kopanje. Tako su Lee i suradnici (2008) primjenom robotske ruke koja simulira rad bagera te pomoću neuronskih mreža pokušali pronaći optimalnu trajektoriju kopanja kroz pijesak. Nakon izvedenih istraživanja nisu mogli potvrditi da je njihovo rješenje optimalna putanja kopanja, te su istaknuli da je problematika vrlo kompleksna. U svakom slučaju njihov rad predstavlja vrlo dobro preliminarno istraživanje na tu temu. Chen i suradnici su u svom radu iz 2013. predložili novi dizajn radne konzole bagera na temelju optimizacije trajektorije i kutova između katarke i ruke. Dokazali su da su sile kopanja prosječno 4 % veće nakon optimizacije. Većina ostalih autora (Vladeanu i Vladeanu, 2017, Kim i sur., 2013) bavila se optimizacijom trajektorije kretanja radnoga alata u svrhu usavršavanja ciklusa rada za autonomni bager. Na slici 3.10. prikazana je realna (plavo) i optimalna (crveno) trajektorija kretanja radnoga alata bagera u jednom ciklusu. Optimalna trajektorija izračunata je pomoću algoritma za optimizaciju no autori nisu sigurni je li u praksi izvediva.



Slika 3.10. Trajektorija kretanja lopate (Kim i sur., 2013)

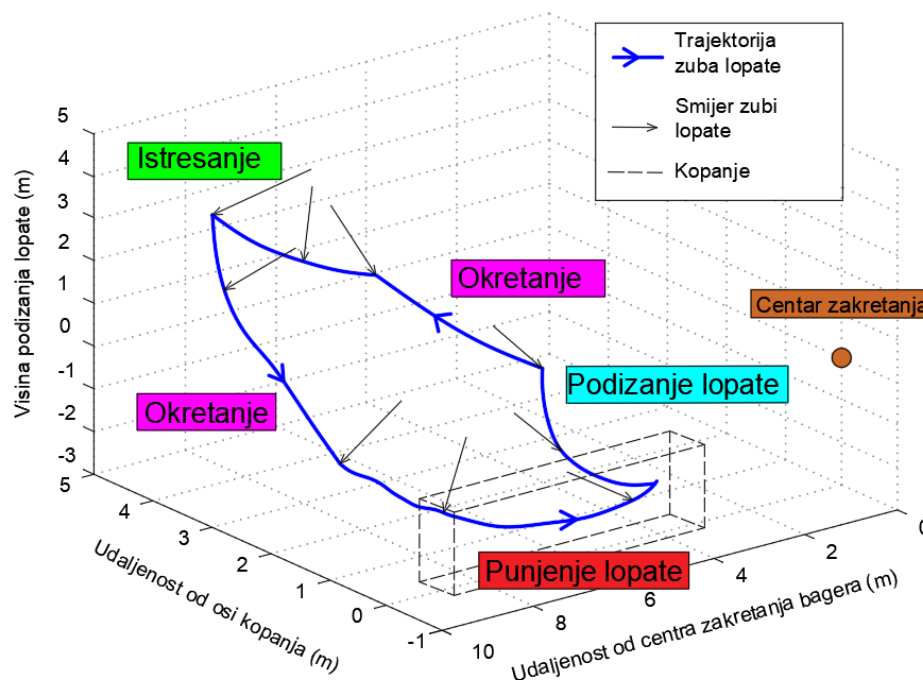
Poznavanje trajektorije kretanja lopate omogućuje praćenje različitih radnih veličina i geometrije kopanja, te je u tu svrhu korištena u ovom radu. Trajektoriju kretanja lopate je u

realnim radnim uvjetima pri manualnom upravljanju bagerom vrlo teško optimizirati. U realnim uvjetima za razliku od laboratorijskih svaki je ciklus drugačiji te optimizaciju treba sagledati šire. Da bi se optimizirala trajektorija kretanja lopate u ciklusu potrebno je optimizirati cjelokupni radni postupak u sklopu određenoga radnog zadatka (Tiwari i sur., 2013).

Istraživanje je u ovom radu koncentrirano na trajektoriju kopanja, odnosno dio trajektorije ciklusa u kojem je radni alat u kontaktu s materijalom. Razlog tome je istraživanje radnih veličina prema značajkama stijenskoga materijala. Za promatranje trajektorije kopanja dovoljno je poznavanje dvije dimenzije kretanja lopate (X i Z) jer se prilikom kopanja u normalnom ciklusu bager u pravilu ne okreće oko svoje osi te je Y koordinata jednaka tijekom cijeloga izvođenja kopanja.

3.2.2. Radni ciklus

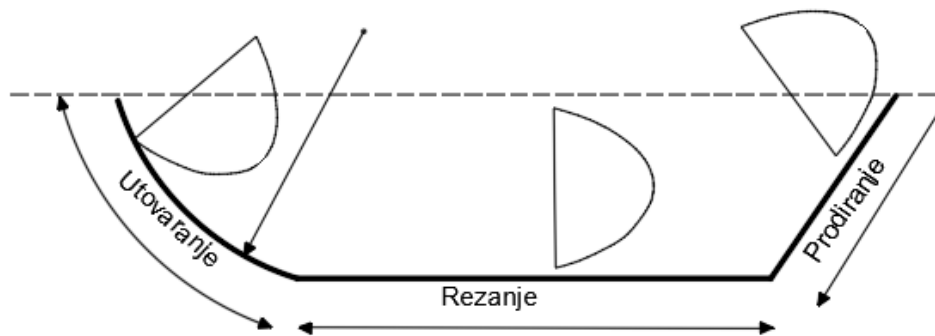
Načelo rada hidrauličnoga bagera s dubinskom lopatom zasniva se na ponavljajućim ciklusima. Jedan ciklus u osnovi se sastoji od kopanja, podizanja, istresanja i vraćanja na poziciju kopanja. Tijekom podizanja i vraćanja na poziciju kopanja bager se zakreće za određeni kut zakretanja. Na slici 3.11. grafički je prikazana krivulja kretanja zuba lopate u tri dimenzije (Du i sur., 2016).



Slika 3.11. Kretanje zuba u radnom ciklusu (Du i sur., 2016)

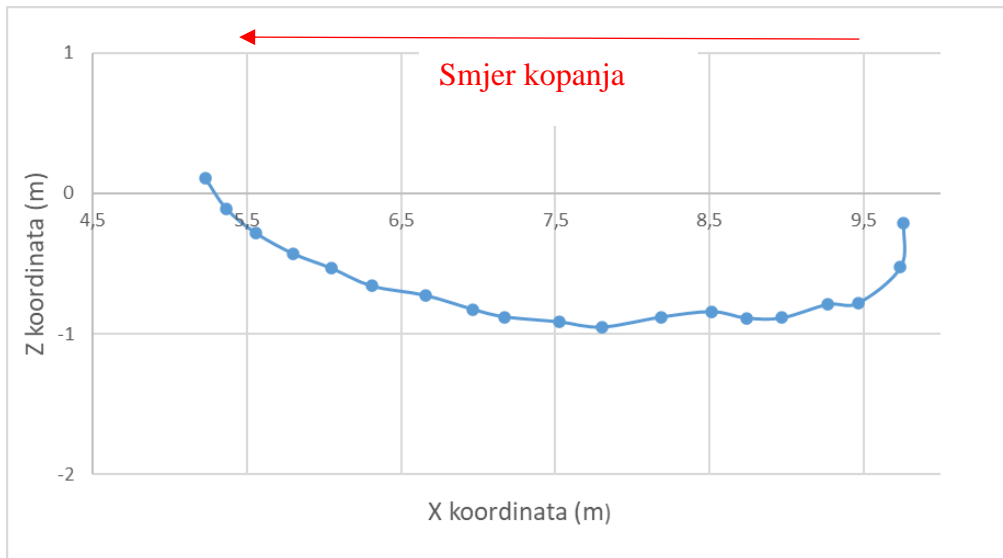
Ciklusi mogu biti različiti ovisno o zadatku koji se obavlja i radnim uvjetima. Tako na primjer prilikom kopanja na nižoj poziciji od istresanja, lopata se prije istresanja podiže, a tijekom povratka na poziciju spušta. Ukoliko bager izvodi kopanje na višoj poziciji od istresanja, što je slučaj kod gravitacijskoga transporta, lopata se prije istresanja kreće horizontalno ili čak spušta, a tijekom povratka podiže. Kut zakretanja ovisi o poziciji mjesta istresanja u odnosu na mjesto kopanja. Da bi se radni ciklus optimizirao veliki utjecaj ima upravo kut zakretanja. Stoga je važno radne uvjete prilagoditi tako da kut zakretanja bagera bude što manji (Kujundžić i sur., 2021).

Samo kopanje, odnosno dio ciklusa u kojem lopata bagera prolazi kroz materijal, prikazano je na slici 3.12. prema radu Zhao i sur. 2020. Na isti način je još nekoliko autora prikazalo faze samoga kopanja, između ostalog i Lee i sur. (2008).



Slika 3.12. Proces kopanja (Zhao i sur., 2020)

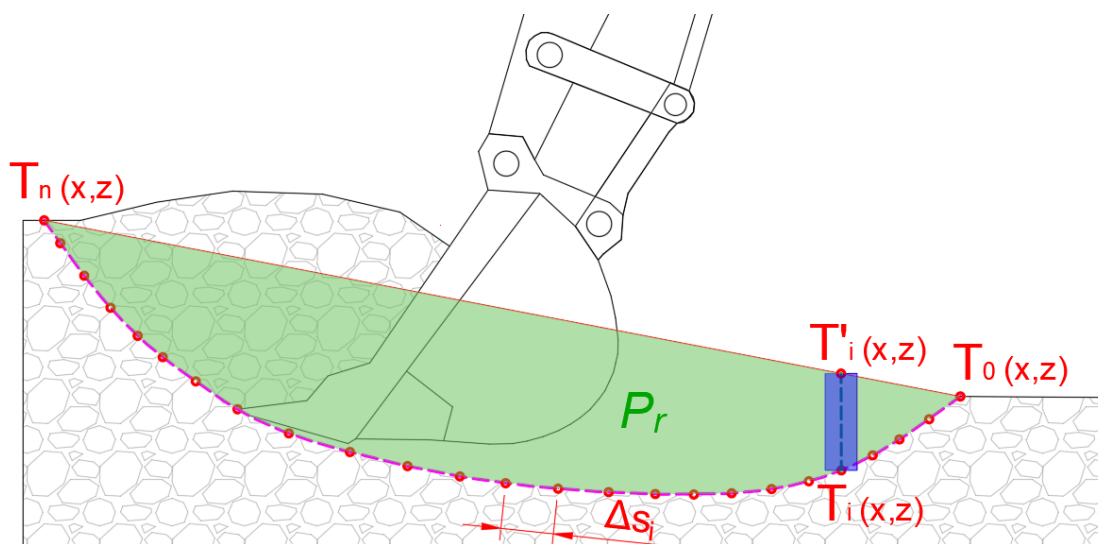
Ovakav pristup gdje kopanje započinje prodiranjem lopate u materijal, zatim se izvodi „rezanje“ te je na kraju zatvaranjem lopate materijal utovaren, teoretski dobro opisuje kopanje. U laboratoriju je na pripremljenim uzorcima moguće postići da bager odradi ciklus na opisani način tako da se jasno razlikuju pojedine faze kopanja. U realnim uvjetima je to vrlo teško postići i faze kopanja teško se mogu razlikovati. Na temelju podataka terenskih mjerenja u sklopu ovoga rada dostupne su realne trajektorije kopanja u različitim vrstama materijala. Pregledom podataka izdvojen je reprezentativni primjer oblika trajektorije kopanja izmjereno u odminiranom stijenskom materijalu na kamenolomu „Zvečaj“. Realna trajektorija kopanja prikazana je na slici 3.13. Vidljivo je da se faze preklapaju te je vrlo teško utvrditi granice između pojedinih faza kopanja. Iz toga razloga je u ovom radu promatran cjelokupni proces kopanja bez razdvajanja na faze. Početak i završetak kopanja određen je na temelju kombinacije uvjeta vezanih uz kretanja pozicije lopate i sila kopanja koje su u nastavku proračunate.



Slika 3.13. Realna trajektorija kopanja

3.2.3. Geometrija kopanja

Poznavanjem trajektorije kretanja lopate moguće je pomoću standardnih izraza izračunati geometrijske veličine kopanja. Na slici 3.14. prikazana je skica lopate bagera i trajektorije kopanja te su dodane karakteristične točke (T_i) važne za proračun geometrijskih veličina kopanja. Kopanje započinje u točki T_0 a završava u točki T_n . Svaka točka T_i definirana je X i Z koordinatom u pravokutnom koordinatnom sustavu čije ishodište se nalazi u sjecištu osi zakretanja kupole s horizontalnom ravninom na kojoj leži podvozje bagera.



Slika 3.14. Geometrija kopanja

Površina reza po profilu prikazana je na slici 3.14., a predstavlja površinu između pravca koji spaja početnu (T_0) i završnu točku kopanja (T_n) i trajektorije kopanja. Površinu reza lako je odrediti ukoliko se kopanje izvodi na ravnoj horizontalnoj ili nagnutoj podlozi. Rezultati površine tada mogu imati veliku točnost te se pomoću njih može računati i volumen reza (Ito i suradnici 2020.) Ukoliko teren nije ravan, što je pravilo u realnim uvjetima, dobivene veličine neće biti precizne već okvirne. Računanje volumena reza iz takvih podataka rezultirat će velikim odstupanjima i greškama.

Površina reza u ovom radu izračunata je prema sljedećem postupku: zbog neravnoga terena površina materijala je aproksimirana kao pravac koji spaja T_0 i T_n (slika 3.14.). Točke T'_i nalaze se na pravcu T_0, T_n te je X koordinata točke T'_i jednaka X koordinati točke T_i prema izrazu 3.17. Z koordinate točke T'_i računaju se prema izrazu 3.18. Površina reza tada može biti izračunata prema izrazu 3.19.

$$X_{T'_i} = X_{T_i} \quad (3.17)$$

$$Z_{T'_i} = \frac{Z_{T_n} - Z_{T_0}}{X_{T_n} - X_{T_0}} * X_{T_i} - \frac{Z_{T_n} - Z_{T_0}}{X_{T_n} - X_{T_0}} * X_{T_0} - Z_{T_0} \quad (3.18)$$

$$P_r = \sum_{i=0}^n (Z_{T'_i} - Z_{T_i}) * \left(\frac{X_{T_{i-1}} - X_{T_i}}{2} + \frac{X_{T_i} - X_{T_{i+1}}}{2} \right) [m^2] \quad (3.19)$$

Gdje je: P_r – površina reza [m^2],

$Z_{T'_i}, X_{T'_i}$ – koordinate točkaka na pravcu koji spaja početak i kraj trajektorije kopanja [m],

Z_{T_i}, X_{T_i} – koordinate točkaka na trajektoriji kopanja [m].

n – broj mjernih intervala

Duljina reza (l_r) predstavlja duljinu trajektorije od početne do završne točke kopanja (T_0-T_n). Poznavanjem duljine reza i širine lopate može se izračunati površina rezne plohe. Rezna ploha u ovom radu nije računata jer su mjerenja izvođena na različitim bagerima s različitim širinama lopate, te su dinamičke radne veličine (sila, snaga i potrošnja energije) svedene na širinu lopate (1 m) kako bi ih bilo moguće usporediti. U tom slučaju duljina reza je sasvim dovoljan podatak geometrije reza. Udaljenosti između pojedinih točkaka (Δs_i) izračunate su pomoću izraza 3.20. Zbrajanjem svih duljina (Δs_i) na trajektoriji kopanja pomoću izraza 3.21 dobivena je duljina reza.

$$\Delta s_i = \sqrt{(XV_i - XV_{i-1})^2 + (ZV_i - ZV_{i-1})^2} \quad (3.20)$$

$$l_r = \sum_{i=0}^n \Delta s_i \text{ [m]} \quad (3.21)$$

Gdje je: Δs_i - udaljenost intervala mjerenja [m],

XV_i, ZV_i – koordinate vrha lopate [m],

l_r – duljina trajektorije kopanja (duljina reza) [m].

3.3. Dinamika rada bagera

Dinamičko modeliranje važan je čimbenik prilikom dizajniranja dijelova bagera. Dinamički model radne konzole bagera koristi se za izračun momenata i sila koje se javljaju tijekom tipičnoga radnog ciklusa. U nastavku je prikazan pregled nekoliko radova iz područja dinamičkoga modeliranja radne konzole bagera. Dinamičko ponašanje bagera povezuje moment sila u zglobovima i pomak katarke, ruke i lopate, što je osnova simulacije procesa rada i postavljanja algoritma upravljanja.

Koivo i suradnici (1996) razvili su dinamički model bagera na način da su u kinematički model uključili sile na cilindrima katarke, ruke i lopate. Simulacijom je ilustrirana uporaba dinamičkoga modela i izvedba upravljačke sheme. Dobiveni dinamički model može se koristiti kao osnova za automatizaciju rada bagera. Margolis i Taehyun (2003) su pomoću dinamičkih modela hidrauličkoga i mehaničkog sustava na bageru izveli simulaciju nestabilnosti, odnosno rizika od prevrtanja. Otkrili su moguće uzroke prevrtanja te predložili rješenja u vidu redizajniranja komponenata i automatskoga sustava kontrole stabilnosti. Torres-Rodriguez i suradnici (2004) opisali su kompletni nelinearni model bagera, kao sustav od šest stupnjeva slobode od kojih se dva stupnja odnose na podvozje, dok se četiri stupnja slobode primjenjuju za kopanje. Dinamički model koji su razvili uzima u obzir četiri stupnja slobode preko produljenja hidrauličnih cilindara i rotacije kupole. Također je razvijen prototip bagera koji služi kao simulator, a funkcionira uz programsku podršku. Svrha ovoga istraživanja bila je unaprijediti sustav za poluautomatsko upravljanje bagerom te razviti simulator za obuku operatera.

Na temelju dinamičkih modela u ovom radu su proračunate dinamičke radne veličine. Pokretači radne konzole bagera su hidraulični cilindri. Stoga je prije svega potreban proračun sila na cilindrima.

3.3.1. Dinamičke radne veličine

Dinamika jest dio mehanike u kojem se proučavaju međusobni odnosi gibanja tijela i sila koje ta gibanja izazivaju (Jecić, 1989). U ovom se radu dinamičkim veličinama smatraju efektivne sile na cilindrima i na vrhu lopate, snaga i utrošak energije kopanja. Sve navedene veličine mijenjaju se u ovisnosti o kretanju lopate bagera i silama koje generira tlak hidrauličnoga ulja u cilindrima. Kako bi praćenje kretanja dinamičkih veličina bilo moguće, potrebno je simultano mjerenje tlakova i pomaka hidrauličnoga sustava u određenom vremenu.

Sila na cilindru predmet je istraživanja mnogih autora (Feng i sur., 2018, Kim i sur., 2013, Lee i sur., 2017) Svi ističu silu na cilindru kao ključnu veličinu u promatranju dinamike rada bagera. Konstrukcija bagera zahtijeva da cilindri budu dvoradnoga tipa, odnosno mogu se izvlačiti i uvlačiti ovisno o tome u kojoj je od dvije komore veći tlak hidrauličnoga ulja. Na slici 3.15. prikazana je skica ruke i lopate bagera na kojoj je vidljiv presjek hidrauličnoga cilindra lopate. Na cilindru su vidljive komore u kojima se stvaraju tlakovi P_1 i P_2 te dimenzije unutarnjeg promjera cilindra D_c i promjera klipnjače D_p . Tlak hidrauličnoga ulja P_1 stvara silu na donji dio klipa te gura klipnjaču na izvlačenje. Tlak P_2 stvara silu na povratni dio klipa te vuče klipnjaču na uvlačenje. Efektivna sila cilindra F_c računa se prema izrazu 3.23, a predstavlja razliku između sile izvlačenja i uvlačenja klipnjače. Ukoliko je rezultat sile pozitivna vrijednost, dolazi do izvlačenja, a pri negativnoj vrijednosti rezultata, uvlačenje. Ista pravila vrijede za sve cilindre na bageru. Na katarci bagera nalaze se dva cilindra u paru koji su međusobno spojeni te u njima vlada isti tlak. Efektivna sila proračunata na jednom cilindru katarke množi se s dva kako bi se dobila stvarna efektivna sila cilindara koji u paru djeluju na katarku.

$$F_c = \left(\frac{D_c}{2}\right)^2 * \pi * P_1 - \left(\left(\frac{D_c}{2}\right)^2 * \pi - \left(\frac{D_p}{2}\right)^2 * \pi\right) * P_2 \quad (3.23)$$

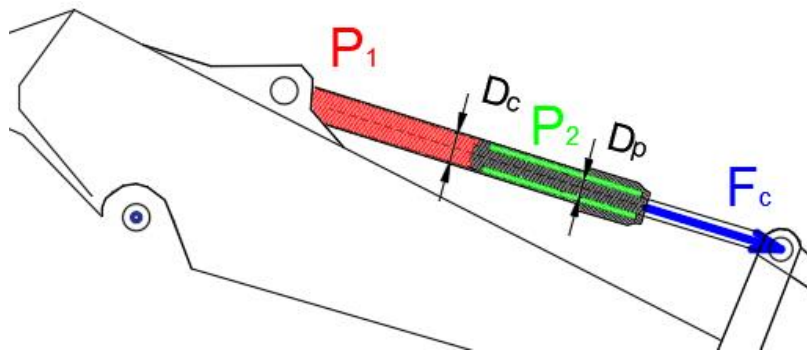
Gdje je: F_c – Efektivna sila cilindra [kN],

D_c – Unutarnji promjer cilindra [m],

D_p – Promjer klipnjače [m],

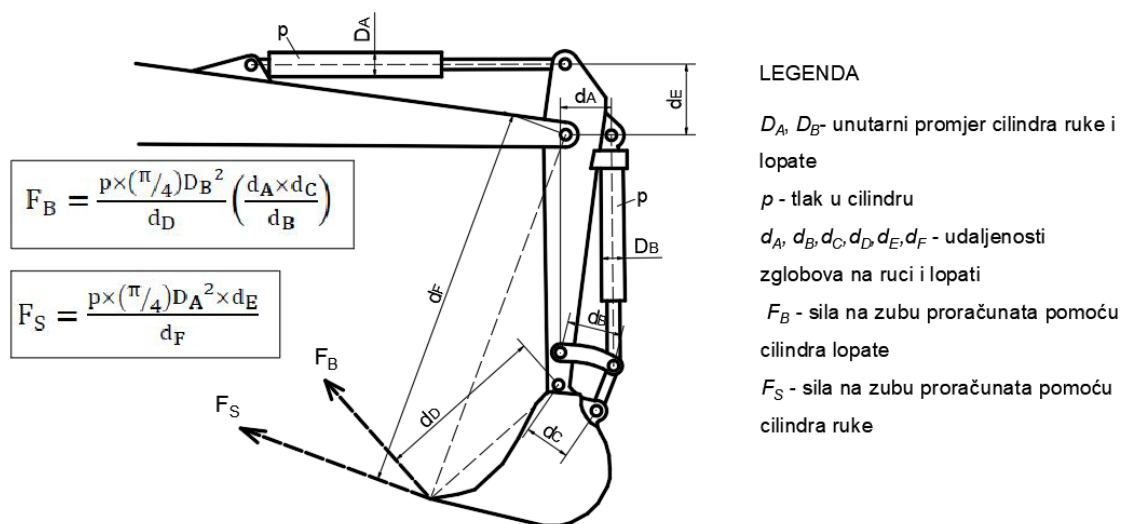
P_1 – Tlak u potisnoj komori cilindra [Pa],

P_2 – Tlak u povratnoj komori cilindra [Pa].



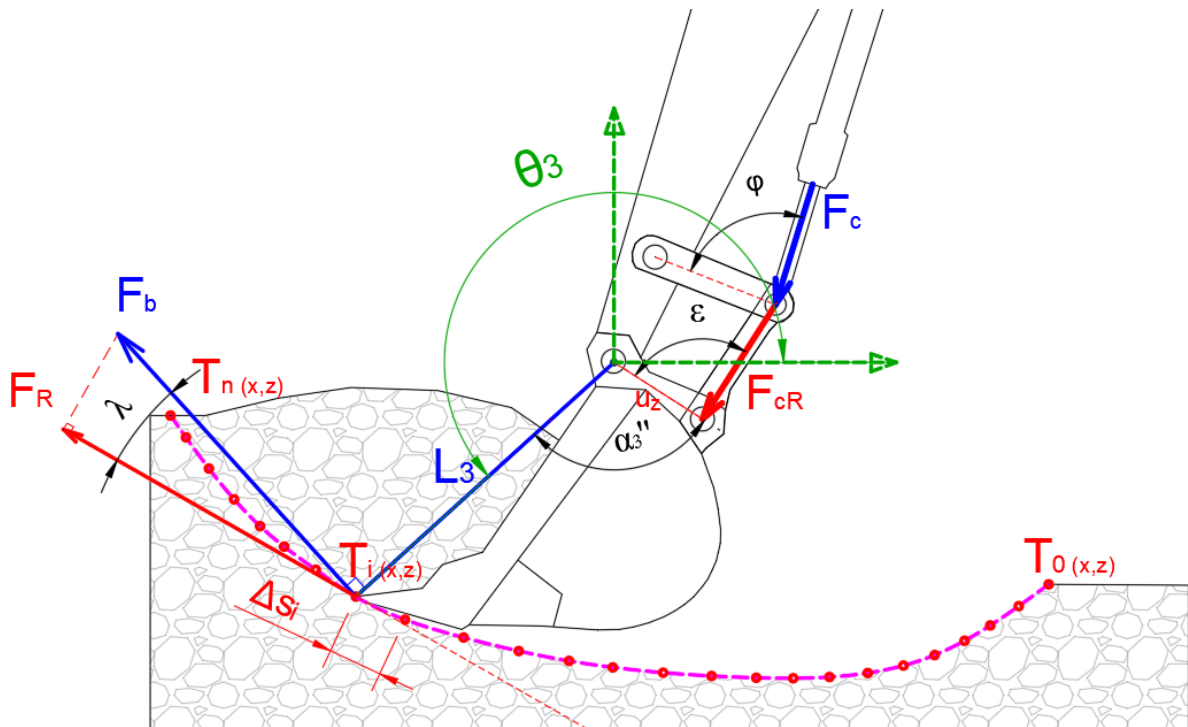
Slika 3.15. Efektivna sila cilindra lopate

Sile kopanja predstavljaju reakciju hidrauličnoga sustava bagera projiciranu na vrhu lopate, koja se događa tijekom kopanja. Autori koji istražuju silu kopanja bagera (Hadi i sur., 2018, Patel i Prajapati, 2012) u pravilu se vode standardom SAEJ1179 koji je izdala SAE (Society of Automotive Engineers) International 1990. Taj dokument trebao bi pružiti jedinstvenu metodu određivanja sila kopanja za hidraulične bagere. Skica vezana uz standard prikazana je na slici 3.16. F_B sila kopanja generirana je cilindrom lopate dok je F_S sila kopanja generirana cilindrom ruke bagera. Ostale naznačene veličina na slici 3.16. (d_A , d_B , d_C , d_D , d_D^1 , d_E i d_F) predstavljaju udaljenosti između pojedinih ključnih točaka (Patel i Prajapati, 2012). U ovom radu proračunata je samo sila kopanja koju generira cilindar lopate. Razlog tome je što se tijekom kopanja sile koje generira cilindar ruke aproksimiraju i na cilindar lopate.



Slika 3.16. SAE J1179 standard (Patel i Prajapati, 2012)

U ovom radu sile kovanja izraunavaju se prema skici na slici 3.17. Prema izrazu 3.24. koristeći silu cilindra lopate F_c i kuta koji zatvara lopata s cilindrom (ε) izraunata je sila F_{cR} koja predstavlja projekciju sile F_c na polugu kojom je vezan cilindar s lopatom. Sila koju generira cilindar lopate na vrh zuba (F_b) rauna se prema izrazu 3.25 uz pomoć kuta koji zatvara lopata s cilindrom (ε) te udaljenosti između zglobova na lopati (p) i duljine osi lopate (L_3). Sila F_R izraunata je prema izrazu 3.26 koristeći silu F_b i kut λ . Sila F_R je projekcija sile F_b na tangentu trajektorije kretanja lopate. Kut (λ) koji zatvara pravac sile F_b i F_R izraunat je prema izrazu 3.27 te predstavlja razliku kuta upada zuba i tangente na trajektoriju kretanja lopate .



Slika 3.17. Sile na zubu lopate

$$F_{cR} = F_c * \cos(90 - \varphi) \text{ [kN]} \quad (3.24)$$

$$F_b = \frac{F_{cR} * \cos(90 - \varepsilon) * u_z}{L_3} \text{ [kN]} \quad (3.25)$$

$$F_R = \cos(\lambda) * F_b \text{ [kN]} \quad (3.26)$$

$$\lambda = \theta_3 - 180^\circ - 90^\circ * \tan^{-1} \left(-\frac{Z_{T_{i+1}} - Z_{T_{i-1}}}{X_{T_{i+1}} - X_{T_{i-1}}} \right) \text{ [}^\circ\text{]} \quad (3.27)$$

Gdje je: F_c – efektivna sila na cilindru lopate [kN],

F_{cR} – projekcija sile F_c na uzdužnu polugu između cilindra i lopate [kN],

u_z – udaljenosti između zglobova na lopati [m],

φ – kut između osi cilindra i poprečne poluge [°],

ε – kut između uzdužne poluge i osi zglobova lopate [°],

L_3 – dužina lopate [m],

λ – razlika kuta upada zuba i tangente na trajektoriju kopanja [°],

θ_3 - kut koji zatvara os lopate s horizontalnom ravninom [°],

X_{Ti}, Z_{Ti} – X i Z koordinata točke na trajektoriji kopanja [m].

Utrošak energije kopanja vrlo je rijetko korišten u literaturi kao dinamička veličina kojom možemo ukazivati na učinkovitost bagera pri nekom radu. Brînas i sur. (2018) istražuju uštedu potrošnje energije rezanja rotornoga bagera, optimizacijom procesa kopanja. Na temelju rezultata ispitivanja zaključili su da se regulacijom brzine okretanja rotora može postići ušteda energije. Hippalgaonkar i Ivantysynova (2016) istražuju potrošnju energije tijekom cijeloga ciklusa rada bagera. Izvode optimizaciju tlaka hidrauličkoga ulja u cilindrima na temelju brzine vrtnje motora koristeći specijalne regulatore kako bi se optimizirao rad mini bagera. Jassim i ostali (2018) prikazuju rezultate mjerenja potrošnje energije tijekom cijeloga ciklusa kopanja pri iskopavanju materijala iz različitih dubina te pomoću neuronskih mreža dobivaju model za optimizaciju organizacije rada bagera na građevinskim iskopima. Za razliku od spomenutih autora, ovaj rad razmatra samo proces kopanja, koji uglavnom ovisi o vrsti materijala. Energija potrebna za podizanje lopate, okretanje bagera i istresanje lopate ovisi o masi materijala u lopati i putanji kretanja. Za usporedbu potrošnje energije u različitim materijalima puno je preciznije promatrati samo dio ciklusa gdje se izvodi kopanje. Kako bi se definirala potrošnja energije tijekom kopanja potrebno je proračunati udaljenost između intervala mjerenja (Δs_i) (slika 3.17.) korištenjem izraza 3.28. Potrošnja energije u mjernom intervalu EC_i tada predstavlja silu F_{Ri} na putu s_i prema izrazu 3.29. Izrazom 3.30 proračunata je potrošnja energije za cijelo kopanje.

$$\Delta s_i = \sqrt{(XV_i - XV_{i-1})^2 + (ZV_i - ZV_{i-1})^2} [m] \quad (3.28)$$

$$EC_i = F_{Ri} * s_i [kJ] \quad (3.29)$$

$$EC = \int_{t_f}^{t_0} F_{Ri} * ds_i [kJ] \quad (3.30)$$

Gdje je: Δs_i – udaljenost između intervala mjerenja [m],

XV, ZV – koordinate vrha lopate [m],

F_{Ri} – sila na zubu lopate [kN],

EC_i – utrošena energija [kJ].

Snaga kopanja u mjernom intervalu (PK_i) može se definirati kao potrošnja energije EC_i u jedinici vremena prema izrazu 3.31. Mjerni interval v_i definiran je brojem mjerenja u sekundi koje se upisuje u programski kod mjernoga sustava. U ovom radu, prilikom izvođenja prvoga i drugog terenskog mjerenja na kamenolomima „Zvečaj“ i „Gradna“, broj uzorkovanja iznosio je 4 Hz, odnosno vremenski razmak od 0,25 s između svakoga mjerenja. Na svim ostalim mjerenjima broj uzorkovanja iznosio je 10 Hz, odnosno vremenski razmak od 0,1 s.

$$PK_i = \frac{EC_i}{v_i} [kW] \quad (3.31)$$

Gdje je: PK_i – snaga [kW],

EC_i – utrošena energija [kJ],

v_i – interval mjerenja [s].

Vrijeme trajanja kopanja (v) također je izdvojeno kao veličina koja se smatra utjecajnim čimbenikom učinka. Definirana je kao vremenski razmak između početka i završetka kopanja, a može se proračunati kao umnožak vremenskoga razmaka intervala mjerenja i ukupnoga broja mjerenja pri samom kopanju (izraz 3.32)

$$v = v_i * n [s] \quad (3.32)$$

Gdje je: v – vrijeme trajanja kopanja [s],

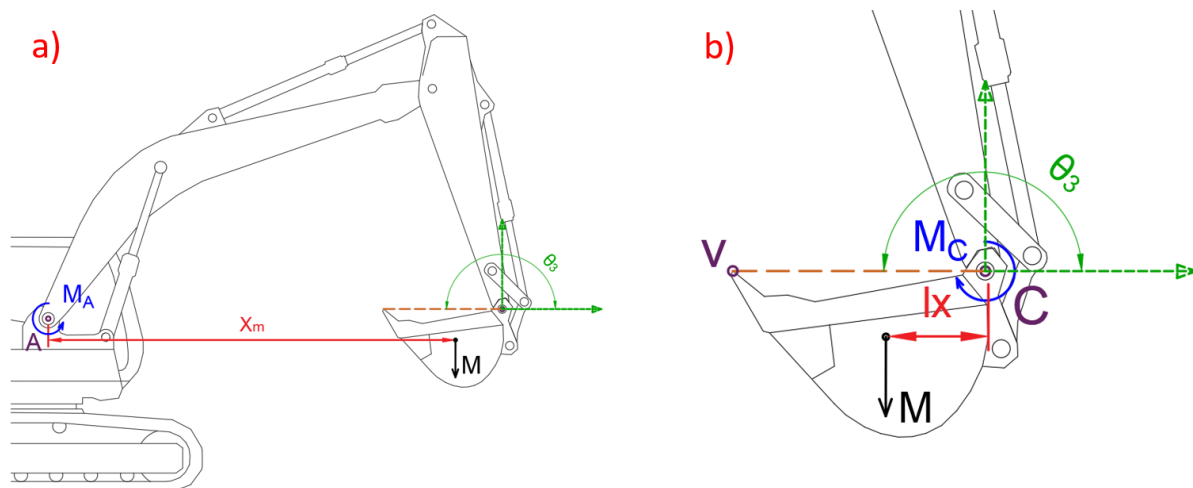
v_i – interval mjerenja [s],

n – broj mjerenih intervala [-].

3.3.2. Masa materijala u lopati

Masa pune lopate može se izmjeriti pomoću sile koju generira cilindar lopate (slika 3.18. b) ili cilindri katarke (slika 3.18. a). Proračun oba spomenuta načina izvodi se pomoću momenta u određenom zglobu (katarke ili lopate) i udaljenosti od toga zgloba do težišta lopate. Težište lopate određeno je grafički sa slike lopate napravljene na terenskom mjerenju. Masa materijala može se izračunati kao razlika mase pune lopate i prazne lopate u istom položaju. U ovom radu odabrano je korištenje sile cilindra lopate (slika 3.18. b). Razlozi odabira cilindra lopate za mjerenje mase su sljedeći:

- mjerenjem mase na cilindrima katarke može doći do greške zbog udaljenosti zgloba A i težišta lopate X_m , (slika 3.18. a). Da bi se dobila koordinata težišta lopate potrebno je proračunati kinematički odnos cijele konzole (katarke, ruke i lopate). Moguća pogreška proračuna kinematike može iznositi 0,4% po X osi, što je detaljno objašnjeno u poglavlju 6. (Validacija izmjerenih vrijednosti). Takva pogreška utječe na konačni rezultat proračuna mase materijala u lopati. Znatno je manja mogućnost pogreške pri mjerenju pomoću cilindra lopate jer je udaljenost od zgloba C do težišta X_m fiksna.
- prilikom mjerenja na cilindru katarke uvjet je da se masa bilježi u istim položajima za svaki ciklus što je vrlo teško izvedivo u realnim uvjetima. Prilikom mjerenja na lopati jedini je uvjet da os lopate bagera nalazi u približno horizontalnom položaju, što se u pravilu postiže u svakom ciklusu.
- inercija cijele konzole znatno je veća od inercije same lopate te je pri mjerenju na katarci puno više vremena potrebno da podatci tlaka postanu stabilni kako bi se mogla odrediti masa.



Slika 3.18. Skica mjerenja mase materijala u lopati na cilindru katarke a) i na cilindru lopate b)

Masa pune lopate (M) izračunata je prema izrazu 3.33 pomoću momenta u zglobu lopate, udaljenosti od zgloba do težišta lopate (l_x) i akceleracije sile teže (g) uz uvjet da kut θ_3 iznosi približno 180° . Masa materijala (m) predstavlja razliku između mase pune (M) i prazne lopate (M_0) (izraz 3.34).

$$M = \frac{M_c}{l_x * g} [t] \rightarrow \text{uz uvjet } \theta_3 \approx 180^\circ \quad (3.3317)$$

$$m = M - M_0 [t] \quad (3.34)$$

Gdje je: M – masa pune lopate [kg],

l_x - udaljenost od zgloba do težišta lopate [m],

M_0 – masa prazne lopate [t],

M_c – moment u točki C [kNm],

m – masa materijala [kg].

3.3.3. Učinak kopanja

Učinak kopanja predstavlja volumen ili masu materijala koji je iskopan u jednom ciklusu za vrijeme trajanja kopanja. Lopata bagera tijekom izvođenja kopanja prolazi kroz materijal te po završetku kopanja bude do određene mjere ispunjena materijalom. Uzmemo li masu ili volumen toga materijala te podijelimo s vremenom trajanja kopanja odnosno kontakta lopate s materijalom dobije se učinak kopanja. Izraz za proračun učinka kopanja 3.35 uz korištenje mase

materijala u lopati (m), nasipne gustoće materijala (ρ_n) i vremena trajanja kopanja (v) daje učinak u jedinici metar kubni po sekundi [m^3/s]. Izraz 3.36 daje učinak u jedinici tona po sekundi [t/s].

$$Q_s = \frac{m}{v} [\text{m}^3/\text{s}] \quad (3.35)$$

$$Q_s = \frac{m}{v} [\text{t}/\text{s}] \quad (3.36)$$

Gdje je: Q_s – učinak kopanja [m^3/s],

m – masa materijala u lopati [t],

ρ_n - nasipna gustoća materijala [t/m^3],

v - vrijeme trajanja kopanja [s].

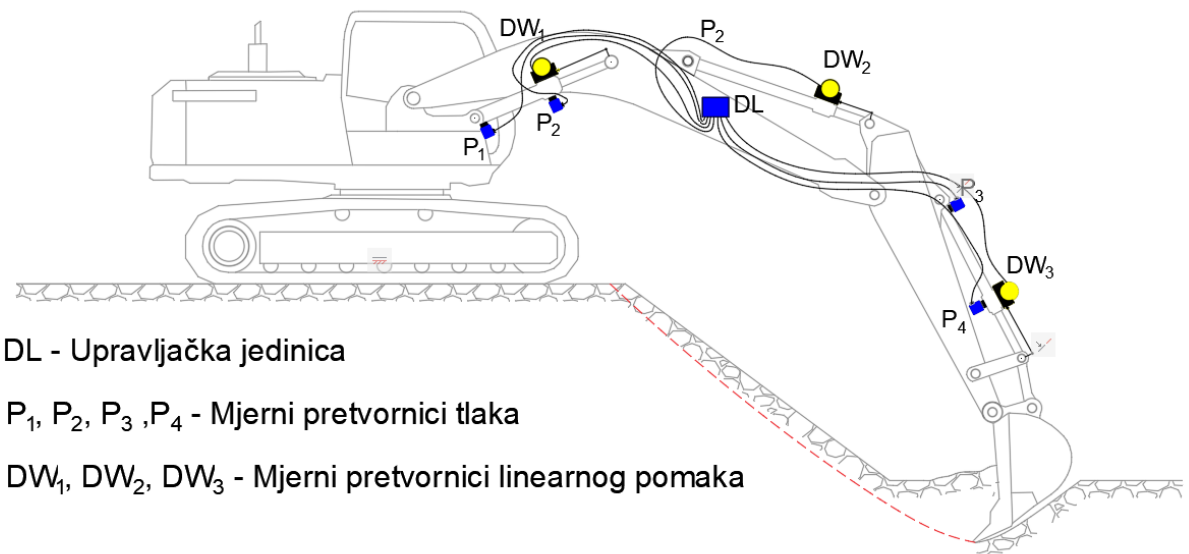
Učinak kopanja pogodan je za korištenje prilikom ispitivanja utjecajnih značajki stijenskoga materijala ili geometrije kopanja jer se odnosi isključivo na dio ciklusa u kojem se izvodi kopanje te je lopata bagera u kontaktu s materijalom. Ukoliko bi učinak bio promatran za cijeli ciklus, masa materijala bila bi ista kao i kod učinka kopanja dok bi vrijeme trajanja bilo uvećano za ostale dijelove ciklusa (podizanje, zakretanje, istresanje i vraćanje na poziciju kopanja). U tom slučaju veliki utjecaj na učinak imaju čimbenici poput kuta zakretanja i visine istresanja koji nemaju veze sa značajkama materijala.

4. PROVEDENA MJERENJA

Mjerenja u sklopu ovoga rada provedena su s ciljem prikupljanja podataka o radu bagera i svojstvima stijenskih materijala. Dio mjerenja izveden je na terenu, dio u laboratoriju te dio računalnom obradom fotografija s terena. Na terenu su provedena mjerenja tlakova hidrauličnoga sustava i pomaka bagera te mjerenje nasipne gustoće materijala. Laboratorijskim mjerenjima utvrđen je sadržaj vlage i granulometrijski sastav materijala. Računalnom obradom fotografija s terena utvrđene su detaljne dimenzije bagera koje su potrebne u proračunu kinematike, te je pomoću WipFrag programskog paketa određen granulometrijski sastav krupnozrnatih materijala.

4.1. *Mjerni sustav*

U prethodnim istraživanjima na RGN fakultetu, temeljem usvojenih znanja o mjernoj tehnologiji i elektronici osmišljen je i razvijen mjerni sustav za potrebe istraživanja učinka strojeva. Glavne su odlike sustava autonomnost, modularnost, mogućnost bežične komunikacije s računalom te pohrana podataka na internu memoriju. Na sustav se mogu spajati različiti mjerni pretvornici ovisno o potrebama mjerenja. Za potrebe mjerenja u sklopu ovoga rada sustav je opremljen mjernim pretvornicima linearnoga pomaka i tlaka. Samim time ističe se kao specifičan i jedinstven mjerni sustav za mjerenje tlakova i pomaka na hidrauličnom sustavu bagera. Sustav se sastoji od tri linearna mjerna pretvornika položaja te četiri mjerna pretvornika tlaka. Svi se mjerni pretvornici spajaju se na jedinicu za pohranu podataka koja je opremljena s modulom SD kartice za bilježenje podataka i *Bluetooth* modulom za bežični prijenos podataka na PC ili laptop. Prednost ovoga sustava također je i baterijsko napajanje koje omogućava višesatno mjerenje podataka na terenu bez potrebe za spajanjem na fiksni izvor napajanja. Skica spajanja sustava na bager prikazana je na slici 4.1.



Slika 4.1. Postavljanje mjernoga sustava na bager (Klanfar i sur., 2018)

Postavljanje ovoga sustava maksimalno je pojednostavljeno. Koriste se međuprirubnice s mjernim mjestima pomoću kojih se spajaju mjerni pretvornici tlaka, obujmice s kopčama za spajanje linearnih mjernih pretvornika položaja i magneti za pričvršćivanje jedinice za pohranu podataka na sam stroj. Mjerni pretvornici su spojeni žičnom vezom s jedinicom za pohranu podataka.

4.1.1. Linearni mjerni pretvornik položaja

Linearni mjerni pretvornici položaja (*engl. Draw-Wire sensors*) jednostavni su uređaji za mjerenje linearnoga pomaka. Pogodni su za mjerenje produljenja cilindra ponajprije zbog otpornosti na vibracije i prašinu što je u uvjetima rada bagera neizbježno. Princip rada linearnoga mjernog pretvornika pomaka bazira se na očitavanju položaja žice koja je namotana unutar kućišta te se prilikom produljenja izvlači. Linearni pomak žice pretvara se u rotaciju osovine na koju je spojen višezakretni potencijometar pomoću kojeg se očitava položaj. Napetost žice osigurana je pomoću spiralne opruge smještene na namotaju. Spajanje se izvodi na način da kućište mjernoga pretvornika bude pričvršćeno za cilindar a mjerna žica na vrh klipa (slika 4.2.). Time se postiže da prilikom rada cilindra mjerni pretvornik bilježi produljenje klipa. Korišteni mjerni pretvornik (WPS-2300-MK88-CR-5) ima mjerni raspon od 2300 mm (Klanfar i sur., 2018).



Slika 4.2. Ugradnja linearnoga mjernog pretvornika položaja.

4.1.2. Mjerni pretvornici tlaka

Hidraulični cilindri na bageru dvoradne su izvedbe, odnosno pod pritiskom ulja mogu se izvlačiti i uvlačiti. To također znači da imaju dva ulaza hidrauličnoga ulja. Za mjerenje sila kopanja mjerne pretvornike tlaka potrebno je spojiti na oba ulaza u cilindar. Razlog je tome što prilikom rada bagera unutar obje komore cilindra postoji određeni tlak, neovisno o smjeru kretanja klipa. Konačna efektivna sila cilindra dobije se razlikom umnožaka površine i tlaka u obje komore. Mjerni pretvornici tlaka spajaju se na hidraulični cilindar pomoću međuprirubnice s mjernim mjestom (slika 4.3.). Međuprirubnica je standardni čelični umetak koji se instalira na sam ulaz hidrauličnoga crijeva u kućište cilindra te na sebi ima izvod za pričvršćivanje mjernoga pretvornika tlaka.

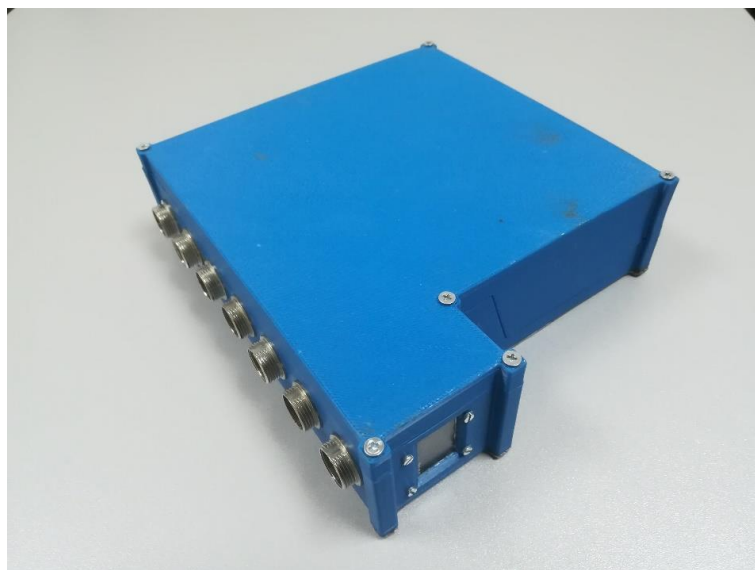


Slika 4.3. Spajanje mjernoga pretvornika tlaka (Klanfar i sur., 2018)

4.1.3. Jedinica za pohranu podataka

Jedinica za pohranu podataka je centralni dio mjernoga sustava na koji se pomoću žica spajaju svi mjerni pretvornici. Uz pohranu podataka kao glavnu funkciju, jedinica također služi za napajanje, upravljanje sustavom te komunikaciju s računalom. Temeljni dio je mikro kontroler Atmega328 iz kojeg se razvila Arduino platforma. Arduino je elektronička platforma koja se koristi za čitanje ulaza i, ako je potrebno, pretvaranje prikupljenih podataka u izlaz. Prednost Arduino-a je njegova niska cijena hardvera i softvera koji se lako koriste (Klanfar i sur., 2018).

Kućište jedinice za pohranu podataka izrađeno je pomoću 3D printera (slika 4.4.). Dizajnirana je tako da se u nju funkcionalno mogu uklopiti mikro kontroler, potrebni moduli i konektori za spajanje mjernih pretvornika. Na dno kućišta pričvršćena je čelična ploča koja osigurava dodatnu robusnost i lako spajanje magnetima na stroj.



Slika 4.4. Kućište jedinice za pohranu podataka

4.1.4. Umjeravanje sustava

Sustav je testiran u laboratorijskim uvjetima kako bi se utvrdila točnost. Tijekom postupka, kao referentna vrijednost za usporedbu izlaznih vrijednosti korišteni su umjereni instrumenti, uključujući perforiranu čeličnu traku i precizni manometar. U postupku mjerenja zanemaren je bio temperaturni i vremenski utjecaj jer uvjeti ispitivanja to nisu dopuštali. Sva odstupanja od referentnoga izlaza izračunavaju se prema linearnoj regresiji, s izuzetkom linearnih senzora položaja gdje je polinomna regresija bila prikladnija za povećanje točnosti.

Linearni mjerni pretvornici položaja testirani su pomoću perforirane čelične trake s podjednako raspoređenim perforacijama u razmaku od 10 mm. Kod ove vrste mjernih pretvornika očitana je nelinearnost. Pokazalo se da je u ovom slučaju najveća pogreška ± 6 mm, odnosno 0,26% mjernoga opsega. Apsolutna pogreška od 6 mm prihvatljiva je s obzirom na raspon mjerenja, ali može uzrokovati preveliku pogrešku u određenim položajima lopate bagera. Iz toga razloga izvedena je polinomna regresija kako bi se dobila matematička funkcija trećega reda. Na taj se način nelinearnost senzora smanjuje, a maksimalna pogreška pada na samo ± 2 mm ili 0,087% mjernoga opsega (Klanfar i sur., 2018). U tablici 4.1. prikazane su karakteristike mjernih pretvornika i funkcije korekcije izmjerenih vrijednosti.

Tablica 4.1. Karakteristike mjernih pretvornika i korekcijske funkcije

Mjerni pretvornici	Točnost	Rezolucija	Mjerni opseg	Korekcijska funkcija	
Linearnog pomaka	1	0,087% mjernog opsega	0,58 mm	0-2400 mm	$y = -1,02742 \cdot 10^{-9} x^3 + 3,5668 \cdot 10^{-6} x^2 + 0,5844736x + 9,8078$
	2	0,087% mjernog opsega	0,58 mm	0-2400 mm	$y = -1,21043 \cdot 10^{-9} x^3 + 5,3918 \cdot 10^{-6} x^2 + 0,5802741x + 1,3093$
	3	0,087% mjernog opsega	0,58 mm	0-2400 mm	$y = -1,50389 \cdot 10^{-9} x^3 + 7,6488 \cdot 10^{-6} x^2 + 0,575456x + 8,9753$
Tlaka	1 - 4	0,026% mjernog opsega	0,15 bar	0-500 bar	$y = 0,153x - 62,48$

Mjerni pretvornici tlaka testirani su u rasponu od 0 bara do 100 bara jer je to granica referentnoga manometra. Ispitivanje je obavljeno primjenom dva prolaza u smjeru podizanja tlaka i dva prolaza u smjeru pada tlaka. Izlaz pokazuje samo Gausovu distribuciju pogreške, vjerojatno uzrokovanu šumom. Zaključak je da ovi senzori imaju veliku linearnost i vrlo malu pogrešku od $\pm 0,15$ bara, odnosno 0,026% mjernoga opsega za testirani raspon. Za precizno pretvaranje u mjerne jedinice linearna regresija je više nego dovoljna. Karakteristike mjernih pretvornika tlaka prikazane su u tablici 4.1. (Klanfar i sur., 2018).

4.1.5. Dinamometar

Dinamometar je uređaj za mjerenje intenziteta sile. U ovom radu korišten je prilikom terenskih mjerenja pri određivanju nasipne gustoće materijala te za mjerenje sile na zubu lopate. Uređaj se u osnovi sastoji od mjernoga pretvornika sile, konstrukcije za ovješnje tereta i jedinice za pohranu podataka (slika 4.5.). Karakteristike mjernoga pretvornika naznačene su u tablici 4.2. Konstrukcija za ovješnje tereta sastoji se od dvije alke koje su vijčanim spojem pričvršćene za mjerni pretvornik. Jedinica za pohranu podataka konstruirana je na RGN fakultetu, njena je funkcija napajanje, komunikacija s mjernim pretvornikom, obradu i prikaz podataka mjerenja. Uređaj je testiran i provjeren pomoću umjerenoga dinamometra na kidalici u Laboratoriju za rudarsku mehanizaciju i arhitektonsko-građevni kamen na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Tablica 4.2. Karakteristike mjernoga pretvornika sile

Podatci o uređaju	
Vrsta mjerila	pretvornik sile
Proizvođač	WIKA
Tip	F2226
Smjer sile	vlačna
Nominalno opterećenje	200 kN
Relativna greška linearnosti	+/- 0,15 % F_{nom}
Izlazni signal	0/10 V, 3-žični
Temperaturno područje	15 - 71 °C



Slika 4.5. Dinamometar

4.2. Izvođenje terenskih mjerenja

Organizacija izvođenja terenskih mjerenja u okviru ovoga rada predstavljala je vrlo složeni proces. Da bi se uspješno organiziralo i provelo terensko mjerenje ovakvoga tipa potrebno je uskladiti velik broj čimbenika. U nastavku su navedeni najvažniji koraci pri organizaciji i izvođenju terenskoga mjerenja:

- odabir prikladne lokacije s dostupnim strojem i materijalima,
- suglasnost tvrtke za izvođenje mjerenja,
- posjet lokaciji u svrhu izviđanja uvjeta,
- dogovor prikladnoga termina,
- organizacija logistike za samo mjerenje,
- izvođenje mjerenja na terenu.

Svaka od navedenih stavki trebala je biti pozitivno riješena kako bi mjerenje bilo izvedeno. Kriteriji za odabir lokacije bili su prije svega dostupnost prikladnoga stroja i materijala u kojima bi se izvodilo mjerenje. Vrlo je važna također zainteresiranost i susretljivost rukovodeće osobe na odabranoj lokaciji. Sljedeći korak bio je traženje službene suglasnosti uprave pojedine tvrtke za izvođenje mjerenja. Nakon odobrenja izvođenja mjerenja potrebno je bilo obaviti izviđanje uvjeta na samoj lokaciji s ciljem što bolje pripreme mjerenja. Prilikom posjeta lokaciji provjerena je mogućnost spajanja sustava na bager, dostupnost lokacije izvođenja i vrste materijala u kojima će se izvoditi mjerenje. Nakon toga slijedio je dogovor za prikladan termin izvođenja mjerenja. Čimbenici koji utječu na odabir termina jesu svakako uvjeti na samom

radilištu te organizacija tehnološkoga procesa. Vremenski uvjeti također su vrlo važan čimbenik pa je na primjer zbog kišnoga vremena nekoliko puta odgađano mjerenje. Logistička organizacija kao i samo izvođenje mjerenja moraju biti na vrlo visokoj razini, isplanirani do zadnjeg detalja jer ukoliko se dogodi i najmanji propust cijela mjerenja mogu biti uzaludna. Za izvođenje mjerenja potrebno je minimalno dvoje ljudi te transportno sredstvo s većim tovarnim prostorom za prijevoz uređaja i alata.

Samo izvođenje mjerenja sastoji se od sljedećih faza:

- dolazak na lokaciju,
- spajanje mjernoga sustava,
- mjerenje i fotografiranje dimenzija bagera,
- provjera rada mjernoga sustava,
- izvođenje mjerenja u različitim materijalima,
- određivanje nasipne gustoće materijala,
- uzimanje uzoraka,
- demontaža sustava.

Prilikom dolaska na lokaciju potrebno je pronaći prikladno mjesto gdje se prijevoznim sredstvom može stati što bliže bageru i pritom ne zakrčiti prolaz ostalih strojeva na radilištu. Pritom je nužno voditi računa o sigurnosti svih sudionika kao i opreme. Sama montaža sustava započinje nakon što operater namjesti radnu konzolu bagera tako da je što dostupnija za spajanje sustava. Mjerni pretvornici tlaka spajaju se na cilindar katarke i lopate pomoću međuprirubnica. Taj postupak traje otprilike 15 min po cilindru. Prvo je potrebno otpustiti vijke prirubnica na ulazima hidrauličnih crijeva u cilindre. Pri tome je važno da je radna konzola stroja namještena u položaj tako da cilindri nisu pod tlakom. Prilikom otpuštanja vijaka svakako treba pripaziti da ulje koje se može i dalje nalaziti pod visokim tlakom ne bi nekoga ozlijedilo ili načinilo štetu okolišu, strojevima ili alatu. Nakon otpuštanja vijaka između prirubnice i ulaza u cilindar stavlja se međuprirubnica s mjernim mjestom te se pričvršćuje drugim vijcima koji su dulji za visinu međuprirubnice. Na međuprirubnicu se postavlja mjerni pretvornik tlaka. Mjerni pretvornici linearnoga pomaka spajaju se na vrh svakoga cilindra pomoću obujmice s kopčom koja čvrsto fiksira donji dio kućišta mjernoga pretvornika za cilindar. Na vrh klipnjače cilindra spaja se obujmicom limeni L-profil na koji se kopča čelična nit mjernoga pretvornika linearnoga

pomaka. Nakon spajanja svih mjernih pretvornika na mjesta mjerenja redom se priključuju žicama na jedinicu za pohranu podataka koja se pomoću magneta postavlja na katarku bagera. Jedinica za pohranu podataka se pali i provjerava funkcioniraju li svi mjerni pretvornici. U međuvremenu je fotoaparatom snimljeno dvadesetak fotografija bagera kako bi se računalno mogle odrediti sve potrebne dimenzije. Na svakom bageru mjernom vrpcom izmjerene su minimalno tri veće dimenzije koje će se koristiti za podešavanje mjera u računalu. Nakon što je sustav spreman za mjerenja, bager pristupa odrađivanju svojih planiranih zadataka dok sustav cijelo vrijeme mjeri i pohranjuje podatke o tlaku i pomaku na cilindrima. Nakon obavljanja zadanoga posla u određenom materijalu pristupa se mjerenju nasipne gustoće materijala. Način mjerenja je detaljno objašnjen u poglavlju 4.2.3. Za potrebe laboratorijskih ispitivanja uzeti su uzorci sitnijih frakcija i koherentnih materijala. Uzorci krupnijih frakcija fotografirani su za grafičku analizu. Nakon obavljenoga mjerenja demontiran je mjerni sustav.

4.2.1. Preliminarna terenska istraživanja i probna terenska mjerenja

Preliminarna terenska istraživanja izvedena su u svrhu detaljnoga upoznavanja konstrukcije i procesa rada hidrauličkoga i mehaničkog sustava bagera radi prilagodbe mjernoga sustava i postupka mjerenja. Ukupno su izvedena tri preliminarna terenska istraživanja na lokaciji Donja Zelina u radionici za servis radnih strojeva tvrtke Makromehanika. Spomenuta tvrtka omogućila je ispitivanje na jednom od svojih strojeva. Na prvom terenskom ispitivanju detektirana su najprikladnija mjesta i načini spajanja mjernih pretvornika na hidraulični sustav bagera. Također je popisana sav dodatni materijal i alat koji je potreban prilikom spajanja. Na drugom terenskom ispitivanju spojen je i testiran mjerni sustav. Otkrivene su poteškoće pri spajanju mjernih pretvornika tlaka na cilindar katarke zbog specifičnih spojeva koji se razlikuju od stroja do stroja. Nabavkom spojnice koje se najčešće pojavljuju riješen je potencijalni problem na budućim mjerenjima. U sklopu trećega terenskoga istraživanja uhodan je proces spajanja i testirana je poboljšana verzija sustava. Testirani su i komunikacijski sustavi s računalom te je utvrđeno da je sustav uz manje dorade spreman za probno mjerenje u materijalu. Dodatna preliminarna istraživanja odrađena su i prije nekih od glavnih mjerenja u realnim uvjetima. Kako bi se sa sigurnošću utvrdilo da su sve komponente sustava kompatibilne s bagerom na kojemu se planira izvoditi mjerenje u realnim uvjetima rada, kamenolomi su posjećeni u nekoliko navrata prije samih mjerenja.

Probna terenska mjerenja odrađena su u svrhu usavršavanja postupka spajanja te detaljnoga testiranja i validacije mjernoga sustava koje je detaljno objašnjeno u poglavlju 6. (Validacija izmjerenih vrijednosti). Za razliku od preliminarnih istraživanja, na probnim je mjerenjima sustav testiran pri radu u određenom materijalu simulirajući normalni ciklus kretanja radnoga mehanizma bagera. Rezultati dobiveni probnim mjerenjem poslužili su za izradu i testiranje programa za obradu podataka.

4.2.1.1. Zelina (Makromehanika)

Prvo probno terensko mjerenje obavljeno je u mjestu Donja Zelina na zemljištu tvrtke Makromehanika u zemljanom materijalu (slika 4.6.). Sustav je spojen na bager tako da su mjerni pretvornici linearnoga pomaka i tlaka spojeni na cilindre katarke, ruke i lopate. Mjerni pretvornici tlaka na svim cilindrima bili su spojeni samo na tlačnu komoru, odnosno bio je mjeren samo tlak izvlačenja. Nakon spajanja sustava na bager, testirano je povezivanje sustava s prijenosnim računalom preko *Bluetooth* veze te je kratkim radom stroja provjereno funkcioniranje svih senzora. Rezultati su prikazani u obliku grafova koji se iscrtavaju na zaslonu u realnom vremenu za svaki mjerni pretvornik. Mjerni pretvornici tlaka prilikom mirovanja sa spuštenom lopatom pokazivali su nula bara, a tijekom rada maksimalni tlak iznosio je 250 bara što je jednako maksimalnom tlaku hidraulične pumpe bagera. Na temelju toga zaključeno je da mjerni pretvornik tlaka daje točne rezultate. Mjernom vrpcom izmjerena su produljenja cilindra na bageru pri mirovanju te je utvrđeno da se podudaraju s izlaznim vrijednostima mjernih pretvornika linearnoga pomaka. Izmjerene su također i koordinate vrha lopate u različitim pozicijama te uspoređene s proračunatim koordinatama vrha lopate koje su dobivene iz ranije navedenoga kinematičkog modela (tablica 4.3.). Na dnu tablice prikazana je maksimalna pogreška izračunata na temelju mjerenja u sve tri točke. Razlike između izmjerenih i izračunatih koordinata bile su manje od 2% što je zadovoljavajuće s obzirom na to da je na terenu vrlo teško odrediti točnu poziciju centra rotacije bagera i horizontalnu ravninu, od kojih su mjerene udaljenosti. Utvrđeno je da je proračun, kao i cijeli sustav, ispravan i primjenjiv za daljnja ispitivanja. Provjera koordinata vrha lopate uz određivanje udaljenosti mjernom vrpcom pokazala se primjenjivom u ovom slučaju grube provjere koordinata. No, na terenskim mjerenjima u realnim uvjetima na kamenolomu bila je primijenjena preciznija fotogrametrijska metoda određivanja udaljenosti koja je detaljno objašnjena u poglavlju 4.3.

Tablica 4.3. Provjera koordinata

Lokacija	Stroj	Točka 1				Točka 2				Točka 3			
		Izm. (m)		Rač. (m)		Izm. (m)		Rač. (m)		Izm. (m)		Rač. (m)	
		x	z	x	z	x	z	x	z	x	z	x	z
Donja Zelina	Volvo EC290B-NCL	8,54	0	8,48	-0,14	4,23	1,87	4,18	1,82	5,24	2,28	5,29	2,25
Maks. pogreška				x	z	x (%)	z (%)						
				0,06	0,14	0,70%	1,64%						



Slika 4.6. Probno terensko mjerenje – Donja Zelina

4.2.1.2. Kaštel Sućurac (Cemex i TRG)

Probno terensko mjerenje obavljeno je na kamenolomu “Sv. Juraj – Sv. Kajo” u Kaštel Sućurcu koji je u koncesiji tvrtke Cemex d.d. Podizvođač radova bušenja, miniranja, utovara i transporta je tvrtka TRG d.o.o. koja je u suglasnosti s tvrtkom Cemex d.d. omogućila izvođenje mjerenja. Mjerenje je izvedeno na bageru Volvo EC290CL pri utovaru odminirane stijenske mase (slika 4.7.). Osnovne karakteristike bagera nalaze se u tablici 4.4. dok su detaljni podatci prikazani u prilogu 7.

Tablica 4.4 Podatci o bageru Volvo EC290 CL

Karakteristike bagera	
Proizvođač	Volvo
Model	EC 290 CL
Godina proizvodnje	2008
Snaga (kW)	160
Masa (t)	29,6



Slika 4.7. Volvo EC290CL - kamenolom "Sv. Juraj – Sv. Kajo"

Cilj probnoga terenskog mjerenja na kamenolomu "Sv. Juraj – Sv. Kajo" bio je upoznavanje s uvjetima spajanja i mjerenja u takvoj sredini i testiranje sustava pri radu u rastresitom materijalu.

Sustav je spojen na isti način kao i kod prethodnoga probnog mjerenja tako da su mjerni pretvornici linearnoga pomaka i tlaka spojeni na cilindre katarke, ruke i lopate. Mjerni pretvornici tlaka na svim cilindrima bili su spojeni samo na donju komoru, odnosno bio je mjeren samo tlak izvlačenja. Ovakvo se načelo, nakon ovoga terenskog mjerenja, pokazalo neispravnim zbog saznanja da u obje komore istovremeno vlada određeni tlak, te je za efektivnu silu potrebno mjerenje na obje komore.

Nakon obrade podataka s navedenoga probnog mjerenja primijećeno je da su sile koje generira cilindar ruke prilikom kopanja razmjerne silama koje se pojavljuju na cilindru lopate - drugim riječima, sile se manifestiraju na cilindar lopate. Iz tog razloga odlučeno je da se na svim sljedećim mjerenjima mjerne pretvornike tlaka spaja samo na cilindre lopate i katarke i to na obje komore.

4.2.2. Terenska mjerenja u realnim uvjetima

Terenska mjerenja u realnim uvjetima rada bagera započela su tek nakon dovoljno stečenoga iskustva i saznanja na preliminarnim istraživanjima i probnim mjerenjima. Uvjet za brzo i efikasno mjerenje bila je dobra organizacija, nabavka alata i rezervnih materijala te uhodana rutina spajanje sustava na bager. Samo spajanje sustava svedeno je na manje od sat vremena a demontaža na pola sata. Vremenski okviri vrlo su važni jer su radilišta na kojima su se odvijala

mjerenja bila u pogonu, a svaki veći vremenski zastoje znatno remeti organizaciju rada. Mjerenja su se odvijala na četiri različite lokacije, s time da je na jednoj lokaciji mjerenje održano u dva navrata. Na svakoj od lokacija odabran je jedan bager na koji se priključio mjerni sustav. Odabrani su materijali koji su u tom trenutku bili dostupni na kamenolomu te je moglo početi izvođenje mjerenja. Na većini mjerenja bila su dostupna samo dva materijala, osim na kamenolomu „Špica“ gdje je bilo dostupno pet materijala. Ukoliko je bager u određenom materijalu imao zadan radni zadatak nastojalo se provesti mjerenje što je dulje moguće. Ukoliko bager nije imao radni zadatak u određenom materijalu, nastojalo se odraditi nekoliko ciklusa kako bi se dobili rezultati, a ujedno ne bi bila previše narušena organizacija rada samoga radilišta. U tablici 4.5. nalazi se popis kamenolomima na kojima je odrađeno mjerenje te materijali i broj odrađenih ciklusa u svakom od njih.

Tablica 4.5. Lokacije mjerenja, materijali i broj ciklusa kopanja

Lokacija	Materijal	Broj ciklusa
Zvečaj	Odmirano	51
	Otkrivka	22
Zvečaj	Frakcija + glina	3
	Otkrivka suho	12
Gradna	Odmirano	24
	Odmirano sitno	30
Špica	Otkrivka	5
	Frakcija + glina	8
	Blokovi	12
	Odmirano	11
	Frakcija	14
Čelina	Odmirano	45
	Blokovi	6

4.2.2.1. Kamenolom „Zvečaj“

Kamenolom „Zvečaj“ smješten je 10 km jugozapadno od Duge Rese u mjestu Donji Zvečaj. Koncesionar i izvođač radova je tvrtka Arkada d.o.o. U ležištu prevladava vapnenac, a lapor se pojavljuje na starom dijelu kamenoloma u pri površinskom sloju do debljine od 10 m. Trenutni napredak kamenoloma odvija se prema sjeverozapadu u tri razvijene etaže visine od 10 do 25 m. Mineralna sirovina dobiva se bušenjem i miniranjem dok se utovar izvodi bagerom u kamione koji transportiraju sirovinu do usipnoga bunkera stacionarnog oplemenjivačkog

postrojenja. Proizvodi u vidu standardnih frakcija kamenih agregata prodaju se na tržištu te se koriste za potrebe betonare koja se nalazi u sklopu kamenoloma.



Slika 4.8. CAT 330FLN - kamenolom "Zvečaj"

Na prvom terenskom mjerenju rada bagera izvedenom na kamenolomu „Zvečaj“ mjerni sustav spojen je na bager CAT 330 FLN (slika 4.8.). Osnovne karakteristike bagera navedene su u tablici 4.6. Svi detaljni podatci o bageru navedeni su u prilogu 7. Mjerni pretvornici tlaka spojeni su na cilindar lopate i katarke na ulaza u obje komore (tlačnu i vlačnu). Mjerenja su obavljena u dvije dostupne vrste materijala. Prvi radni zadatak bagera bio je utovar odminirane stijenske mase u kamion, pritom je snimljen 51 ciklus. Sljedeći zadatak bio je prebacivanje otkrivke s vrha kamenoloma na nižu etažu, pri čemu su snimljena 22 ciklusa. Nakon odrađenih mjerenja rada bagera izmjerena je i nasipna gustoća odminiranoga stijenskog materijala i uzeti su uzorci oba materijala za laboratorijska ispitivanja.

Tablica 4.6. podatci o bageru - CAT 330FLN

Karakteristike bagera	
Proizvođač	Caterpillar
Model	330 FLN
Godina proizvodnje	2016
Snaga (kW)	178
Masa (t)	28,836

Drugo terensko mjerenje rada bagera na kamenolomu „Zvečaj“ obavljeno je nekoliko mjeseci kasnije. Mjerni sustav spojen je na drugi bager koji je tada bio dostupan CAT 323 ELN (slika 4.9.) Osnovne karakteristike bagera navedene su u tablici 4.7. Detaljni podatci su prikazani u

prilogu 7. Mjerni pretvornici tlaka spojeni su na cilindar lopate i katarke na ulaza u obje komore (tlačnu i vlačnu). Bager je samo u svrhu mjerenja izveo simulaciju utovara u dva različita materijala. Prvi materijal bila je otkrivka pri čemu je zabilježeno 12 ciklusa, a drugi materijal bila je drobljena stijenska masa u kojoj su zabilježena svega tri valjana ciklusa. Nakon mjerenja uzeti su uzorci materijala za laboratorijska ispitivanja.



Slika 4.9. Caterpillar 323 ELN - kamenolom "Zvečaj"

Tablica 4.7. Podatci o bageru - CAT 323 ELN

Karakteristike bagera	
Proizvođač	Caterpillar
Model	323 ELN
Godina proizvodnje	2016
Snaga (kW)	121
Masa (t)	22,4

4.2.2.2. Kamenolom „Gradna“

Kamenolom „Gradna“ nalazi se 5 km zapadno od Samobora u mjestu Smerovišće. Koncesionar i izvođač radova je tvrtka Samoborka d.d. U ležištu prevladava dolomit uz pojavu vapnenca. U eksploatacijskom dijelu ukupno je razvijeno 13 etaža visine po 15 metara. Eksploatacija se vrši bušenjem i miniranjem, dok se transport izvodi kombinacijom gravitacijskoga transporta do osnovnoga ili utovarnog platoa te se nadalje bagerom utovara u damper koji sirovinu odvozi do oplemenjivačkoga postrojenja. Mjerenje u realnim uvjetima rada bagera na kamenolomu „Gradna“ (slika 4.10.) izvedeno je u dva različita materijala. Dostupni bager bio je Komatsu PC340 NLC čije su osnovne karakteristike navedene u tablici 4.8. Svi detaljni podatci o bageru navedeni su u prilogu 7. Prvi materijal bio je odminirana stijenska masa koja je zbog specifičnosti dolomitne stijene relativno sitna. Bager je prilikom mjerenja izvodio utovar

materijala u damper pri čemu je zabilježeno ukupno 24 ciklusa. Sljedeći materijal bio je sitnija frakcija stijenske mase koja je gravitacijskim transportom spuštена na nižu etažu. U tom je materijalu bager za potrebe mjerenja simulirao utovar u damper, pri čemu je zabilježeno 37 ciklusa. Ispitivanja nasipne gustoće materijala provedeno je u Laboratoriju za rudarsku mehanizaciju i arhitektonsko-građevni kamen na uzorcima koji su uzeti s terena.



Slika 4.10. Komatsu PC340 NLC - kamenolom "Gradna"

Tablica 4.8. Podatci o bageru - Komatsu PC340 NLC

Karakteristike bagera	
Proizvođač	Komatsu
Model	PC 340 NLC - 7EO
Godina proizvodnje	2006
Snaga (kW)	184
Masa (t)	32,97

4.2.2.3. Špica (Ljubešćica)

Kamenolomu „Špica“ nalazi se 6 km istočno od Novog Marofa u mjestu Ljubešćica. Koncesionar i izvođač radova je tvrtka Kaming d.d. U naslagama ležišta prevladavaju vapnenci i dolomitični vapnenci te manje zastupljen dolomit. Dosadašnjim napretkom kamenolom je razvijen u 5 etaža visine od 25 do 30 m i širine berme od 10 do 30 m. Radni plato nalazi se na nadmorskoj visini od 213 do 216 m. Stijenska masa primarno se drobi bušenjem i miniranjem. Odminirani stijenski materijal gravitacijski se spušta na radni plato, a odatle transportira do drobilice. U drobilici se materijal usitnjava na standardne građevinske agregate. Proizvodi iz ovoga kamenoloma naširoko se koriste u graditeljstvu.



Slika 4.11. Doosan XD 300 LCA - kamenolom "Špica"

Mjerenja na kamenolomu „Špica“ izvedena su na bageru Doosan XD 300 LCA (slika 4.11.) čije su osnovne karakteristike prikazane u tablici 4.9, a ostali detaljni podatci navedeni u prilogu 7. Mjerenje je izvedeno u ukupno 5 različitih materijala. U svakom od materijala bager je samo za potrebe mjerenja simulirao utovar. Redoslijed mjerenja u materijalima i broj zabilježenih ciklusa bio je sljedeći:

- otkrivka (5),
- frakcija s glinom (8),
- blokovi (14),
- odminirana stijenska masa (11),
- frakcija (20).

Na terenu je odrađeno i mjerenje nasipne gustoće za sve materijale osim blokova te su uzeti uzorci za laboratorijska ispitivanja.

Tablica 4.9. Podatci o bageru - Doosan XD 300 LCA

Karakteristike bagera	
Proizvođač	Doosan
Model	XD 300 LCA
Godina proizvodnje	2018
Snaga (kW)	146
Masa (t)	29,6

4.2.2.4. Kamenolom „Čelina“

Kamenolom „Čelina“ nalazi se 10 km južno od Daruvara u mjestu Sirač. U koncesiji je tvrtke Kamen Sirač d.d.. U naslagama ležišta prevladava dolomit. Kamenolom je trenutno razvijen u šest etaža visine od 15 do 30 m i širine bermi od 10 do 20 m. Radni plato nalazi se na 1 etaži. Transport se izvodi kombinacijom gravitacijskoga spuštanja materijala do radnoga platoa te utovarom pomoću bagera ili utovarača u dampere koji prevoze sirovinu do usipnoga bunkera oplemenjivačkoga postrojenja. Proizvodi ovoga kamenoloma jesu standardne građevinske frakcije te sirovine za industrijsku preradu. Dolomit koji se eksploatira posjeduje pogodna kemijska svojstva za proizvodnju vapna te petrokemijsku industriju za proizvodnju umjetnih gnojiva. Terenska mjerenja na kamenolomu „Čelina“ izvedena su na bageru Komatsu PC 360LC (slika 4.12.) čije su osnovne karakteristike navedene u tablici 4.10. Svi detaljni podatci o bageru navedeni su u prilogu 7. Mjerenje se odvijalo prilikom utovara odminirane stijenske mase u damper pri čemu je zabilježeno 45 ciklusa te premještanju blokova gdje je zabilježeno svega 7 ciklusa.



Slika 4.12. Komatsu PC 360LC - kamenolom "Čelina"

Tablica 4.10. Podatci o bageru - Komatsu PC 360LC

Karakteristike bagera	
Proizvođač	Komatsu
Model	PC 360 LC
Godina proizvodnje	2012
Snaga (kW)	202
Masa (t)	35,876

4.2.3. Mjerenje nasipne gustoće materijala na terenu

Nasipna gustoća materijala određena je u sklopu terenskih mjerenja rada bagera. U tu svrhu izrađena je robusna drvena kutija zapremine 1 m^3 s otvorom na vrhu koja je poslužila kao posuda za vaganje materijala. Kutija je učvršćena s četiri čelične šipke koje se protežu duž bočnih bridova. Na vrhu svake čelične šipke nalazi se navoj na koji se stavlja alka za podizanje. Dodatno su instalirane dvije alke na donji rub kutije, koje služe za prevrtanje i istresanje. Pri postupku mjerenja također je korišten dinamometar te trake i lanci za podizanje tereta. Na slici 4.13. prikazano je mjerenje nasipne gustoće odminirane stijenske mase na kamenolomu „Zvečaj“.



Slika 4.13. Terensko određivanje nasipne gustoće

Postupak mjerenja je sljedeći: drvena kutija se uz pomoć bagera napuni materijalom te se drvenom letvom materijal poravna tako da bude u ravnini s vrhom kutije. Trake za podizanje tereta prikopčaju se na četiri alke na vrhu kutije i na dinamometar. Drugi dio dinamometra prikopča se na lanac za podizanje tereta koji je pričvršćen na bager. Kutija se pomoću bagera podigne cca 50 cm od tla i napravi se očitavanje na dinamometru. Teret se spušta i prevrtanjem istresa iz kutije. Prethodno je ovješanjem na dinamometar određena i masa prazne kutije. Nasipna gustoća izračunata je prema izrazu 4.1.

$$\rho_n = \frac{m_{k+m} - m_k}{V_k} [t/m^3] \quad (4.1)$$

Gdje je: ρ_n – nasipna gustoća materijala [t/m^3],

m_{m+k} – masa materijala i kutije [t],

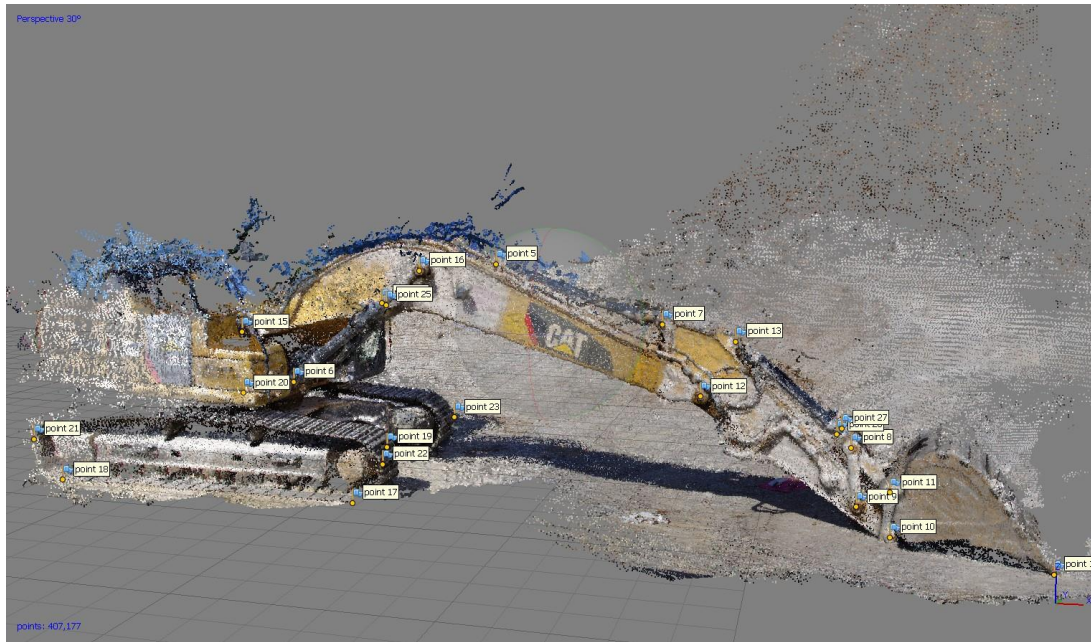
m_k – masa kutije [t],

V_k – volumen kutije [m^3].

Postupak za prvi materijal ponovljen je tri puta te je uzeta srednja vrijednost svih rezultata. Utvrđeno je da su razlike između mjerenja u istom materijalu vrlo male ($\pm 3\%$). Samo ispitivanje u prosjeku traje oko 25 minuta te je odlučeno da se zbog što manjega zadržavanja bagera sljedeća mjerenja izvode samo jednom za svaki materijal.

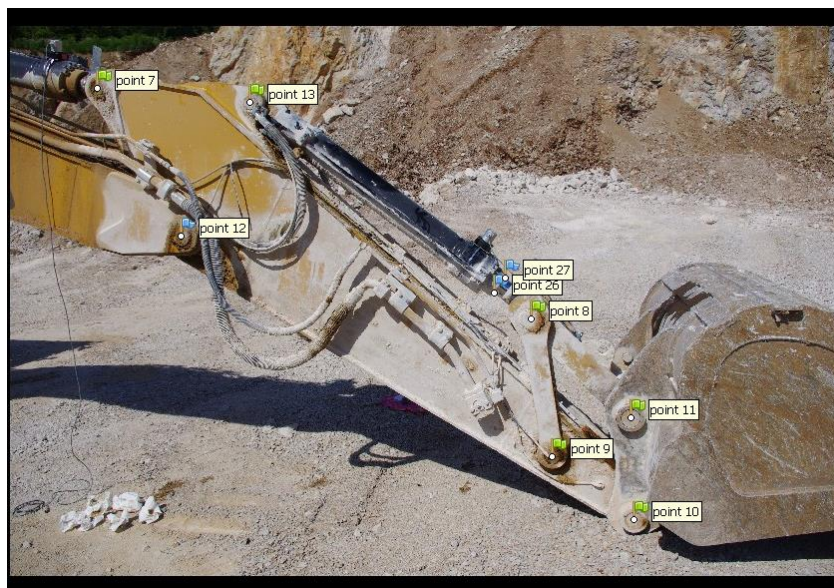
4.3. Određivanje dimenzija bagera

Za proračun kinematike bagera potrebno je poznavanje detaljnih dimenzija radnoga mehanizma (katarke, ruke i lopate). Određivanje dimenzija mjernom vrpcom i laserskim daljinomjerom testirano je na terenu te je zaključeno da rezultati mogu odstupati i do 3,5% (poglavlje 6.) što predstavlja neprihvatljivu pogrešku. Stoga je mjerenje dimenzija izvedeno fotogrametrijskom metodom. Svaki bager na kojemu je izvedeno mjerenje detaljno je fotografiran s dvadesetak fotografija tako da se obuhvate svi zglobovi na radnom mehanizmu. Fotografije su učitane u program Agisoft Photoscan i na temelju njih je izrađen trodimenzionalni model bagera (slika 4.14.).



Slika 4.14. Model bagera PhotoScan

Na fotografijama su označene karakteristične točke (point 1-21) u osima svih zglobova. Primjer označavanja karakterističnih točaka prikazan je na slici 4.15. Unošenjem poznatih vrijednosti najmanje dvije duljine, program automatski sve ostale dimenzije modela u mjerilu prilagođava unesenim vrijednostima. U ovom slučaju bile su unesene duljine katarke i ruke koje su preuzete iz tvorničkih specifikacija bagera. Nakon toga su izvezene koordinate karakterističnih točaka u program AutoCad. Sve točke pridružene su istoj ravnini koja leži u osi radnog mehanizma, a nakon toga su određene potrebne udaljenosti između pojedinih točaka. Sve dimenzije koje su određivane navedene su u poglavlju 3. na skicama 3.6. do 3.9, a rezultati prikazani u prilogu 7.



Slika 4.15. Označavanje karakterističnih točaka na fotografijama

4.4. Laboratorijska ispitivanja

4.4.1. Određivanje sadržaja vlage

Laboratorijsko određivanje vlažnosti materijala opisano je u poglavlju 2.3.3. Vлага materijala određena je u laboratoriju za rudarsku mehanizaciju i arhitektonsko-građevni kamen na RGN fakultetu na uzorcima rastresitih materijala najvećeg zrna do 50 mm i koherentnih materijala. Za uzorke veće granulacije, u što ulaze blokovi i pojedini odminirani stijenski materijali većih granulacija sadržaj vlage je pretpostavljen prema podatku o upijanju vlage za određenu vrstu stijene.

Postupak određivanja sadržaja vlage je sljedeći: uzorak je na terenu stavljen u dvostruku plastičnu vreću i čvrsto zavezan kako tijekom transporta ne bi došlo do prosipanja ili isparavanja vlage. Unutar 24 sata uzorak je u laboratoriju izvagan i stavljen na sušenje. Na elektronskoj vagi točnosti $\pm 0,1$ g prvo je određena masa prazne posude u koju će se staviti uzorak. Nakon toga uzorak je stavljen u posudu te je određena masa uzorka i posude prije sušenja (slika 4.16.). Sušenje se je izvedeno u sušioniku na 110°C 24 sata. Nakon sušenja uzorak je ohlađen na sobnoj temperaturi u eksikatoru te se utvrdila masa nakon sušenja. Sadržaj vlage predstavlja razliku između mase uzorka prije i poslije sušenja izražene u postotcima (%) (izraz 2.4). Sadržaj vlage koji je laboratorijski određen na uzorcima nalazi se u tablici 4.11.



Slika 4.16. Određivanje mase uzorka na elektronskoj vagi

Tablica 4.11. Sadržaj vlage

Br	Lokacija	Uzorak	Masa vlažnog uzorka	Masa suhog uzorka	Postotak vlage (%)
1.	Zvečaj	Otkrivka	897,1	619,5	44,81%
	Zvečaj	Odmirano			<1%
2.	Gradna	Odmirano	7053,4	6956,9	1,39%
	Gradna	Frakcija	8314,9	8212,5	1,25%
3.	Špica	Otkrivka	1864,9	1604,9	16,20%
	Špica	Frakcija + glina	4793,5	4671,8	2,60%
	Špica	Blokovi			<1%
	Špica	Odmirano			<1%
	Špica	Frakcija	1974,8	1941,2	1,73%
4.	Čelina	Odmirano	6150,4	6030,6	1,99%
	Čelina	Blokovi			<1%
5.	Zvečaj	Otkrivka	2164,9	1913	13,17%
	Zvečaj	Frakcija + glina	716,3	683,9	4,74%

4.4.2. Određivanje granulometrijskoga sastava

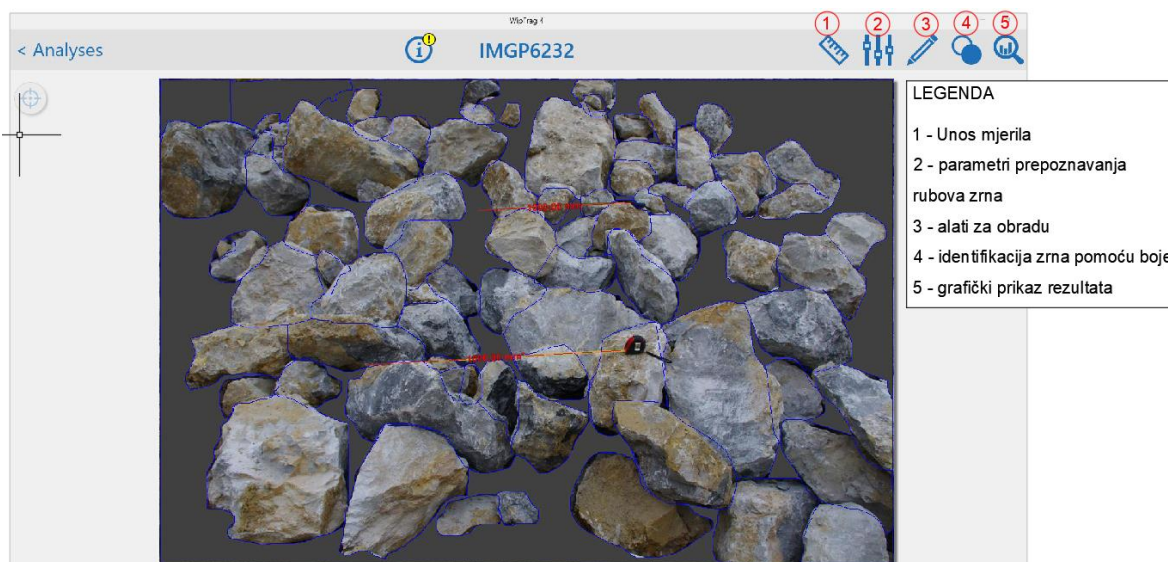
Granulometrijski sastav određen je u Laboratoriju za oplemenjivanje mineralnih sirovina i zaštitu okoliša te Geomehaničkom laboratoriju na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu. Postupak određivanja granulometrijskoga sastava detaljno je opisan u poglavlju 3.2.3. U Laboratoriju za oplemenjivanje mineralnih sirovina i zaštitu okoliša određen je granulometrijski sastav nekoherentnih materijala s maksimalnom veličinom zrna do 50 mm. Postupak određivanja granulometrijskoga sastava je sljedeći: odabran je standardni set sita s otvorom oka od 2, 4, 8, 16, 32 i 50 mm. Osušeni materijal propušten je kroz sita te je izvagan ostatak na svakom situ (slika 4.17.). Podatci o dimenziji sita i masi ostataka na sitima korišteni su u programu koji ispisuje izvještaj analize granulometrijskoga sastava. Uzorci koherentnih materijala (otkrivke) obrađeni su u Geomehaničkom laboratoriju. Izvještaji laboratorijskih ispitivanja nalaze se u prilogu 3.



Slika 4.17. Određivanje granulometrijskoga sastava nekoherentnih materijala

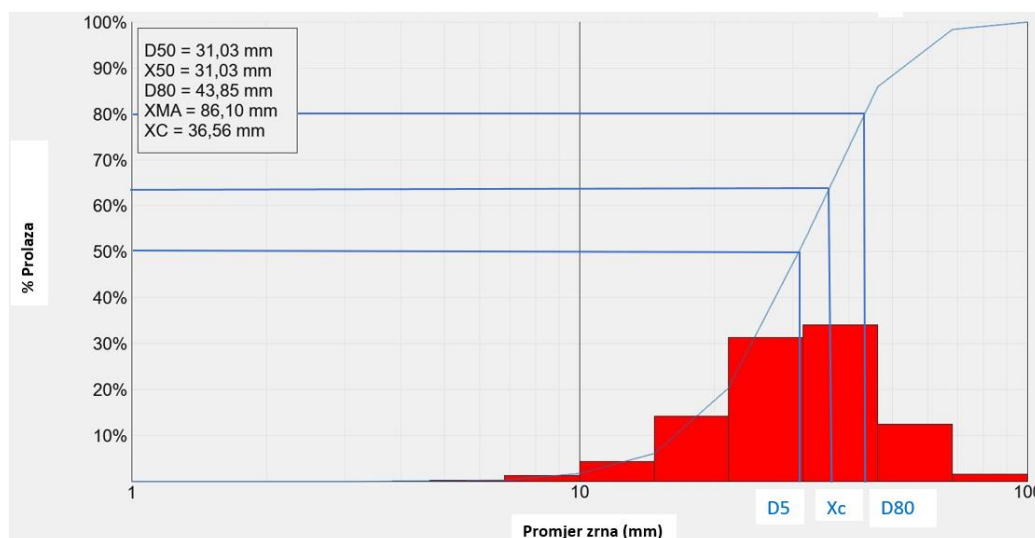
4.5. Određivanje granulometrijskoga sastava pomoću računalnoga programa WipFrag

Krupniji materijali kao što su blokovi i većina odminiranih stijenskih materijala sadrže čestice koje su prevelike za laboratorijsko određivanje granulometrijskoga sastava. Stoga se koristi programski paket za grafičku analizu slika WipFrag koji omogućuje razdiobu fragmenata i prikaza granulometrijskoga sastava. Obrada slike u softveru sastoji se od četiri koraka. Prvi je korak učitavanje slike u softver. Na slici materijala koja je snimljena na terenu potrebno je istaknuti dvije poznate dimenzije kako bi softver mogao ostatak slike prilagoditi prema njima. U sljedećem koraku unose se dimenzije i ucrtavaju na sliku. Nakon toga uključuje se automatsko prepoznavanje zrna koje se može ručno korigirati. Kada su na slici označena sva zrna (slika 4.18.) program automatski izračunava postotni udio pojedinoga raspona zrna te u izvještaju iscrtava dijagram granulometrijskoga sastava.



Slika 4.18. Analiza granulometrijskoga sastava materijala u softveru WipFrag

Na slici 4.19. prikazan je primjer dijagrama granulometrijskoga sastava koji je dio izvještaja dobivenoga pomoću softvera WipFrag. Na horizontalnu os dijagrama nanosi se promjer zrna (D) u logaritamskom mjerilu, dok na vertikalnu kumulativni postotak prolaza zrna (ostatak na situ), odnosno postotak čestica manji od (D). Svi izvještaji odrađenih analiza granulacije u softveru WipFrag nalaze se u prilogu 4. Iz izvještaja su preuzeti podatci D_{50} , D_{80} , X_c i D_{max} za daljnju analizu. D_{50} i D_{80} predstavljaju promjer zrna od kojeg je 50% ili 80% zrna od ukupnoga materijala ispod toga promjera. X_c predstavlja karakteristični promjer zrna koji se naknadno koristi u Rosin-Rammlerovoj (RR) distribuciji a ekvivalentan je veličini $D_{63.2}$, odnosno promjeru zrna od kojeg je 63,2% zrna od ukupnoga materijala ispod toga promjera. D_{max} predstavlja najveći izmjereni promjer zrna.



Slika 4.19. Dijagram granulometrijskoga sastava u softveru WipFrag

U tablici 4.12. prikazani su svi rezultati terenskih i laboratorijskih ispitivanja te analiza svojstava svakoga od materijala u kojemu je izvedeno mjerenje. U prvom lijevom stupcu tablice navedeni su materijali te je uz njih skraćeni naziv kamenoloma na kojemu je bilo izvedeno mjerenje. Na taj način je svaki materijala povezan s lokacijom mjerenja odnosno moguće je razlikovati iste vrste materijala s različitih lokacija. Oznaka ZV predstavlja mjerenja obavljena na kamenolomu „Zvečaj“, GR – „Gradna“, SP - „Špica“ i CE - „Čelina“. Podatci su u ovom obliku korišteni u daljnjoj statističkoj obradi.

Tablica 4.12. Rezultati ispitivanja svojstava materijala

Materijal i lokacija mjerenja	Svojstva materijala								
	D50	D80	D _{max}	X _c	n	b	Nasipna gustoća (t/m ³)	Sadržaj sitnih čestica	Sadržaj vlage (%)
Odminirano ZV	268,14	432,26	656	311,46	1,82	2,26	1,66	0	1,52
Otkrivka ZV	0	0	0	0	0,00	0,00	1,46	95	44,81
Frakcija + glina ZV	13,8	31,2	50	19,2	0,85	1,52	1,38	20	4,74
Otkrivka suho ZV	0	0	0	0	0,00	0,00	1,31	95	13,17
Odminirano GR	16,2	38,2	50	19,8	0,99	1,55	1,79	19	1,39
Odminirano sitno GR	5,4	18,2	50	9,5	0,71	2,18	1,76	29	1,25
Otkrivka SP	1,75	13,5	38	3,6	0,53	2,25	1,78	55	16,20
Frakcija + glina Sp	13,7	31,5	50	19,5	1,00	1,80	1,84	15	2,60
Blokovi SP	558,56	835,46	898	697	2,37	1,56	1,50	0	0,99
Odminirano SP	131,9	267,24	341	179,75	0,98	1,29	1,74	3	1,25
Frakcija SP	15,2	34,8	50	23,5	0,97	1,60	1,76	10	1,73
Odminirano CE	90,59	157,57	323	112,85	1,49	2,63	1,80	0	1,99
Blokovi CE	406,68	564,24	675	466	3,04	2,14	1,50	0	0,99

Vrijednosti D_{50} , D_{80} , D_{max} i X_c , očitane su s krivulje granulometrijskoga sastava materijala dobivene laboratorijskim mjerenjima i softverskom obradom fotografija. Ti podatci se naknadno koriste kako bi se proračunao Rosin-Rammlerov (RR) koeficijent uniformnosti (n) i Swebrecov parametar valovitosti krivulje (b). Koeficijent uniformnosti (n) proračunat prema RR distribuciji (izraz 4.2) pomoću Microsoft Excel programske podrške (tablica 4.12.).

$$y_{RR} = 1 - e^{\left(\frac{-x}{X_c}\right)^n} \quad (4.2)$$

Gdje je: y_{RR} – Rosin-Rammlerova distribucija,

X_c - karakteristični promjer zrna [mm],

x – otvor sita [mm],

n - koeficijent uniformnosti [-].

U tablici 4.13. prikazani su podaci pomoću kojih je određen parametar n . Na slici 4.20. prikazan je graf distribucije. Vrijednosti x i y iz tablice prikazuju ostatak na situ i promjer zrna (d) određenih u okviru laboratorijskih ispitivanja granulometrijskoga sastava ili grafičkoga određivanja u softveru WipFrag. y_{RR} je proračunat pomoću izraza 4.2 koristeći vrijednosti x , X_c te n koji je na početku pretpostavljen kao vrijednost 1. Pomoću alata za analizu podataka „solver“ na temelju vrijednosti Sum_{ost}^2 koja je proračunata s izrazom 4.3. dobivena je optimalna vrijednost n . Optimizacijom vrijednosti n dolazi se do optimalnoga preklapanja RR krivulje i izmjerenih podataka.

$$Sum_{ost}^2 = \sum (y - y_{RR})^2 \quad (4.3)$$

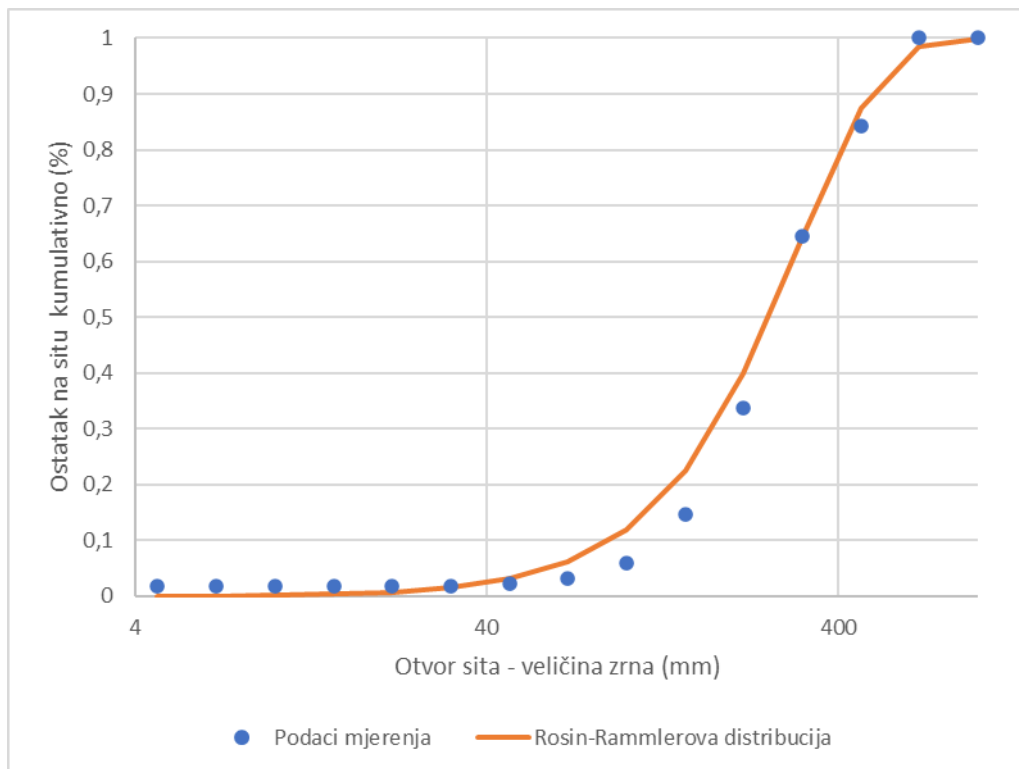
Gdje je: Sum_{ost}^2 – suma kvadrata razlike,

y_{RR} – Rosin-Rammlerova distribucija,

y – Izmjereni kumulativni postotak veličine zrna [mm].

Tablica 4.13. Proračun koeficijenta (n)

Podaci mjerenja		Rosin-Rammlerova distribucija		
X	Y	$Y_{RR}=(1-\exp(-((x/X_c)^n))$	Ostatak	Ostatak^2
1000	1	0,999770289	0,00023	5,27671E-08
681	1	0,984453721	0,015546	0,000241687
464	0,8421	0,873975636	-0,03188	0,001016056
316	0,6458	0,642797753	0,003002	9,01349E-06
215	0,3381	0,399958656	-0,06186	0,003826493
147	0,1476	0,225608845	-0,07801	0,00608538
100	0,0584	0,119104783	-0,0607	0,003685071
68,1	0,031	0,061078771	-0,03008	0,000904732
46,4	0,0221	0,030863773	-0,00876	7,68037E-05
31,6	0,0192	0,015460642	0,003739	1,39828E-05
21,5	0,0185	0,007700811	0,010799	0,000116622
14,7	0,0183	0,003862367	0,014438	0,000208445
10	0,0182	0,001917606	0,016282	0,000265116
6,81	0,0182	0,000953447	0,017247	0,000297444
4,64	0,0182	0,00047439	0,017726	0,000314197
Xc	n			Sum-ost^2
311	1,82			0,017061097



Slika 4.20. Grafički prikaz podataka mjerenja i RR distribucije

Vrijednosti x_{max} i x_{50} ekvivalentne su vrijednostima D_{max} i D_{50} dobivenim očitanjem. Parametar b proračunat je prema izrazu 4.4 koji je predložio Ouchterlony 2005. Sadržaj sitnih čestica očitao je na granulometrijskoj krivulji, a predstavlja postotak materijala s veličinom čestica ispod 2 mm.

$$b = (\ln(2) * \ln\left(\frac{x_{max}}{x_{50}}\right) * n \quad (4.4)$$

Gdje je: b - Swebrecov parametar valovitosti krivulje [-],

X_{50} – srednja veličina zrna [mm],

X_{max} – najveća veličina zrna [mm].

5. OBRADA PODATAKA

Nakon obavljenih terenskih mjerenja u realnim uvjetima prikupljeno je ukupno više od 100 tisuća podataka za svaku mjerenu veličinu pomaka i tlakova na cilindrima. Obrada tolikoga broja podataka zahtijeva primjenu računalne podrške. Individualno kreiranje programa korištenjem nekoga od dostupnih programskih jezika omogućava veću fleksibilnost prilikom obrade podataka. Kao najprihvatljivije rješenje odabran je programski jezik Python s integriranim razvojnim okruženjem IDLE (Integrated Development and Learning Environment).

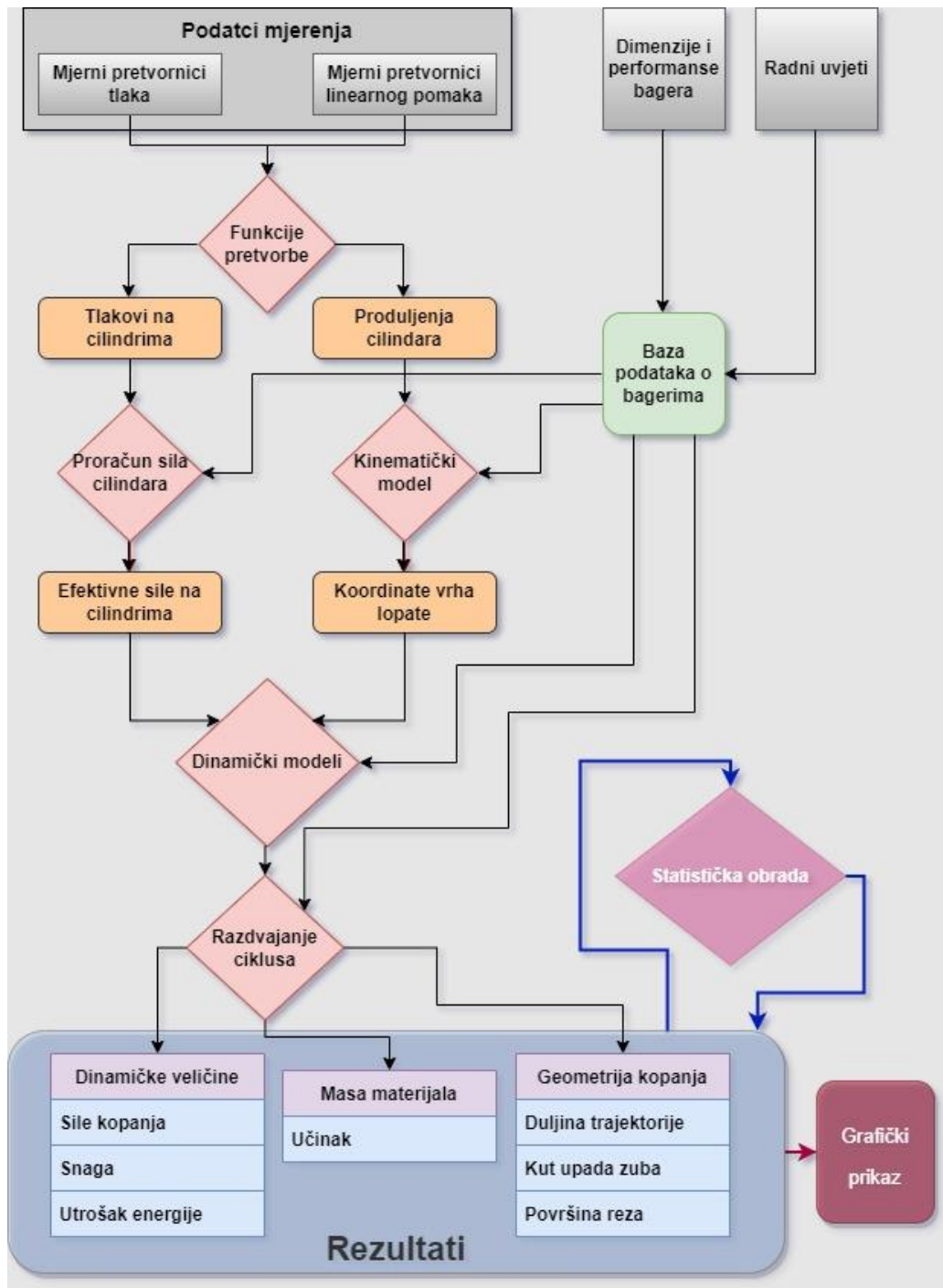
U nastavku je opisan programski jezik Python te programska skripta pomoću koje su obrađeni podatci. Osnovni sadržaj programske skripte kao i detaljne metode proračuna pojedinih rezultata prikazani su grafički pomoću blok dijagrama. Za svaku skupinu rezultata odabran je jedan dio te prikazan na grafu.

5.1. Programski jezik Python

Python je programski jezik razvijen u kasnim 1980-im godinama kao nasljednik ABC programskog jezika. Osmislio ga je Guido van Rossum u CWI-u (Centrum Wiskunde & Informatica) u Nizozemskoj. Python je u razvijen kao skriptni jezik, a u početku nije našao veliku primjenu u inženjerstvu, no posljednjih godina se to promijenilo. Danas Python nalazi vrlo veliku primjenu u gotovo svim područjima, pa tako i u razvoju inženjerskih aplikacija i rješavanja problema obrade podataka. Prednost Pythona je u tome što nije preveden u strojni kôd nego se pokreće pomoću tumača koji omogućuje brzo testiranje i otklanjanje pogreške. Besplatan je, jednostavan za učenje, te posjeduje velik broj napisanih primjera koji olakšavaju primjenu (Kiusalaas, 2010).

5.2. Programska skripta

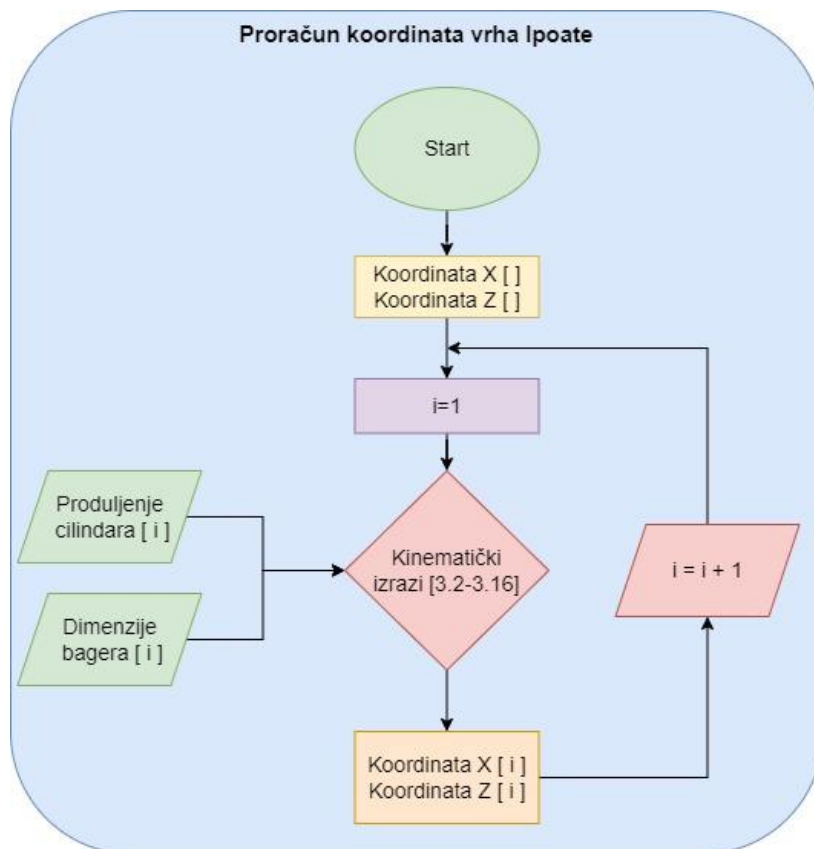
Programska skripta za obradu i prikaz podataka razvijena je u okviru prethodnih istraživanja te je u svrhu izrade ove disertacije dopunjena specifičnim analitičkim i statističkim proračunima. Na blok dijagramu (slika 5.1.) grafički su prikazane osnovne operacije koje se izvode u programu. Ulazne veličine jesu podatci mjerenja, dimenzije i performanse stroja te utjecajni radni uvjeti. Prilikom pokretanja programa prvo su učitani podatci mjerenja s mjernog sustava u obliku izlaznih vrijednosti s mjernih pretvornika koje je potrebno pretvoriti u mjerne jedinice. Operacija pretvorbe izvodi se pomoću funkcija dobivenih na temelju tehničkih podataka o mjernim pretvornicima i laboratorijskoga umjeravanja (poglavlje 4.1.4.). Pomoću dobivenih tlakova na cilindrima katarke i lopate te podataka o dimenzijama cilindara računaju se efektivne sile na cilindrima. Dimenzije i performanse stroja te utjecajni radni uvjeti pohranjeni su u zasebnoj datoteci nazvanoj „Baza podataka o bagerima“. Program koristi podatke iz baze u svim daljnjim proračunima. Podatci o produljenju cilindara te detaljne dimenzije bagera omogućuju proračun koordinata vrha lopate na temelju poznavanja kinematičkoga modela bagera koji je detaljno opisan u poglavlju 3.2. Kinematika. Daljnjim proračunima na temelju dinamičkoga modela bagera dobiveni su rezultati dinamičkih radnih veličina, masa materijala u lopati i geometrijske veličine kopanja te učinka kopanja. Program omogućuje razdvajanje rezultata na pojedine cikluse, jednostavnu statističku obradu te prikazivanje podataka na grafovima.



Slika 5.1. Blok dijagram prikaz programa za obradu podataka

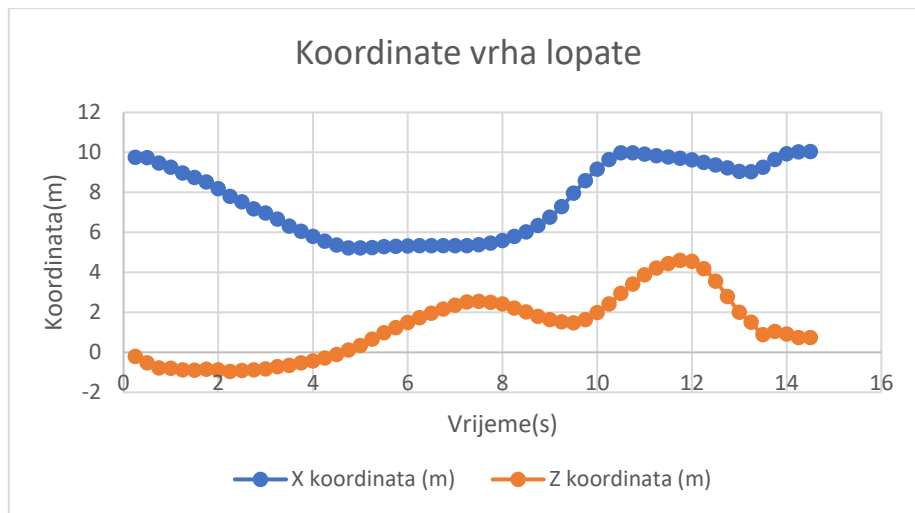
5.3. Koordinate vrha lopate

Proračun koordinata vrha lopate izveden je pomoću kinematičkih izraza za bager (3.2 -3.16) koji su navedeni i objašnjeni u poglavlju 3.2. Kinematika. Blok dijagram proračuna prikazan je na slici 5.2. Ulazne vrijednosti u proračunu su izmjerena produljenja cilindara te dimenzije bagera. Kao rezultat dobivene su X i Z koordinate vrha lopate u svakoj od mjerenih točaka.



Slika 5.2. Blok dijagram proračuna koordinata vrha lopate

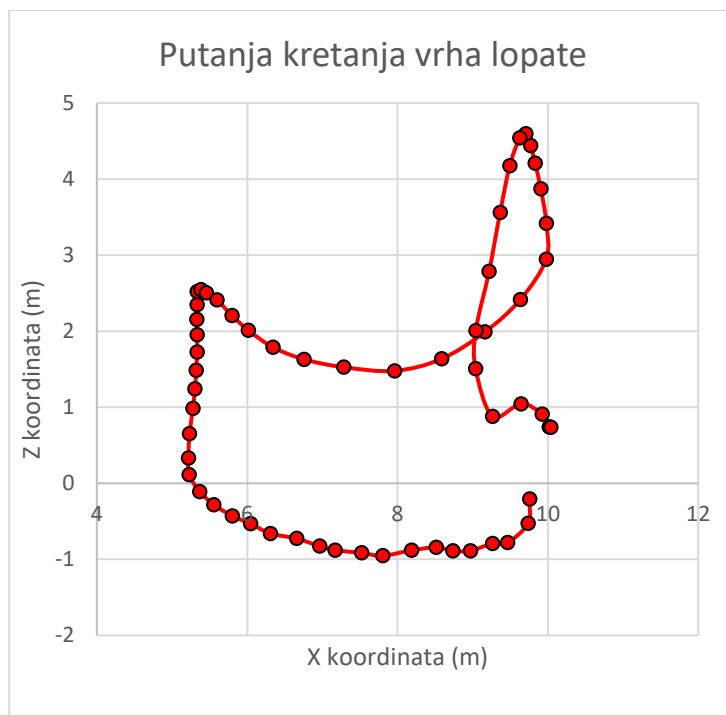
Zamišljena X os koordinatnoga sustava nalazi se na ravnini koja predstavlja podnožje gusjenica bagera i paralelna je s pružanjem katarke ruke i lopate bagera. Zamišljena Z os nalazi se u osi rotacije kupole bagera. Ishodište koordinatnoga sustava nalazi se u sjecištu X i Z osi. Koordinatni sustav prikazan je na slici 3.4. X koordinata povećava se udaljavanjem vrha lopate od samoga stroja dok se Z povećava podizanjem od poda. Na grafu (slika 5.3.) prikazano je kretanje koordinata vrha lopate tijekom jednog ciklusa. Prikazani ciklus predstavlja reprezentativni primjer odabran iz rezultata mjerenja na kamenolomu „Zvečaj“ u odminiranom stijenskom materijalu.



Slika 5.3. Koordinate vrha lopate

5.3.1. Putanja kretanja lopate

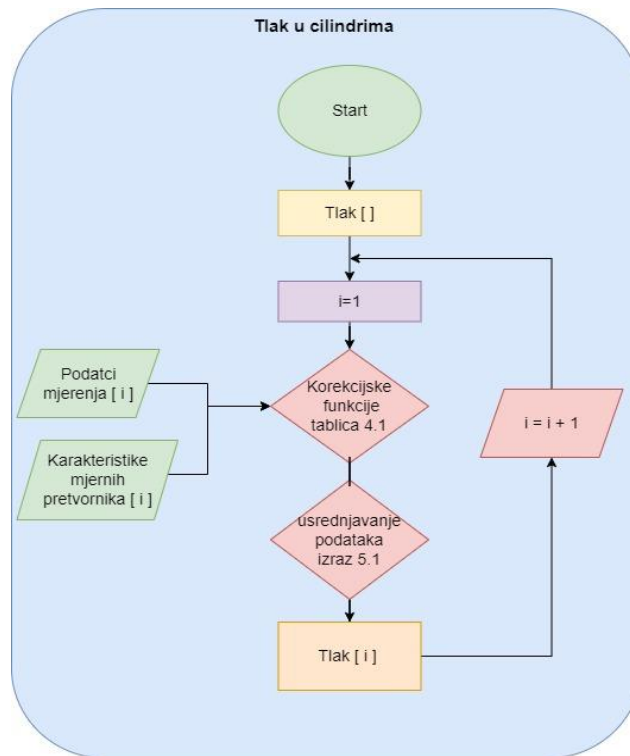
Putanja kretanja lopate, kao što je opisano u poglavlju 3.2.1., dobivena je smještanjem X i Z koordinata vrha lopate u koordinatni sustav za svaki interval mjerenja. Za promatranje izoliranoga procesa kopanja materijala, kao što je slučaj u ovom radu, dovoljno je poznavanje dvije dimenzije trajektorije. Prilikom samoga kopanja materijala u normalnom ciklusu ne dolazi do zakretanja kupole bagera te je uzimanje u obzir treće dimenzije (Y) nepotrebno. Na slici 5.4. prikazana je dobivena putanja kretanja vrha lopate u koordinatnom sustavu s X i Z -osi za isti ciklus kao na slici 5.3. Na njoj se vrlo jasno mogu razlučiti dijelovi ciklusa rada bagera (kopanje, podizanje, zakretanje i istresanje). Tijekom kopanja putanja kretanja lopate tvori oblik hiperbole te se nalazi u najnižem položaju s obzirom na ostale dijelove ciklusa. Podizanje pune lopate započinje nakon kopanja materijala, a trajektorija u tom dijelu ciklusa izgleda kao relativno ravna vertikalna linija. Tijekom podizanja lopate započinje i zakretanje kupole bagera prema mjestu istresanja. Zakretanje se na dvodimenzijskoj putanji ne vidi jasno no znamo da završava prilikom istresanja materijala što je vidljivo na putanji u trenutku kad je Z koordinata u najvišem položaju. Nakon istresanja slijedi ponovno zakretanje i spuštanje lopate do mjesta sljedećeg kopanja.



Slika 5.4. Putanja kretanja vrha lopate

5.4. Tlak hidrauličnoga ulja u cilindrima

Na slici 5.5. prikazana je shema proračuna tlaka hidrauličkoga ulja u cilindrima. Nakon pretvorbe izlaznih podataka mjernih pretvornika utvrđene su određene fluktuacije tlaka. Pretpostavlja se da je uzrok fluktuacija tlaka u hidrauličkom sustavu bagera. Prije daljnje obrade podataka izvedeno usrednjavanje dobivenih vrijednosti prema izrazu 5.1 koji vrijedi samo za neparnu vrijednost x .



Slika 5.5. Blok dijagram proračuna tlaka u cilindrima

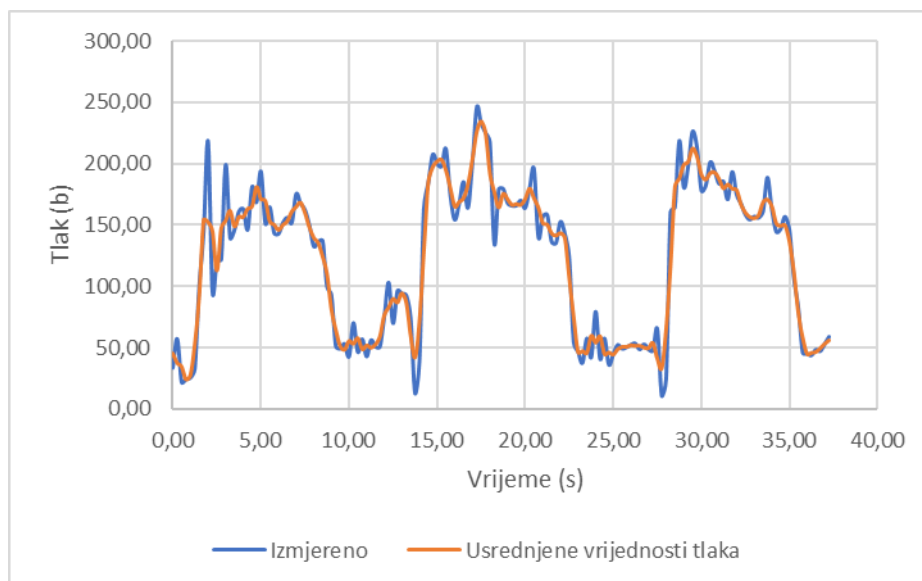
$$Pu_i = \frac{SUM(P_{i-\frac{x-1}{2}}; P_{i+\frac{x-1}{2}})}{x} \quad (5.1)$$

Gdje je Pu_i – usrednjena vrijednost tlaka [Pa],

P_i - vrijednost prije usrednjavanja [Pa],

x - broj podataka koji se usrednjuje [-].

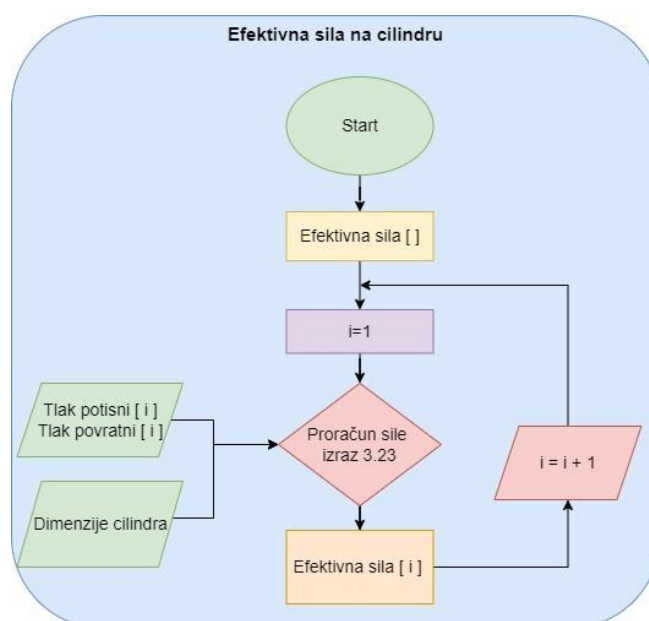
Na slici 5.5. prikazan je graf s podacima tlaka prije i nakon usrednjavanja. Podatci tlaka prikazani na grafu izmjereni su u sklopu probnoga terenskog mjerenja na kamenolomu Sv. Juraj – Sv. Kajo. U ovom slučaju najoptimalniji broj podataka za usrednjavanje pokazao se ($x=3$). Ako je x veći od tri pokazalo se da usrednjeni podatci previše odstupaju od izmjerenih vrijednosti. -



Slika 5.6. Usrednjavanje podataka tlaka

5.4.1. Efektivna sila na cilindrima

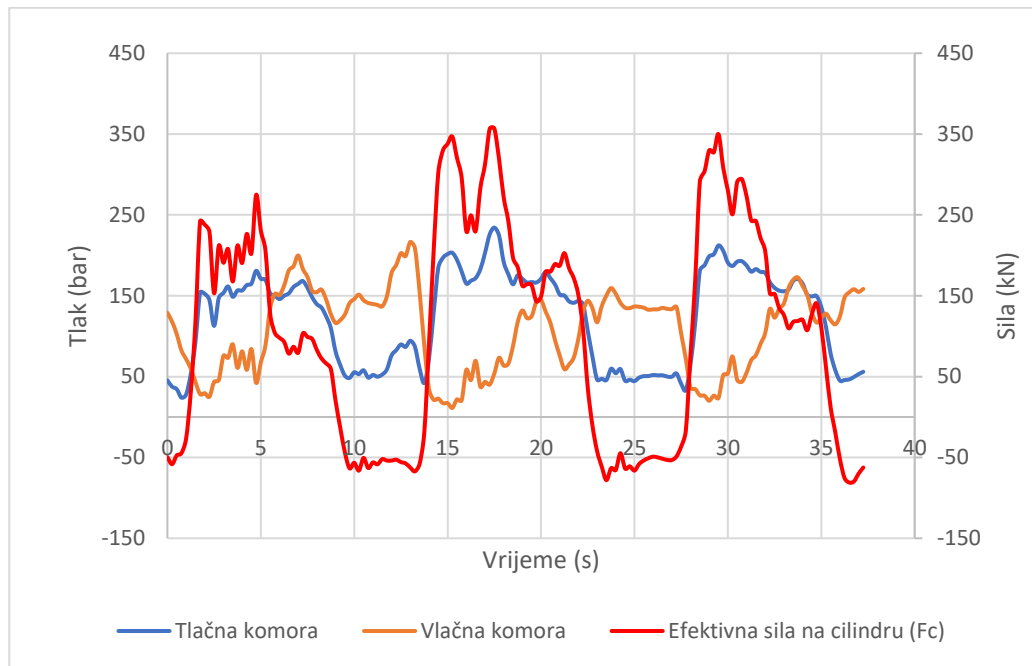
Efektivna sila na cilindrima (F_c) objašnjena je u poglavlju 3.3.2. Sile kopanja. Proračun efektivne sile izvodi se pomoću izraza 3.17 a predstavlja razliku između tlačne i vlačne sile cilindra u određenom trenutku. Blok dijagram proračuna efektivne sile na cilindru prikazan je na slici 5.7.



Slika 5.7. Proračun efektivne sile na cilindrima

Rezultat efektivne sile cilindra lopate prikazan je na slici 5.8. Graf prikazuje tlakove u tlačnoj i vlačnoj komori cilindra izmjerene na kamenolomu „Zvečaj“ prilikom mjerenja u otkrivci, te

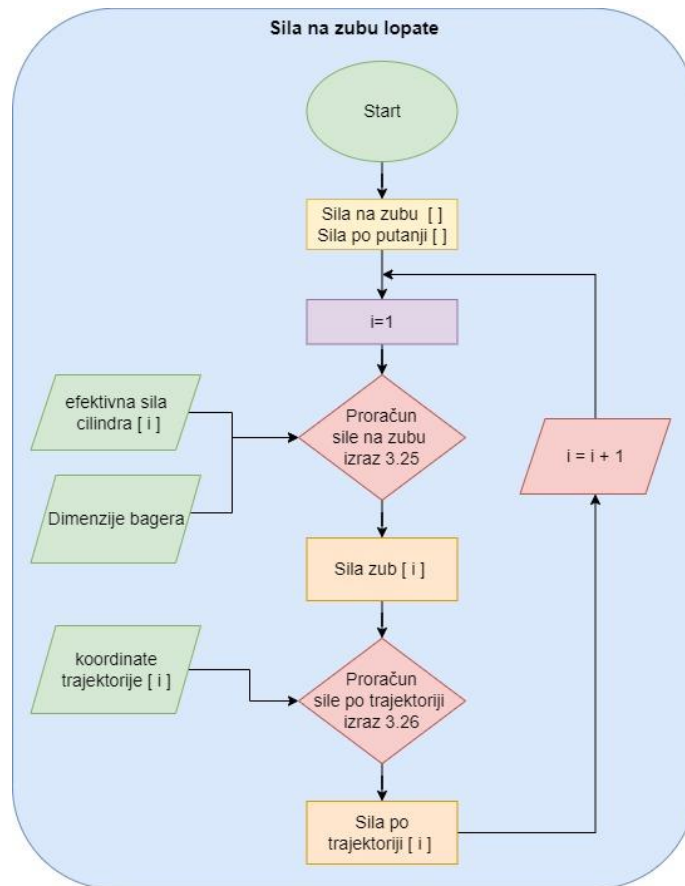
proračunatu efektivnu silu cilindra kroz tri izdvojena radna ciklusa. Tlak ni u jednoj komori nikad ne pada ispod 10 bara. Na taj se način postiže brz i siguran rad hidrauličnoga sustava no ukoliko želimo odrediti efektivnu silu cilindra potrebno je oduzeti iznos vučne sile od tlačne sile cilindra. Zbog same konstrukcije cilindra površina na koju djeluje tlak hidrauličnoga ulja u vlačnoj komori manja je od površine na koju djeluje tlak ulja u tlačnoj komori te razlika tlakova nije ekvivalentna iznosu sile što se može također primijetiti na grafu.



Slika 5.8. Efektivna sila na cilindru lopate

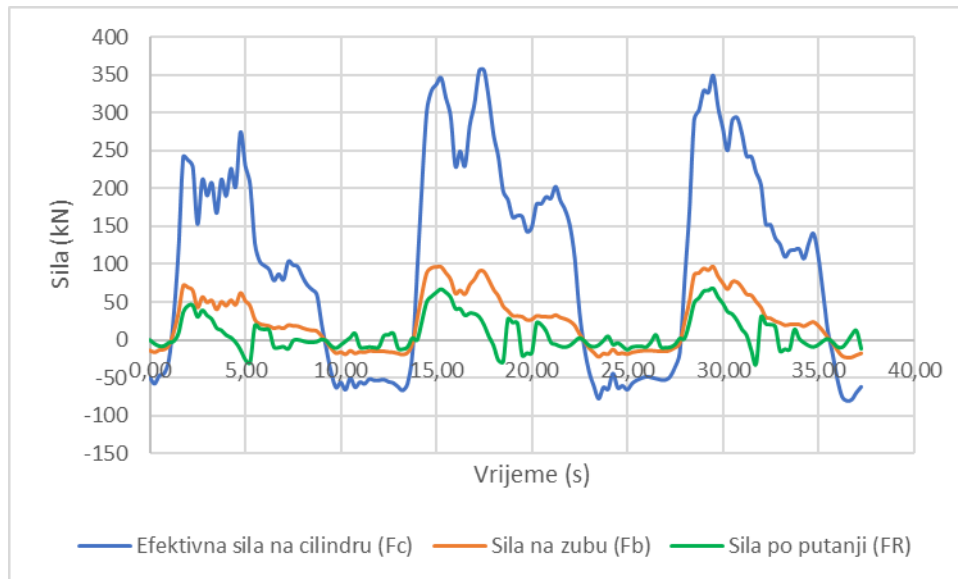
5.4.2. Sile na zubu lopate

Sile na zubu lopate objašnjene su u poglavlju 3.3.2. Na slici 5.9. grafički je prikazana metoda proračuna sile koje se javljaju na vrhu lopate. Sila na zubu lopate (F_b) računa se pomoću izraza 3.25, a predstavlja silu kojom zub lopate djeluje na materijal okomito na os lopate (slika 3.6.) Ta se sila preko momenta na zglobovima manifestira na cilindar te ovisi o dimenzijama lopate i donjega dijela ruke bagera. Sila po putanji (F_R) jest sila kojom zub lopate djeluje na materijal tangencijalno na putanju kretanja (izraz 3.26). Ta sila ovisi o kutu između tangente na putanju i pravca djelovanja sile zuba lopate (λ).



Slika 5.9. Proračun sile na zubu lopate

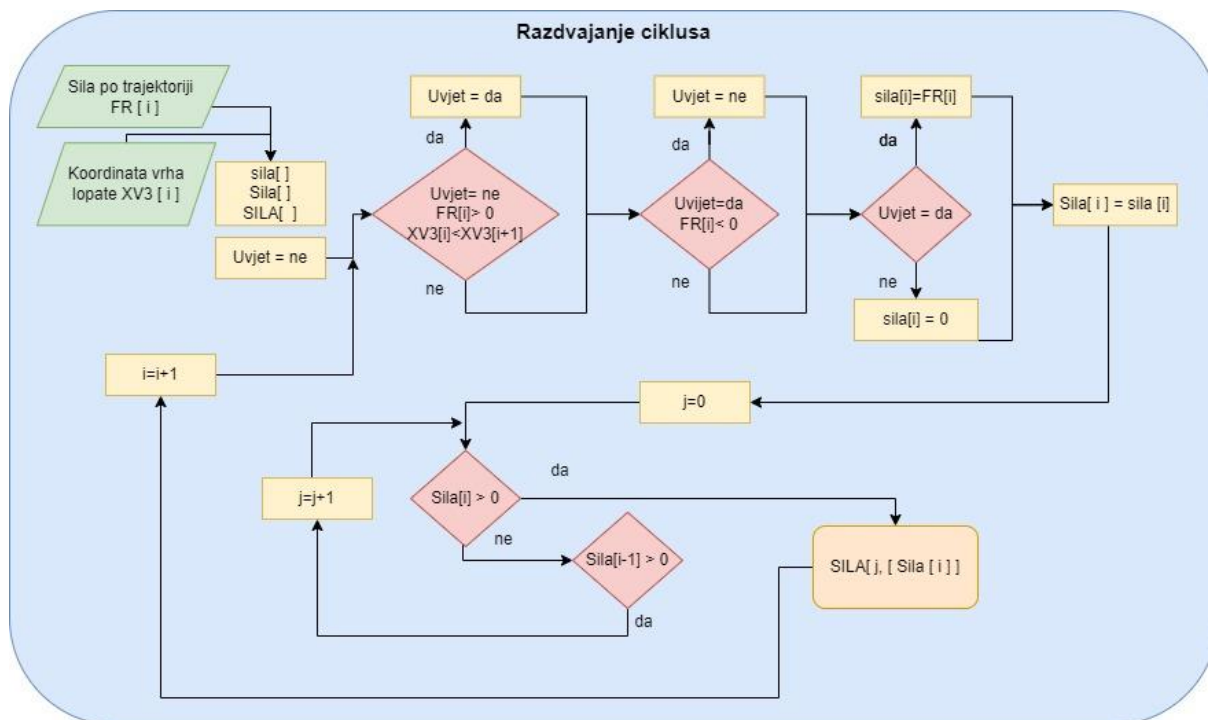
Na slici 5.10. prikazani su rezultati sile na zubu lopate proračunatih za ista tri ciklusa koja su prikazana na prethodnoj slici 5.8. Na grafu je vidljivo da je intenzitet sile na zubu (F_b) znatno manji od efektivne sile na cilindru (F_c). Uzrok tome je krak sile F_c koji je znatno kraći od duljine lopate koja predstavlja krak sile F_b dok je u zglobu lopate moment sile jednak (slika 3.6.). Sila po putanji (F_R) dodatno se smanjuje ovisno o kutu λ . Ukoliko se lopata kreće prema bageru odnosno u smjeru u kojem lopata grabi materijal, sila F_R je pozitivna jer je i kut λ pozitivan. Prilikom kretanja lopate u suprotnom smjeru sila F_R je negativna zbog toga što je kut λ negativan.



Slika 5.10. Sile na zubu lopate

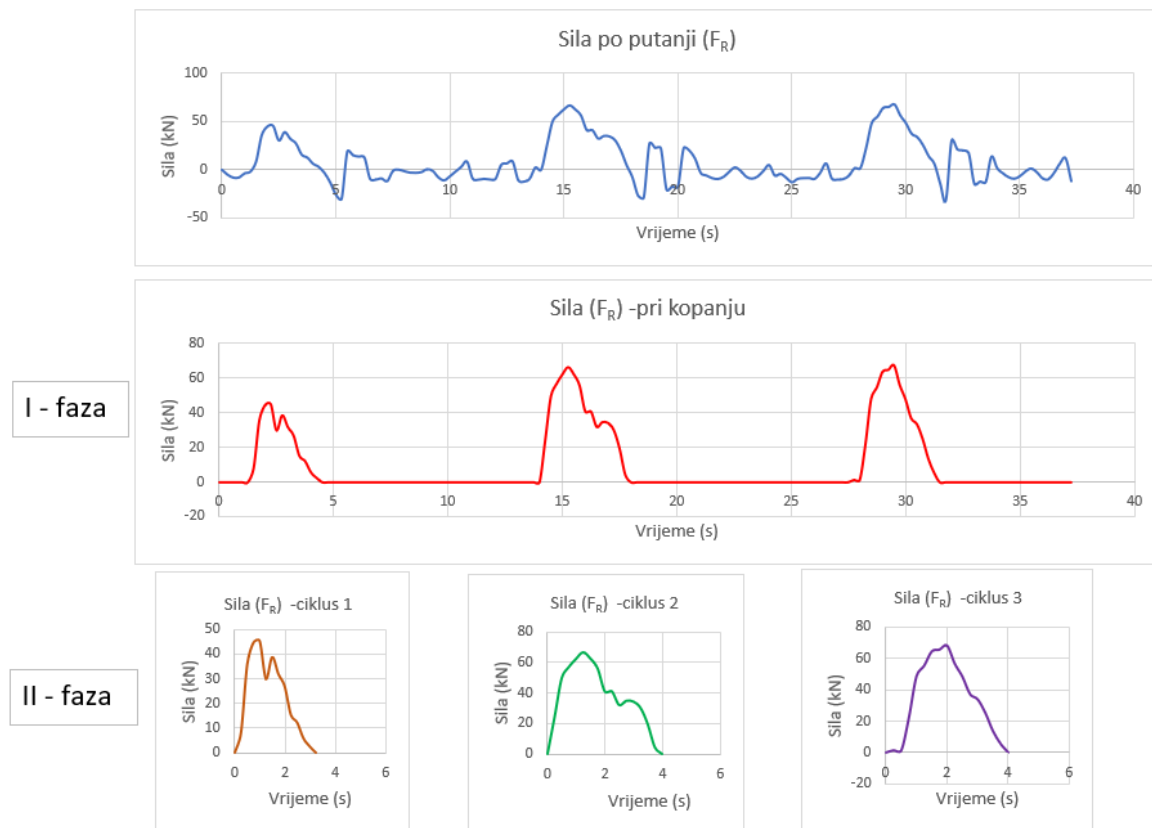
5.5. Razdvajanje ciklusa i proračun dinamičkih radnih veličina

Za daljnju analizu potrebno je razdvojiti podatke svakoga ciklusa. Ciklus rada bagera detaljno je objašnjen u poglavlju 3.3.1. Potrebno je izdvojiti dio ciklusa u kojem postoji interakcija radnoga alata s materijalom kako bi se dinamičke radne veličine i geometrijske veličine kopanja mogle usporediti s karakteristikama materijala. Taj dio ciklusa nazivamo *kopanje*, a izdvojeno je pomoću podataka o sili po trajektoriji (F_R) te smjeru kretanja vrha lopate s obzirom na horizontalnu os. Algoritam koji je u programu zadužen za razdvajanje ovoga dijela ciklusa shematski je prikazan na blok dijagramu na slici 5.11.



Slika 5.11. Postupak razdvajanja ciklusa

Ulazne veličine su sila po trajektoriji (F_R) i x koordinate vrha lopate (XV_3). U prvoj fazi pomoću petlje provjerava se uvjet da je sila veća od nule te da se vrh lopate kreće prema stroju. Ukoliko je taj uvjet zadovoljen algoritam upisuje vrijednost sile u novu liniju sve dok nije postignut uvjet da je sila manja od nule, tada algoritam u polje upisuje nulu umjesto vrijednosti sile. U drugoj fazi pomoću algoritma izdvajaju se vrijednosti veće od nule u zasebne linije unutar novoga polja. Grafički prikaz razdvajanja ciklusa po fazama prikazan je na slici 5.12. gdje su prikazani podatci sila po putanji proračunatih na temelju mjerenja na kamenolomu „Zvečaj“ pri radu bagera u otkrivci.



Slika 5.12. Razdvajanje ciklusa po fazama

5.5.1. Sila kopanja

Sile kopanja za sva mjerenja izračunate su i razdvojene po ciklusima prema prethodno objašnjenim metodama. Za daljnju analizu sila kopanja u vidu usporedbe različitih lokacija i materijala, najpogodnije ih je prikazati pomoću srednje vrijednosti. Tako su izračunate srednje vrijednosti sila kopanja u mjernom intervalu za svaki ciklus pomoću izraza 5.2, te srednja vrijednost za svako pojedino mjerenje na temelju iznosa srednjih vrijednosti svakoga ciklusa u tom mjerenju također koristeći izraz 5.2.

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5.2)$$

Gdje je:

μ = srednja vrijednost,

x = član skupa,

i = redni broj člana skupa,

n = broj članova skupa.

Rezultati srednjih vrijednosti sila kopanja u svakom materijalu na svim lokacijama prikazani su na slici 5.13. Prikazu je dodana i standardna devijacija rezultata srednjih vrijednosti za svaki pojedini ciklus. Standardna devijacija izračunata je pomoću izraza 5.3.

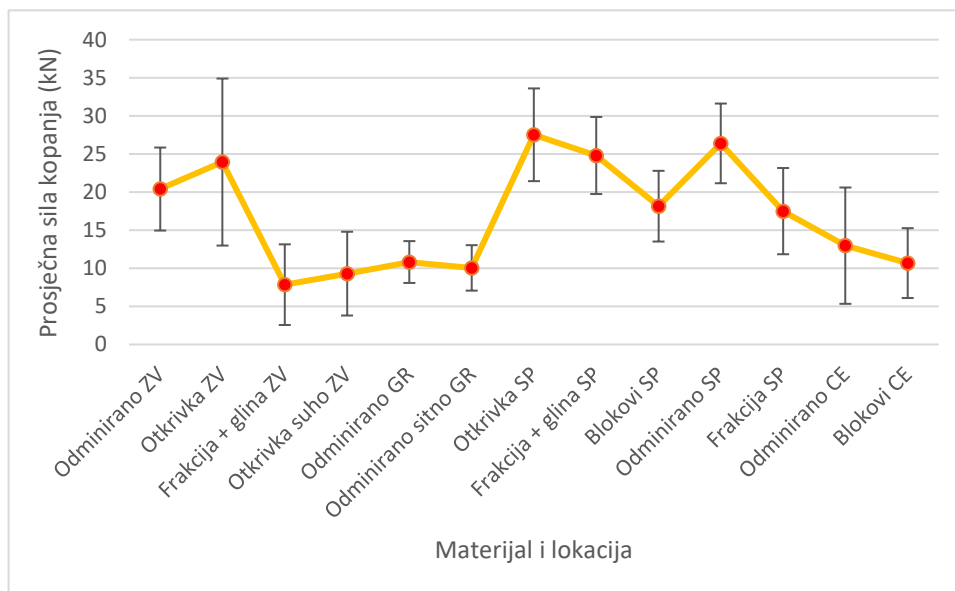
$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n - 1}} \quad (5.3)$$

Gdje je: S_x = standardna devijacija,

n = broj podataka u skupu,

x_i = svaki podatak skupa,

μ = srednja vrijednost skupa.

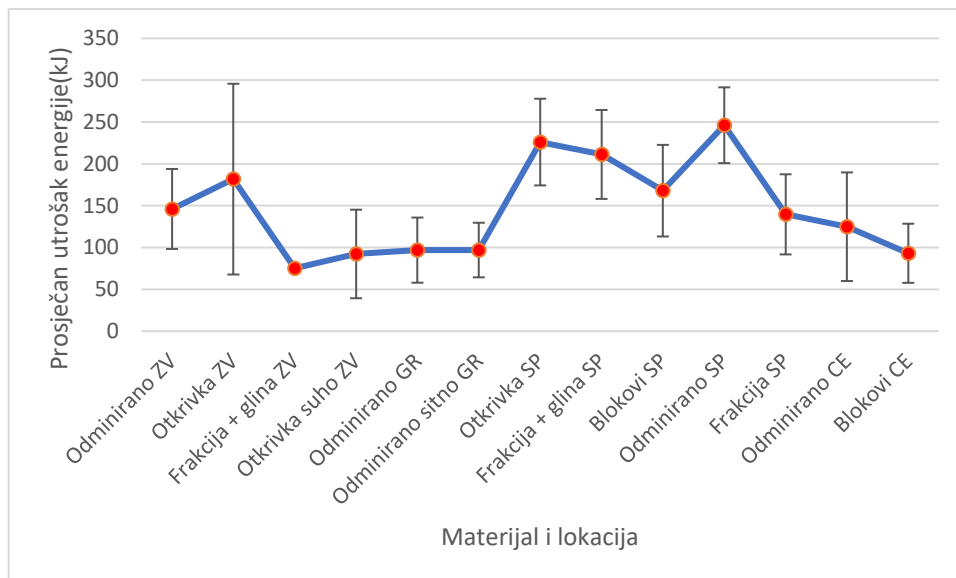


Slika 5.13. Prosječne sile kopanja

Sile kopanja u ovom radu predstavljaju jedan od ključnih rezultata. Na temelju njih proračunate su ostale dinamičke veličine kopanja (snaga i potrošnja energije). Na slici 5.13. vidljivo je da su prosječne sile kopanja u otkrivci i odminiranom stijenskom materijalu u pravilu veće od sila kopanja u frakcijama ili blokovima. To ukazuje na određeni utjecaj značajki materijala na dinamičke radne veličine. Ovaj podatak potreban je kako bi se dokazao dio prve hipoteze koji glasi: dinamičke radne veličine kopanja bagerom specifične su u različitim vrstama stijenskoga materijala.

5.5.2. *Utrošak energije*

Pomoću podataka sila kopanja za svaki pojedini ciklus izračunata je potrošnja energije po ciklusima. Utrošak energije (E_c) računa se prema izrazu 3.30 iz poglavlja 3.3.1. Za razliku od sila kopanja koje su prikazane kao prosječna vrijednost iznosa sile u svakom intervalu mjerenja, utrošak energije prikazuje se kao zbroj utrošaka energije po mjernim intervalima odnosno površina ispod krivulje energije. Tako rezultat utroška energije (E_c) za svaki ciklus daje ukupnu energiju koja je utrošena tijekom kopanja u tom ciklusu. Na slici 5.14. prikazane su prosječne vrijednosti utrošene energije u svakom materijalu s naznačenom standardnom devijacijom vrijednosti utrošenih energija po ciklusima. Standardna devijacija izračunata je pomoću izraza 5.3.

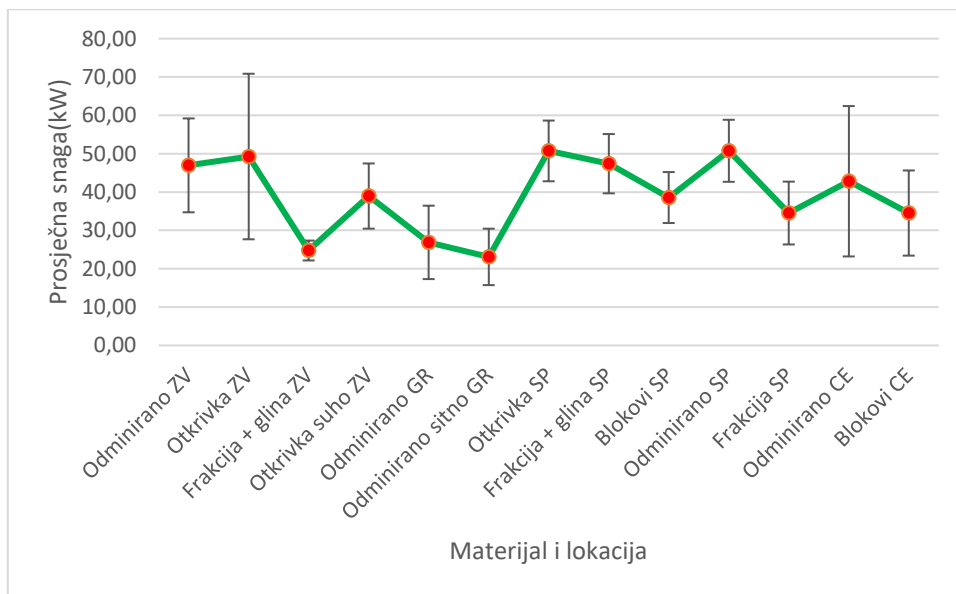


Slika 5.14. *Potrošnja energije*

Utrošak energije u ovom se radu definira kao dinamička radna veličina kopanja. U rezultatima prosječne potrošnje energije prikazanim na slici 5.14. vidljivo je, kao i kod sila kopanja da su vrijednosti za odmirirani stijenski materijal i otkrivku u pravilu veće od vrijednosti za frakciju i blokove. To također ukazuje na određeni utjecaj značajki materijala na potrošnju energije kopanja, što je potrebno dokazati u okviru prve hipoteze.

5.5.3. Snaga

Korištenjem podataka utroška energije izračunata je snaga po mjernim intervalima za svaki ciklus. Izraz 3.31 u poglavlju 3.3.1. prikazuje način proračuna snage. U programu je izdvojena i maksimalna snaga za svaki pojedini ciklus naredbom (*max*) koja iz odabranoga ciklusa izdvaja maksimalni podatak. Rezultati srednje vrijednosti snage u svakom materijalu prikazani su na slici 5.15. uz naznačenu standardnu devijaciju srednjih vrijednosti po ciklusima. Standardna devijacija izračunata je pomoću izraza 5.3.



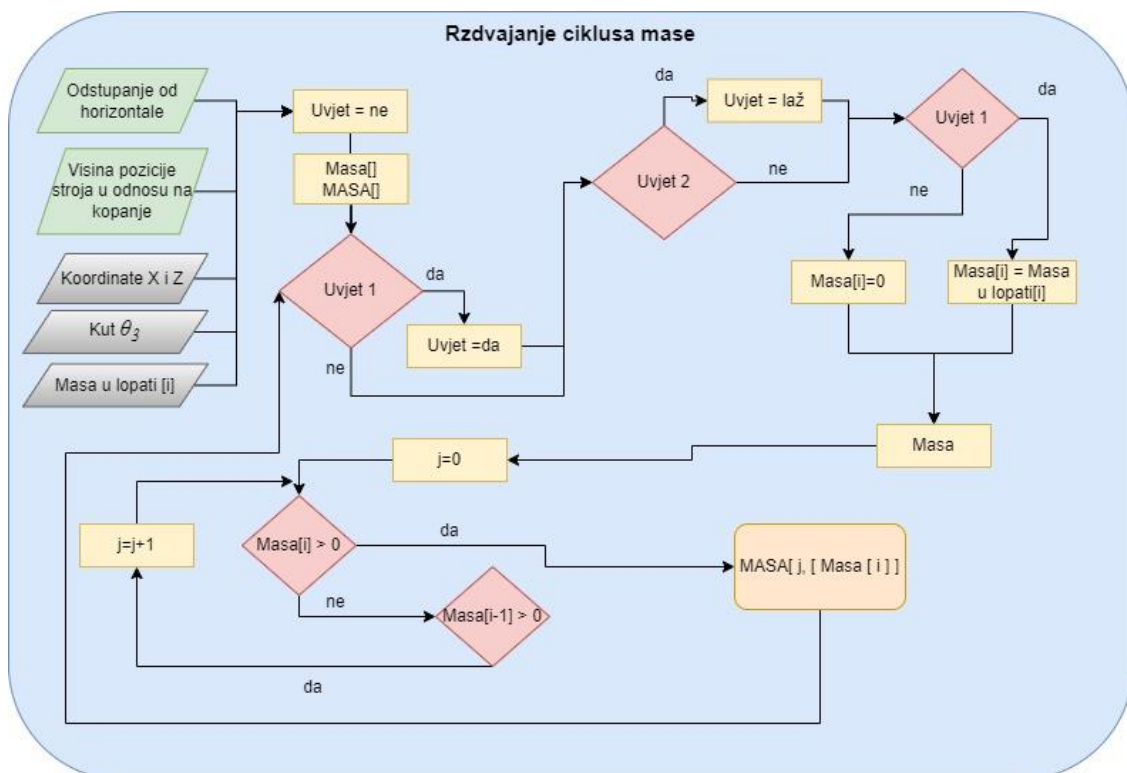
Slika 5.15. Rezultati prosječne snage

Snaga kopanja također je uz sile i potrošnju energije definirana kao dinamička radna veličina za koju je potrebno u okviru prve hipoteze istražiti utjecaj značajki materijala. Na temelju rezultata prikazanih na slici 5.15. vidljivo je da su vrijednosti snage u pravilu veće u otkrivci i odminiranom stijenskom materijalu nego u frakciji i blokovima. Stoga možemo zaključiti da kao i kod sile i potrošnje energije, značajke materijala mogu pokazivati određeni utjecaj i na snagu kopanja.

5.5.4. Masa materijala u lopati

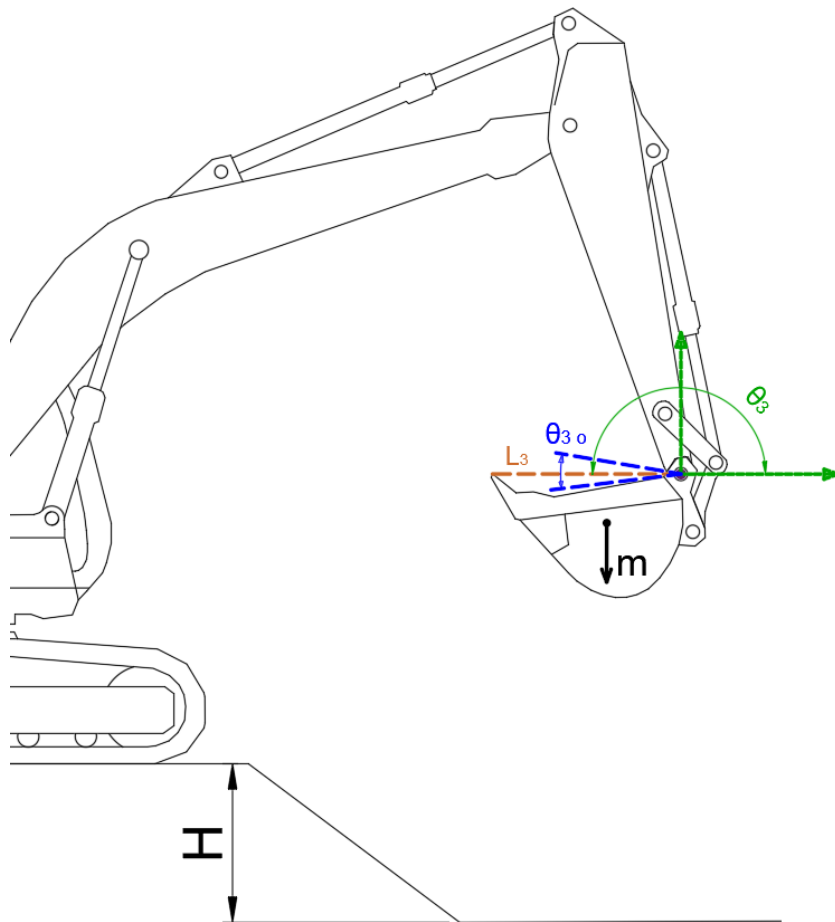
Masa materijala u lopati u programu se računa prema izrazu 3.34 iz poglavlja 3.3.1. Iz baze podataka dimenzija bagera uzima se grafički utvrđena udaljenost od zgloba do težišta lopate (l) te se pomoću momenta sile u zglobu (M_c) računa masa pune lopate (m). Kako bi se dobila masa samoga materijala oduzeta je masa prazne lopate dobivena mjerenjem u praznom ciklusu.

Da bi se izračunala masa pune lopate potrebno je izdvojiti najprikladniji dio ciklusa u kojem je moguće najpouzdanije utvrditi masu. Na slici 5.16. grafički je prikazan postupak izdvajanja odgovarajućega dijela ciklusa i razdvajanje podataka mase za svaki ciklus.



Slika 5.16. Postupak izdvajanja mase materijala u lopati

U ovom postupku koriste se ulazne vrijednosti iz baze podataka o bagerima te prethodno izračunate veličine. Odstupanje od horizontalne ravnine jest kut (θ_{3o}) prikazan na slici 5.17., a govori nam koliko os lopate L_3 maksimalno smije odstupati od horizontalne ravnine kako bi mjerenje mase u lopati bilo prihvatljivo, te ukazuje na to je li lopata „zatvorena“ odnosno nalazi li se u krajnjem sklopljenom položaju ili blizu njega. Kut θ_{3o} procijenjen je na 5 do 15 ° a ovisi o konstrukciji bagera i obliku lopate. Visina stroja u odnosu na ravninu kopanja (H) prikazana je na slici 5.17.



Slika 5.17. Pomoćni parametri za određivanja mase materijala u lopati

Ostale ulazne vrijednosti (koordinate X i Z , kuta θ_3 te mase lopate) prethodno su izračunate u programu. Kut θ_3 izračunat je prema izrazu 3.11, a koordinate X i Z prema formulama 3.15 i 3.16 iz poglavlja 3.2.

Postupak izdvajanja zapisa mase materijala u lopati provodi se na temelju zadovoljavanja uvjeta za početak i kraj izdvajanja. Algoritam pomoću petlje prolazi kroz podatke zapisa, proračunate mase lopate, koordinata X i Z te kuta θ_3 , kada se svi podatci nalaze unutar granica za postizanje UVJETA 1 algoritam započinje bilježiti svaki sljedeći podatak mase u zasebno polje ($Masa[i]$) unutar polja ($MASA[j]$). Prilikom postizanja UVJETA 2 algoritam prestaje bilježiti podatke mase lopate.

UVJET 1 - početak izdvajanja podataka mase u lopati:

- iznos mase materijala u lopati je pozitivan
- kut θ_3 nalazi se unutar granica odstupanja od horizontalne ravnine θ_{3_0}
- kut θ_3 se ne smanjuje se, povećava se ili miruje

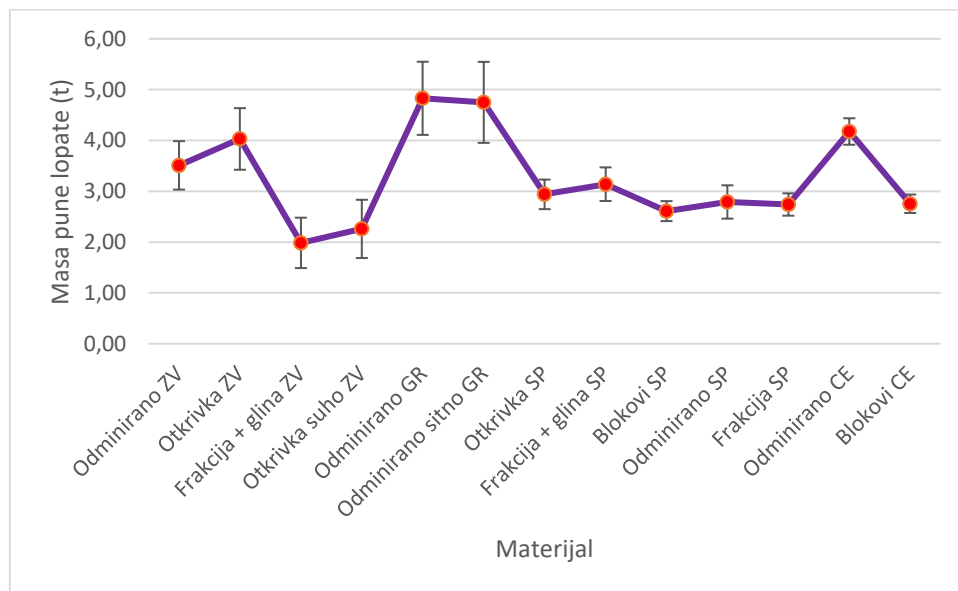
- Z koordinata se ne smanjuje, povećava se ili miruje.

UVJET 2 - predstavlja kraj izdvajanja podataka mase materijala u lopati:

- iznos mase materijala u lopati je pozitivan
- kut θ_3 nalazi se izvan granica odstupanja od horizontalne ravnine θ_{30}
- Z koordinata se i dalje povećava.

Na taj su način izdvojeni podatci mjerenja mase materijala u lopati za svaki ciklus posebno.

Rezultati mjerenja mase prikazani su na slici 5.19. kao srednje vrijednosti svih ciklusa mjerenja na pojedinim lokacijama. Dodana je i standardna devijacija rezultata izračunata pomoću izraza 5.3.

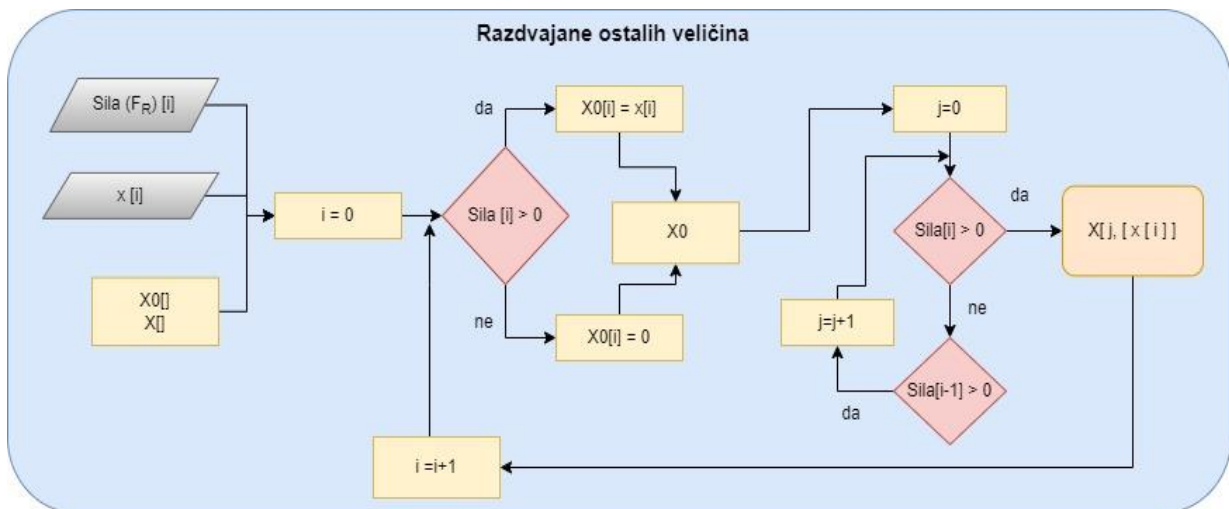


Slika 5.18. Rezultati mase materijala u lopati

Rezultati masa lopate napunjene materijalom u ovom radu služe kao osnovni podatak za proračun mase materijala u lopati te učinka kopanja. Proračuni navedenih veličina objašnjeni su u poglavlju 3. Njihovi rezultati prikazani su u okviru prikaza ulaznih vrijednosti za analize podataka u poglavljima 7. i 8.

5.6. Geometrija kopanja

Veličine geometrije kopanja izračunate su prema standardnim formulama navedenim i objašnjenim u poglavlju 3.2.3. Određene veličine potrebno je razdvojiti u cikluse kopanja prije samoga proračuna, na način da njihova pozicija odgovara razdvojenim ciklusima kopanja dinamičkih veličina (sile, snage i energije). Zbog toga je u programu napisan algoritam koji izdvaja bilo koju veličinu a povezan je s razdvajanjem sile na zubu lopate. Na slici 5.19. grafički je prikazan postupak razdvajanja ostalih veličina uz korištenje razdvojene sile na zubu lopate.

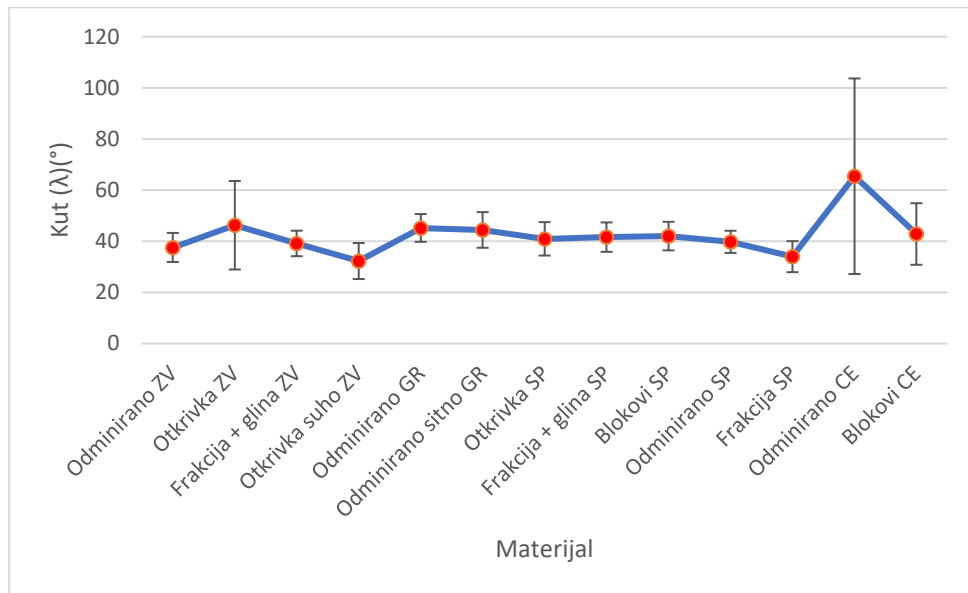


Slika 5.19. Razdvajanje ostalih veličina

Ulazne vrijednosti su sila F_{R0} preuzeta iz algoritma za razdvajanje ciklusa sila gdje je svim vrijednostima koje ne pripadaju kopanju pridružena vrijednost *nula*, te bilo koja druga veličina (x) uz uvjet da imaju isti broj podataka u skupu. Algoritam razdvaja podatke na temelju provjere vrijednosti sile F_R . Ako je sila F_R veća od nule novoj liniji ($X0[i]$) pridružuje se vrijednost ($x[i]$). Naknadno se linija razdvaja te se u polje ($X[j]$) pridružuju zasebne linije podataka za svaki ciklus kao i u razdvajanju sila (slika 5.12.). Navedeni algoritam korišten je za razdvajanje podataka svih niže navedenih radnih veličina.

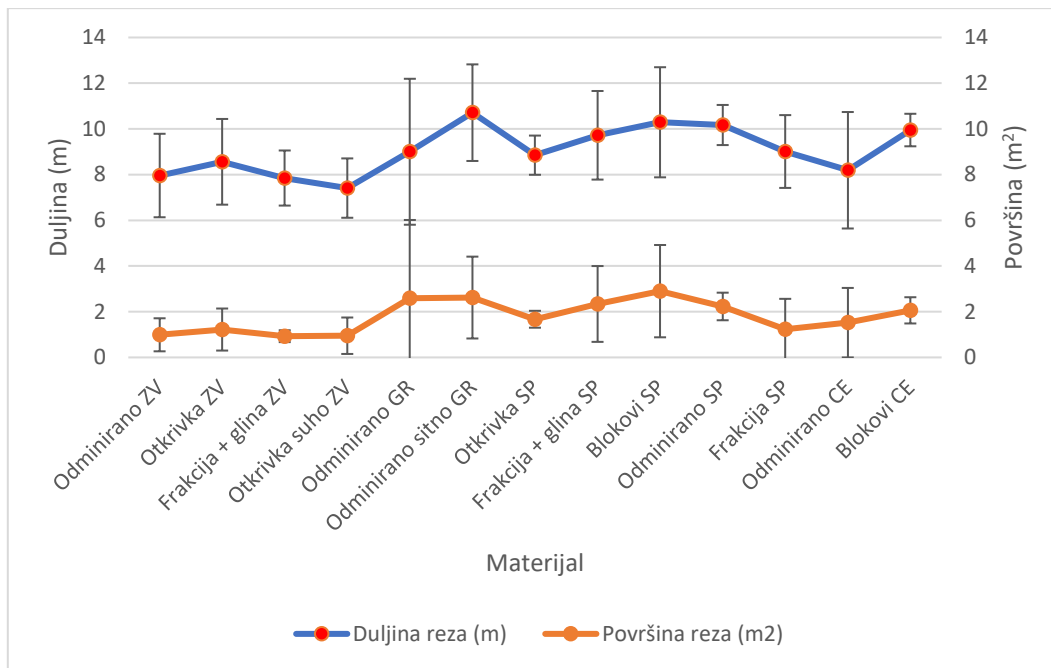
Razlika kuta upada zuba i tangente na trajektoriju kretanja lopate (λ) objašnjena je u poglavlju 3.3.1., izračunata je prema izrazu 3.27. Kut λ predstavlja geometrijsku veličinu kopanja za koju je u okviru dokazivanja prve hipoteze provjerena ovisnost o svojstvima stijena te radnim veličinama. Rezultati kuta λ su prikazani na slici 5.20. s naznačenom standardnom devijacijom dobivenih rezultata svakoga mjerenja.

Na grafu je vidljivo da rezultati kuta λ pokazuju relativno slične vrijednosti u različitim materijalima uz jednu veću iznimku. Iznimka je zabilježena prilikom mjerenja u odminiranom stijenskom materijalu na kamenolomu „Čelina“. Detaljno objašnjenje ponašanja kuta λ bit će prikazano naknadno u poglavlju 7.



Slika 5.20. Rezultati kuta λ

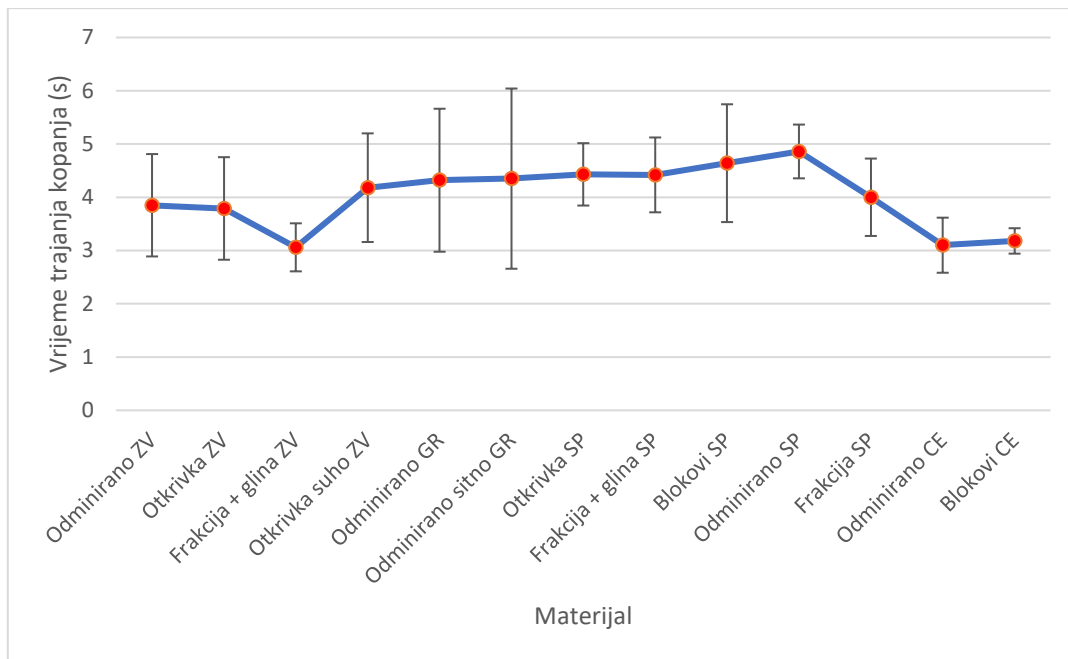
Duljina i površina reza objašnjene su u poglavlju 3.2.3. U programu su navedene veličine geometrije kopanja proračunate prema izrazima 3.19 i 3.21. Srednje vrijednosti ovih veličina s istaknutom standardnom devijacijom prikazane su na slici 5.21.



Slika 5.21. Rezultati duljine i površine reza

Duljina i površina reza uz kut λ u ovom radu predstavljaju geometrijske veličine pomoću kojih se može promatrati optimalna trajektorija kopanja. Na slici 5.21. vidljivo je da duljine i površine reza imaju vrlo sličan trend kretanja u različitim materijalima. Značajnije pravilo pojavljivanja u pojedinim vrstama materijala nije vidljivo iz ovih rezultata stoga će u nastavku biti prikazana provedba dodatnih analiza u vidu korelacija i regresija.

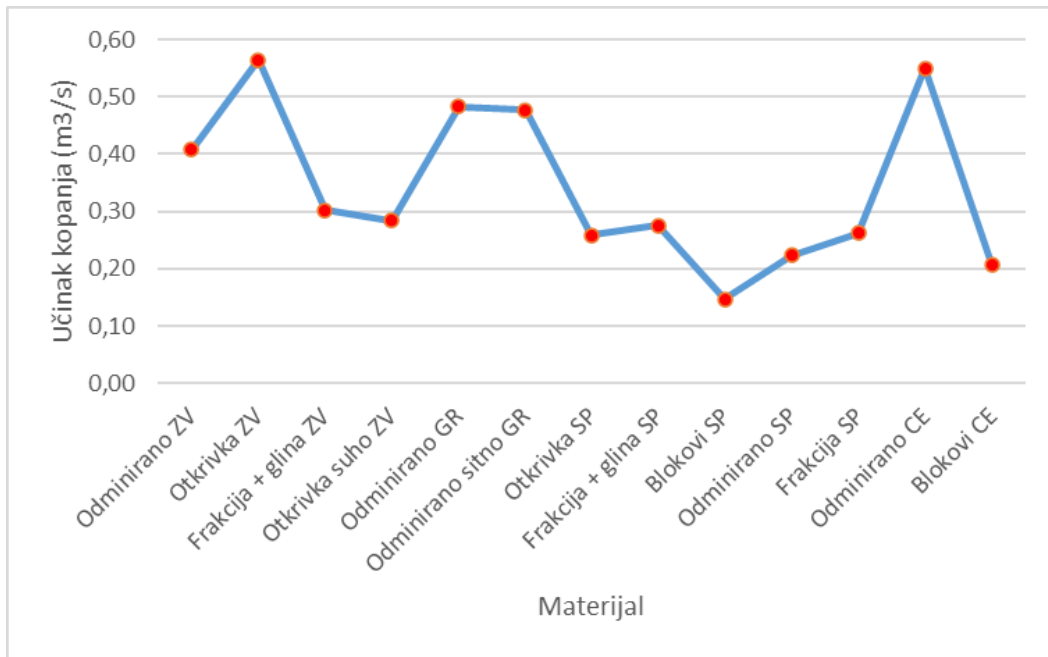
Vrijeme trajanja kopanja dobiveno je na temelju izraza 3.32, pomoću te veličine izračunati je učinak kopanja prema izrazu 3.35 i 3.36 u poglavlju 3.3.3. Rezultati srednjih vrijednosti s istaknutom standardnom devijacijom prikazani su na slici 5.22.



Slika 5.22. Rezultati prosječnoga vremena trajanja kopanja

Na grafu je vidljivo da se prosječno vrijeme trajanja kopanja kreće između 3 i 5 sekundi. Na temelju ovoga prikaza podataka nije moguće zaključiti da postoji zavisnost vremena trajanja kopanja o vrsti materijala. No, vrijeme trajanja kopanja smatra se utjecajnom veličinom na učinak, optimalnu trajektoriju kopanja stoga se koristi u daljnjim statističkim analizama kako bi se dokazala prva hipoteza.

Učinak kopanja opisan je u poglavlju 3.3.3. Proračun učinka izveden je prema izrazu 3.35 koristeći rezultat srednje vrijednosti mase materijala u lopati za svako mjerenje, nasipne gustoće materijala u kojem se izvode mjerenja i srednju vrijednost vremena trajanja kopanja. Učinak je u ovom radu bitna veličina za dokazivanje prve i druge hipoteze. Pri dokazivanju prve hipoteze, učinak je pokazatelj optimalne trajektorije kopanja. Druga hipoteza dokazana je analizom utjecaja značajki materijala na učinak. Dobiveni učinak kopanja za svako mjerenje prikazan je na grafu 5.23.



Slika 5.23. Rezultati učinka kopanja

U rezultatima prikazanim na grafu vidljiva je tendencija pojavljivanja nižeg učinka kopanja u krupnijim materijalima kao što su blokovi. Kao bi se dodatno istražila zavisnost učinka kopanja o vrsti materijala provedene su daljnje statističke analize utjecaja pojedinih značajki materijala te radnih i geometrijskih veličina kopanja na učinak kopanja.

6. VALIDACIJA IZMJERENIH VRIJEDNOSTI

Validacija kinematičkoga modela izvršena je na svakom terenskom mjerenju. Na probnom terenskom mjerenju u kamenolomu Sv. Juraj – Sv. Kajo u Kaštel Sućurcu izmjerene su koordinate vrha lopate pomoću mjerne vrpce na terenu. Rezultati mjerenja i rezultati proračuna za iste točke prikazani su u tablici 6.1. Na dnu tablice prikazana je maksimalna pogreška izračunata na temelju mjerenja u sve tri točke. Razlika između izmjerenih i proračunatih koordinata je 1,42% pri usporedbi X koordinate te čak 3,5% pri usporedbi Z koordinate. Ovakve greške javljaju se zbog otežanih uvjeta mjerenja mjernom vrpcom na terenu. Pri određivanju X koordinate vrlo je teško na samom bageru fizički odrediti točnu poziciju osi rotacije od koje se mjeri udaljenost. Taj se postupak izvodi spuštanjem ispod podvozja bagera gdje se na centralnoj poziciji nalazi okrugla ploča čiji centar ujedno predstavlja i os rotacije kupole bagera. Točke mjerenja nalazile su se na različitim visinama, a mjerena je njihova horizontalna udaljenost. Točne pozicije su procijenjene, što je na neravnom terenu vrlo teško točno izvesti te su se zbog toga u rezultatima pojavile neprihvatljive greške. Iz toga razloga se ova metoda više nije primjenjivala nego su mjere nadalje određene fotogrametrijskom metodom korištenjem fotografija bagera s terena (poglavlje 4.3.).

Tablica 6.1. Provjera koordinata mjernom vrpcom

Lokacija	Stroj	Točka 1				Točka 2				Točka 3			
		Izm. (m)		Rač. (m)		Izm. (m)		Rač. (m)		Izm. (m)		Rač. (m)	
		x	z	x	z	x	z	x	z	x	z	x	z
Sv. Juraj-Sv. Kajo	Volvo EC290CL	10,56	0	10,74	-0,37	8,5	0	8,35	-0,17	3,1	0	3,13	-0,08
		Maks. pogreška		x	z	x (%)	z (%)						
				0,15	0,37	1,42%	3,50%						

U tablici 6.2. prikazane su usporedbe koordinata određenih fotogrametrijskom metodom i računski dobivenih pomoću modela kinematike. Prilikom svakoga terenskog mjerenja nakon što je sustav spojen, prije samoga uključivanja detaljno je fotografiran bager kako bi se fotogrametrijski mogle odrediti koordinate početnoga položaja vrha lopate. Te koordinate su uspoređene s početnim koordinatama iz modela kinematike. U tablici 6.2. vidljivo je da su razlike dobivenih rezultata znatno manje nego prilikom mjerenja mjernom vrpcom.

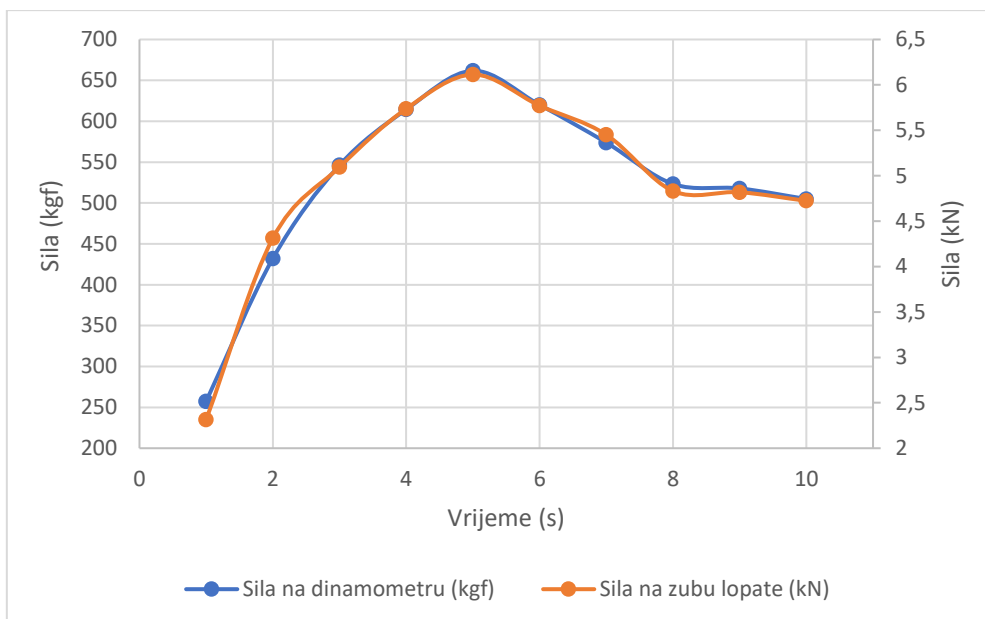
Tablica 6.2. Provjera koordinata određenih fotogrametrijskom metodom

Lokacija	Stroj	Točka 1			
		Izm. (m)		Rač. (m)	
		x	z	x	z
Zvečaj	Caterpillar 330 ELN	10,151	-0,235	10,164	-0,259
Gradna	Komatsu PC 340 NLC - 7EO	9,842	-0,485	9,864	-0,511
Špica	Doosan XD 300 LCA	10,076	0,013	10,121	-0,029
Čelina	Komatsu PC 360 LC	11,112	-0,304	11,110	-0,308
Zvečaj	Caterpillar 323 FLN	9,240	-0,443	9,196	-0,502
	Maksimalna pogreška	0,045	0,059	0,4%	0,6%

Na temelju podataka iz tablice 6.2. može se zaključiti da kinematički proračun zadovoljava te ne postoji zapreka da ga se koristi u proračunu.

Validacija izmjerenih sila

Provjera sila na vrhu lopate izvedena je pomoću dinamometra. Na terenskom mjerenju nasipne gustoće, drvena kutija napunjena materijalom poslužila je kao sidro za provjeru sila kopanja. Dinamometar je priključen za alke koje se nalaze pri dnu kutije s vanjske strane, a služe za prevrtanje. Drugi kraj dinamometra priključen je za zub lopate pomoću trake za podizanje tereta. Bager je pokretom izveo simulaciju kopanja povlačeći kutiju napunjenu materijalom. Na dinamometru je očitana sila koja se uslijed toga javljala. Rezultat usporedbe sile na dinamometru i sila kopanja proračunatih iz dinamičkoga modela nalazi se na slici 6.1. Sila na dinamometru izražena je u mjernoj jedinici kilogram sile (kgf). To je sila koja masi od 1 kg daje ubrzanje od $9,80665 \text{ m/s}^2$. Sila na zubu lopate izražena je u kilo njutnima (kN).



Slika 6.1. Usporedba mase na dinamometru i sile kopanja

U tablici 6.3. prikazani su prosjeci sile na dinamometru i sile na zubu lopate za prikazani segment mjerenja. Pretvaranjem jedinice kilogram sile (*kgf*) u kilo njutne (*kN*) dobivena je vrijednost koju možemo usporediti sa silom kopanja. Iz tablice je vidljivo da se prosječne sile razlikuju za 0,096 kN, odnosno 1,95 % što ukazuje na dobru pouzdanost dinamičkoga modela proračuna i mjerenja mjernoga sustava.

Tablica 6.3. Razlika sile kopanja i sile na dinamometru

Prosjek sile na dinamometru (kgf)	Prosjek sile na zubu lopate (kN)	Sile na dinamometru (kN) (*0,00981)
491,430	4,917	4,821
Razlika	0,096	1,95%

7. ANALIZA PODATAKA I DISKUSIJA

Obradom podataka mjerenja na temelju standardnih kinematičkih i dinamičkih modela dobivene su dinamičke radne veličine i geometrijske veličine kopanja bagera. Da bi se utvrdila međuovisnost dobivenih veličina te njihova ovisnost o fizikalno-mehaničkim značajkama materijala u kojima su izvedena mjerenja provedena je statistička obrada podataka. Sve navedene veličine izdvojene su za svaki ciklus pri svakom mjerenju. Broj izdvojenih ciklusa je različit kod svakoga mjerenja, a varira od samo 3 pa sve do 51 izmjenjenog ciklusa u jednom materijalu. Iz toga razloga se daljnja statistička obrada provodi koristeći srednje vrijednosti izračunatih veličina svih ciklusa u pojedinom mjerenju. Kao najprikladnija statistička metoda obrade podataka odabrana je višestruka regresijska analiza.

7.1. Višestruka regresijska analiza

Višestruka regresijska analiza (engl. multiple regression analysis) je metoda statističke obrade podataka kojom se predviđaju vrijednosti zavisne varijable na osnovi skupa vrijednosti nezavisnih varijabli. Rezultat takve analize je model za procjenu zavisne varijable. Izraz 7.1. prikazuje jednadžbu višestrukoga regresijskog modela za procijenjenu linearnu ovisnost zavisne varijable y o nezavisnim varijablama x_1-x_n . Nužan uvjet pri provedbi ovakve analize je da broj ulaznih podataka svake posebne varijable bude veći ili barem jednak broju nezavisnih varijabli (n). Izraz 7.2. prikazuje jednadžbu višestrukoga regresijskog modela za procijenjenu polinomnu ovisnost zavisne varijable y o nezavisnim varijablama x uz uvjet da je $n > m$.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + c \quad (7.1)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x^2 + \dots + \beta_n x^m + c \quad (7.2)$$

gdje je: y - procijenjena vrijednost zavisne varijable,

x_1, x_2, \dots, x_n - nezavisne varijable,

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ - nepoznati koeficijenti,

c - slučajna varijabla,

m - stupanj potencije.

Višestruka regresijska analiza omogućuje uvođenje kategoričkih varijabli kojima se klasificira niz podataka pomoću fiksnih vrijednosti koje su povezane s određenom kvalitetom ili kategorijom. Za razliku od kontinuiranih varijabli koje omogućuju numeričke izračune, kategoričke varijable imaju funkciju grupiranja podataka. To se postiže uvođenjem jednostavnih brojeva 0, 1, -1 ili njihovih kombinacija za određenu karakteristiku podatka.

Regresijske analize u svrhu statističke obrade podataka u sklopu ovoga rada provedene su pomoću računalnoga programa MS Excel uz pomoć funkcijskoga paketa analize podataka (Data analysis). Na slici 7.1. prikazan je primjer izvještaja regresijske analize iz MS Excela.

SUMMARY OUTPUT								
Regression Statistics								
Multiple R	0,809405044							
R Square	0,655136525							
Adjusted R Square	0,310273049							
Standard Error	3,052084977							
Observations	13							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	6	106,176671	17,69611184	1,899698203	0,22724847			
Residual	6	55,89133624	9,315222706					
Total	12	162,0680073						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	-9,413931944	12,38951284	-0,759830678	0,476140305	-39,72997774	20,90211385	-39,72997774	20,90211385
Rastresito	7,0800131	3,800032732	1,863145293	0,111735537	-2,218332027	16,37835823	-2,218332027	16,37835823
Koherentno	14,78062926	8,972890728	1,647253902	0,150604259	-7,175243397	36,73650193	-7,175243397	36,73650193
Volumen materijala (m3)	-0,007079683	0,002632744	-2,689089342	0,036096412	-0,013521774	-0,000637591	-0,013521774	-0,000637591
Duljina putanje (m)	2,083930614	1,062493848	1,961357815	0,097511433	-0,515898176	4,683759403	-0,515898176	4,683759403
Kut upada zuba (°)	0,03825517	0,132217379	0,289335416	0,782062193	-0,285269101	0,361779442	-0,285269101	0,361779442
Udio gline	-5,784097701	8,990583695	-0,643350632	0,54378658	-27,78326349	16,21506809	-27,78326349	16,21506809

Slika 7.1. Izvještaj regresijske analize iz MS Excela

Koeficijent korelacije (r^2), (engl. „R square“) je statistički podatak koji nam pokazuje koliko su promjene jedne statističke varijable povezane s promjenama drugih. Također možemo reći da ukazuje na slaganje između vrijednosti izračunatih modelom i izmjerenih vrijednosti, ali nam daje tek djelomične informacije o uspješnosti regresije u smislu objašnjavanja korelacije između zavisne i nezavisne varijable. Koeficijent korelacije ukazuje na veću povezanost što je bliži 1. Da bi se to dokazalo, provode se dodatni testovi. F-test se koristi za utvrđivanje postoji li značajan odnos između zavisne varijable i skupa svih nezavisnih varijabli. F-test možemo smatrati testom ukupne razine značaja (Significance F). Ako F-test pokaže ukupnu značajnost, t-test se koristi za određivanje je li svaka od pojedinačnih nezavisnih varijabli značajna.

Odvojeni test provodi se za svaku od nezavisnih varijabli u modelu, svaki od ovih testova nazivamo testom individualne važnosti, a njihov značaj prikazan je u izvještaju u ćeliji ispod *p-value*. Koeficijenti *Significance F* ukazuju na značajnost ukupnog modela ukoliko su manji od 0,1 dok koeficijenti *p-value* ukazuju na značajno nisku vjerojatnost pogreške ukoliko su manji od 0,05, odnosno 5 %. Regresijski koeficijenti (*coefficients*) interpretiraju se kao promjena zavisne varijable *y* koja odgovara jedinici promjena nezavisne varijable *x* kada su sve ostale nezavisne varijable konstantne (Anderson i sur., 2007).

7.1.1. Zavisnost dinamičkih radnih veličina i učinka kopanja o značajkama materijala

U prvoj hipotezi ovoga rada između ostaloga ističe se da su dinamičke radne veličine kopanja bagerom specifične u različitim vrstama stijenskoga materijala, dok se u drugoj hipotezi tvrdi da je na učinak hidrauličnoga bagera najutjecajnije značajka granulometrijski sastav kod rastresitih te vlažnost kod koherentnih stijenskih materijala. U svrhu dokazivanja prve i druge hipoteze ovoga rada izvedene su regresijske analize utjecaja značajki materijala na dinamičke radne veličine te učinak bagera.

7.1.1.1. Linearna zavisnost

Uz pretpostavku da dinamičke radne veličine i učinak kopanja linearno zavise o značajkama materijala prvo su izvedene višestruke linearne regresijske analize.

U tablici 7.1. navedeni su rezultati ispitivanja značajki materijala i rezultati dinamičkih radnih veličina. Kao nezavisne varijable u svim analizama uzeta su svojstva materijala (*D50*, *D_{max}*, *b*, sadržaj vlage, nasipna gustoća i sadržaj sitnih čestica). U svakoj analizi je uzeta jedna od izračunatih dinamičkih veličina (sila, energija, snaga i maksimalna snaga kopanja) te na kraju i učinak kopanja kao zavisna varijabla. Sila kopanja, utrošak energije i prosječna snaga kopanja svedene su na tonu otkopanoga materijala. Prema izrazu 7.3 je određeno koliki je iznos pojedine dinamičke radne veličine po toni iskopanoga materijala.

$$D_t = \frac{D}{m_m} \quad (7.3)$$

Gdje je D_t – dinamička radna veličina po toni materijala

D – dinamička radna veličina

m_m – masa materijala

Na taj je način omogućena usporedba rezultata dobivenih na različitim lokacijama mjerenja uz korištenje bagera s različitim volumenom lopate.

Tablica 7.1. Podatci za provođenje višestrukih regresijskih analiza zavisnosti dinamičkih veličina o svojstvima materijala

Materijal i lokacija	Kategoričke varijable		Nezavisne varijable						Zavisne varijable				
	Rastresito	Koherentno	D50 (mm)	Dmax (mm)	b	Sadržaj vlage (%)	Gustoća (t/m ³)	Sadržaj sitnih čestica (%)	Prosječna sila (kN/t)	Utrošak energije (kJ/t)	Prosječna snaga (kW/t)	Max snaga (kW)	Učinak kopanja (t/s)
Odminirano ZV	1	0	268,14	656	2,26	1,52	1,66	0	7,85	56,18	18,06	90,59	0,41
Otkrivka ZV	0	1	0	0	0,00	44,81	1,46	95	7,67	58,25	15,79	84,70	0,56
Frakcija + glina ZV	1	0	13,8	50	1,52	4,74	1,38	20	6,13	58,66	19,32	27,23	0,30
Otkrivka ZV	0	1	0	0	0,00	13,17	1,31	95	5,98	59,28	25,03	41,54	0,28
Odminirano GR	1	0	16,2	50	1,55	1,39	1,79	19	2,90	25,96	7,20	43,54	0,48
Frakcija GR	1	0	5,4	50	2,18	1,25	1,76	29	2,75	26,56	6,32	48,72	0,48
Otkrivka SP	0	1	1,75	38	2,25	16,20	1,78	55	13,49	110,82	24,86	108,56	0,26
Frakcija + glina SP	1	0	13,7	50	1,80	2,60	1,84	15	11,07	94,31	21,16	83,37	0,28
Blokovi SP	0	0	558,56	898	1,56	0,99	1,50	0	10,61	98,20	22,55	73,12	0,15
Odminirano SP	1	0	131,9	341	1,29	1,25	1,74	3	13,96	130,25	26,85	88,41	0,22
Frakcija SP	1	0	15,2	50	1,60	1,73	1,76	10	9,51	75,88	18,76	62,29	0,26
Odminirano CE	1	0	90,59	323	2,63	1,99	1,80	0	4,22	40,57	13,92	63,20	0,55
Blokovi CE	0	0	406,68	675	2,14	0,99	1,50	0	6,45	56,24	20,86	61,03	0,21

Tablica 7.2. Koeficijenti korelacije za višestruku linearnu regresiju

Višestruka linearna regresija		
Zavisne varijable	Nezavisne varijable	
	D50, Dmax, b, vlaga, gustoća, sitne čestice	
	r ²	Significance F
Prosječna sila (kN/t)	0,203	0,940
Utrošak energije (kJ/t)	0,179	0,957
Prosječna snaga (kW/t)	0,185	0,953
Max snaga (kW)	0,717	0,142
Učinak kopanja (t/s)	0,495	0,510

U tablici 7.2. vidljivo je da su korelacijski koeficijenti (r^2) u provedenim analizama uglavnom ispod granice od 0,5 što ukazuje na to da između nezavisnih varijabli i zavisne varijable u većini ovih modela postoji slabija linearna zavisnost. Odnosno, modeli nedovoljno dobro opisuju zavisnost između varijabli. Model zavisnosti maksimalne snage o značajkama materijala jedini u ovom slučaju ukazuje na značajnu linearnu povezanost između varijabli. Koeficijenti ukupne značajnosti modela (Significance F) dobiveni F-testom u regresijskoj analizi također ukazuje na vrlo slabu značajnost. Izvještaji svih navedenih regresijskih analiza prikazani su u prilogu 5.

Nakon što je utvrđeno da višestruka linearna regresija ne daje odgovarajući model za dati skup podataka, uvedene su kategoričke varijable. Pogledamo li u tablici 7.1. pregled ulaznih vrijednosti, vidljivo je da se značajke koherentnih materijala kao što je otkrivka značajnije razlikuju od svojstva rastresitih materijala kao što su odminirana stijenska masa ili frakcija. Razlike su najočitije u sadržaju vlage i sitnih čestica. Iz toga razloga uvedene su kategoričke vrijednosti koje matematički grupiraju koherentne materijale posebno od rastresitih materijala. Dodane su varijable „Rastresito“ i „Koherentno“ (tablica 7.1.). Pod varijablom rastresito dodana je vrijednost 1 za svaki rastresiti materijal te 0 svakom koherentnom i blokovima koji također pokazuju različita svojstva od rastresitih materijala. Pod varijablom koherentno dodana je vrijednost 1 svakom koherentnom materijalu, a 0 svakom rastresitom i blokovima. Na taj su način uvođenjem dviju varijabli dobivene tri različite „grupe“ materijala koje karakteriziraju određene razlike u svojstvima. Nakon provedene višestruke linearne regresijske analize sa kategoričkim varijablama dobiveni su koeficijenti korelacije prikazani u tablici 7.3.

Tablica 7.3. Koeficijenti regresijske analize s kategoričkim varijablama

Višestruka linearna regresija sa kategoričkim vrijednostima		
Zavisne varijable	Nezavisne varijable	
	D50, Dmax, b, vlaga, gustoća, sitne čestice	
	r^2	Significance F
Prosječna sila (kN/t)	0,734	0,401
Utrošak energije (kJ/t)	0,693	0,486
Prosječna snaga (kW/t)	0,759	0,349
Max snaga (kW)	0,869	0,131
Učink kopanja (t/s)	0,828	0,207

Koeficijenti korelacije (r^2) provedenih višestrukih linearnih regresijskih analiza s kategoričkim varijablama su znatno veći od koeficijenata analize bez kategoričkih varijabli. Njihov iznos je veći od 0,5 što ukazuje na značajnu linearnu ovisnost između varijabli. Koeficijenti ukupne značajnosti modela (*Significance F*) i dalje su iznad granice od 0,1 što ukazuje na slabu ukupnu značajnost modela.

Na temelju provedenih višestrukih linearnih regresijskih analiza zaključeno je da svojstva rastresitih i koherentnih materijala zajedno u regresijskoj analizi pokazuju značajniju korelaciju (r^2) s dinamičkim radnim veličinama i učinkom kopanja ukoliko se dodaju kategoričke varijable. Sama primjenjivost dobivenih modela nije značajna na što ukazuju koeficijenti značajnosti (*Significance F*) te se za provjeru utjecaja pojedinih svojstava provode daljnje analize.

7.1.1.2. Nelinearna zavisnost

Da bi se pronašao prikladni regresijski model zavisnosti dinamičkih veličina i učinka o svojstvima materijala u nastavku su provedene analize uz pretpostavku da varijable pokazuju nelinearnu zavisnost. Provedena je analiza nelinearne zavisnosti između varijabli. Za izvođenje takve analize odabrane su četiri značajke materijala (parametar b , vlaga, gustoća i udio sitnih čestica). Višestruka regresijska analiza polinomne zavisnosti drugoga stupnja između varijabli provodi se u MS Excel softveru kao linearna regresijska analiza uz dodavanje druge potencije svake nezavisne varijable kao dodatne varijable u regresijsku analizu. U takvoj analizi broj nezavisnih varijabli tehnički je dvostruko veći od analize linearne zavisnosti te je zbog toga smanjen njihov broj. Parametri granulacije $D50$ (srednja veličina zrna) i $Dmax$ (maksimalna veličina zrna) pokazali su u prethodnim analizama znatno manji utjecaj na dinamičke radne veličine od parametra b . Stoga je od granulacijskih parametara u ovoj analizi uzet u obzir samo parametar b . Utjecaj je utvrđen prema regresijskim koeficijentima utjecaja (*coefficients*) iz izvještaja regresijskih analiza za svaku pojedinu varijablu koji su vidljivi u prilogu 6. U tablici 7.4. prikazane su zavisne i nezavisne varijable koje su korištene u nelinearnoj regresijskoj analizi.

Tablica 7.4. Ulazne vrijednosti za nelinearnu regresijsku analizu

Materijal i lokacija	Kategoričke varijable		Nezavisne varijable								Zavisne varijable				
	Ras.	Koh.	b	b ²	Sadržaj vlage (%)	Sadržaj vlage ² (%)	Gustoća (t/m ³)	Gustoća ² (t/m ³)	Sadržaj sitnih čestica (%)	Sadržaj sitnih čestica ² (%)	Prosječna sila (kN/t)	Utrošak energije (kJ/t)	Prosječna snaga (kW/t)	Max snaga (kW)	Tehnički učinak (t/s)
Odminirano ZV	1	0	2,26	5,10	1,52	2,31	1,66	2,75	0	0,00	7,85	56,18	18,06	90,59	0,41
Otkrivka ZV	0	1	0,00	0,00	44,81	2007,94	1,46	2,13	95	9025,00	7,67	58,25	15,79	84,70	0,56
Frakcija + glina ZV	1	0	1,52	2,30	4,74	22,47	1,38	1,91	20	400,00	6,13	58,66	19,32	27,23	0,30
Otkrivka ZV	0	1	0,00	0,00	13,17	173,45	1,31	1,72	95	9025,00	5,98	59,28	25,03	41,54	0,28
Odminirano GR	1	0	1,55	2,39	1,39	1,93	1,79	3,19	19	361,00	2,90	25,96	7,20	43,54	0,48
Frakcija GR	1	0	2,18	4,76	1,25	1,56	1,76	3,10	29	841,00	2,75	26,56	6,32	48,72	0,48
Otkrivka SP	0	1	2,25	5,08	16,20	262,44	1,78	3,17	55	3025,00	13,49	110,82	24,86	108,56	0,26
Frakcija + glina SP	1	0	1,80	3,24	2,60	6,76	1,84	3,39	15	225,00	11,07	94,31	21,16	83,37	0,28
Blokovi SP	0	0	1,56	2,43	0,99	0,98	1,50	2,25	0	0,00	10,61	98,20	22,55	73,12	0,15
Odminirano SP	1	0	1,29	1,67	1,25	1,56	1,74	3,03	3	9,00	13,96	130,25	26,85	88,41	0,22
Frakcija SP	1	0	1,60	2,56	1,73	2,99	1,76	3,09	10	100,00	9,51	75,88	18,76	62,29	0,26
Odminirano CE	1	0	2,63	6,90	1,99	3,96	1,80	3,25	0	0,00	4,22	40,57	13,92	63,20	0,55
Blokovi CE	0	0	2,14	4,56	0,99	0,98	1,50	2,25	0	0,00	6,45	56,24	20,86	61,03	0,21

Prvo je provedena analiza bez kategoričkih varijabli a nakon toga i s kategoričkim varijablama. U tablici 7.5. prikazani su dobiveni koeficijenti korelacije (r^2) i rezultati F-testa, koeficijenti ukupne razine značaja (*Significance F*).

Tablica 7.5. Rezultati koeficijena nelinearne regresijske analize zavisnosti dinamičkih veličina o svojstvima materijala

Višestruka nelinearna regresija - polinom 2. stupnja				
Zavisne varijable	Nezavisne varijable (b, vlaga, gustoća, sitne čestice)			
	Svojstva materijala		Svojstva materijala + kat. varijable	
	r^2	Significance F	r^2	Significance F
Prosječna sila (kN/t)	0,816	0,230	0,887	0,452
Utrošak energije (kJ/t)	0,755	0,356	0,833	0,600
Prosječna snaga (kW/t)	0,842	0,179	0,875	0,488
Max snaga (kW)	0,886	0,103	0,907	0,385
Učinak kopanja (t/s)	0,879	0,114	0,940	0,267

Iz prikaza koeficijenata (r^2) vidljivo je da varijable pokazuju neznatno veću polinomnu vezu pri uključivanju kategoričkih varijabli od provedene analize bez kategoričkih varijabli. No značajnost primjene modela na temelju koeficijenta značajnosti (*Significance F*) pada s uključivanjem kategoričkih varijabli.

U tablici 7.6. prikazani su regresijski koeficijenti (*coefficients*) iz izvještaja regresijskih analiza utjecaja značajki materijala na dinamičke radne veličine i učinak kopanja. Koeficijenti se interpretiraju kao promjena zavisne varijable y koja odgovara jedinici promjena nezavisne varijable x kada su sve ostale nezavisne varijable konstantne. Na temelju koeficijenata možemo promatrati utjecaj pojedine značajke materijala na radne veličine i učinak kopanja.

Tablica 7.6. Regresijski koeficijenti

Značajke materijala	Prosječna sila (kN/t)		Utrošak energije (kJ/t)		Prosječna snaga (kW/t)		Max snaga (kW)		Učinak kopanja (t/s)	
	Lin.	Lin. + kat	Lin.	Lin. + kat	Lin.	Lin. + kat	Lin.	Lin. + kat	Lin.	Lin. + kat
D50 (mm)	0,010	0,079	0,101	0,568	-0,007	0,003	-0,049	0,214	-0,001	-0,003
Dmax (mm)	-0,001	-0,038	-0,017	-0,289	0,012	-0,008	0,091	-0,048	0,001	0,001
b	-1,897	-3,150	-19,857	-33,284	-2,432	-7,133	-0,747	-4,340	0,032	0,088
Sadržaj vlage (%)	0,074	0,036	0,192	-0,184	-0,107	-0,218	1,072	0,953	0,006	0,008
Gustoća (t/m ³)	11,498	3,387	91,947	25,862	-1,339	-12,578	115,747	87,489	-0,004	0,214
ržaj sitnih čestica (%)	-0,012	-0,344	-0,084	-2,972	0,049	-0,577	0,299	-0,816	-0,001	0,010
Polinom 2. stupnja										
b	4,459	-8,385	91,884	-58,478	3,199	-12,046	-56,005	-53,386	-0,072	0,530
Sadržaj vlage (%)	-0,2683	-0,0230	-2,4182	-0,2159	-0,3328	-0,0444	-0,4858	-0,0702	0,0081	0,0002
Gustoća (t/m ³)	-536,0	-1,4	-4872,5	-13,4	-575,0	53,8	-1018,3	-153,7	15,6	-1,9
ržaj sitnih čestica (%)	0,0090	0,0056	0,0421	0,0391	0,0142	0,0103	0,0712	0,0464	-0,0003	-0,0003

Prema tome, u tablici 7.6. vidljivo je da promatranjem svih materijala zajedno najveći utjecaj na dinamičke radne veličine i učinak kopanja pokazuje nasipna gustoća materijala i parametar *b*, dok sadržaj vlage i sadržaj sitnih čestica ne pokazuju značajni utjecaj. Razlog tome može biti u znatno većoj zastupljenosti promatranih uzoraka rastresitih materijala koji većinom sadrže vrlo malo vlage. Kako bi se utvrdila najutjecajnije svojstva materijala rastresitih i koherentnih materijala na učinak kopanja naknadno su provedene zasebne analize.

7.2. Utjecaj značajki materijala na učinak kopanja

U drugoj hipotezi potrebno je dokazati da je na učinak hidrauličnoga bagera najutjecajnije značajka granulometrijski sastav kod rastresitih te vlažnost kod koherentnih stijenskih materijala. Stoga su provedene dvije višestruke regresijske analize s kojima je moguće najpreciznije dokazati spomenute tvrdnje.

Analiza utjecaja značajki rastresitih materijala na učinak kopanja izvedena je na temelju podataka iz tablice 7.7. Kao nezavisne varijable uzete su vrijednosti parametara granulacije (*D50*, *Dmax* i *b*) te sadržaj vlage, gustoća i sadržaj sitnih čestica. Zavisna varijabla u modelu je učinak kopanja.

Tablica 7.7. Podatci za analizu zavisnosti značajki rastresitih materijala o učinku kopanja.

Materijal i lokacija	Nezavisne varijable						Zavisne varijable
	D50 (mm)	Dmax (mm)	b	Sadržaj vlage (%)	Gustoća (t/m ³)	Sadržaj sitnih čestica (%)	Učink kopanja (t/s)
Odnirano ZV	268,14	656	2,26	1,52	1,66	0	0,41
Frakcija + glina ZV	13,8	50	1,52	4,74	1,38	20	0,30
Odnirano GR	16,2	50	1,55	1,39	1,79	19	0,48
Frakcija GR	5,4	50	2,18	1,25	1,76	29	0,48
Frakcija + glina SP	13,7	50	1,80	2,60	1,84	15	0,28
Blokovi SP	558,56	898	1,56	0,99	1,50	0	0,15
Odnirano SP	131,9	341	1,29	1,25	1,74	3	0,22
Frakcija SP	15,2	50	1,60	1,73	1,76	10	0,26
Odnirano CE	90,59	323	2,63	1,99	1,80	0	0,55
Blokovi CE	406,68	675	2,14	0,99	1,50	0	0,21

Izvještaj regresijske analize prikazan je u tablici 7.8. U izvještaju je vidljivo da koeficijent korelacije (r^2) iznosi 0,78 što ukazuje da postoji zadovoljavajuća veza između dobivenoga modela i ulaznih varijabli te je unatoč slabijoj ukupnoj značajnosti modela na temelju koeficijenta (*Significance F*) razmatrana najutjecajnija varijabla. Koeficijent regresije (*coefficients*) za parametar b iznosi 0,15 dok za sve ostale nezavisne varijable iznosi <0,02. Koeficijent *p-value* za parametar b iznosi 0,24 dok su za sve ostale značajke materijala koeficijenti veći što ukazuje na najnižu vjerojatnost pogreške odnosno najveću pojedinačnu značajnost varijable. Na temelju toga možemo zaključiti da parametar b (*koeficijent zakrivljenosti krivulje granulacije*) predstavlja najutjecajniju značajku materijala na učinak kopanja kod rastresitih materijala. Ta tvrdnja djelomično dokazuje drugu hipotezu.

Tablica 7.8. Izvještaj regresijske analize utjecaja značajki rastresitih materijala na učinak kopanja

SUMMARY OUTPUT								
Regression Statistics								
Multiple R	0,88513895							
R Square	0,78347096							
Adjusted R Square	0,350412881							
Standard Error	0,109877283							
Observations	10							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	6	0,131052	0,021842	1,809159	0,335130266			
Residual	3	0,036219	0,012073					
Total	9	0,167271						
	Coefficients	Standard Err	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	0,017447724	1,111717	0,015694	0,988464	-3,520532899	3,555428	-3,520532899	3,555428348
D50 (mm)	-0,00134689	0,001117	-1,20532	0,314482	-0,004903131	0,002209	-0,004903131	0,002209352
Dmax (mm)	0,000701312	0,000073	0,960872	0,4075	-0,001621463	0,003024	-0,001621463	0,003024088
b	0,152605626	0,104754	1,456799	0,241213	-0,180768524	0,48598	-0,180768524	0,485979775
Sadržaj vlage (%)	-0,01913233	0,06723	-0,28458	0,79448	-0,233088928	0,194824	-0,233088928	0,194824269
Gustoća (t/m ³)	-0,00195892	0,545665	-0,00359	0,997361	-1,738509837	1,734592	-1,738509837	1,734591989
Sadržaj sitnih čestica	0,005885698	0,007224	0,814715	0,474899	-0,017105054	0,028876	-0,017105054	0,028876451

Analiza utjecaja značajki koherentnih materijala na učinak kopanja izvedena je na temelju podataka iz tablice 7.9. Kao nezavisne varijable uzeti su u obzir samo sadržaj vlage, gustoća i sadržaj sitnih čestica iz razloga što za glinovite materijale kao što je „Otkrivka ZV“ nije moguće definirati parametre granulacije (*D50*, *Dmax* i *b*). Na tom materijalu laboratorijskim je ispitivanjem utvrđeno da se radi o glini visoke plastičnosti. Laboratorijski izvještaj nalazi se u prilogu 4. Od svih mjerenja u sklopu izrade ove disertacije samo tri mjerenja izvedena su u koherentnim materijalima. Na temelju tri mjerenja ne može se izvesti regresijska analiza s tri nezavisne varijable stoga su u analizu dodana dva rastresita materijala s većim udjelom sitnih čestica. Zavisna varijabla u modelu je učinak kopanja.

Tablica 7.9. Podatci za analizu zavisnosti značajki koherentnih materijala o učinku kopanja

Materijal i lokacija	Nezavisne varijable			Zavisna varijabla
	Sadržaj vlage (%)	Gustoća (t/m ³)	Sadržaj sitnih čestica (%)	Učinak kopanja (t/s)
Otkrivka ZV	44,81	1,46	95	0,56
Otkrivka ZV	13,17	1,31	95	0,28
Fracija + glina ZV	4,74	1,38	20	0,30
Otkrivka SP	16,20	1,78	55	0,26
Fracija + glina SP	2,60	1,84	15	0,28

Izveštaj regresijske analize prikazan je u tablici 7.10. U izvještaju je vidljivo da koeficijent korelacije (r^2) iznosi 0,93 što ukazuje na značajnu vezu između dobivenoga modela i ulaznih varijabli te je unatoč slabijoj ukupnoj značajnosti modela na temelju koeficijenta (*Significance F*) koji iznosi 0,3, razmotrena najutjecajnija varijabla. Na temelju koeficijenata regresije (*coefficients*) kao najutjecajnije svojstvo ističe se gustoća s vrijednošću od -0,15 dok su apsolutne vrijednosti koeficijenata za sadržaj vlage i sitnih čestica $<0,01$. Koeficijenti (*p-value*) ukazuju na najmanju vjerojatnost pogreške kod sadržaja vlage što je naznaka da bi pri većem broju mjerenja u koherentnim materijalima sadržaj vlage mogao predstavljati najutjecajniju značajku. Zbog toga dio druge hipoteze koji govori o sadržaju vlage kao najutjecajnijem svojstvu potrebno je dodatno istražiti obavljanjem većeg broja ispitivanja na koherentnim materijalima.

Tablica 7.10. Izveštaj regresijske analize utjecaja značajki koherentnih materijala na učinak kopanja

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0,969504102							
R Square	0,939938203							
Adjusted R Square	0,759752814							
Standard Error	0,062849339							
Observations	5							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	3	0,061816214	0,0206054	5,216506203	0,308886918			
Residual	1	0,003950039	0,00395					
Total	4	0,065766254						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>
Intercept	0,525783784	0,27857562	1,8874006	0,31017723	-3,01385508	4,065423	-3,01386	4,065423
Sadržaj vlage (%)	0,009541507	0,002896657	3,2939718	0,187638849	-0,027264014	0,046347	-0,02726	0,046347
Gustoća (t/m ³)	-0,155160739	0,157035123	-0,9880639	0,503822138	-2,150481158	1,84016	-2,15048	1,84016
Sadržaj sitnih čestica (%)	-0,001841055	0,0014243	-1,2926034	0,419185557	-0,019938497	0,016256	-0,01994	0,016256

7.3. Korelacije veličina u rastresitom i koherentnom materijalu

U ovom poglavlju cilj je istražiti optimalnu trajektoriju kretanja lopate bagera u različitim materijalima, što je potrebno za dokazivanje prve hipoteze. Provjerom korelacija između izračunatih podataka na dvama različitim mjerenjima izdvojene su veličine pomoću kojih je moguće odrediti optimalnu trajektoriju.

Kao što je već spomenuto, regresijske analize provedene su korištenjem srednjih vrijednosti podataka dobivenih pri mjerenju u određenom materijalu zbog razlike u broju odrađenih ciklusa za svaki materijal. Da bi se usporedili podatci unutar jednoga mjerenja, odnosno pri mjerenju u jednom materijalu potrebno je izdvojiti podatke svih ciklusa unutar toga mjerenja. Za tu analizu

odabrana su dva materijala, jedan rastresiti i jedan koherentni u kojima je bilo odmjereno najviše radnih ciklusa. Rastresiti materijal koji je odabran jest odminirana stijenska masa u kojoj su izvedena mjerenja na lokaciji „Zvečaj“ pri čemu su dobiveni podatci za 51 radni ciklus. Koherentni materijal odabran je također s lokacije „Zvečaj“, a radi se o otkrivci koja je pretežno glinovitoga sastava gdje su dobiveni podatci za 21 radni ciklus. Za svaki ciklus izdvojeni su podatci: prosječne sile kopanja, masa materijala, utrošak energije, duljina trajektorije, kut upada zuba prema trajektoriji kretanja lopate, površina reza, vrijeme trajanja kopanja i učinak kopanja. Pomoću programa MS Excel uz naredbu „CORREL“ izračunate su korelacije između navedenih veličina. Naredba „CORREL“ vraća koeficijent korelacije između odabranih skupova podataka. Rezultati koeficijenata korelacija prikazani su u tablici 7.11.

Tablica 7.11. Korelacije između dinamičkih i geometrijskih veličina kopanja

Korelacije	Prosječna sila	Masa materijala u lopati	Utr. Energije po toni	Duljina trajektorije	Prosječni kut	Površina reza	Vrijeme trajanja kopanja	Učinak kopanja
Prosječna sila		0,223	0,883	0,571	0,100	0,517	0,747	-0,586
Masa materijala u lopati	0,444		-0,149	0,093	-0,248	-0,168	0,277	0,210
Utr. Energije po toni	0,439	-0,243		0,745	0,164	0,742	0,870	-0,778
Duljina trajektorije	-0,047	-0,296	0,763		0,060	0,827	0,887	-0,836
Prosječni kut	-0,086	-0,099	0,024	0,299		0,418	-0,005	-0,182
Površina reza	-0,031	-0,298	0,591	0,866	0,569		0,620	-0,672
Vrijeme trajanja kopanja	0,042	-0,185	0,714	0,960	0,157	0,763		-0,853
Učinak kopanja	0,036	0,454	-0,789	-0,916	-0,174	-0,728	-0,914	

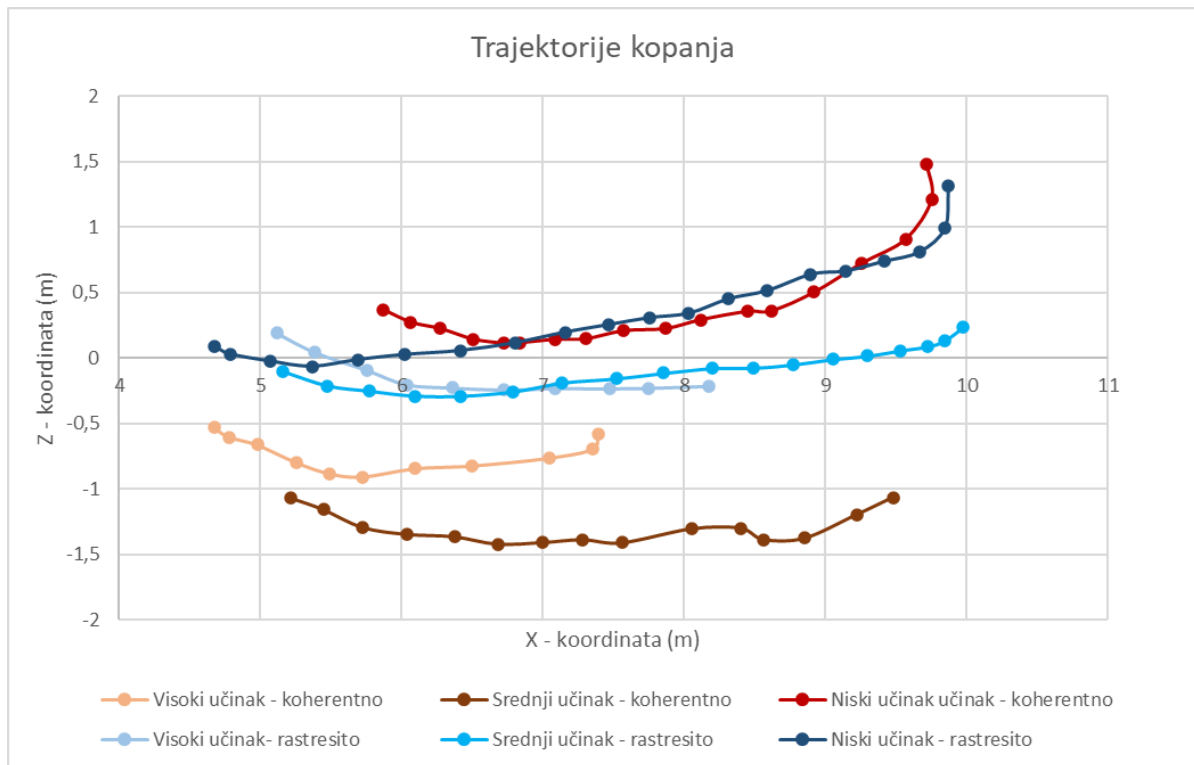
U tablici, ćelije obojane žutom bojom prikazuju rezultate za koherentni materijal dok plavo obojane prikazuju rezultate za rastresiti materijal. Crveno obojani tekst prikazuje koeficijent korelacije koji ukazuje na značajniju povezanost između promatranih veličina.

Iz rezultata je vidljivo da učinak kopanja pokazuje najznačajnija korelacijska svojstva s duljinom trajektorije kopanja, vremenom trajanja kopanja te potrošnjom energije.

Optimalna trajektorija kopanja predstavlja kretanje lopate na način da u što manje vremena bude iskopano što više materijala, odnosno ostvaren što veći učinak uz što manju potrošnju energije. Na temelju izvedenih korelacija i regresijske analize može se zaključiti da je duljina

trajektorije kopanja geometrijska veličina koja najviše utječe na učinak kopanja te je pogodna za analizu optimalne trajektorije kopanja kako u rastresitom tako i koherentnom materijalu.

Kako bi se usporedile stvarne trajektorije odabrana su po tri ciklusa kopanja za rastresiti i koherentni materijal. Korišteni su kao i za prikaz korelacija, podatci mjerenja s kamenoloma „Zvečaj“ u odminiranom materijalu i otkrivci. Odabrani su reprezentativni ciklusi s visokim, srednjim i niskim učinkom. Trajektorije kopanja odabranih ciklusa prikazane su na slici 7.2.



Slika 7.2. Usporedba trajektorija kopanja

Razlike trajektorija pri kojima se postiže različiti učinak jasno su vidljive na grafu. Može se zaključiti da je učinak obrnuto proporcionalan duljini trajektorije. Niski učinak postignut je kod trajektorija označenih crvenom (rastresiti materijal) i tamno plavom bojom (koherentni materijal). Njihova je duljina veća od trajektorija kopanja kod kojih se postižu veći učinci te kut koji zatvaraju s horizontalnom ravninom značajnije pada u smjeru kopanja. Trajektorije kod kojih se postiže srednji učinak i visoki učinak razlikuju se međusobno u duljini dok je oblik u pravilu konkavnoga oblika. Na temelju usporedbe trajektorija sličnoga učinka u rastresitom i koherentnom materijalu možemo zaključiti da se njihov geometrijski oblik u osnovi ne razlikuje značajno no za isti učinak u rastresitom materijalu potrebna je veća duljina kopanja nego u koherentnom materijalu. Takva tendencija pojavljuje se i na ostalim rezultatima mjerenja što je objašnjeno u nastavku.

Na temelju rezultata korelacija prikazanih u tablici 7.11. može se zaključiti da duljina trajektorije kopanja ima najveće korelacije s učinkom kopanja. Provedena je i regresijska analiza utjecaja geometrijskih veličina na učinak kopanja. U tablici 7.12. prikazane su ulazne vrijednosti regresijske analize.

Tablica 7.12. Ulazne vrijednosti za regresijsku analizu utjecaja geometrijskih veličina kopanja na učinak

Materijal i lokacija mjerenja	KATEGORIČKE VARIJABLE		NEZAVISNE VARIJABLE			ZAVISNE VARIJABLE
	Rastresito	Koherentno	Duljina putanje (m)	Kut upada zuba (°)	Površina reza (m ²)	Učinak kopanja (t/s)
Odmirano ZV	1	0	7,96	37,56	0,99	0,41
Otkrivka ZV	0	1	8,56	46,25	1,22	0,56
Frakcija + glina ZV	1	0	7,85	39,13	0,93	0,30
Otkrivka ZV	0	1	7,41	32,26	0,95	0,28
Odmirano GR	1	0	9,00	45,20	2,59	0,48
Frakcija GR	1	0	10,71	44,42	2,62	0,48
Otkrivka SP	0	1	8,85	40,94	1,67	0,26
Frakcija + glina SP	1	0	9,72	41,61	2,34	0,28
Blokovi SP	0	0	10,29	42,01	2,90	0,15
Odmirano SP	1	0	10,17	39,76	2,23	0,22
Frakcija SP	1	0	9,01	33,97	1,23	0,26
Odmirano CE	1	0	8,19	65,42	1,52	0,55
Blokovi CE	0	0	9,95	42,83	2,06	0,21

Izvještaj provedene analize prikazan je u tablici 7.13. Koeficijent korelacije (r^2) iznosi 0,64 što ukazuje na zadovoljavajuću povezanost između ulaznih i izlaznih vrijednosti. Koeficijent (*Significance F*), koji iznosi 0,12 ukazuje na ukupnu značajnost modela. Prema regresijskom koeficijentu koji iznosi -0,015, duljina trajektorije pokazuje najveći utjecaj na učinak od geometrijskih veličina kopanja, no koeficijent (*p-value*) za duljinu trajektorije ističe veću vjerojatnost pogreške od ostalih varijabli. Zbog toga su provedene i daljnje analize trajektorije kopanja.

Tablica 7.13. Analiza utjecaja geometrijskih veličina kopanja na učinak kopanja

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0,8047183							
R Square	0,6475716							
Adjusted R Square	0,395837							
Standard Error	0,1071101							
Observations	13							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	5	0,147562299	0,02951246	2,57244	0,125067392			
Residual	7	0,080307943	0,011472563					
Total	12	0,227870242						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>
Intercept	-0,166164	0,537667912	-0,309045755	0,76628	-1,437546571	1,105218599	-1,437546571	1,105218599
Rastresito	0,1740182	0,093084511	1,869464966	0,10376	-0,04609166	0,394128125	-0,04609166	0,394128125
Koherentno	0,1998568	0,119134327	1,677575666	0,13733	-0,081851071	0,481564768	-0,081851071	0,481564768
Duljina putanje (m)	-0,0150836	0,063084945	-0,159841244	0,87752	-0,159255767	0,139088615	-0,159255767	0,139088615
Kut upada zuba (°)	0,0105205	0,00414083	2,540682943	0,03863	0,000729029	0,020312043	0,000729029	0,020312043
Površina reza (m2)	-0,0001115	0,093855373	-0,001187578	0,99909	-0,222044153	0,221821232	-0,222044153	0,221821232

Na temelju korelacijskih i regresijskih analiza utvrđeno je da trajektorija kretanja lopate predstavlja vrlo utjecajnu geometrijsku veličinu kopanja. U daljnjoj analizi prikazan je odnos između učinka i duljine kopanja u različitim materijalima pomoću izračunatog prosječnog jediničnog učinka kopanja po metru dužine trajektorije (izraz 7.4). Pomoću toga podatka uspoređeni su odnosi duljine trajektorije i učinka u različitim materijalima.

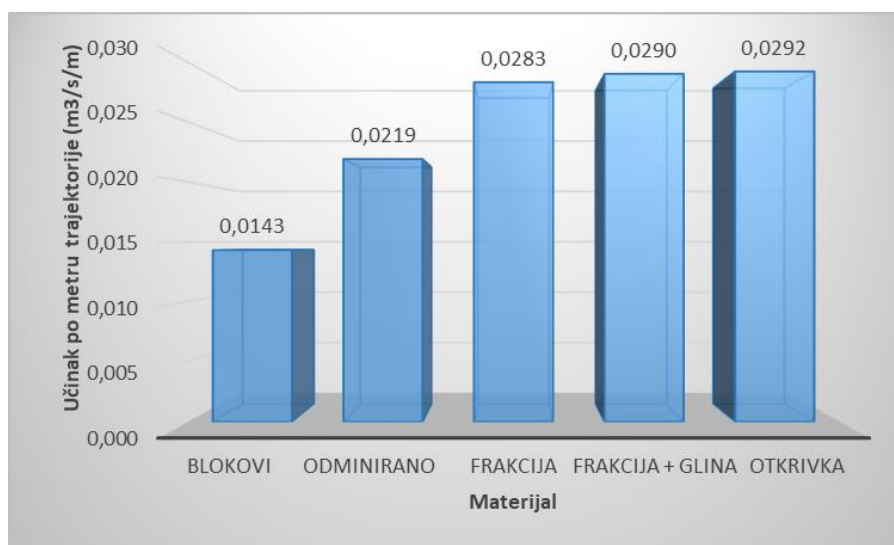
$$Q_{sm} = \frac{Q_s}{l_r} \left[\frac{m^3/s}{m} \right] \quad (7.4)$$

Gdje je: Q_{sm} – učinak kopanja po dužnom metru trajektorije [$m^3/s/m$],

Q_s – učinak kopanja [m^3/s],

l_r – duljina trajektorije kopanja [m].

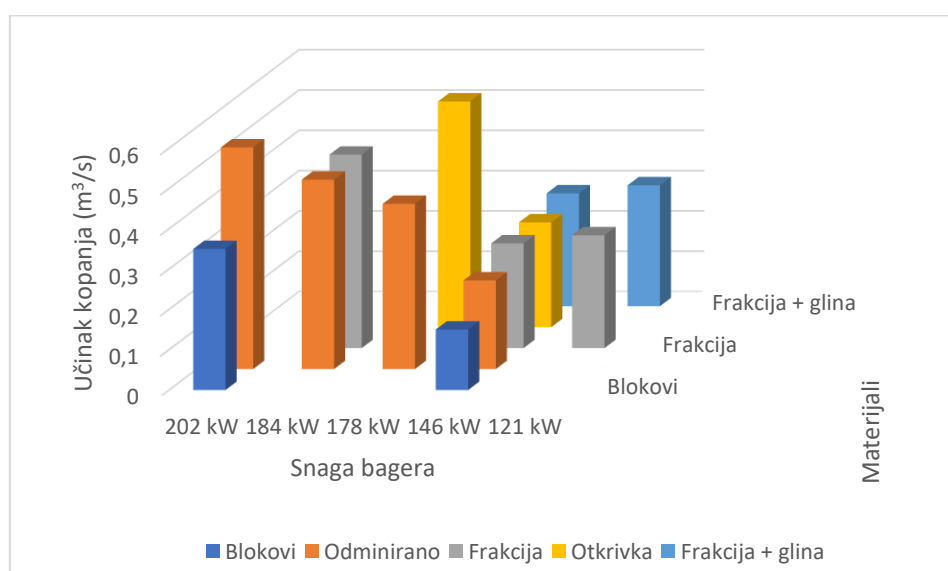
Na slici 7.3. prikazan je grafički prikaz vrijednosti učinka kopanja po dužnom metru trajektorije kopanja u materijalima izmjenim na kamenolomu „Špica“. Na tom je mjerenju bilo dostupno najviše različitih materijala te je zbog toga uzeto kao reprezentativni primjer. Na temelju podataka prikazanih na grafu može se zaključiti da je u krupnijim materijalima jedinični učinak kopanja manji nego u sitnijim materijalima. Drugim riječima, za isti učinak u krupnim materijalima potrebna je veća duljina kopanja. Na temelju toga podatka može se zaključiti da je i optimalna trajektorija specifična u različitim materijalima što predstavlja tvrdnju prve hipoteze.



Slika 7.3. Jedinični učinak kopanja u različitim materijalima

7.4. Klasifikacija učinka kopanja bagera u različitim materijalima

Na slici 7.4. prikazan je trodimenzionalni graf učinka kopanja u različitim materijalima za sve korištene bagere u ovisnosti o njihovoj snazi. Na grafu je vidljiva tendencija postizanja većeg učinka kod bagera veće snage te pri radu u sitnijim materijalima dok se tendencija postizanja manjeg učinka javlja u krupnijim materijalima i kod bagera manje snage. Ekvivalentno snazi bagera projektirane su i njegove dimenzije, volumen lopate te brzina rada što utječe na učinak kopanja. Zbog toga je snaga bagera uzeta kao veličina koja objedinjuje više utjecajnih čimbenika učinka.



Slika 7.4. Pregled tehničkoga učinka kopanja

Provedena je višestruka regresijska analiza utjecaja vrste materijala, snage stroja i nasipne gustoće materijala na učinak kopanja. Nezavisne varijable u regresijskoj analizi su snaga stroja, nasipna gustoća te vrsta materijala koja je definirana kao cijeli broj koji je pridružen određenom materijalu (tablica 7.15.). Brojevi su dodijeljeni redosljedom od krupnijeg prema sitnijem materijalu. U izvještaju regresijske analize (tablica 7.14.) vidljivo je da korelacijski koeficijent (r^2) iznosi 0,77 što ukazuje na vrlo dobro korelaciju između zavisne i nezavisnih varijabli. Koeficijenti (*significance F* i *P-value*) koji su značajno ispod granice 0,05 ukazuju na dobru primjenjivost modela. Model klasifikacije učinak bagera, izveden pomoću regresijske analize prikazan je u izrazu 7.5.

Tablica 7.14. Izvještaj regresijske analize

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0,8828687							
R Square	0,77945714							
Adjusted R Square	0,69675357							
Standard Error	0,07246494							
IS	12							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>gnificance F</i>			
Regression	3	0,148472	0,049491	9,42470947	0,005282			
Residual	8	0,042009	0,005251					
Total	11	0,190482						
	<i>Coefficients</i>	<i>andard Err</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>ower 95,0%</i>	<i>pper 95,0%</i>
Intercept	-0,4884407	0,237093	-2,06012	0,07334607	-1,03518	0,058297	-1,03518	0,058297
Materijal	0,06251064	0,020416	3,061819	0,01553964	0,015431	0,10959	0,015431	0,10959
Snaga stroja (kW)	0,00562397	0,001091	5,153933	0,00087011	0,003108	0,00814	0,003108	0,00814
Nasipna gustoća (t/m3)	-0,1545428	0,131191	-1,178	0,02726474	-0,45707	0,147983	-0,45707	0,147983

Tablica 7.15. Ulazne vrijednosti za regresijsku analizu i validacija modela

Materijal i lokacija mjerenja	Materijal	Snaga stroja (kW)	Nasipna gustoća (t/m ³)	Učinak kopanja (m ³ /s)
Odmirano ZV	2	178,00	1,66	0,41
Otkrivka ZV	4	178,00	1,46	0,56
Frakcija + glina ZV	5	121,00	1,38	0,30
Otkrivka suho ZV	4	121,00	1,31	0,28
Odmirano GR	2	184,00	1,79	0,48
Frakcija GR	3	184,00	1,76	0,48
Otkrivka SP	4	146,00	1,78	0,26
Frakcija + glina SP	5	146,00	1,84	0,28
Blokovi SP	1	146,00	1,50	0,15
Frakcija SP	3	146,00	1,76	0,26
Blokovi CE	1	202,00	1,50	0,35
Odmirano CE	2	202,00	1,80	0,55
Neovisno mjerenje Odmirano SP	2	146,00	1,742	0,22
Validacija modela		$Q_{kop} =$		0,1885

$$Q_{kop} = -0,488 + (Br_m * 0,0625) + (P_b * 0,005623) + (\rho_n * -0,1545) \quad (7.5)$$

Gdje je: Q_{kop} - učinak kopanja [m³/s],

Br_m – broj pridružen materijalu [-],

P_b – snaga bagera [kW],

ρ_n – nasipna gustoća materijala [kg/m³].

Model za predviđanje učinka kopanja u različitim materijalima provjeren je na jednom neovisnom mjerenju koje nije ulazilo u proračun regresijske analize. Radi se o mjerenju u odmiranom stijenskom materijalu na kamenolomu „Špica“. Rezultati validacije modela prikazani su na dnu tablice 7.15. Dobiveni učinak kopanja vrlo je blizu izmjenenoga te se može zaključiti da je model primjenjiv. Za dobiveni model dodatno je analizirano odstupanje. U tablici 7.16. prikazani su podatci izmjenenog učinka kopanja u pojedinom materijalu i rezultati učinka za svaki materijal proračunatog pomoću modela. Odstupanje je prikazano kao apsolutno i relativno odstupanje rezultata modela od izmjerenih vrijednosti. Maksimalno odstupanje je

zabilježeno je u otkrivci te iznosi 15% dok je prosječno odstupanje 7,76%. S obzirom na to da model objedinjuje rastresite i koherentne materijale čija se svojstva značajno razlikuju, maksimalno odstupanje od 15 % je u ovom slučaju prihvatljivo.

Tablica 7.16. Analiza odstupanja modela za predviđanje učinka kopanja u različitim materijalima

Materijal i lokacija mjerenja	Izmjereno - učinak kopanja (m ³ /s)	Proračunato - učinak kopanja (m ³ /s)	Odstupanje (m ³ /s)	Odstupanje (%)
Odmirano ZV	0,41	0,3814	0,0259	6,36%
Otkrivka ZV	0,56	0,5373	0,0273	4,83%
Frakcija + glina ZV	0,30	0,2909	0,0118	3,90%
Otkrivka suho ZV	0,28	0,2393	0,0444	15,64%
Odmirano GR	0,48	0,4252	0,0579	11,99%
Frakcija GR	0,48	0,4620	0,0149	3,12%
Otkrivka SP	0,26	0,2852	0,0265	10,24%
Frakcija + glina SP	0,28	0,2658	0,0095	3,44%
Blokovi SP	0,15	0,1634	0,0159	10,81%
Frakcija SP	0,26	0,2487	0,0132	5,02%
Blokovi CE	0,35	0,3729	0,0259	7,48%
Odmirano CE	0,55	0,4938	0,0563	10,23%
Prosječno odstupanje			0,0275	7,76%

7.5. Analiza predviđanja parametra granulacije materijala u ovisnosti o dinamičkim i radnim veličinama bagera

Kao jedan od očekivanih doprinosa ovoga rada vezan uz tvrdnju druge hipoteze da granulometrijski sastav predstavlja najutjecajnije značajku rastresitih materijala na učinak hidrauličnoga bagera, ističe se i model procjene značajki stijenskoga materijala na temelju dinamičkih veličina rada bagera. Model je izrađen pomoću regresijske analize čije su ulazne vrijednosti navedene u tablici 7.17. Kao nezavisna varijabla u regresijskoj analizi, odnosno veličina koja se procjenjuje, odabran je granulacijski parametar oblika krivulje (*b*). Parametar (*b*), prema analizi iz poglavlja 7.2. predstavlja najutjecajnije značajku rastresitih materijala na učinak kopanja te je često korišten u struci pri procjeni fragmentacije stijenskog materijala nakon miniranja i drobljenja (Ouchterlony, 2005), stoga je odabran kao značajka materijala za koju je izveden model procjene. Zavisne varijable u regresijskoj analizi, odnosno ulazne vrijednosti modela, predstavljaju dinamičke radne veličine te duljina trajektorije kopanja i snaga stroja. Duljina trajektorije kopanja uzeta je u obzir kao najutjecajnije geometrijska veličina na učinak kopanja dok snaga stroja objedinjuje utjecajne parametre konstrukcije bagera.

Tablica 7.17. Ulazne vrijednosti i validacija modela

Materijal i lokacija	Zavisne varijable						Nezavisna varijabla
	Max snaga (kN)	Prosječna sila (kN/t)	Utrošena energija (kJ/t)	Snaga (kW/t)	Duljina trajektorije kopanja (m)	Snaga bagera (kW)	b
Odnirano ZV	90,59	7,85	56,18	18,06	7,96	178,00	2,257
Frakcija + glina ZV	27,23	6,13	58,66	19,32	7,85	121,00	1,517
Odnirano GR	43,54	2,90	25,96	7,20	9	184,00	1,547
Frakcija GR	48,72	2,75	26,56	6,32	10,71	184,00	2,181
Otkrivka SP	108,56	13,49	110,82	24,86	8,85	146,00	2,253
Frakcija + glina Sp	83,37	11,07	94,31	21,16	9,72	146,00	1,800
Blokovi SP	88,41	13,96	130,25	26,85	10,17	146,00	1,290
Frakcija SP	62,29	9,51	75,88	18,76	9,01	146,00	1,601
Odnirano CE	63,20	4,22	40,57	13,92	8,19	202,00	2,626
Blokovi CE	61,03	6,45	56,24	20,86	9,95	202,00	2,135
Validacija modela							1,770
Odnirano SP	73,12	10,61	98,20	22,55	10,29	146,00	1,560

Izveštaj provedene analize procjene parametra b na temelju dinamičkih veličina rada bagera prikazan je u tablici 7.18. Koeficijent korelacije (r^2) iznosi 0,79 što ukazuje na dobru povezanost ulaznih i izlazne veličine. Koeficijent (*Significance F*) iznosi 0,31 što ne ukazuje na značajnu primjenjivost modela kao ni koeficijenti (*p-value*). Model je ipak izrađen prema izrazu 7.5 i testiran na jednom neovisnom mjerenju koje nije ulazilo u regresijsku analizu. Radi se o mjerenju u odniranom stijenskom materijalu izvedenom na kamenolomu „Špica“ čije su vrijednosti prikazane na dnu tablice 7.17.

Tablica 7.18. Izveštaj regresijske analize procjene parametra (b) na temelju dinamičkih radnih veličina

SUMMARY OUTPUT								
Regression Statistics								
Multiple R	0,889960465							
R Square	0,792029629							
Adjusted R Square	0,376088888							
Standard Error	0,33839621							
Observations	10							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	6	1,30831463	0,218052439	1,904188628	0,319073529			
Residual	3	0,34353599	0,114511995					
Total	9	1,65185062						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	1,699584543	1,5395261	1,103966045	0,350205839	-3,199874613	6,599043699	-3,199874613	6,599043699
Max snaga (kN)	0,033921778	0,01830938	1,852699159	0,160992422	-0,02434685	0,092190406	-0,02434685	0,092190406
Prosječna sila (kN/t)	-0,351921704	0,31095332	-1,13175092	0,340026656	-1,341513938	0,63767053	-1,341513938	0,63767053
Utrošena energija (kJ/t)	0,001502593	0,02426596	0,061921831	0,954519681	-0,075722519	0,078727705	-0,075722519	0,078727705
Snaga (kW/t)	0,076959908	0,06042694	1,273602545	0,29252439	-0,115345593	0,26926541	-0,115345593	0,26926541
Duljina trajektorije kopar	0,060213793	0,18060318	0,333403845	0,760772179	-0,514546119	0,634973705	-0,514546119	0,634973705
Snaga bagera (kW)	-0,008065677	0,0120871	-0,66729626	0,552323316	-0,046532226	0,030400872	-0,046532226	0,030400872

Proračunati rezultat na temelju modela koristeći ulazne vrijednosti neovisnoga mjerenja iznosi 1,77 dok je izmjerena vrijednost 1,56. Razlika izmjerenih i proračunatih vrijednosti iznosi

11,86% što je prihvatljivo. Treba spomenuti da je u proračun modela ulazilo svega 11 mjerenja dok se unutar toga nalazi 5 različitih grupa materijala. Za dobivanje modela veće točnosti potrebno je provesti više mjerenja.

$$b = 1,69958 + 0,033P_{max} - 0,3519P + 0,0015EC + 0,0769P_k + 0,0602l_r + 0,008P_v \quad (7.5)$$

Gdje je: b - koeficijent zakrivljenosti granulometrijske krivulje [-],

P_{max} – maksimalna snaga [kW],

P – prosječna snaga [kW],

EC – utrošak energije [kJ],

P_k – prosječna snaga po ciklusu [kW],

l_r – duljina trajektorije kopanja [m],

P_v -snaga stroja [kW].

Za dobiveni model dodatno je analizirano odstupanje. U tablici 7.19. prikazani su podatci ispitanog parametra (b) na uzorcima materijala i rezultati za svaki materijal proračunati pomoću modela. Odstupanje je prikazano kao apsolutno i relativno odstupanje rezultata modela od ispitanih vrijednosti. Maksimalno odstupanje zabilježeno je u odminiranom materijalu te iznosi 16,82% dok je prosječno odstupanje 8,35%. S obzirom na to da model objedinjuje različite materijale čija se svojstva značajno razlikuju, maksimalno odstupanje od 16,82 % je prihvatljivo.

Tablica 7.19. Analiza odstupanja modela za procjenu parametra (*b*) na temelju dinamičkih veličina rada bagera

Materijal i lokacija	Izmjereno - <i>b</i>	Proračunato - <i>b</i>	Odstupanje	Odstupanje (%)
Odnirano ZV	2,257	2,529	0,272	12,05%
Frakcija + glina ZV	1,517	1,538	0,022	1,42%
Odnirano GR	1,547	1,807	0,260	16,82%
Frakcija GR	2,181	2,071	0,111	5,07%
Otkrivka SP	2,253	2,070	0,183	8,13%
Frakcija + glina Sp	1,800	1,809	0,009	0,49%
Blokovi SP	1,290	1,482	0,191	14,83%
Frakcija SP	1,601	1,388	0,213	13,30%
Odnirano CE	2,626	2,356	0,270	10,30%
Blokovi CE	2,135	2,158	0,023	1,08%
	Prosječno odstupanje		0,16	8,35%

7.6. Analiza predviđanja trajanja kopanja u ovisnosti o značajkama materijala

U trećoj hipotezi ovog rada istaknuto je da se opažanjem dinamičkih radnih veličina bagera mogu unaprijediti modeli proračuna učinka. Ako učinak bagera razložimo na pojedine dijelove ciklusa, u tom slučaju je vrijeme trajanja kopanja dinamička veličina rada bagera koja predstavlja jednu od komponenti učinka. Kako bi se dokazala treća hipoteza, izvedena je regresijska analiza na temelju rezultata mjerenja vremena trajanja kopanja u različitim materijalima te rezultata ispitivanja značajki svakog materijala. Pomoću analize dobiven je model zavisnosti vremena trajanja kopanja o značajkama materijala. Ulazne vrijednosti analize naznačene su u tablici 7.20. Nezavisna varijabala u analizi je vrijeme trajanja kopanja dok su zavisne varijable značajke materijala: parametar (*b*), sadržaj vlage i nasipna gustoća. Navedene značajke materijala odabrane su iz razloga što ih je lako odrediti te se određuju i za druge potrebe u praksi pa je na taj način model naknadno lakše primijeniti.

Tablica 7.20. Ulazne vrijednosti analize zavisnosti vremena trajanja kopanja o značajkama materijala

Materijal i lokacija mjerenja	b	Vlaga (%)	Nasipna gustoća (t/m ³)	Vrijeme trajanja kopanja (s)
Odmirano ZV	2,19	1,52	1,66	3,85
Otkrivka ZV	0,00	44,81	1,46	3,79
Frakcija + glina ZV	1,87	4,74	1,38	3,06
Otkrivka suho ZV	0,00	13,17	1,31	4,18
Frakcija GR	2,14	1,25	1,76	4,35
Otkrivka SP	1,76	16,20	1,78	4,43
Frakcija + glina SP	1,82	2,60	1,84	4,42
Blokovi SP	1,39	0,99	1,50	4,64
Odmirano SP	1,49	1,25	1,74	4,86
Frakcija SP	1,68	1,73	1,76	4,00
Odmirano CE	2,73	1,99	1,80	3,10
Blokovi CE	1,71	0,99	1,50	3,18
Odmirano GR	1,53	1,39	1,79	4,32
Validacija modela		Vrijeme trajanja kopanja (s)		4,63

Izveštaj regresijske analize nalazi se u tablici 7.21. iz kojeg je vidljivo da koeficijent korelacije (r^2) iznosi 0,62 što ukazuje na zadovoljavajuću povezanost ulaznih i izlazne veličine. Koeficijent (Significance F) iznosi 0,04 što ukazuje na značajnu ukupnu primjenjivost modela kao i koeficijenti (p-value) koji ukazuju na dobru pojedinačnu značajnost svake varijable. Model je definiran prema izrazu 7.6 i testiran na jednom neovisnom mjerenju koje nije ulazilo u regresijsku analizu. Radi se o mjerenju u odmiranom stijenskom materijalu izvedenom na kamenolomu „Gradna“ čije su vrijednosti prikazane na dnu tablice 7.20.

Tablica 7.21. Izveštaj regresijske analize zavisnosti vremena trajanja kopanja o značajkama materijala

SUMMARY OUTPUT								
Regression Statistics								
Multiple R	0,790385							
R Square	0,624709							
Adjusted R Square	0,483974							
Standard Error	0,438368							
Observations	12							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	3	2,559036	0,853012	4,438925126	0,040799			
Residual	8	1,5373307	0,1921663					
Total	11	4,0963667						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	0,647051	1,3683024	0,4728862	0,648927538	-2,50826	3,80236227	-2,50825965	3,802362271
b	-1,00356	0,2986011	-3,3608687	0,009918994	-1,69213	-0,3149837	-1,69213442	-0,314983706
Vlaga (%)	-0,03142	0,0152025	-2,0666309	0,072608183	-0,06647	0,00363907	-0,06647488	0,003639066
Nasipna gustoća (t/m ³)	3,169735	0,9882854	3,2073074	0,012474643	0,890745	5,44872545	0,890744869	5,448725447

$$v = 0,647 - 1,003b - 0,0314w + 3,169\rho_n \quad (7.6)$$

Gdje je: v – vrijeme trajanja kopanja [s],

b – parametar granulacije [-],

w – sadržaj vlage [%],

ρ_n – nasipna gustoća [t/m^3].

Proračunati rezultat na temelju modela koristeći ulazne vrijednosti neovisnoga mjerenja iznosi 4,63 s dok je izmjerena vrijednost 4,32 s. Razlika izmjerenih i proračunatih vrijednosti iznosi 6,69% što je prihvatljivo. Treba spomenuti da je u proračun modela ulazilo svega 12 mjerenja dok se unutar toga nalazi 5 različitih grupa materijala. Za dobivanje modela veće točnosti potrebno je provesti više mjerenja. Za dobiveni model dodatno je analizirano odstupanje. U tablici 7.22. prikazani su podatci izmjerenog vremena trajanja kopanja u različitim materijalima i rezultati proračunati pomoću modela. Odstupanje je prikazano kao apsolutno i relativno odstupanje rezultata modela od izmjerenih vrijednosti. Maksimalno odstupanje zabilježeno je u otkrivci te iznosi 15,21% dok je prosječno odstupanje 6,96%. S obzirom na to da model objedinjuje različite materijale čija se svojstva značajno razlikuju, maksimalno odstupanje od 15,21% je prihvatljivo.

Tablica 7.22. Analiza odstupanja modela zavisnosti vremena trajanja kopanja o značajkama materijala

Materijal i lokacija mjerenja	Izmjereno - vrijeme trajanja kopanja (s)	Proračunato - vrijeme trajanja kopanja (s)	Odstupanje	Odstupanje (%)
Odmirano ZV	3,85	3,79	0,06	1,62%
Otkrivka ZV	3,79	3,21	0,58	15,21%
Frakcija + glina ZV	3,06	3,02	0,04	1,29%
Otkrivka suho ZV	4,18	3,97	0,21	5,02%
Frakcija GR	4,35	4,15	0,20	4,60%
Otkrivka SP	4,43	3,99	0,44	9,90%
Frakcija + glina SP	4,42	4,58	0,16	3,51%
Blokovi SP	4,64	4,25	0,39	8,41%
Odmirano SP	4,86	4,52	0,34	7,08%
Frakcija SP	4,00	4,43	0,43	10,63%
Odmirano CE	3,10	3,38	0,28	9,03%
Blokovi CE	3,18	3,41	0,23	7,23%
Prosječno odstupanje			0,28	6,96%

8. ZAKLJUČAK

Cilj ovoga rada bio je istražiti učinak i dinamičke veličine rada bagera u ovisnosti o karakteristikama stijenskoga materijala. U zbirnom pregledu literature u prilogu 1. vidljivo je da su se mnogi autori bavili istraživanjem veličina bitnih za učinak rada bagera. Također se može zaključiti da je većina autora istraživanja bazirala na laboratorijskim ispitivanjima i računalnim simulacijama, dok je tek nekolicina izvodila terenska ispitivanja. Istraživanje u sklopu ove disertacije baziralo se na terenskom mjerenju rada bagera različitih karakteristika u realnim uvjetima na više različitih materijala. Svrha mjerenja bila je ostvariti pristup dinamičkim i geometrijskim veličinama rada bagera te utvrditi utjecaj značajki materijala na njih. Takav pristup u literaturi nije pronađen. Prednost ovoga načina ispitivanja je dostupnost širokoga spektra podataka koji se mogu upotrijebiti za razna istraživanja vezana uz rad bagera. Obradom izmjerenih podataka tlakova i produljenja cilindara na hidrauličkom sustavu bagera dobiveni su dinamički radni parametri, geometrija kopanja i učinak kopanja. Nedostatak ovoga pristupa je veliki rasap podataka zbog više utjecajnih veličina na samo mjerenje u odnosu na laboratorijska mjerenja, gdje se mogu kontrolirati i anulirati određene utjecajne veličine. Zbog toga je potreban veći broj mjerenja te statistička obrada kako bi podatci bili precizniji.

Materijali u kojima su provedena mjerenja posjeduju različite fizikalno-mehaničke značajke te ih nije bilo moguće numerički klasificirati prema nekom svojstvu ili kombinaciji svojstava kako bi se u proračunu jasno razlikovali. Dokaz je tome provedena regresija utjecaja značajki materijala na radne veličine i geometriju kopanja gdje prije uključivanja kategoričkih varijabli podatci nisu pokazivali značajniju zavisnost. Razlog tome je relativno mali broj ispitivanja u pojedinim materijalima. Materijale je zbog toga najprikladnije promatrati zasebno kao kategorije te na temelju toga uspoređivati s pojedinim dinamičkim radnim veličinama ili učinkom.

U okviru rada predložene su tri hipoteze.

Prva hipoteza glasi: Optimalna trajektorija i dinamičke radne veličine kopanja bagerom specifične su u različitim vrstama stijenskoga materijala.

Trajektoriju promatramo kao optimalnu ako uz minimalnu potrošnju energije ostvari maksimalni mogući učinak. Kako bi se ta činjenica detaljno istražila izvedene su regresijske analize utjecaja geometrijskih veličina kopanja na učinak i dinamičke radne veličine. Dokazano je da duljina trajektorije kopanja predstavlja najutjecajniju veličinu na učinak kopanja. Također su provedene analize međusobnih korelacija dinamičkih veličina, geometrije kopanja i učinka

kopanja na jednom odabranom koherentnom i jednom rastresitom materijalu u poglavlju 7.3. Utvrđeno je da najveću korelaciju u oba materijala pokazuje učinak kopanja s duljinom trajektorije i utrošenom energijom. Na temelju toga je zaključeno je da promatranjem date tri veličine u pojedinim materijalima možemo detektirati optimalnu trajektoriju. U poglavlju 7.3. također su grafički uspoređene trajektorije kopanja u rastresitom i koherentnom materijalu na tri različita slučaja. Utvrđeno je da se trajektorije u kojima je postignut gotovo isti učinak u rastresitom i koherentnom materijalu značajnije razlikuju u duljini. Odnosno u rastresitom materijalu trajektorija je duža od trajektorije u koherentnom materijalu. Isti takav trend pojavljuje se u ostalim rezultatima gdje prosječna duljina trajektorije u odnosu na učinak je dulja u krupnijim materijalima. Taj podatak dokazuje dio prve hipoteze da je optimalna trajektorija specifična u različitim materijalima.

Prema rezultatima iz poglavlja 5.5. gdje su prikazane prosječne vrijednosti dinamičkih radnih veličina (sila, snage i utroška energije) za svaki materijal u kojem je izvedeno mjerenje može se zaključiti da su dinamičke radne veličine specifične u različitim materijalima jer pokazuju tendenciju pojavljivanja većih vrijednosti u odminiranom materijalu i otkrivke te manjih u frakciji i blokovima. Također su dokaz tome i regresijske analize u poglavlju 7.1.1. (izvještaji u prilogu 8) gdje se nakon uvođenja kategoričkih varijabli koje grupiraju stijene različitih svojstava, značajno povećaju regresijski koeficijenti. Na temelju svih predočenih činjenica prva hipoteza može se smatrati dokazanom.

Kao očekivani znanstveni doprinos uz prvu hipotezu ističe se model klasifikacije učinka kopanja bagera u različitim materijalima objašnjen u poglavlju 7.4. Model na temelju poznavanja snage stroja i vrste materijala daje očekivani učinak kopanja.

Druga hipoteza glasi: Na učinak hidrauličnoga bagera najutjecajnije značajka je granulometrijski sastav kod rastresitih te vlažnost kod koherentnih stijenskih materijala.

Granulometrijski sastav je prema mnogim autorima definiran kao utjecajna značajka materijala na učinak. U ovom je radu granulometrijski sastav promatran kroz tri parametra. Provedena je regresijska analiza utjecaja značajki materijala na učinak kopanja u rastresitim materijalima. U izvještaju analize (tablica 7.8.) u poglavlju 7.2. vidljivo je da parametar oblika krivulje (b) ima znatno veći koeficijent regresije od ostalih promatranih parametara u analizi. To dokazuje da parametar (b) od promatranih značajki materijala ima najveći utjecaj na učinak te potvrđuje dio hipoteze gdje se tvrdi da na učinak hidrauličnoga bagera najutjecajnije značajka je granulometrijski sastav kod rastresitih materijala.

Kod koherentnih stijenskih materijala na temelju dobivenih rezultata analize utjecaja značajki koherentnih materijala na učinak kopanja (poglavlje 7.2.) rezultati regresijske analize upućuju da bi pri većem broju mjerenja u koherentnim materijalima sadržaj vlage mogao predstavljati najutjecajnije značajku. Zbog toga dio druge hipoteze koji govori o sadržaju vlage kao najutjecajnijem svojstvu potrebno je dodatno istražiti obavljanjem većeg broja ispitivanja na koherentnim materijalima.

Kao znanstveni doprinos uz drugu hipotezu ističe se model procjene parametra oblika krivulje granulometrijskoga sastava (*b*) za rastresite materijale. Model je izveden na temelju regresijske analize dinamičkih radnih veličina (maksimalne snage, prosječne snage kopanja, utroška energije, prosječne sile kopanja) te duljine trajektorije kopanja i snage bagera. U poglavlju 7.5. detaljno je objašnjen i prikazan model te validacija.

Treća hipoteza glasi: Simultanim opažanjem dinamičkih radnih veličina bagera kroz dulje razdoblje moguće je unaprijediti modele proračuna učinka bagera.

U rezultatima obrade podataka terenskih mjerenja dostupni su podatci kontinuiranih praćenja dinamičkih radnih veličine bagera u realnim uvjetima. Vrijeme trajanja kopanja je dinamička veličina rada bagera koja je izdvojena kao jedna od komponenti učinka bagera. Analizom utjecaja značajki materijala na vrijeme trajanja kopanja dobiven je model zavisnosti. Na temelju modela moguće je procijeniti prosječno vrijeme trajanje kopanja u jednom ciklusu rada bagera za materijal poznatih fizikalno-mehaničkih značajki. Proračun učinka bagera moguće je unaprijediti uvođenjem vremena trajanja kopanja kao jedne od komponenata.

POPIS LITERATURE

1. Asenov, E., Bosilkov, E., Dimitrov, R., Damianv, T. (2003): Kinematics and dynamics of hydraulic excavator. *Electrification and Automation in Mines*. 46, 47-49.
2. Blott, S.J. and Pye, K., (2001): A Grain Size Distribution and Statistics Package for the Analysis of Unconsolidated Sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1237-1248.
3. Bosch (2014): BNO055 Intelligent 9-axis absolute orientation sensor. Bosch Sensortec GmbH, Reutlingen.
4. Brînas, I., Andras, A., Radu, S.M., Popescu, F.D., Andras, I., Marc, B.I., Cioclu, A.R. (2021): Determination of the Bucket Wheel Drive Power by Computer Modeling Based on Specific Energy Consumption and Cutting Geometry. *Energies* 14, 3892.
5. Budny, E., Chlost, M., Gutkowski, W. (2003): Load-independent control of a hydraulic excavator. *Autonomation in construction*. 12, 245-254.
6. Chung, S.H. and Katsabanis P.D. (2000): Fragmentation prediction using improved engineering formulae, *Fragblast: International Journal for Blasting and Fragmentation*, 4:3-4, 198-207
7. Chen, J., Qing, F., Pang, X. (2013) Mechanism optimal design of backhoe hydraulic excavator working device based on digging paths. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28, 213-222.
8. Chen, J., Qing, F., Pang, X. (2014): Mechanism optimal design of backhoe hydraulic excavator working device based on digging paths. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 28, 213-222.
9. CPI (2022): Draw Wire Sensors Revisited. URL: <https://www.cpi-nj.com/blog/draw-wire-sensors-revisited> (29.08. 2018)
10. Du, Y., Dorneich, M. C., Steward, B. (2016): Virtual operator modeling method for excavator trenching. *Automation in Construction*, 70, 14–25.
11. Feng, H., Yin, C. B., Weng W. W., Maa, W., Zhou J. J., Jia, W. H., Zhang, Z. L., (2018): Robotic excavator trajectory control using an improved GA based PID controller. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 105, 153–168.
12. Geeks for geeks (2022): Python programming language. <https://www.geeksforgeeks.org/python-programming-language> (26.11.2022)

13. Hadi, S., Jamari, B., Andika, R. M., Chamid, K. (2018). Design and analysis of trapezoidal bucket excavator for backhoe. SHS Web of Conferences. 49.
14. Hanh, L. D., Kwan, K., Kha, N. B. and Jo, W. K. (2009) :Trajectory control of electro-hydraulic excavator using fuzzy self tuning algorithm with neural network. Mechanical science and technology. 23, 149-160.
15. Hippalgaonkar, R., Ivantysynova, M., (2016): Optimal Power Management of Hydraulic Hybrid Mobile Machines – Part I: Theoretical Studies, Modeling and Simulation. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control. 138.
16. Ito, M., Raima, C., Saiki, S., Yamazaki, Y., Kurita, Y. (2020): A Study on Machine Instability Feedback During Digging Operation in Teleoperated Excavators, 13th International Conference on Human System Interaction (HSI), Tokyo, Japan, 2020, pp. 14-19.
17. Jassim, H.S.H.; Lu, W., Olofsson, T. (2018): Quantification of Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions During Excavator Operations. In: Smith, I., Domer, B. (eds) Advanced Computing Strategies for Engineering. EG-ICE 2018. Lecture Notes in Computer Science, 10863. 431–453.
18. Jecić, S. (1989): Mehanika II kinematika i dinamika, Tehnička knjiga Zagreb
19. Fournier, J. and Gallon, R. (2012): G2Sd Grain-size statistics and description of sediment. hal-00671719
20. Juza, M., Hermanek, P. (2022): Study of the energy efficiency of the USD 214 Excavator hydraulic system. MM Science journal. October, 2022.
21. Jovanović, V., Janošević, D. and Petrović, N., (2014): Experimental determination of bearing loads in rotating platform drive mechanisms of hydraulic excavators. Mechanical Engineering. 12, 157 – 169.
22. Kailei Liu, K., Gao, Y., Tu, Z. and Lin, P. (2016): Energy-saving analysis of the independent metering system with pressure compensation for excavator's manipulator. Journal of systems and control engineering. 230, 905-920.
23. Kim, B. Y., Ha, J., Kang, H., Kim, P. Y., Park, J., Park, F.C. (2013) Dynamically optimal trajectories for earthmoving excavators. Automation in Construction. 35, 568–578

24. Kiusalaas, J. (2010): Numerical Methods in Engineering with Python. New York. Cambridge University Press.
25. Klanfar, M., Herceg, V., Kuhinek, D., Sekulić, K. (2018): Construction and testing of the measurement system for excavator productivity. Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 34, 51-58.
26. Koivo, A. J. (1994): Kinematics of excavators (backhoes) for transferring surface material. Journal of Aerospace Engineering. 7, 17–32
27. Koivo, A. J., Thoma, M., Kocaoglan, E., Andrade-Cetto J., (1996): modeling and control of excavator dynamics during digging operation. Aerospace Engineering. 9,10-18
28. Kvasnička, P i Domitrović, D. (2007): Mehanika tla – Interna skripta, Rudarsko geološko naftni fakultet.
29. Kujundžić, T., Klanfar, M., Korman, T., Briševac, Z. (2021): Influence of Crushed Rock Properties on the Productivity of a Hydraulic Excavator. Applied Sciences. 11(5), 2345.
30. Kumar, B and Alam, T. (2016): Excavator bucket tooth wear analysis. International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)
31. Kusmierczyk, J. and Szlagowski, J. (2008): Automated excavation process analysis for given trajectory and soil parameters. International Symposium on automation and robotics in construction. 2008, 26-29.
32. Kwon, S. K., Kim, J. J., Jung, Y. M., Jung, C. S., Lee, C. D., Yang, S. Y. (2008): A hydraulic simulator for an excavator. JFPS International Symposium on Fluid Power. 2008, 7-3, 611-616.
33. Lee, H. S., Changa, S. L. and Linb, K. H. (2004): A study of the design, manufacture and remote control of a pneumatic excavator. International Journal of Mechanical Engineering Education. 32/4
34. Lee, S. L. and Chang, P. H. (2012): Modeling of a hydraulic excavator based on bond graph method and its parameter estimation. Journal of Mechanical Science and Technology. 26, 195-204.
35. Lee, S., Hong, D., Park, H., and Bae, J. (2008): Optimal Path Generation for Excavator with Neural Networks Based Soil Models. IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Inteligent Systems. (20-22 Aug. 2008).

36. Li, X., Wang, G., Miao, S. and Li, X. (2017): Optimal design of a hydraulic excavator working device based on parallel particle swarm optimization. The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. Tehnical paper 2017.
37. Manger, G. E. (1963): Porosity and bulk density of sedimentary rocks. Geological survey bulletin 1144-E.
38. Megatred, poslovna rješenja (2022): rast programskog jezika Python <https://www.megatrend.com/rast-programskog-jezika-python/> (13.11.2022)
39. Microchip (2002): 2.7 4-Channer/8-Channel 12-Bit A/D Converters with SPI Serial Interface - MCP304/3208 datasheet. Microchip Technology Inc. Chandler.
40. MicroEpsilon (2015): Draw wire displacement sensors - instruction manual. Micro-epsilon Messtechnik GmbH & Co. Ortenburg.
41. Ministarstvo gospodarstva (2022): Rudarstvo :<https://mingor.gov.hr/djelokrug/uprava-za-industriju-poduzetnistvo-i-obrt-6090/rudarstvo/jisms-rh/bilanca-stanja-rezervi-mineralnih-sirovina/6985> (12.11.2022)
42. Mitrev, M., Janošević, D., Marinković, D. (2017): Dynamical modeling of hydraulic excavator considered as a multibody sistem. Technical Gazette. 24, 327-338.
43. Nikkhah, A. Vakylabad, A.B. Hassanzadeh, A. Niedoba, T. Surowiak, A. (2022): An Evaluation on the Impact of Ore Fragmented by Blasting on Mining Performance. Minerals 2022, 12, 258.
44. Ouchterlony, F. (2005): The Swebrec function: linking fragmentation by blasting and crushing. Mining Technology, Vol. 114 A29.
45. Patel, B. P. and Prajapati, M. (2012): Evaluation of Bucket Capacity, Digging Force Calculations and Static Force Analysis of Mini Hydraulic Backhoe Excavator. Machine Design. 4, 59–66.
46. Richardson-Little, W. and Damaren, C. (2008): Position Accommodation and Compliance Control for Robotic Excavation. Journal of aerospace engineering. 21, 27-34.
47. Spong, M. W., Hutchinson, S., Vidyasagar, M. (2005): Robot Modeling and Control. John Wiley and Sons. New York, 407 p.

48. Swick, W.C., and Perumpral, J.V. (1988): A model for predicting soil-tool interaction, *Journal of Terramechanics*, Volume 25(1), 43-56.
49. Tiwari, R., Knowles, J., Danko, G. (2013): Bucket trajectory classification of mining excavators. *Automation in Construction*. 31, 128–139.
50. Torres-Rodriguez, H.I., Parra-Vega, V. Ruiz-Sanchez, F.J. (2004): Dynamic Haptic Training System for the Operation of an Excavator. *International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)*. Acapulco, Guerrero; Mexico September 8-10. 2004
51. Ur Rehman, A. (2021): Using similitude theory and discrete element modeling to understand the effects of digging parameters on excavation performance for rubber tire loaders, *Doctoral Dissertations*. 3021.
52. Vaiha, P. K. and Skibniewski, M. J. (1993): Dynamic model of excavator. *Aerospace Engineering*, 6, 148-158.
53. Vladeanu, A. and Vladeanu, G. (2017): The displacement of the excavator bucket on the optimum trajectory through the control of the hydraulic cylinders lengths. *Romanian journal of technical sciences*. 62, 105-117.
54. Wika (2011): Pressure transmitter for general industrial applications – A10 datasheet. Wika instrument Corporation, Lawrenceville
55. Xu, J., and Yoon, H. S., (2016) A Review on Mechanical and Hydraulic System Modeling of Excavator Manipulator System. *Journal of Construction Engineering*. 2016, 11p.
56. Zhao, Y. Wang, J. Zhang Y., Luo, C. (2020): A Novel Method of Soil Parameter Identification and Force Prediction for Automatic Excavation, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 11197-11207.
57. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, (2021). Površinski kop <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=49858> (3. 3. 2022.)
58. Stueland, S. (1994). The Otis Steam Excavator. *Technology and Culture*, 35(3), 571–574.

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Otkopane količine tehničko građevnog kamena u RH (Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja RH, 2022)	4
Slika 3.1. Hidraulični bager s dubinskom lopatom (Flickr, 2023).....	11
Slika 3.2. Proračun kinematike s dva stupnja slobode (Hanh i sur., 2009).....	15
Slika 3.3. Kinematika bagera (Koivo, 1994).....	15
Slika 3.4. Kinematika mehanizma bagera (Lee i sur., 2002)	16
Slika 3.5. Model mehanizma ruke i katarke (Assenov i sur., 2003)	17
Slika 3.6. Kinematika katarke bagera	18
Slika 3.7. Kinematika ruke bagera	19
Slika 3.8. Kinematika lopate bagera.....	20
Slika 3.9. Pomoćni koordinatni sustavi.....	22
Slika 3.10. Trajektorija kretanja lopate (Kim i sur., 2013)	23
Slika 3.11. Kretanje zuba u radnom ciklusu (Du i sur., 2016).....	24
Slika 3.12. Proces kopanja (Zhao i sur., 2020)	25
Slika 3.13. Realna trajektorija kopanja	26
Slika 3.14. Geometrija kopanja	26
Slika 3.15. Efektivna sila cilindra lopate.....	30
Slika 3.16. SAE J1179 standard (Patel i Prajapati, 2012)	30
Slika 3.17. Sile na zubu lopate	31
Slika 3.18. Skica mjerenja mase materijala u lopati na cilindru katarke a) i na cilindru lopate b)	35
Slika 4.1. Postavljanje mjernoga sustava na bager (Klanfar i sur., 2018).....	38
Slika 4.2. Ugradnja linearnoga mjernog pretvornika položaja.....	39
Slika 4.3. Spajanje mjernoga pretvornika tlaka (Klanfar i sur., 2018).....	40

Slika 4.4. Kućište jedinice za pohranu podataka.....	41
Slika 4.5. Dinamometar.....	43
Slika 4.6. Probno terensko mjerenje – Donja Zelina.....	47
Slika 4.7. Volvo EC290CL - kamenolom "Sv. Juraj – Sv. Kajo"	48
Slika 4.8. CAT 330FLN - kamenolom "Zvečaj".....	50
Slika 4.9. Caterpillar 323 ELN - kamenolom " Zvečaj"	51
Slika 4.10. Komatsu PC340 NLC - kamenolom "Gradna"	52
Slika 4.11. Doosan XD 300 LCA - kamenolom "Špica"	53
Slika 4.12. Komatsu PC 360LC - kamenolom "Čelina"	54
Slika 4.13. Terensko određivanje nasipne gustoće	55
Slika 4.14. Model bagera PhotoScan	57
Slika 4.15. Označavanje karakterističnih točaka na fotografijama	57
Slika 4.16. Određivanje mase uzorka na elektronskoj vagi	58
Slika 4.17. Određivanje granulometrijskoga sastava nekoherentnih materijala	60
Slika 4.18. Analiza granulometrijskoga sastava materijala u softveru WipFrag	61
Slika 4.19. Dijagram granulometrijskoga sastava u softveru WipFrag.....	61
Slika 4.20. Grafički prikaz podataka mjerenja i RR distribucije	64
Slika 5.1. Blok dijagram prikaz programa za obradu podataka	67
Slika 5.2. Blok dijagram proračuna koordinata vrha lopate.....	68
Slika 5.3. Koordinate vrha lopate.....	69
Slika 5.4. Putanja kretanja vrha lopate	70
Slika 5.5. Blok dijagram proračuna tlaka u cilindrima	71
Slika 5.6. Usrednjavanje podataka tlaka	72
Slika 5.7. Proračun efektivne sile na cilindrima.....	72
Slika 5.8. Efektivna sila na cilindru lopate.....	73

Slika 5.9. Proračun sile na zubu lopate	74
Slika 5.10. Sile na zubu lopate	75
Slika 5.11. Postupak razdvajanja ciklusa	76
Slika 5.12. Razdvajanje ciklusa po fazama	77
Slika 5.13. Prosječne sile kopanja.....	78
Slika 5.14. Potrošnja energije.....	79
Slika 5.15. Rezultati prosječne snage.....	80
Slika 5.16. Postupak izdvajanja mase materijala u lopati	81
Slika 5.17. Pomoćni parametri za određivanja mase materijala u lopati	82
Slika 5.18. Rezultati mase materijala u lopati	83
Slika 5.19. Razdvajanje ostalih veličina.....	84
Slika 5.20. Rezultati kuta λ	85
Slika 5.21. Rezultati duljine i površine reza.....	86
Slika 5.22. Rezultati prosječnoga vremena trajanja kopanja	87
Slika 5.23. Rezultati učinka kopanja.....	88
Slika 6.1. Usporedba mase na dinamometru i sile kopanja.....	91
Slika 7.1. Izvještaj regresijske analize iz MS Excela	93
Slika 7.2. Usporedba trajektorija kopanja	104
Slika 7.3. Jedinični učinak kopanja u različitim materijalima	107
Slika 7.4. Pregled tehničkoga učinka kopanja.....	107

POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Karakteristike mjernih pretvornika i korekcijske funkcije.....	41
Tablica 4.2. Karakteristike mjernoga pretvornika sile	42
Tablica 4.3. Provjera koordinata	47
Tablica 4.4 Podatci o bageru Volvo EC290 CL.....	47
Tablica 4.5. Lokacije mjerenja, materijali i broj ciklusa kopanja	49
Tablica 4.6. podatci o bageru - CAT 330FLN	50
Tablica 4.7. Podatci o bageru - CAT 323 ELN	51
Tablica 4.8. Podatci o bageru - Komatsu PC340 NLC	52
Tablica 4.9. Podatci o bageru - Doosan XD 300 LCA.....	53
Tablica 4.10. Podatci o bageru - Komatsu PC 360LC	54
Tablica 4.11. Sadržaj vlage	59
Tablica 4.12. Rezultati ispitivanja svojstava materijala.....	62
Tablica 4.13. Proračun koeficijenta (n).....	63
Tablica 6.1. Provjera koordinata mjernom vrpcom.....	89
Tablica 6.2. Provjera koordinata određenih fotogrametrijskom metodom	90
Tablica 6.3. Razlika sile kopanja i sile na dinamometru.....	91
Tablica 7.1. Podatci za provođenje višestrukih regresijskih analiza zavisnosti dinamičkih veličina o svojstvima materijala	95
Tablica 7.2. Koeficijenti korelacije za višestruku linearnu regresiju	95
Tablica 7.3. Koeficijenti regresijske analize s kategoričkim varijablama.....	96
Tablica 7.4. Ulazne vrijednosti za nelinearnu regresijsku analizu	98
Tablica 7.5. Rezultati koeficijenata nelinearne regresijske analize zavisnosti dinamičkih veličina o svojstvima materijala	98
Tablica 7.6. Regresijski koeficijenti.....	99

Tablica 7.7. Podatci za analizu zavisnosti značajki rastresitih materijala o učinku kopanja.	100
Tablica 7.8. Izvještaj regresijske analize utjecaja značajki rastresitih materijala na učinak kopanja	101
Tablica 7.9. Podatci za analizu zavisnosti značajki koherentnih materijala o učinku kopanja	101
Tablica 7.10. Izvještaj regresijske analize utjecaja značajki koherentnih materijala na učinak kopanja	102
Tablica 7.11. Korelacije između dinamičkih i geometrijskih veličina kopanja	103
Tablica 7.12. Ulazne vrijednosti za regresijsku analizu utjecaja geometrijskih veličina kopanja na učinak	105
Tablica 7.13. Analiza utjecaja geometrijskih veličina kopanja na učinak kopanja.....	106
Tablica 7.14. Izvještaj regresijske analize.....	108
Tablica 7.15. Ulazne vrijednosti za regresijsku analizu i validacija modela	109
Tablica 7.16. Analiza odstupanja modela za predviđanje učinka kopanja u različitim materijalima.....	110
Tablica 7.17. Ulazne vrijednosti i validacija modela	111
Tablica 7.18. Izvještaj regresijske analize procjene parametra (b) na temelju dinamičkih radnih veličina	111
Tablica 7.19. Analiza odstupanja modela za procjenu parametra (b) na temelju dinamičkih veličina rada bagera.....	113
Tablica 7.20. Ulazne vrijednosti analize zavisnosti vremena trajanja kopanja o značajkama materijala.....	114
Tablica 7.21. Izvještaj regresijske analize zavisnosti vremena trajanja kopanja o značajkama materijala.....	114
Tablica 7.22. Analiza odstupanja modela zavisnosti vremena trajanja kopanja o značajkama materijala.....	115

POPIS SIMBOLA

SIMBOL	JEDINICA	OPIS
ρ_n	[t/m ³]	Nasipna gustoća materijala
V_m	[m ³]	Volumen materijala
m	[t]	Masa uzorka
w	[%]	Sadržaj vlage
m_w	[g]	Masa vode
m_m	[g]	Masa uzorka prije sušenja
m_d	[g]	Masa uzorka nakon sušenja
Q_t	[m ³ /h]	Teoretski učinak bagera
t_c	[s]	Trajanje radnog ciklusa
V_0	[m ³]	Volumen lopate
a_1	[m]	Duljina cilindra katarke bagera (slika 3.6)
b_1	[m]	Udaljenost zglobova na kupoli (slika 3.6)
c_1	[m]	Udaljenost zglobova na katarci (slika 3.6)
α_1	[°]	Kut između osi c_1 i b_1 (slika 3.6)
α_1'	[°]	Kut između osi c_1 i osi katarke (slika 3.6)
α_1''	[°]	Kut između horizontalne ravnine i osi b_1 (slika 3.6)
ϕ_1	[°]	Kut između osi katarke i horizontalne ravnine (slika 3.6)
a_2	[m]	Duljina cilindra ruke bagera (slika 3.7)
b_2	[m]	Udaljenost gornjeg zgloba cilindra ruke i zgloba između ruke i katarke (slika 3.7)
c_2	[m]	Udaljenost zglobova na ruci (slika 3.7)
α_2	[°]	Kut između osi c_1 i osi katarke (slika 3.7)
α_2'	[°]	Kut između osi katarke i osi c_2 (slika 3.7)
α_2''	[°]	Kut između osi ruke i osi b_2 (slika 3.7)
ϕ_2	[°]	Kut između osi katarke i osi ruke (slika 3.7)
a_3	[m]	Duljina cilindra lopate bagera (slika 3.8)
b_3	[m]	Dužina poprečne poluge na mehanizmu za pokretanje lopate (slika 3.8)
c_3	[m]	Udaljenost zglobova na lopati (slika 3.8)

α_3	[°]	Kut između osi b_3 i osi c_3 (slika 3.8)
α_3'	[°]	Kut između osi ruke i osi r (slika 3.8)
α_3''	[°]	Kut između osi r i osi c_3 (slika 3.8)
α_3'''	[°]	Kut između osi lopate i osi p (slika 3.8)
ϕ_3	[°]	Kut između osi lopate i osi ruke (slika 3.8)
p	[m]	Udaljenost zglobova na lopati (slika 3.8)
r	[m]	Udaljenost zglobova na ruci (slika 3.8)
e	[m]	Duljina dijagonale u mehanizmu za pokretanje lopate (slika 3.8)
t	[m]	Duljina uzdužne poluge u mehanizmu za pokretanje lopate (slika 3.8)
γ	[°]	Kut između osi r i osi e (slika 3.8)
δ	[°]	Kut između osi e i osi p (slika 3.8)
θ_1	[°]	Kut koji zatvara os katarke s horizontalnom ravninom (slika 3.9)
θ_2	[°]	Kut koji zatvara os ruke s horizontalnom ravninom (slika 3.9)
θ_3	[°]	Kut koji zatvara os lopate s horizontalnom ravninom (slika 3.9)
XV_i	[m]	X – koordinata promatranog zgloba ili vrha lopate
ZV_i	[m]	Z – koordinata promatranog zgloba ili vrha lopate
X_{Ti}	[m]	X – koordinata točke na trajektoriji kopanja
Z_{Ti}	[m]	Z – koordinata točke na trajektoriji kopanja
P_r	[m ²]	Površina reza (slika 3.14)
Δs_i	[m]	Razmak između točaka na trajektoriji kopanja (slika 3.14)
l_r	[m]	Duljina reza (slika 3.14)
P_1	[b]	Tlak u potisnoj komori cilindra (slika 3.15)
P_2	[b]	Tlak u povratnoj komori cilindra (slika 3.15)
D_p	[m]	Unutarnji promjer cilindra (slika 3.15)
D_c	[m]	Promjer klipa (slika 3.15)
F_c	[kN]	Efektivna sila cilindra (slika 3.15)
F_{cR}	[kN]	Projekcija sile F_c na uzdužnu polugu kojom je vezan cilindar s lopatom (slika 3.15)

F_b	[kN]	Sila koju generira cilindar lopate na vrh zuba (slika 3.15)
F_R	[kN]	Projekcija sile F_b na tangentu trajektorije kretanja lopate (slika 3.15)
λ	[°]	Razlika kuta upada sile F_R i F_b (slika 3.15)
EC_i	[kJ]	Potrošnja energije u mjernom intervalu
EC	[kJ]	Ukupna potrošnja energije po ciklusu
PK_i	[kW]	Snaga kopanja u mjernom intervalu
v	[s]	Vrijeme trajanja kopanja
M_c	[Nm]	Moment u zglobu lopate
M	[t]	Masa pune lopate
M_0	[t]	Masa prazne lopate
m	[t]	Masa materijala u lopati
l_x	[m]	Udaljenosti od zgloba do težišta lopate
Q_s	[m ³ /s],[t/s]	Učinak kopanja
Pu_i	[b]	Usrednjena vrijednost tlaka
P_i	[b]	Vrijednost tlaka prije usrednjavanja
S_x	[-]	Standardna devijacija
μ	[-]	Srednja vrijednost skupa
x	[-]	Član skupa
i	[-]	Redni broj člana skupa
x_i	[-]	Svaki podatak skupa
n	[-]	Broj članova skupa
r^2	[-]	Koeficijent korelacije

PRILOZI

PRILOG 1 Zbirni pregled literature vezane uz kinematiku i dinamiku bagera

RB.	Autori	God.	Kinematika	Dinamika	Trajektorija	Sile kopanja	Tlak u cilindrima	Produljenje cilindara	Kut zakretanja	Simulacija	Laboratorij	Terenska mjerenja	Rezultati	Primjena
1	Vaha et al.	1993	✓	✓									Kinematički i dinamički model bagera	Razvoj automatiziranog sustava
2	Koivo	1994	✓										Detaljan matematički model kinematike bagera	Osnova za automatsko računalno upravljanje
3	Koivo et al.	1996	✓	✓									Kinematički i dinamički model	Autonomno upravljanje
4	Assenov et al.	2003	✓	✓						✓			Odnosi sila u cilindrima i zglobovima	Projektiranje kontrolnog sustava
5	Bundy et al.	2003	✓	✓	✓					✓			Testiranje tlačno neovisnih ventila	Pomoćni sustav za kopanje
6	Lee et al.	2008			✓	✓					✓	✓	Testiranje optimalne putanje kopanja	Optimizacija rada bagera
7	Richardson-Little and Damaren	2008				✓				✓	✓		Model interakcije tla i lopate	Razvoj kontrole usklađivanja s optimalnom trajektorijom
8	Kwon et al.	2008	✓	✓			✓		✓	✓	✓		Razvijen simulator rada bagera	Ispitivanje performansi
9	Kusmierzyk and Szlagowski	2008	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		Optimizacija kopanja	Autonomno upravljanje
10	Patel & Prajapati	2012	✓			✓				✓			Analiza sila kopanja	Autonomno upravljanje
11	Lee and Chand	2012	✓	✓			✓	✓		✓		✓	Model proračuna za procjenu parametara	Projektiranje bagera
12	Chen & Qing	2013	✓	✓	✓	✓				✓			Optimizacija trajektorije i sila kopanja	Projektiranje bagera
13	Kim et al.	2013	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓	Uspoređena Optimalna i realna trajektorija kopanja i	Edukacija operatera i autonomni proces
14	Kang et al.	2014			✓		✓	✓	✓			✓	Algoritam za usklađivanje trajektorije	Projektiranje regulatora idealne trajektorije
15	Jovanović et al.	2014	✓	✓					✓			✓	Model napreznja rotirajućeg prstena	Odabir ležajeva, ostale dinamičke analize bagera
16	Du et al.	2016	✓	✓	✓					✓			Virtualni model operatera	Procjena učinka i automatizacija
17	Liu et al.	2016				✓	✓			✓	✓		Testiranje kompenzacijskog regulatora	Ušteda energije
18	Mitrev et al.	2017	✓	✓		✓				✓			Kinematički i dinamički model bagera	Automatizacija, projektiranje sustava
19	Li et al.	2017	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓	Simulacija, optimizacija rada	Projektiranje sustava
20	Feng Et al.	2017	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		Testiran sustav za praćenje trajektorije kretanja lopate	Kontrola trajektorije
21	Vladeanu and Vladeanu	2017	✓	✓	✓			✓					Optimizacija trajektorije	Automatizacija i sustav za praćenje trajektorije

PRILOG 2

Nasipna gustoća materijala određena na terenu i u laboratoriju

Mjerenje	Materijal	Nasipna gustoća				
		Volumen kutije (m ³)	Masa prazne kutije (kg)	Masa uzorka s kutijom (kg)	Masa uzorka (kg)	Nasipna gustoća (kg/m ³)
Zvečaj I	Minirano	1	155	1813	1658	1658
	Otkrivka mokro	0,0024	0,6601	4,1798	3,5197	1467
Zvečaj II	Fracija	0,0095	1,136	14,311	13,175	1387
	Otkrivka suho	0,0012	0,652	2,219	1,567	1306
Gradna	Odminirano	0,008	1,131	15,4285	14,2975	1787
	Okršeno	0,007	1,135	13,4523	12,3173	1760
Špica	Otkrivka	1	161	1941	1780	1780
	Tampon s glinom	1	161	2002	1841	1841
	Blokovi	-	-	-	-	1500
	Odminirano	1	161	1903	1742	1742
	Tampon čist	1	161	1918	1757	1757
Čelina	Minirano	1	194	1998	1804	1804
	Blokovi	1	-	-	-	1500

PRILOG 3

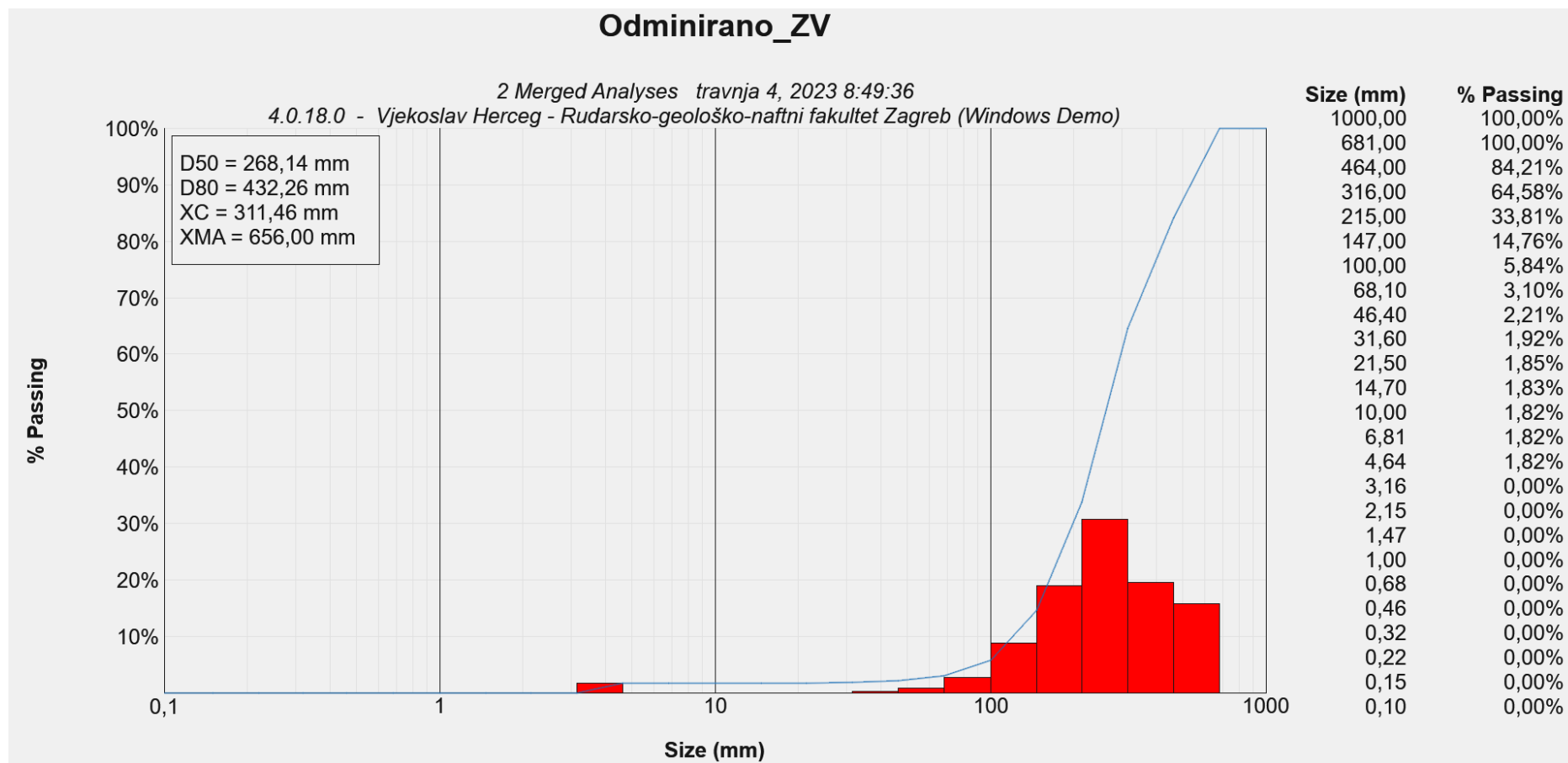
Ispitivanje sadržaja vlage

Br	Lokacija	Uzorak	Masa vlažnog uzorka i posude (g)	Masa posude (g)	Masa suhog uzorka i posude (g)	Masa vlažnog uzorka	Masa suhog uzorka	Postotak vlage (%)
1.	Zvečaj	Otkrivka	1315,6	418,5	1038	897,1	619,5	44,81%
	Zvečaj	Oadminirano	-					<1%
2.	Gradna	Oadminirano	7495,2	441,8	7398,7	7053,4	6956,9	1,39%
	Gradna	Frakcija	8756,7	441,8	8654,3	8314,9	8212,5	1,25%
3.	Špica	Otkrivka	2118,1	253,2	1858,1	1864,9	1604,9	16,20%
	Špica	Frakcija + glina	5235,3	441,8	5113,6	4793,5	4671,8	2,60%
	Špica	Blokovi	-					<1%
	Špica	Oadminirano	-					<1%
	Špica	Frakcija	2466,7	491,9	2433,1	1974,8	1941,2	1,73%
4.	Čelina	Oadminirano	6592,2	441,8	6472,4	6150,4	6030,6	1,99%
	Čelina	Blokovi	-					<1%
5.	Zvečaj	Otkrivka	2656,7	491,8	2404,8	2164,9	1913	13,17%
	Zvečaj	Frakcija + glina	969,3	253	936,9	716,3	683,9	4,74%

PRILOG 4

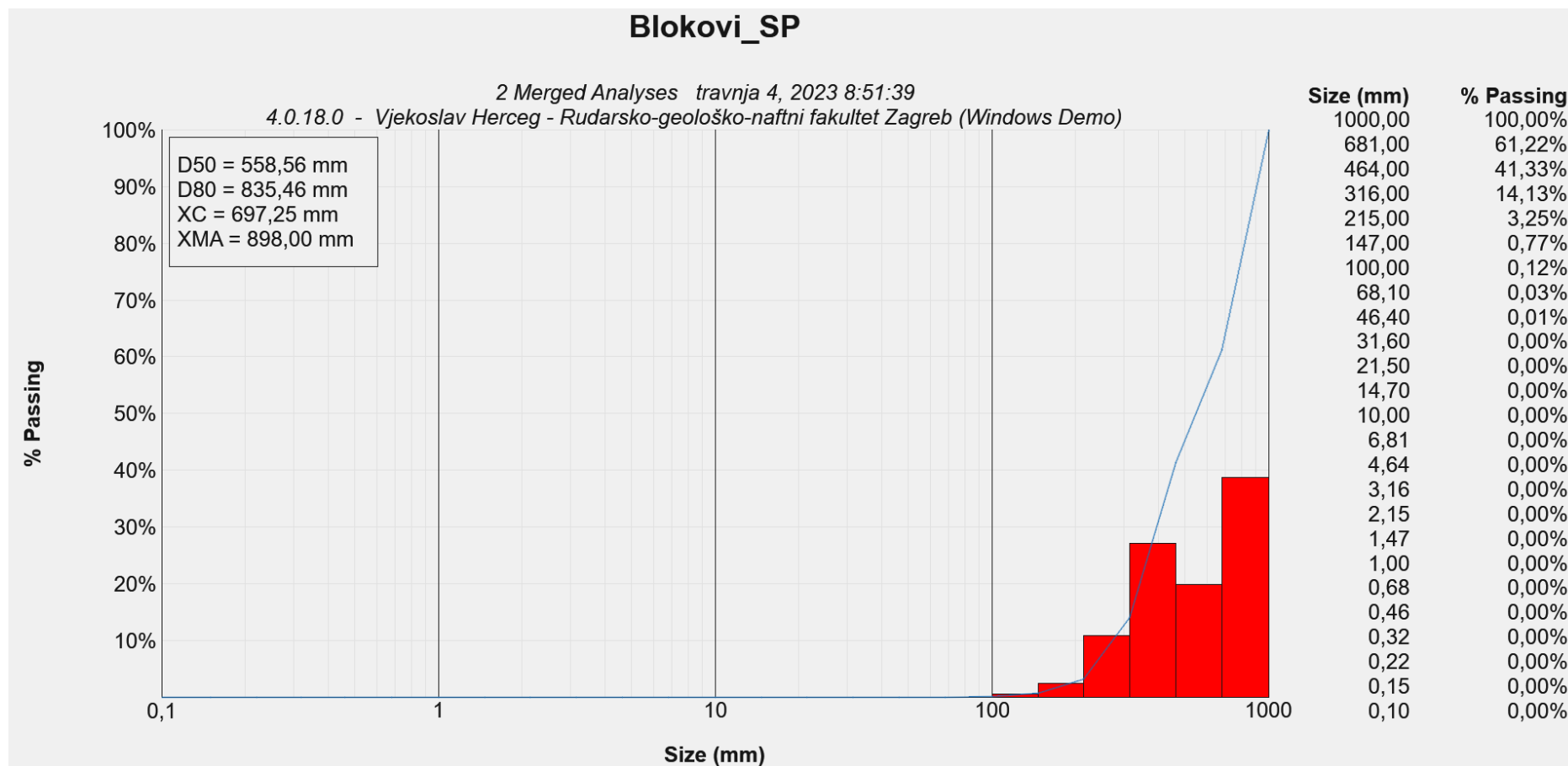
List 1

Izvjestaj ispitivanja granulometrijskoga sastava odminiranoga materijala s kamenoloma „Zvečaj“



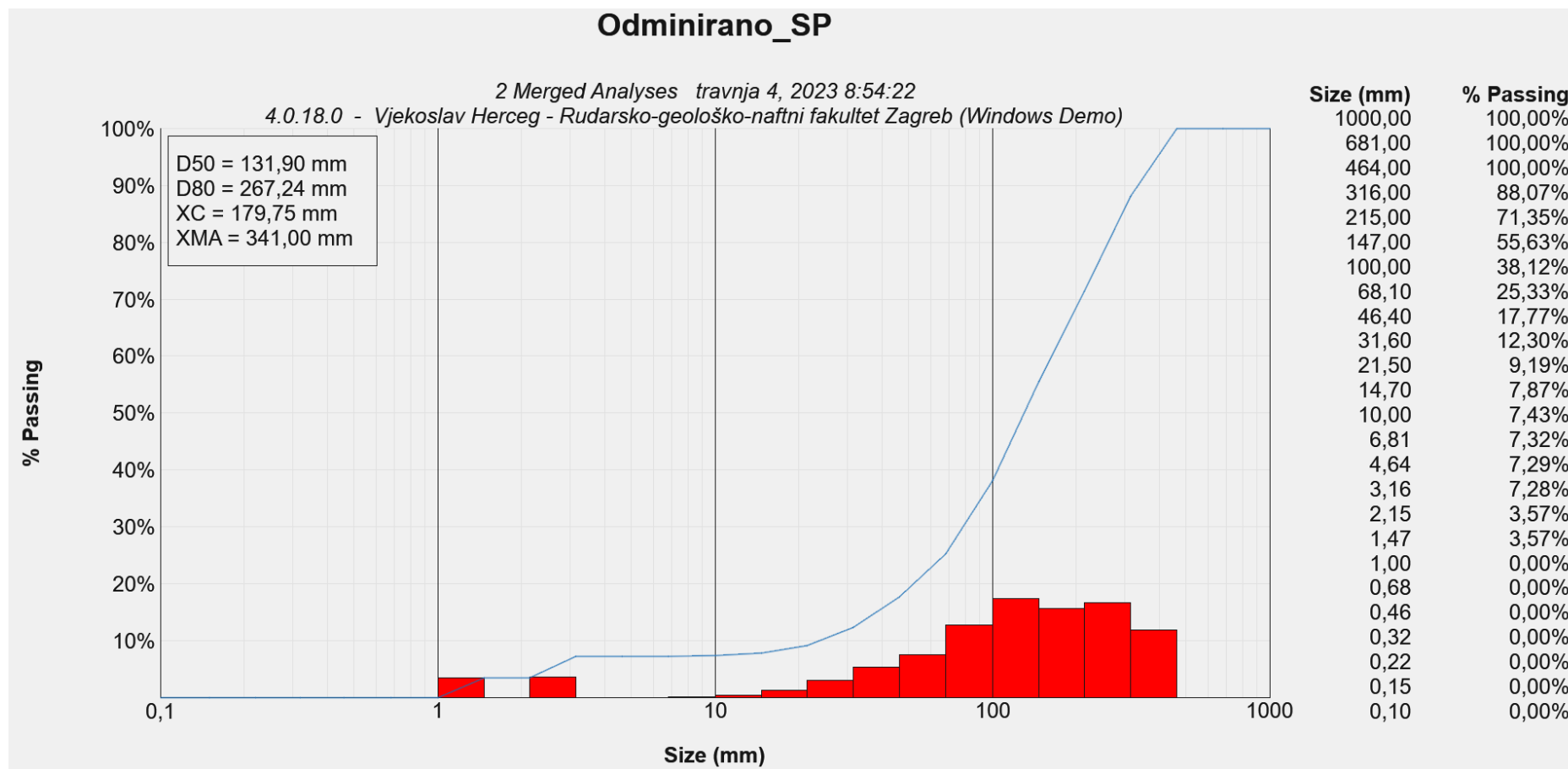
List 2

Izveštaj ispitivanja granulometrijskoga sastava blokova s kamenoloma „Špica“



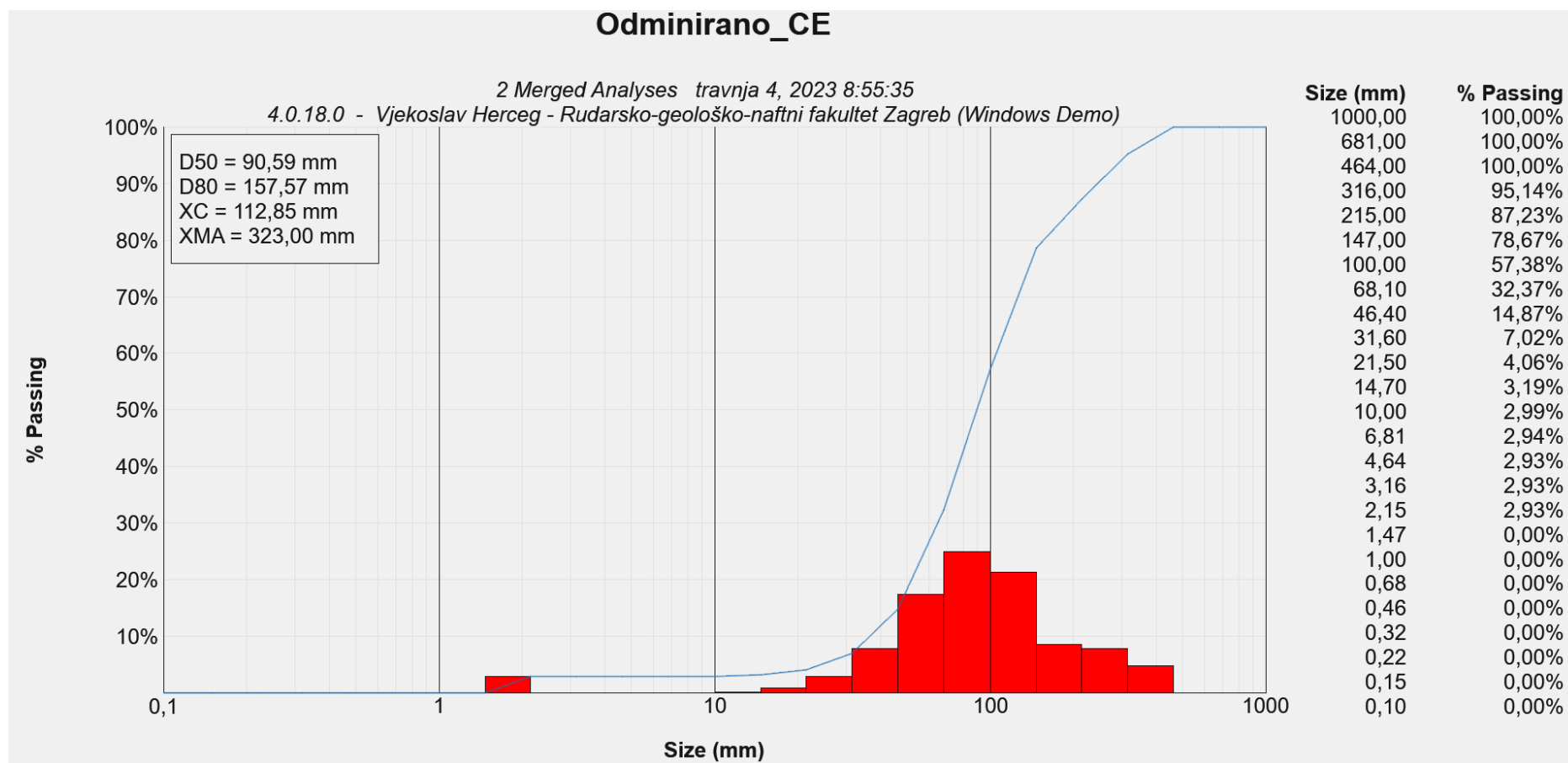
List 3

Izveštaj ispitivanja granulometrijskoga sastava odminiranoga materijala s kamenoloma „Špica“

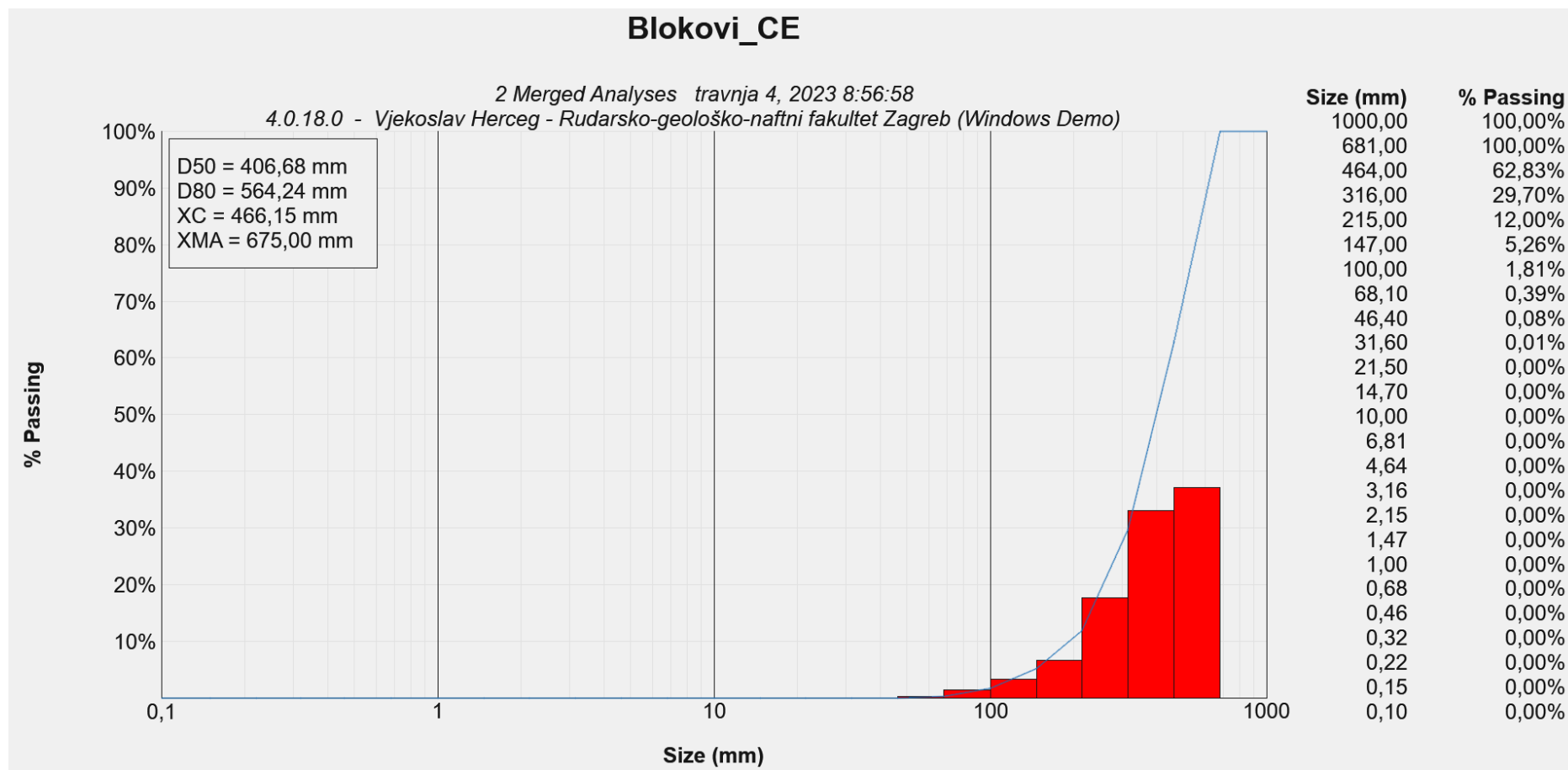


List 4

Izveštaj ispitivanja granulometrijskoga sastava odminiranoga materijala s kamenoloma „Čelina“




Izveštaj ispitivanja granulometrijskoga sastava blokova s kamenoloma „Čelina“



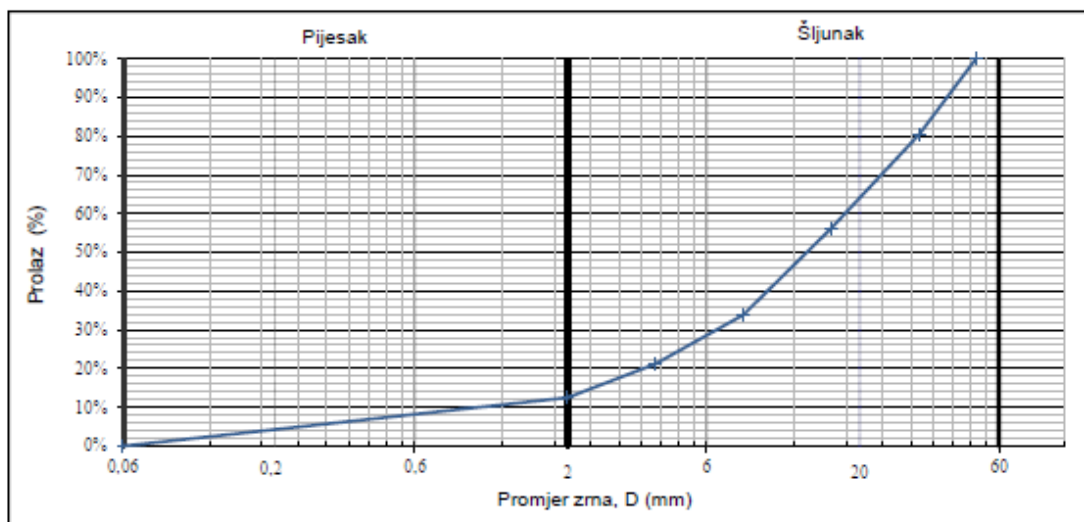
List 6

Izveštaj ispitivanja granulometrijskoga sastava frakcije s glinom s kamenoloma „Špica“

 Sveučilište u Zagrebu RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET HR-10002 Zagreb, Pločeva 6, p.p. 079	Zavod za rudarstvo i geotehniku GEOMEHANIČKI LABORATORIJ Tel./Fax: +385 1 48 36 061
---	--

IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU Granulometrijski sastav tla

Radni nalog: 16-009 Datum ispitivanja: 01.12.21
Naručitelj: RGNF
Projekt: Frakcija+glina_SP
Lokacija: Kamenolom "Špica"
Uzorak br.: 01.01.00 Bušotina: - Dubina: - m
Opis uzorka: -
Metoda ispitivanja: ASTM D 422



G	Ukupno	87,56	%
	Krupan	37,75	%
	Srednji	34,74	%
	Sitan	15,07	%
S	Ukupno	5,97	%
	Krupan	4,08	%
	Srednji	1,79	%
	Sitan	0,10	%
M-C	Ukupno	0,00	%

D10	1,620	mm
D30	6,789	mm
D60	18,517	mm

C _c	1,54
C _u	11,43

Masa uzorka:	7311,1	g
Gustoća čvrstih čestica:	-	Mg/m ³

Klasifikacijska oznaka
Dobro graduirani šljunak GW

Napomena: -

Analiza: Sijanje Antikoagulans: -

Hidrometar: -

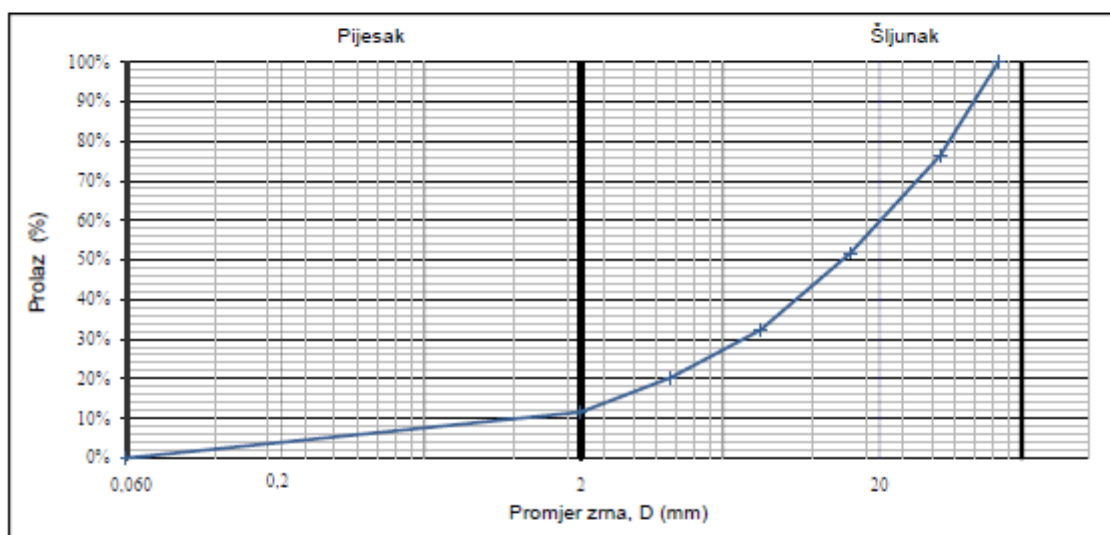
Odgovorna osoba: Doc. dr. sc. Dubravko Domitrović	Oznaka i datum izvještaja: 1-002 27.2.2017.	Voditeljica odjela: Prof. dr. sc. Biljana Kovačević Zelić
--	---	--

Rezultati ispitivanja odnose se samo na ispitne uzorke. Djelomično umnožavanje ovog izvještaja nije dopušteno bez pisanog odobrenja Voditeljice odjela.

Izveštaj ispitivanja granulometrijskoga sastava frakcije s kamenoloma „Špica“


IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU
Granulometrijski sastav tla

Radni nalog: 16-009 Datum ispitivanja: 01.12.21
 Naručitelj: RGNF
 Projekt: Frakcija_SP
 Lokacija: Kamenolom "Špica"
 Uzorak br.: 01.01.00 Bušotina: - Dubina: - m
 Opis uzorka: -
 Metoda ispitivanja: ASTM D 422



G	Ukupno	88,43	%
	Krupan	42,11	%
	Srednji	31,63	%
	Sitan	14,68	%
S	Ukupno	5,97	%
	Krupan	4,08	%
	Srednji	1,79	%
M-C	Sitan	0,10	%
	Ukupno	0,00	%

D10	1,737	mm
D30	7,241	mm
D60	21,375	mm

C _c	1,41
C _u	12,31

Masa uzorka:	6792,6	g
Gustoća čvrstih čestica:	-	Mg/m ³

Klasifikacijska oznaka
 Dobro graduirani šljunak GW

Napomena: -


Analiza: Sijanje Antikoagulans: -

Hidrometar: -

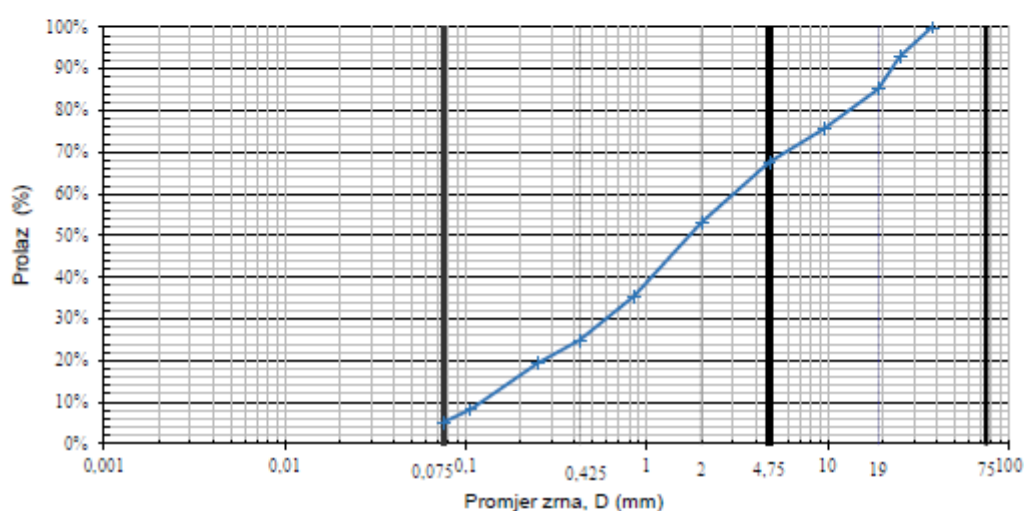
--	--	--

Rezultati ispitivanja odnose se samo na ispitne uzorke. Djelomično umnožavanje ovog izvještaja nije dopušteno bez pisanog odobrenja Voditeljice odjela.

Izvještaj ispitivanja granulometrijskoga sastava otkrivke s kamenoloma „Špica“

 Osnovik i Zagreb RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET HR-10002 Zagreb, Plovidarska 6, p.p. 306	IZVJEŠTAJ ISPITIVANJA GRANULOMETRIJSKI SASTAV TLA	Zavod za rudarstvo i geotehniku GEOMEHANIČKI LABORATORIJ Tel./Fax: +385 1 48 36 061
--	--	--

Radni nalog:	22-002	Datum zaprimanja:	2022.
Naručitelj:	Vjekoslav Herceg, mag.ing.min.		
Projekt:	Otkrivka_SP		
Laboratorijsko uzorkovanje:	2022.	Datum uzorkovanja:	2022.
Vrsta uzorka:	PU		
Laboratorijska oznaka:	22-002-003	Lokacija/bušotina:	
Metoda ispitivanja:	ASTM 422	Dubina (m):	



G	Ukupno	32,39	%
	Krupan	14,81	%
	Sitan	17,58	%
S	Ukupno	62,34	%
	Krupan	14,45	%
	Srednji	28,22	%
	Sitan	19,67	%
M-C	Ukupno	5,27	%

D10	0,128	mm	C _c	1,15
D30	0,629	mm	C _u	20,81
D60	2,669	mm		

Masa uzorka:	1415,8	g
Gustoća čvrstih čestica:	-	Mg/m ³

Klasifikacijska oznaka	ASTM D 2487
SW - Dobro graduirani pijesak sa šljunkom	

Napomena:

Analiza:	Sijanje	Antikoagulans:	-
Hidrometar:	-		

Odgovorna osoba:	Datum izvještaja:	Voditeljica Odjela za mehaniku tla:
Evelina Oršulić, dipl.ing.geotech.	travanj, 2022.	Prof. dr. sc. Biljana Kovačević Zelić

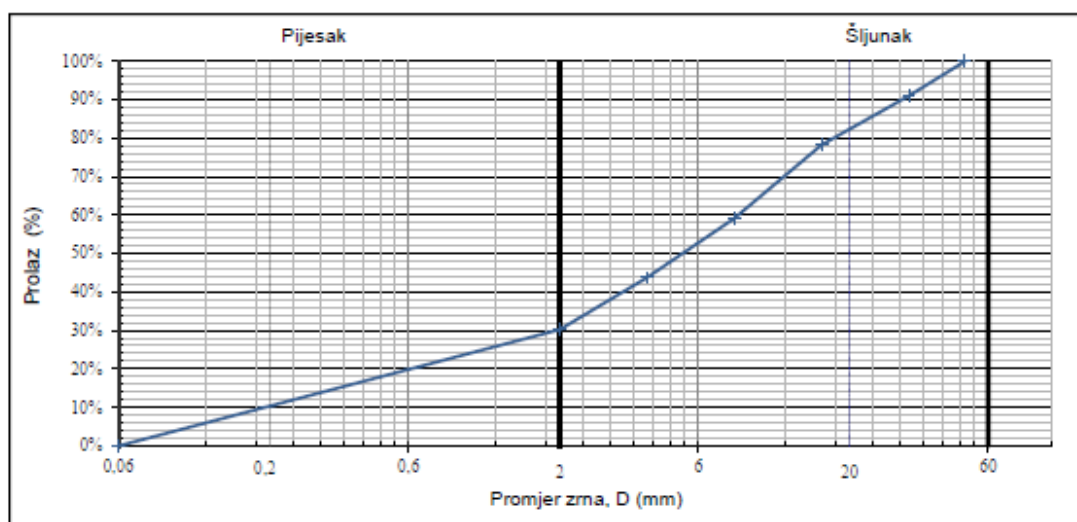
Rezultati ispitivanja odnose se samo na ispitne uzorke. Djelomično umnožavanje ovog izvještaja nije dopušteno bez pisanog odobrenja Voditeljice odjela.

Izveštaj ispitivanja granulometrijskog sastava frakcije s kamenoloma „Gradna“



IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU Granulometrijski sastav tla

Radni nalog: 16-009 Datum ispitivanja: 01.12.21
 Naručitelj: RGNF
 Projekt: Frakcija_GR
 Lokacija: Kamenolom "Gradna"
 Uzorak br.: 06.01.00 Bušotina: - Dubina: - m
 Opis uzorka: -
 Metoda ispitivanja: ASTM D 422



G	Ukupno	69,81	%
	Krupan	18,62	%
	Srednji	30,00	%
	Sitan	21,20	%
S	Ukupno	5,97	%
	Krupan	4,08	%
	Srednji	1,79	%
	Sitan	0,10	%
M-C	Ukupno	0,00	%

D10	0,703	mm	C _c	0,67
D30	1,988	mm	C _u	11,93
D60	8,384	mm		

Masa uzorka:	5078,0	g
Gustoća čvrstih čestica:	-	Mg/m ³

Klasifikacijska oznaka	Dobro graduirani šljunak GW
------------------------	-----------------------------

Napomena: -


Analiza: Sijanje Antikoagulans: -

Hidrometar: -

--	--	--

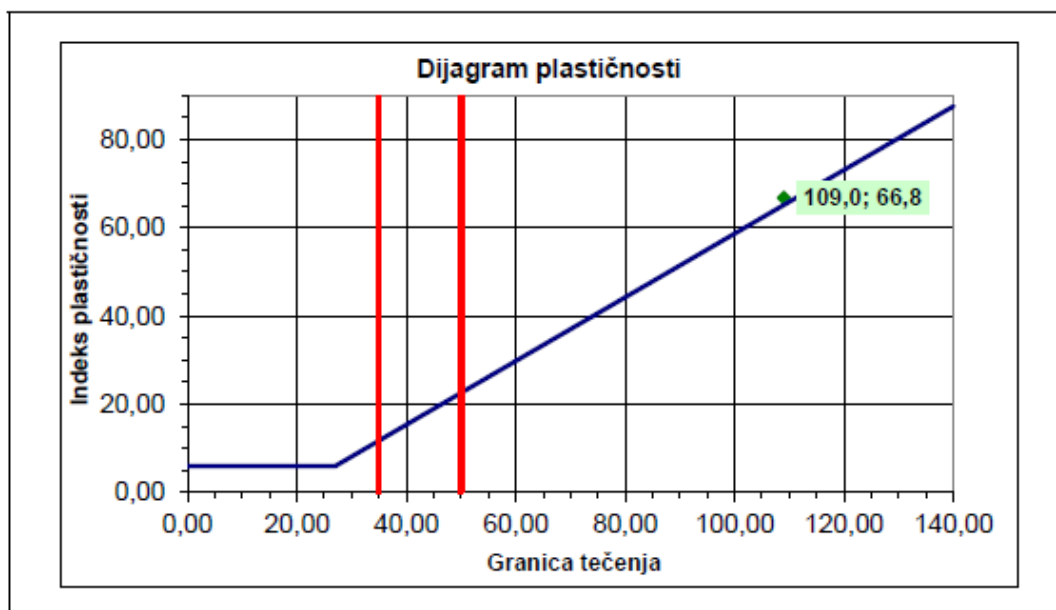
Rezultati ispitivanja odnose se samo na ispitne uzorke. Djelomično umnožavanje ovog izvještaja nije dopušteno bez pisanog odobrenja Voditeljice odjela.

Izveštaj ispitivanja granica plastičnosti otkrivke s kamenoloma „Zvečaj“

 <small>Republika u Zagrebu RUDARSTVO-GEOTEHNIČKI INSTITUT 101-1000 Zagreb, Posušjska R. p. p. 308</small>	IZVJEŠTAJ ISPITIVANJA GRANICE PLASTIČNIH STANJA	Zavod za rudarstvo i geotehniku GEOMEHANIČKI LABORATORIJ Tel./Fax: +385 1 48 36 061
--	---	--

Radni nalog:	22-002	Datum zaprimanja:	2022.
Naručitelj:	Vjekoslav Herceg, mag.ing.min.		
Projekt:	Otkrivka_ZV		
Laboratorijsko uzorkovanje:	2022.	Datum uzorkovanja:	2022.
Vrsta uzorka:	PU		
Laboratorijska oznaka:	22-002-001	Lokacija/bušotina:	
Metoda ispitivanja:	ASTM D 4318	Dubina (m):	

Temp. sušenja	105 ± 5	[C°]
Ostatak na situ 425 µm	0,00	[%]
Granica plastičnosti	42	[%]
Granica tečenja	109	[%]
Indeks plastičnosti	66,8	[%]
Prirodna vlažnost	44,8	[%]
Indeks konzistencije		[-]
Indeks tečenja		[-]



Klasifikacija: CH Glina visoke plastičnosti

--

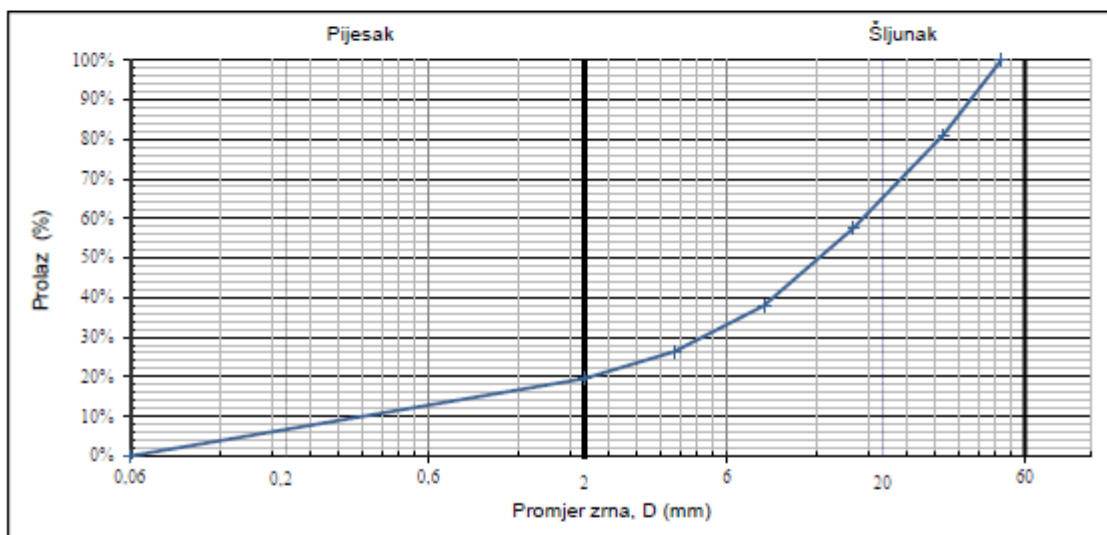
Odgovorna osoba: Evelina Oršulić, dipl.ing.geoteh.	Datum izvještaja: travanj, 2022.	Voditeljica Odjela za mehaniku tla: Prof. dr. sc. Biljana Kovačević Zelić
---	-------------------------------------	--

Izveštaj ispitivanja granulometrijskoga sastava frakcije s kamenoloma „Zvečaj“



IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU Granulometrijski sastav tla

Radni nalog: 16-009 Datum ispitivanja: 01.12.21
 Naručitelj: RGNF
 Projekt: Frakcija+glina_ZV
 Lokacija: Kamenolom Zvečaj
 Uzorak br.: 05.01.00 Bušotina: - Dubina: - m
 Opis uzorka: -
 Metoda ispitivanja: ASTM D 422



G	Ukupno	80,48	%
	Krupan	36,56	%
	Srednji	31,32	%
	Sitan	12,60	%
S	Ukupno	5,97	%
	Krupan	4,08	%
	Srednji	1,79	%
	Sitan	0,10	%
M-C	Ukupno	0,00	%

D10	1,054	mm
D30	5,273	mm
D60	17,663	mm

C _c	1,49
C _u	16,76

Masa uzorka:	1833,5	g
Gustoća čvrstih čestica:	-	Mg/m ³

Klasifikacijska oznaka
 Dobro građuirani šljunak GW

Napomena: -

Analiza: Sijanje Antikoagulans: -

Hidrometar: -

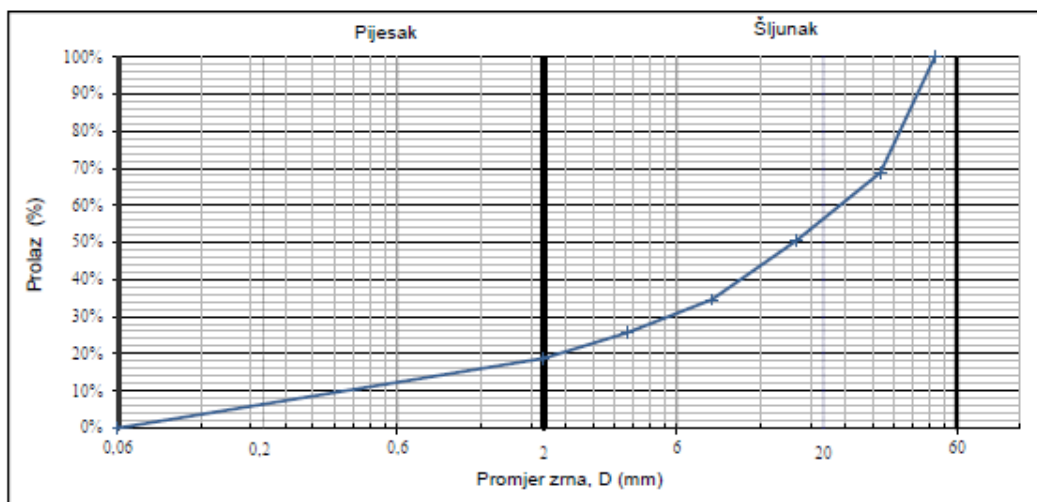
--	--	--

Rezultati ispitivanja odnose se samo na ispitne uzorke. Djelomično umnožavanje ovog izvještaja nije dopušteno bez pisanog odobrenja Voditeljice odjela.

Izveštaj ispitivanja granulometrijskoga sastava frakcije s kamenoloma „Zvečaj“


IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU
Granulometrijski sastav tla

Radni nalog: 16-009 Datum ispitivanja: 01.12.21
 Naručitelj: RGNF
 Projekt: Odmirano_GR
 Lokacija: Kamenolom "Gradna"
 Uzorak br.: 03.01.00 Bušotina: - Dubina: - m
 Opis uzorka: -
 Metoda ispitivanja: ASTM D 422



G	Ukupno	81,25	%
	Krupan	45,00	%
	Srednji	24,85	%
	Sitan	11,39	%
S	Ukupno	5,97	%
	Krupan	4,08	%
	Srednji	1,79	%
	Sitan	0,10	%
M-C	Ukupno	0,00	%

D10	1,094	mm
D30	5,934	mm
D60	24,350	mm

C _c	1,32
C _u	22,25

Masa uzorka:	8118,1	g
Gustoća čvrstih čestica:	-	Mg/m ³

Klasifikacijska oznaka	Dobro graduirani šljunak GW
------------------------	-----------------------------

Napomena: -

Analiza: Sijanje Antikoagulans: -

Hidrometar: -

--	--	--

Rezultati ispitivanja odnose se samo na ispitne uzorke. Djelomično umnožavanje ovog izvještaja nije dopušteno bez pisanog odobrenja Vodiči(ce) odjela.

PRILOG 5.

List 1.

Pregled podataka ulaznih vrijednosti za izvođenje višestrukih linearnih regresijskih analiza utjecaja značajki materijala na dinamičke radne veličine i učinak kopanja.

Materijal i lokacija	Kategoričke varijable		Nezavisne varijable						Zavisne varijable				
	Rastresito	Koherentno	D50 (mm)	Dmax (mm)	b	Sadržaj vlage (%)	Gustoća (t/m ³)	Sadržaj sitnih čestica (%)	Prosječna sila (kN/t)	Potrošnja energija (kJ/t)	Prosječna snaga (kW/t)	Max snaga (kW)	Tehnički učinak (t/s)
Odminirano ZV	1	0	268,14	656	2,26	1,52	1,66	0	7,85	56,18	18,06	90,59	0,41
Otkrivka ZV	0	1	0	0	0,00	44,81	1,46	95	7,67	58,25	15,79	84,70	0,56
Frakcija + glina ZV	1	0	13,8	50	1,52	4,74	1,38	20	6,13	58,66	19,32	27,23	0,30
Otkrivka ZV	0	1	0	0	0,00	13,17	1,31	95	5,98	59,28	25,03	41,54	0,28
Odninirano GR	1	0	16,2	50	1,55	1,39	1,79	19	2,90	25,96	7,20	43,54	0,48
Frakcija GR	1	0	5,4	50	2,18	1,25	1,76	29	2,75	26,56	6,32	48,72	0,48
Otkrivka SP	0	1	1,75	38	2,25	16,20	1,78	55	13,49	110,82	24,86	108,56	0,26
Frakcija + glina SP	1	0	13,7	50	1,80	2,60	1,84	15	11,07	94,31	21,16	83,37	0,28
Blokovi SP	0	0	558,56	898	1,56	0,99	1,50	0	10,61	98,20	22,55	73,12	0,15
Odminirano SP	1	0	131,9	341	1,29	1,25	1,74	3	13,96	130,25	26,85	88,41	0,22
Frakcija SP	1	0	15,2	50	1,60	1,73	1,76	10	9,51	75,88	18,76	62,29	0,26
Odminirano CE	1	0	90,59	323	2,63	1,99	1,80	0	4,22	40,57	13,92	63,20	0,55
Blokovi CE	0	0	406,68	675	2,14	0,99	1,50	0	6,45	56,24	20,86	61,03	0,21

List 2.

Izveštaji provedenih linearnih regresijskih analiza utjecaja značajki materijala na učinak kopanja - sa i bez kategoričkih varijabli

Linearna zavisnost učinka o značajkama materijala							Linearna zavisnost učinka o značajkama materijala + kategoričke varijable											
SUMMARY OUTPUT							SUMMARY OUTPUT											
<i>Regression Statistics</i>							<i>Regression Statistics</i>											
Multiple R	0,703494479						Multiple R	0,909725501										
R Square	0,494904483						R Square	0,827600488										
Adjusted R Squ	-0,01019103						Adjusted R Squ	0,482801464										
Standard Error	0,138501647						Standard Error	0,099101865										
Observations	13						Observations	13										
ANOVA							ANOVA											
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>		<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>							
Regression	6	0,112774004	0,0187957	0,9798235	0,5095534		Regression	8	0,188585523	0,02357319	2,400240226	0,207377582						
Residual	6	0,115096238	0,0191827				Residual	4	0,039284718	0,00982118								
Total	12	0,227870242					Total	12	0,227870242									
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>		<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>	
Intercept	0,262808017	0,600722597	0,4374865	0,6770668	-1,207107	1,7327233	-1,207107	1,732723259		Intercept	-0,19458223	0,56863681	-0,34219071	0,749431109	-1,773371122	1,384206655	-1,77337112	1,38420666
D50	-0,0014614	0,001077255	-1,3565947	0,2237295	-0,004097	0,0011745	-0,004097	0,00117455		Rastresito	-0,20185532	0,381558288	-0,5290288	0,624781728	-1,261230963	0,857520318	-1,26123096	0,85752032
Dmax	0,000705442	0,000659552	1,0695777	0,3259386	-0,000908	0,0023193	-0,000908	0,002319307		Koherentno	-0,83374281	0,450730631	-1,84975849	0,138028103	-2,085171666	0,417686041	-2,08517167	0,41768604
b	0,03181773	0,089997071	0,3535418	0,7357731	-0,188397	0,2520326	-0,188397	0,252032629		D50	-0,00264207	0,002247248	-1,17568959	0,304918277	-0,008881429	0,003597295	-0,00888143	0,0035973
Vlaga	0,006498457	0,006077593	1,0692485	0,3260754	-0,008373	0,0213698	-0,008373	0,021369793		Dmax	0,001468657	0,001011294	1,45225542	0,220075276	-0,001339145	0,004276459	-0,00133914	0,00427646
Gustoća	-0,00379954	0,360630602	-0,0105358	0,9919354	-0,886231	0,8786317	-0,886231	0,87863175		b	0,088498128	0,08087929	1,09420011	0,335337193	-0,136058781	0,313055037	-0,13605878	0,31305504
Sadržaj sitnih č	-0,00051382	0,003079011	-0,1668785	0,8729477	-0,008048	0,0070202	-0,008048	0,007020248		Vlaga	0,007981868	0,004448404	1,79432202	0,147207981	-0,00436888	0,020332617	-0,00436888	0,02033262
										Gustoća	0,213983615	0,276306026	0,77444426	0,48189802	-0,553164898	0,981132128	-0,5531649	0,98113213
										Sadržaj sitnih č	0,009696901	0,004317438	2,24598517	0,088035874	-0,002290228	0,021684029	-0,00229023	0,02168403

List 3.

Izveštaji provedenih linearnih regresijskih analiza utjecaja značajki materijala na maksimalnu snagu kopanja - sa i bez kategoričkih varijabli

Linearna zavisnost maksimalne snage kopanja o značajkama materijala								Linearna zavisnost maksimalne snage kopanja o značajkama materijala + kategoričke varijable									
SUMMARY OUTPUT								SUMMARY OUTPUT									
<i>Regression Statistics</i>								<i>Regression Statistics</i>									
Multiple R	0,846485761							Multiple R	0,932178076								
R Square	0,716538144							R Square	0,868955965								
Adjusted R Squ	0,433076289							Adjusted R Squ	0,606867894								
Standard Error	17,58480092							Standard Error	14,64348347								
Observations	13							Observations	13								
ANOVA								ANOVA									
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>				<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>				
Regression	6	4689,978491	781,66308	2,5278115	0,1419006			Regression	8	5687,603398	710,950425	3,315511322	0,130987079				
Residual	6	1855,351339	309,22522					Residual	4	857,7264327	214,431608						
Total	12	6545,329831						Total	12	6545,329831							
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>	
Intercept	-152,980762	76,27048119	-2,0057663	0,0916908	-339,6079	33,646382	-339,6079	33,64638196	Intercept	-122,41812	84,0228763	-1,45696178	0,218854184	-355,7030233	110,866784	-355,703023	110,866784
D50	-0,04862622	0,136773209	-0,3555245	0,7343617	-0,383298	0,2860458	-0,383298	0,286045761	Rastresito	46,1357103	56,37979153	0,81830225	0,459130326	-110,3996859	202,6711065	-110,399686	202,671107
Dmax	0,091143327	0,08373969	1,0884125	0,3181881	-0,11376	0,296047	-0,11376	0,296046967	Koherentno	114,8187114	66,60083087	1,72398317	0,159803425	-70,09483943	299,7322623	-70,0948394	299,732262
b	-0,7469702	11,42643866	-0,0653721	0,9500015	-28,70646	27,212518	-28,70646	27,21251796	D50	0,213517015	0,332057784	0,64301162	0,555223219	-0,708423195	1,135457226	-0,70842319	1,13545723
Vlaga	1,0720583	0,771638976	1,3893263	0,2140993	-0,816074	2,9601909	-0,816074	2,960190856	Dmax	-0,0479492	0,149430747	-0,32087905	0,764367242	-0,462835464	0,366937071	-0,46283546	0,36693707
Gustoća	115,7466492	45,78730636	2,52792	0,0448053	3,7091467	227,78415	3,7091467	227,7841518	b	-4,34023128	11,95088053	-0,36317251	0,734854766	-37,52119504	28,84073248	-37,521195	28,8407325
Sadržaj sitnih č	0,299236114	0,390925292	0,765456	0,4730255	-0,657324	1,2557958	-0,657324	1,255795844	Vlaga	0,953332757	0,657304721	1,45036651	0,220567289	-0,871637718	2,778303232	-0,87163772	2,77830323
									Gustoća	87,48872329	40,82751348	2,1428864	0,098767101	-25,86662666	200,8440732	-25,86662667	200,844073
									Sadržaj sitnih č	-0,81619143	0,637952943	-1,27939128	0,26993186	-2,587432756	0,955049894	-2,58743276	0,95504989

List 4.

Izveštaji provedenih linearnih regresijskih analiza utjecaja značajki materijala na prosječnu snagu kopanja - sa i bez kategoričkih varijabli

SUMMARY OUTPUT									Linearna zavisnost snage kopanja o značajkama materijala + kategoričke varijable									
Regression Statistics									Regression Statistics									
Multiple R	0,43044404								Multiple R	0,871056664								
R Square	0,185282072								R Square	0,758739713								
Adjusted R Squ	-0,62943586								Adjusted R Squ	0,276219138								
Standard Error	8,132476206								Standard Error	5,420105183								
Observations	13								Observations	13								
ANOVA									ANOVA									
	df	SS	MS	F	Significance F					df	SS	MS	F	Significance F				
Regression	6	90,24496438	15,040827	0,2274187	0,9527612				Regression	8	369,557819	46,1947274	1,572450487	0,348757234				
Residual	6	396,8230155	66,137169						Residual	4	117,5101608	29,3775402						
Total	12	487,0679798							Total	12	487,0679798							
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%		Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%	
Intercept	21,82776191	35,27295398	0,6188243	0,5587787	-64,48205	108,13757	-64,48205	108,13757	Intercept	59,02272144	31,10003356	1,89783465	0,130564588	-27,32481449	145,3702574	-27,3248145	145,370257	
D50	-0,00674733	0,063253765	-0,1066707	0,9185274	-0,161524	0,1480291	-0,161524	0,148029061	Rastresito	1,000495711	20,86828594	0,04794336	0,96405969	-56,93915465	58,94014607	-56,9391546	58,9401461	
Dmax	0,012357945	0,038727253	0,319102	0,7604663	-0,082404	0,1071201	-0,082404	0,107120119	Koherentno	39,89246835	24,65147786	1,61825869	0,180917347	-28,55100669	108,3359434	-28,5510067	108,335943	
b	-2,43184063	5,284406741	-0,4601918	0,6615841	-15,36232	10,498637	-15,36232	10,49863686	D50	0,002744045	0,122907102	0,02232617	0,983257111	-0,338500777	0,343988867	-0,33850078	0,34398887	
Vlaga	-0,10661956	0,35686134	-0,2987703	0,7751929	-0,979828	0,7665887	-0,979828	0,766588682	Dmax	-0,00811355	0,055309952	-0,14669237	0,890471172	-0,161678594	0,145451498	-0,16167859	0,1454515	
Gustoća	-1,3388265	21,17534235	-0,0632257	0,9516405	-53,15302	50,47537	-53,15302	50,47536964	b	-7,13273197	4,423471345	-1,61247387	0,182153567	-19,41425733	5,148793394	-19,4142573	5,14879339	
Sadržaj sitnih č	0,04913877	0,180791961	0,2717973	0,7948882	-0,393243	0,4915208	-0,393243	0,491520761	Vlaga	-0,21799436	0,243293253	-0,89601483	0,420893966	-0,893484722	0,457495999	-0,89348472	0,457496	
									Gustoća	-12,5779046	15,11180163	-0,8323233	0,45203271	-54,53499226	29,37918308	-54,5349923	29,3791831	
									Sadržaj sitnih č	-0,57668839	0,23613043	-2,44224513	0,071036271	-1,232291571	0,078914783	-1,23229157	0,07891478	

List 5.

Izveštaji provedenih linearnih regresijskih analiza utjecaja značajki materijala na trošak energije kopanja - sa i bez kategoričkih varijabli

Linearna zavisnost troška energije kopanja o značajkama materijala									Linearna zavisnost troška energije kopanja o značajkama materijala + kategoričke varijable									
SUMMARY OUTPUT									SUMMARY OUTPUT									
<i>Regression Statistics</i>									<i>Regression Statistics</i>									
Multiple R	0,422811796								Multiple R	0,832431461								
R Square	0,178769815								R Square	0,692942137								
Adjusted R Squ	-0,64246037								Adjusted R Squ	0,078826411								
Standard Error	40,77244582								Standard Error	30,5344466								
Observations	13								Observations	13								
ANOVA									ANOVA									
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>					<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>				
Regression	6	2171,271164	361,87853	0,2176854	0,9570924				Regression	8	8416,215475	1052,02693	1,128357584	0,486254318				
Residual	6	9974,354027	1662,3923						Residual	4	3729,409716	932,352429						
Total	12	12145,62519							Total	12	12145,62519							
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>		<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>	
Intercept	-57,0895088	176,8421534	-0,3228275	0,7577795	-489,8067	375,62765	-489,8067	375,6276522	Intercept	52,83101023	175,2036689	0,30154055	0,778028843	-433,6123586	539,2743791	-433,612359	539,274379	
D50	0,100956136	0,317124901	0,3183482	0,7610104	-0,675021	0,8769328	-0,675021	0,876932814	Rastresito	81,25496865	117,5625825	0,69116352	0,527481735	-245,151088	407,6610253	-245,151088	407,661025	
Dmax	-0,01695544	0,194160399	-0,087327	0,9332532	-0,492049	0,4581379	-0,492049	0,458137945	Koherentno	259,6500416	138,8753924	1,86966198	0,134883837	-125,9298619	645,2299451	-125,929862	645,229945	
b	-19,8574751	26,49355277	-0,749521	0,4818858	-84,68486	44,969913	-84,68486	44,96991316	D50	0,568491847	0,692403601	0,82104115	0,45773697	-1,353928741	2,490912436	-1,35392874	2,49091244	
Vlaga	0,192342986	1,789136454	0,107506	0,9178923	-4,185516	4,5702022	-4,185516	4,570202178	Dmax	-0,28872885	0,311591514	-0,92662617	0,406568268	-1,153845582	0,576387883	-1,15384558	0,57638788	
Gustoća	91,94663405	106,1632984	0,8660868	0,419722	-167,8256	351,71887	-167,8256	351,7188671	b	-33,2842909	24,91985764	-1,33565333	0,252595225	-102,4729077	35,90432585	-102,472908	35,9043259	
Sadržaj sitnih č	-0,08384665	0,906406638	-0,0925045	0,9293086	-2,301744	2,1340505	-2,301744	2,134050493	Vlaga	-0,18381481	1,370605289	-0,13411214	0,899791019	-3,989225161	3,621595531	-3,98922516	3,62159553	
									Gustoća	25,86226335	85,13312644	0,30378613	0,776437343	-210,5051888	262,2297156	-210,505189	262,229716	
									Sadržaj sitnih č	-2,97213709	1,330253153	-2,23426427	0,089187686	-6,665511945	0,721237765	-6,66551194	0,72123777	

List 6.

Izveštaji provedenih linearnih regresijskih analiza utjecaja značajki materijala na prosječne sile kopanja - sa i bez kategoričkih varijabli

Linearna zavisnost prosječne sile kopanja o značajkama materijala									Linearna zavisnost prosječne sile kopanja o značajkama materijala + kategoričke varijable									
SUMMARY OUTPUT									SUMMARY OUTPUT									
<i>Regression Statistics</i>									<i>Regression Statistics</i>									
Multiple R	0,450319658								Multiple R	0,856696398								
R Square	0,202787794								R Square	0,733928718								
Adjusted R Squ	-0,59442441								Adjusted R Squ	0,201786153								
Standard Error	4,640448856								Standard Error	3,283353564								
Observations	13								Observations	13								
ANOVA									ANOVA									
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>ignificance F</i>					<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>				
Regression	6	32,86541374	5,477569	0,2543712	0,9399166				Regression	8	118,9463648	14,8682956	1,379195665	0,401057391				
Residual	6	129,2025935	21,533766						Residual	4	43,12164249	10,7804106						
Total	12	162,0680073							Total	12	162,0680073							
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>		<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>	
Intercept	-9,09222886	20,12699882	-0,4517429	0,6673245	-58,34122	40,156763	-58,34122	40,15676307	Intercept	1,378074096	18,8395617	0,07314789	0,945200154	-50,92893476	53,68508295	-50,9289348	53,685083	
D50	0,010062698	0,036093049	0,2787988	0,7897591	-0,078254	0,0983792	-0,078254	0,098379207	Rastresito	12,06490847	12,6414449	0,95439315	0,393930204	-23,03336934	47,16318628	-23,0333693	47,1631863	
Dmax	-0,00084947	0,022098046	-0,038441	0,9705832	-0,054921	0,0532225	-0,054921	0,053222502	Koherentno	32,56306539	14,93320055	2,1805818	0,094682915	-8,898146175	74,02427695	-8,89814617	74,0242769	
b	-1,89652837	3,015320131	-0,6289642	0,5525498	-9,274751	5,4816942	-9,274751	5,481694196	D50	0,078873732	0,074453808	1,05936465	0,349164393	-0,127843179	0,285590644	-0,12784318	0,28559064	
Vlaga	0,074466547	0,203627623	0,3656996	0,7271361	-0,423792	0,5727254	-0,423792	0,57272539	Dmax	-0,03840737	0,033505277	-1,14630819	0,315580134	-0,131432938	0,05461819	-0,13143294	0,05461819	
Gustoća	11,4977453	12,08280119	0,9515794	0,3780524	-18,0678	41,063295	-18,0678	41,06329472	b	-3,14976413	2,679619659	-1,17545194	0,305003153	-10,58958102	4,290052753	-10,589581	4,29005275	
Sadržaj sitnih č	-0,01178783	0,103161181	-0,1142662	0,9127546	-0,264214	0,2406385	-0,264214	0,240638483	Vlaga	0,036039074	0,147380492	0,24453083	0,818851236	-0,373154771	0,44523292	-0,37315477	0,44523292	
									Gustoća	3,387284303	9,154321929	0,37002023	0,730126226	-22,02918801	28,80375662	-22,029188	28,8037566	
									Sadržaj sitnih č	-0,34429002	0,143041447	-2,40692488	0,073800228	-0,741436745	0,052856707	-0,74143674	0,05285671	

PRILOG 6.

List 1.

Pregled podataka ulaznih vrijednosti za izvođenje višestrukih nelinearnih regresijskih analiza utjecaja značajki materijala na dinamičke radne veličine i učinak kopanja.

Materijal i lokacija	Kategoričke varijable		Nezavisne varijable								Zavisne varijable				
	Ras.	Koh.	b	b ²	Sadržaj vlage (%)	Sadržaj vlage ² (%)	Gustoća (t/m ³)	Gustoća ² (t/m ³)	Sadržaj sitnih čestica (%)	Sadržaj sitnih čestica ² (%)	Prosječna sila (kN/t)	Potrošnja energija (kJ/t)	Prosječna snaga (kW/t)	Max snaga (kW)	Tehnički učinak (t/s)
Odminirano ZV	1	0	2,26	5,10	1,52	2,31	1,66	2,75	0	0,00	7,85	56,18	18,06	90,59	0,41
Otkrivka ZV	0	1	0,00	0,00	44,81	2007,94	1,46	2,13	95	9025,00	7,67	58,25	15,79	84,70	0,56
Frakcija + glina ZV	1	0	1,52	2,30	4,74	22,47	1,38	1,91	20	400,00	6,13	58,66	19,32	27,23	0,30
Otkrivka ZV	0	1	0,00	0,00	13,17	173,45	1,31	1,72	95	9025,00	5,98	59,28	25,03	41,54	0,28
Odminirano GR	1	0	1,55	2,39	1,39	1,93	1,79	3,19	19	361,00	2,90	25,96	7,20	43,54	0,48
Frakcija GR	1	0	2,18	4,76	1,25	1,56	1,76	3,10	29	841,00	2,75	26,56	6,32	48,72	0,48
Otkrivka SP	0	1	2,25	5,08	16,20	262,44	1,78	3,17	55	3025,00	13,49	110,82	24,86	108,56	0,26
Frakcija + glina SP	1	0	1,80	3,24	2,60	6,76	1,84	3,39	15	225,00	11,07	94,31	21,16	83,37	0,28
Blokovi SP	0	0	1,56	2,43	0,99	0,98	1,50	2,25	0	0,00	10,61	98,20	22,55	73,12	0,15
Odminirano SP	1	0	1,29	1,67	1,25	1,56	1,74	3,03	3	9,00	13,96	130,25	26,85	88,41	0,22
Frakcija SP	1	0	1,60	2,56	1,73	2,99	1,76	3,09	10	100,00	9,51	75,88	18,76	62,29	0,26
Odminirano CE	1	0	2,63	6,90	1,99	3,96	1,80	3,25	0	0,00	4,22	40,57	13,92	63,20	0,55
Blokovi CE	0	0	2,14	4,56	0,99	0,98	1,50	2,25	0	0,00	6,45	56,24	20,86	61,03	0,21

PRILOG 7.

bager CATERPILLAR 330FLN (Arkada, Zvečaj, 06.07.2021.)

'CAT_330FL':{ # Udaljenosti zglobova u prvom trokutu (kraj kabine, na katarci)
'a01': 2.55, # izmjerena dužina cilindra katarke prilikom paljenja uređaja
'a01-': 0.867, # prvo očitavanja DW senzora
'b1': 0.92, # udaljenost donjeg zgloba katarke i zgloba 1. cilindra
'c1': 2.71, # udaljenost donjeg zgloba katarke i zgloba 1. klipa

Udaljenosti zglobova u drugom trokutu (na ruci)
'a02':2.20, # izmjerena dužina cilindra ruke prilikom paljenja uređaja
'a02-':0.108, # prvo očitavanja DW senzora
'b2':0.95, # udaljenost gornjeg zgloba katarke i zgloba 2. klipa
'c2':3.01, # udaljenost gornjeg zgloba katarke i zgloba 2. cilindra

Udaljenosti zglobova u trećem trokutu (pri lopati)
'a03':1.75, # izmjerena dužina cilindra lopate prilikom paljenja uređaja
'a03-':0.14, # prvo očitavanja DW senzora
'b3':0.69, # dužina poprečnog trna
'c3':2.33, # udaljenost zgloba poprečnog trna na ruci i zgloba 3. cilindra
'alfa31':4.86, #kut između osi glavnih zglobova ruke i osi (prednjeg zgloba i zgloba poprečnog trna)
'alfa32':13.22, #kut između osi (prednjeg zgloba i zgloba poprečnog trna) i osi c3
'alfa33':105.79, #kut lopate
'filop':43.5, #kut između osi lopate i smjera zuba
'r':0.48, #udaljenost prednjeg zgloba ruke i zgloba poprečnog trna na ruci
't':0.638, #dužina uzdužnog trna
'p':0.526, #razmak zglobova na lopati
'alfa11':23.84, #kut između glavne osi katarke i c1 osi
'alfa12':46.80, #kut između horizontale i b1 osi
'alfa21':24.8, #kut između osi c2 i osi(gornji i donji zglob katarke)
'alfa22':154.55, #kut između osi b2 i osi(gornji i donji zglob ruke)
'Lk':6.15, #duljina katarke
'Lr':2.65, #duljina ruke
'Ll':1.65, #duljina lopate
'Wl':1.41, #širina lopate
'lx':0.33, #pomak x-a od osi rotacije
'ly':1.94, #pomak po z-u od poda
'tl':1.1, #težište lopate
'snaga':178, # snaga stroja u kW
'masa':28836, # masa stroja u kg
'godiste':2016, # godište stroja

'visina':1, # visina na kojoj stroj kopa (m)
'FI3_gkop':290, # kut FI3 gornja granica za određivanje kopanja
'FI3_dkop':180, # kut FI3 donja granica za određivanje kopanja
'FI3_g':210, # kut FI3 gornja granica za određivanje mase u lopati
'FI3_d':165, # kut FI3 donja granica za određivanje mase u lopati
'br_mj':4, # broj mjerenja u sekundi
'upc1':0.140, # unutarnji promjer cilindra katarke
'vpk1':0.110, # vanjski promjer klipa katarke
'upc2':0.150, # unutarnji promjer cilindra ruke
'vpk2':0.110, # vanjski promjer klipa ruke
'upc3':0.150, # unutarnji promjer cilindra lopate
'vpk3':0.095, # vanjski promjer klipa lopate
'tip':330, # tip bagera
'min_mas':1, # minimalna moguća masa lopate
'max_mas':8, # maksimalna moguća masa lopate
'min_rad':45, # minimalno suma rada po ciklusu
'min_snag':22, # minimalna prosječna snaga po ciklusu
'min_put':5.7, # minimalni put po ciklusu
'min_ciklus':7, # minimalni broj točaka po ciklusu

'Pozicija_1':'Draw_wire_1',
'Pozicija_2':'Draw_wire_2',
'Pozicija_3':'Draw_wire_3',
'Pozicija_4':'Wika_pressure_1',
'Pozicija_5':'Wika_pressure_1',
'Pozicija_6':'Wika_pressure_1',
'Pozicija_7':'Wika_pressure_1',

POZICIJE SENZORA NA BAGERU POVEZUJE S POZICIJAMA SENZORA NA LOGERU

'senzDW_katarka':1,
'senzDW_ruka':2,
'senzDW_lopata':3,
'senzTLAK_katarka':0,
'senzTLAK_katarka_povrat':0,
'senzTLAK_ruka':0,
'senzTLAK_ruka_povrat':0,
'senzTLAK_lopata':6,
'senzTLAK_lopata_povrat':5,

bager CATERPILLAR 323ELN (Arkada, Zvečaj, 18.03.2022.)

'CAT_323ELN':{ # Udaljenosti zglobova u prvom trokutu (kraj kabine, na katarki)

'a01': 2.312, # izmjerena dužina cilindra katarke prilikom paljenja uređaja

'a01-': 0.619, # prvo očitavanja DW senzora

'b1': 0.777, # udaljenost donjeg zgloba katarke i zgloba 1. cilindra

'c1': 2.436, # udaljenost donjeg zgloba katarke i zgloba 1. klipa

 # Udaljenosti zglobova u drugom trokutu (na ruci)

'a02':2.072, # izmjerena dužina cilindra ruke prilikom paljenja uređaja

'a02-':0.086, # prvo očitavanja DW senzora

'b2':0.856, # udaljenost gornjeg zgloba katarke i zgloba 2. klipa

'c2':2.820, # udaljenost gornjeg zgloba katarke i zgloba 2. cilindra

 # Udaljenosti zglobova u trećem trokutu (pri lopati)

'a03':1.734, # izmjerena dužina cilindra lopate prilikom paljenja uređaja

'a03-':0.099, # prvo očitavanja DW senzora

'b3':0.638, # dužina poprečnog trna

'c3':2.271, # udaljenost zgloba poprečnog trna na ruci i zgloba 3. cilindra

'alfa31':6.56, #kut između osi glavnih zglobova ruke i osi (prednjeg zgloba i zgloba poprečnog trna)

'alfa32':9.304, #kut između osi (prednjeg zgloba i zgloba poprečnog trna) i osi c3

'alfa33':104.242, #kut lopate

'filop':43.5, #kut između osi lopate i smjera zuba

'r':0.407, #udaljenost prednjeg zgloba ruke i zgloba poprečnog trna na ruci

't':0.690, #dužina uzdužnog trna

'p':0.447, #razmak zglobova na lopati

'alfa11':24.71, #kut između glavne osi katarke i c1 osi

'alfa12':51.84, #kut između horizontale i b1 osi

'alfa21':25.072, #kut između osi c2 i osi(gornji i donji zglob katarke)

'alfa22':161.973, #kut između osi b2 i osi(gornji i donji zglob ruke)

'Lk':5.7, #duljina katarke

'Lr':2.5, #duljina ruke

'Ll':1.562, #duljina lopate

'Wl':1.30, #širina lopate

'lx':0.0, #pomak x-a od osi rotacije

'ly':1.77, #pomak po z-u od poda

'ltl':1.04, #težište lopate

'snaga':121, # snaga stroja u kW

'masa':22400, # masa stroja u kg

'godiste':2016, # godište stroja

'visina':0, # visina na kojoj stroj kopa (m)

'FI3_gkop':290, # kut FI3 gornja granica za određivanje kopanja

'FI3_dkop':180, # kut FI3 donja granica za određivanje kopanja

'FI3_g':250, # kut FI3 gornja granica za određivanje mase u lopati

'FI3_d':145, # kut FI3 donja granica za određivanje mase u lopati
'br_mj':10, # broj mjerenja u sekundi
'upc1':0.120, # unutarnji promjer cilindra katarke
'vpk1':0.090, # vanjski promjer klipa katarke
'upc2':0.140, # unutarnji promjer cilindra ruke
'vpk2':0.095, # vanjski promjer klipa ruke
'upc3':0.120, # unutarnji promjer cilindra lopate
'vpk3':0.085, # vanjski promjer klipa lopate
'tip':323, # tip bagera
'min_mas':0, # minimalna moguća masa lopate
'max_mas':8, # maksimalna moguća masa lopate
'min_rad':22, # minimalno suma rada po ciklusu
'min_snag':10, # minimalna prosječna snaga po ciklusu
'min_put':6.5, # minimalni put po ciklusu
'min_ciklus':25, # minimalni broj točaka po ciklusu

'Pozicija_1':'Draw_wire_4',
'Pozicija_2':'Draw_wire_2',
'Pozicija_3':'Draw_wire_1',
'Pozicija_4':'Wika_pressure_1',
'Pozicija_5':'Wika_pressure_1',
'Pozicija_6':'Wika_pressure_1',
'Pozicija_7':'Wika_pressure_1',

POZICIJE SENZORA NA BAGERU POVEZUJE S POZICIJAMA SENZORA NA LOGERU

'senzDW_katarka':3,
'senzDW_ruka':2,
'senzDW_lopata':1,
'senzTLAK_katarka':0,
'senzTLAK_katarka_povrat':0,
'senzTLAK_ruka':0,
'senzTLAK_ruka_povrat':0,
'senzTLAK_lopata':5,
'senzTLAK_lopata_povrat':4,

bager KOMATSU PC 340 NLC-7EO,(Samoborka, kamenolom Gradna 21.07.2021.)

'KOM_PC340':{ # Udaljenosti zglobova u prvom trokutu (kraj kabine, na katarci)
'a01': 2.65, # izmjerena dužina cilindra katarke prilikom paljenja uređaja
'a01-': 0.865, # prvo očitavanja DW senzora
'b1': 0.95, # udaljenost donjeg zgloba katarke i zgloba 1. cilindra
'c1': 2.90, # udaljenost donjeg zgloba katarke i zgloba 1. klipa
Udaljenosti zglobova u drugom trokutu (na ruci)
'a02':2.42, # izmjerena dužina cilindra ruke prilikom paljenja uređaja
'a02-':0.222, # prvo očitavanja DW senzora
'b2':1.075, # udaljenost gornjeg zgloba katarke i zgloba 2. klipa
'c2':3.32, # udaljenost gornjeg zgloba katarke i zgloba 2. cilindra
Udaljenosti zglobova u trećem trokutu (pri lopati)
'a03':1.868, # izmjerena dužina cilindra lopate prilikom paljenja uređaja
'a03-':0.16, # prvo očitavanja DW senzora
'b3':0.73, # dužina poprečnog trna
'c3':2.55, # udaljenost zgloba poprečnog trna na ruci i zgloba 3. cilindra
'alfa31':7.33, #kut između osi glavnih zglobova ruke i osi (prednjeg zgloba i zgloba poprečnog trna)
'alfa32':10.52, #kut između osi (prednjeg zgloba i zgloba poprečnog trna) i osi c3
'alfa33':108.32, #kut lopate
'filop':43.5, #kut između osi lopate i smjera zuba
'r':0.40, #udaljenost prednjeg zgloba ruke i zgloba poprečnog trna na ruci
't':0.654, #dužina uzdužnog trna
'p':0.464, #razmak zglobova na lopati
'alfa11':22.40, #kut između glavne osi katarke i c1 osi
'alfa12':51.37, #kut između horizontale i b1 osi
'alfa21':27.53, #kut između osi c2 i osi(gornji i donji zglob katarke)
'alfa22':156.77, #kut između osi b2 i osi(gornji i donji zglob ruke)
'Lk':6.47, #duljina katarke
'Lr':2.55, #duljina ruke
'Ll':1.82, #duljina lopate
'Wl':1.60, #širina lopate
'lx':0.0, #pomak x-a od osi rotacije
'ly':2.13, #pomak po z-u od poda
'ltl':0.91, #težište lopate
'visina':-1, # visina na kojoj stroj kopa (m)
'FI3_gkop':220, # kut FI3 gornja granica za određivanje kopanja
'FI3_dkop':175, # kut FI3 donja granica za određivanje kopanja
'FI3_g':220, # kut FI3 gornja granica za određivanje mase u lopati
'FI3_d':145, # kut FI3 donja granica za određivanje mase u lopati
'br_mj':4, # broj mjerenja u sekundi

'snaga':184, # snaga stroja u kW
'masa':32970, # masa stroja u kg
'godiste':2006, # godište stroja
'upc1':0.140, # unutarnji promjer cilindra katarke
'vpk1':0.95, # vanjski promjer klipa katarke
'upc2':0.150, # unutarnji promjer cilindra ruke
'vpk2':0.105, # vanjski promjer klipa ruke
'upc3':0.140, # unutarnji promjer cilindra lopate
'vpk3':0.095, # vanjski promjer klipa lopate
'tip':340, # tip bagera
'min_mas':1, # minimalna moguća masa lopate
'max_mas':10, # maksimalna moguća masa lopate
'min_rad':77, # Minirano (55) minimalno suma rada po ciklusu
'min_snag':21.5, # minirano (15) minimalna prosječna snaga po ciklusu
'min_put':6.5, # minimalni put po ciklusu
'min_ciklus':12, # minimalni broj točaka po ciklusu

POZICIJE SENZORA S LOGERA POVEZUJE S SERIJSKIM BROJEM SENZORA

'Pozicija_1':'Draw_wire_1',
'Pozicija_2':'Draw_wire_2',
'Pozicija_3':'Draw_wire_3',
'Pozicija_4':'Wika_pressure_1',
'Pozicija_5':'Wika_pressure_1',
'Pozicija_6':'Wika_pressure_1',
'Pozicija_7':'Wika_pressure_1',

POZICIJE SENZORA NA BAGERU POVEZUJE S POZICIJAMA SENZORA NA LOGERU

'senzDW_katarka':1,
'senzDW_ruka':2,
'senzDW_lopata':3,
'senzTLAK_katarka':6,
'senzTLAK_katarka_povrat':0,
'senzTLAK_ruka':0,
'senzTLAK_ruka_povrat':0,
'senzTLAK_lopata':4,
'senzTLAK_lopata_povrat':5,

},

bager VOLVO EC 290 CL,(TRG, Cemex, kamenolom Sv. Juraj - Sv. Kajo 15.11.2018.)

'VOLV_ECDL2':{ # Udaljenosti zglobova u prvom trokutu (kraj kabine, na katarki)
'a01': 2.07, # izmjerena dužina cilindra katarke prilikom paljenja uređaja
'a01-': 0.326, # prvo očitavanja DW senzora
'b1': 0.92, # udaljenost donjeg zgloba katarke i zgloba 1. cilindra
'c1': 2.86, # udaljenost donjeg zgloba katarke i zgloba 1. klipa
Udaljenosti zglobova u drugom trokutu (na ruci)
'a02':2.315, # izmjerena dužina cilindra ruke prilikom paljenja uređaja
'a02-':0.248, # prvo očitavanja DW senzora
'b2':1.02, # udaljenost gornjeg zgloba katarke i zgloba 2. klipa
'c2':3.14, # udaljenost gornjeg zgloba katarke i zgloba 2. cilindra
Udaljenosti zglobova u trećem trokutu (pri lopati)
'a03':1.75, # izmjerena dužina cilindra lopate prilikom paljenja uređaja
'a03-':0.06, # prvo očitavanja DW senzora
'b3':0.66, # dužina poprečnog trna
'c3':2.34, # udaljenost zgloba poprečnog trna na ruci i zgloba 3. cilindra
'alfa31':4.32, #kut između osi glavnih zglobova ruke i osi (prednjeg zgloba i zgloba poprečnog trna)
'alfa32':11.45, #kut između osi (prednjeg zgloba i zgloba poprečnog trna) i osi c3
'alfa33':100, #kut lopate
'filop':43.5, #kut između osi lopate i smjera zuba
'r':0.46, #udaljenost prednjeg zgloba ruke i zgloba poprečnog trna na ruci
't':0.65, #dužina uzdužnog trna
'p':0.505, #razmak zglobova na lopati
'alfa11':23.33, #kut između glavne osi katarke i c1 osi
'alfa12':50.30, #kut između horizontale i b1 osi
'alfa21':25.34, #kut između osi c2 i osi(gornji i donji zglob katarke)
'alfa22':155.75, #kut između osi b2 i osi(gornji i donji zglob ruke)
'Lk':6.22, #duljina katarke
'Lr':3.06, #duljina ruke
'Ll':1.86, #duljina lopate
'Wl':1.50, #širina lopate
'lx':0.20, #pomak x-a od osi rotacije
'ly':1.95, #pomak po z-u od poda
'tl':0.93, #težište lopate
'visina':0, # visina na kojoj stroj kopa (m)
'FI3_gkop':290, # kut FI3 gornja granica za određivanje kopanja
'FI3_dkop':180, # kut FI3 donja granica za određivanje kopanja
'FI3_g':200, # kut FI3 gornja granica za određivanje mase u lopati
'FI3_d':165, # kut FI3 donja granica za određivanje mase u lopati
'br_mj':4, # broj mjerenja u sekundi

'snaga':160, # snaga stroja u kW
'masa':29600, # masa stroja u kg
'godiste':2008, # godište stroja
'upc1':0.140, # unutarnji promjer cilindra katarke
'vpk1':0.95, # vanjski promjer klipa katarke
'upc2':0.150, # unutarnji promjer cilindra ruke
'vpk2':0.105, # vanjski promjer klipa ruke
'upc3':0.140, # unutarnji promjer cilindra lopate
'vpk3':0.095, # vanjski promjer klipa lopate
'tip':2, # tip bagera
'min_mas':1, # minimalna moguća masa lopate
'max_mas':8, # maksimalna moguća masa lopate
'min_rad':45, # minimalni rad po ciklusu
'min_snag':22, # minimalna snaga po ciklusu
'min_put':6.5, # minimalni put po ciklusu
'min_ciklus':25, # minimalni broj točaka po ciklusu

POZICIJE SENZORA S LOGERA POVEZUJE S SERIJSKIM BROJEM SENZORA

'Pozicija_1':'Draw_wire_1',
'Pozicija_2':'Draw_wire_2',
'Pozicija_3':'Draw_wire_3',
'Pozicija_4':'Wika_pressure_1',
'Pozicija_5':'Wika_pressure_1',
'Pozicija_6':'Wika_pressure_1',
'Pozicija_7':'Wika_pressure_1',

POZICIJE SENZORA NA BAGERU POVEZUJE S POZICIJAMA SENZORA NA LOGERU

'senzDW_katarka':1,
'senzDW_ruka':2,
'senzDW_lopata':3,
'senzTLAK_katarka':4,
'senzTLAK_katarka_povrat':0,
'senzTLAK_ruka':5,
'senzTLAK_ruka_povrat':0,
'senzTLAK_lopata':6,
'senzTLAK_lopata_povrat':0,

bager DOOSAN 300 LCA (Kaming d.o.o., Špica,)

```
'DOOS_300':{ # Udaljenosti zglobova u prvom trokutu (kraj kabine, na katarcki)
  'a01': 2.670, # izmjerena dužina cilindra katarke prilikom paljenja uređaja
  'a01-': 0.695, # prvo očitavanja DW senzora
  'b1': 0.932, # udaljenost donjeg zgloba katarke i zgloba 1. cilindra
  'c1': 2.751, # udaljenost donjeg zgloba katarke i zgloba 1. klipa
  # Udaljenosti zglobova u drugom trokutu (na ruci)
  'a02': 2.356, # izmjerena dužina cilindra ruke prilikom paljenja uređaja
  'a02-': 0.098, # prvo očitavanja DW senzora
  'b2': 1.054, # udaljenost gornjeg zgloba katarke i zgloba 2. klipa
  'c2': 3.182, # udaljenost gornjeg zgloba katarke i zgloba 2. cilindra
  # Udaljenosti zglobova u trećem trokutu (pri lopati)
  'a03': 1.720, # izmjerena dužina cilindra lopate prilikom paljenja uređaja
  'a03-': 0.205, # prvo očitavanja DW senzora
  'b3': 0.660, # dužina poprečnog trna
  'c3': 2.297, # udaljenost zgloba poprečnog trna na ruci i zgloba 3. cilindra
  'alfa31': 4.473, #kut između osi glavnih zglobova ruke i osi (prednjeg zgloba i zgloba poprečnog trna)
  'alfa32': 13.724, #kut između osi (prednjeg zgloba i zgloba poprečnog trna) i osi c3
  'alfa33': 100.05, #kut lopate
  'filop': 43.5, #kut između osi lopate i smjera zuba
  'r': 0.472, #udaljenost prednjeg zgloba ruke i zgloba poprečnog trna na ruci
  't': 0.598, #dužina uzdužnog trna
  'p': 0.504, #razmak zglobova na lopati
  'alfa11': 24.665, #kut između glavne osi katarke i c1 osi
  'alfa12': 53.828, #kut između horizontale i b1 osi
  'alfa21': 25.89, #kut između osi c2 i osi(gornji i donji zglob katarke)
  'alfa22': 156.51, #kut između osi b2 i osi(gornji i donji zglob ruke)
  'Lk': 6.250, #duljina katarke
  'Lr': 2.52, #duljina ruke
  'Ll': 1.65, #duljina lopate
  'Wl': 1.48, #širina lopate
  'lx': 0.35, #pomak x-a od osi rotacije
  'ly': 1.86, #pomak po z-u od poda
  'ltl': 1.1, #težište lopate
  'visina': 1, # visina na kojoj stroj kopa (m)
  'FI3_gkop': 290, # kut FI3 gornja granica za određivanje kopanja
  'FI3_dkop': 10, # kut FI3 donja granica za određivanje kopanja
  'FI3_g': 220, # kut FI3 gornja granica za određivanje mase u lopati
  'FI3_d': 165, # kut FI3 donja granica za određivanje mase u lopati
  'br_mj': 10, # broj mjerenja u sekundi
```

'snaga':146, # snaga stroja u kW
'masa':29600, # masa stroja u kg
'godiste':2018, # godište stroja

'upc1':0.140, # unutarnji promjer cilindra katarke
'vpk1':0.095, # vanjski promjer klipa katarke
'upc2':0.150, # unutarnji promjer cilindra ruke
'vpk2':0.105, # vanjski promjer klipa ruke
'upc3':0.140, # unutarnji promjer cilindra lopate
'vpk3':0.090, # vanjski promjer klipa lopate
'tip':300, # tip bagera

'min_mas':1.2, # minimalna moguća masa lopate
'max_mas':5, # maksimalna moguća masa lopate
'min_rad':45, # minimalni rad po ciklusu
'min_snag':25, # minimalna snaga po ciklusu
'min_put':6.5, # minimalni put po ciklusu
'min_ciklus':25, # minimalni broj točaka po ciklusu

POZICIJE SENZORA S LOGERA POVEZUJE S SERIJSKIM BROJEM SENZORA

'Pozicija_1':'Draw_wire_1',
'Pozicija_2':'Draw_wire_2',
'Pozicija_3':'Draw_wire_4',
'Pozicija_4':'Wika_pressure_1',
'Pozicija_5':'Wika_pressure_1',
'Pozicija_6':'Wika_pressure_1',
'Pozicija_7':'Wika_pressure_1',

POZICIJE SENZORA NA BAGERU POVEZUJE S POZICIJAMA SENZORA NA LOGERU

'senzDW_kataraka':1,
'senzDW_ruka':2,
'senzDW_lopata':3,
'senzTLAK_kataraka':4,
'senzTLAK_kataraka_povrat':5,
'senzTLAK_ruka':0,
'senzTLAK_ruka_povrat':0,
'senzTLAK_lopata':6,
'senzTLAK_lopata_povrat':7,

},

bager KOMATSU PC 360 LC,(Kamen Sirač, kamenolom Čelina)

'KOM_PC360':{ # Udaljenosti zglobova u prvom trokutu (kraj kabine, na katarci)
'a01': 2.622, # izmjerena dužina cilindra katarke prilikom paljenja uređaja
'a01-':0.5132, # prvo očitavanja DW senzora
'b1': 0.956, # udaljenost donjeg zgloba katarke i zgloba 1. cilindra
'c1': 2.9036, # udaljenost donjeg zgloba katarke i zgloba 1. klipa
Udaljenosti zglobova u drugom trokutu (na ruci)
'a02':2.473, # izmjerena dužina cilindra ruke prilikom paljenja uređaja
'a02-':0.075, # prvo očitavanja DW senzora
'b2':1.051, # udaljenost gornjeg zgloba katarke i zgloba 2. klipa
'c2':3.367, # udaljenost gornjeg zgloba katarke i zgloba 2. cilindra
Udaljenosti zglobova u trećem trokutu (pri lopati)
'a03':1.931, # izmjerena dužina cilindra lopate prilikom paljenja uređaja
'a03-':0.2024, # prvo očitavanja DW senzora
'b3':0.729, # dužina poprečnog trna
'c3':2.558, # udaljenost zgloba poprečnog trna na ruci i zgloba 3. cilindra
'alfa31':6.65, #kut između osi glavnih zglobova ruke i osi (prednjeg zgloba i zgloba poprečnog trna)
'alfa32':7.23, #kut između osi (prednjeg zgloba i zgloba poprečnog trna) i osi c3
'alfa33':93.78, #kut lopate
'filop':43.5, #kut između osi lopate i smjera zuba
'r':0.474, #udaljenost prednjeg zgloba ruke i zgloba poprečnog trna na ruci
't':0.732, #dužina uzdužnog trna
'p':0.512, #razmak zglobova na lopati
'alfa11':20.83, #kut između glavne osi katarke i c1 osi
'alfa12':44.27, #kut između horizontale i b1 osi
'alfa21':24.51, #kut između osi c2 i osi(gornji i donji zglob katarke)
'alfa22':164.01, #kut između osi b2 i osi(gornji i donji zglob ruke)
'Lk':6.475, #duljina katarke
'Lr':3.208, #duljina ruke
'Ll':2.070, #duljina lopate
'Wl':1.580, #širina lopate
'lx':0.0, #pomak x-a od osi rotacije
'ly':1.912, #pomak po z-u od poda
'ltl':1.035, #težište lopate
'visina':2, # visina na kojoj stroj kopa (m)
'FI3_gkop':290, # kut FI3 gornja granica za određivanje kopanja
'FI3_dkop':180, # kut FI3 nošnja granica za određivanje kopanja
'FI3_g':250, # kut FI3 gornja granica za određivanje mase u lopati
'FI3_d':145, # kut FI3 donja granica za određivanje mase u lopati
'br_mj':10, # broj mjerenja u sekundi

'snaga':202, # snaga stroja u kW
'masa':35876, # masa stroja u kg
'godiste':2012, # godište stroja

'upc1':0.135, # unutarnji promjer cilindra katarke
'vpk1':0.085, # vanjski promjer klipa katarke
'upc2':0.130, # unutarnji promjer cilindra ruke
'vpk2':0.085, # vanjski promjer klipa ruke
'upc3':0.130, # unutarnji promjer cilindra lopate
'vpk3':0.08, # vanjski promjer klipa lopate
'tip':906, # tip bagera
'min_mas':1, # minimalna moguća masa lopate
'max_mas':8, # maksimalna moguća masa lopate
'min_rad':45, # minimalni rad po ciklusu
'min_snag':23, # minimalna snaga po ciklusu
'min_put':6.5, # minimalni put po ciklusu
'min_ciklus':15, # minimalni broj točaka po ciklusu

POZICIJE SENZORA S LOGERA POVEZUJE S SERIJSKIM BROJEM SENZOR

'Pozicija_1':'Draw_wire_1',
'Pozicija_2':'Draw_wire_2',
'Pozicija_3':'Draw_wire_4',
'Pozicija_4':'Wika_pressure_1',
'Pozicija_5':'Wika_pressure_1',
'Pozicija_6':'Wika_pressure_1',
'Pozicija_7':'Wika_pressure_1',

POZICIJE SENZORA NA BAGERU POVEZUJE SA POZICIJAMA SENZORA NA LOGERU

'senzDW_katarka':1,
'senzDW_ruka':2,
'senzDW_lopata':3,
'senzTLAK_katarka':4,
'senzTLAK_katarka_povrat':5,
'senzTLAK_ruka':0,
'senzTLAK_ruka_povrat':0,
'senzTLAK_lopata':6,
'senzTLAK_lopata_povrat':7,

},}

PRILOG 8.

Podatci mjerenja u svakom ciklusu na kamenolomu "Gradna"										
Br.	Odmirano GR					Frakcija GR				
	Sila [kN]	Masa [t]	Utr. Energija [kJ]	Snaga [kW]	Duljina trajektorije [m]	Sila [kN]	Masa [t]	Utr. Energija [kJ]	Snaga [kW]	Duljina trajektorije [m]
1	7,47	5,36	190,98	30,56	12,72	9,05	4,82	151,89	11,68	16,64
2	17,34	3,32	39,35	7,83	4,50	10,14	4,39	74,63	21,32	9,51
3	6,40	4,38	42,92	9,04	5,35	8,64	4,76	49,85	14,24	10,64
4	7,84	5,10	55,70	6,42	2,90	6,30	5,52	65,44	17,45	11,18
5	9,80	5,63	89,84	27,64	9,50	5,02	4,63	36,81	11,20	10,36
6	11,11	5,28	92,45	15,67	7,71	6,38	4,54	47,33	13,52	7,50
7	10,29	4,88	89,57	35,56	9,23	9,85	4,35	76,72	20,46	8,37
8	9,72	4,87	87,99	20,48	9,72	12,72	4,82	116,32	33,23	9,28
9	11,39	5,58	129,32	30,87	9,33	9,81	4,83	78,40	28,57	10,63
10	10,88	3,96	90,86	27,96	8,94	10,53	3,90	107,30	26,82	11,82
11	11,74	4,96	111,25	31,15	10,04	7,92	5,38	76,22	21,78	10,62
12	7,40	4,82	85,99	27,21	9,83	12,08	5,40	111,43	21,12	11,40
13	11,78	5,24	147,28	25,61	17,87	13,91	5,37	121,87	37,30	11,20
14	13,19	4,93	78,60	21,93	5,24	7,84	4,45	119,81	19,17	10,82
15	11,65	3,96	68,05	19,15	6,17	13,42	5,24	59,96	15,99	8,83
16	12,44	4,68	118,83	32,96	10,75	9,67	4,82	120,05	34,30	9,74
17	12,40	4,95	122,62	27,25	11,82	12,71	5,70	119,28	19,08	12,23
18	9,56	5,14	92,12	48,34	9,57	11,31	4,97	122,37	33,09	10,11
19	12,50	3,95	132,24	31,11	11,71	8,09	5,76	126,03	26,53	11,65
20	15,44	4,33	124,72	35,63	8,67	4,82	3,30	81,27	18,31	12,45
21	12,82	4,50	72,26	29,26	4,42	4,04	4,26	52,24	13,93	12,29
22	8,27	4,82	85,93	43,96	11,11	12,43	4,85	54,22	11,52	10,51
23	12,32	5,46	110,48	35,79	9,68	11,43	4,41	113,07	32,30	10,49
24	5,89	5,72	64,27	23,50	9,26	11,21	3,79	105,78	30,22	10,12
25						15,88	4,61	98,92	24,56	11,35
26						12,32	4,77	154,05	36,01	9,30
27						10,51	4,12	141,16	23,86	11,58
28						13,11	5,20	97,84	22,93	9,50
29						9,59	4,71	138,89	30,84	10,49
30						10,75	4,69	89,37	21,01	10,81
Prosjeak	10,82	4,83	96,82	26,87	9,00	10,05	4,75	96,95	23,08	10,71

Podatci mjerenja u svakom ciklusu na kamenolomu "Zvečaj"

Br.	Otkrivka suho ZV					Frakcija + glina ZV				
	Sila [kN]	Masa [t]	Utr. Energija [kJ]	Snaga [kW]	Duljina trajektorije [m]	Sila [kN]	Masa [t]	Utr. Energija [kJ]	Snaga [kW]	Duljina trajektorije [m]
1	17,55	2,89	161,42	45,62	8,98	7,34	1,90	70,85	27,25	6,56
2	2,25	1,41	49,13	18,55	7,72	6,73	1,98	77,33	24,94	8,06
3	6,23	2,18	52,00	23,21	6,01	9,50	2,09	77,27	22,08	8,94
4	2,24	1,86	75,33	29,96	8,74					
5	12,75	2,93	111,14	43,79	7,45					
6	4,78	1,99	81,88	16,54	5,00					
7	17,75	2,59	173,96	78,96	9,29					
8	9,06	1,95	96,67	27,48	6,86					
9	15,35	2,65	140,14	67,75	8,47					
10	7,49	1,98	45,16	34,90	6,30					
11	5,98	1,78	57,93	31,54	7,23					
12	10,17	2,89	66,68	49,05	6,91					
Prosjek	9,30	2,26	92,62	38,95	7,41	7,85	1,99	75,15	24,76	7,85

Podatci mjerenja u savakom ciklusu na kamenolomu "Zvečaj"

Br.	Odmirano ZV					Otkrivka ZV				
	Sila [kN]	Masa [t]	Utr. Energija [kJ]	Snaga [kW]	Duljina trajektorije [m]	Sila [kN]	Masa [t]	Utr. Energija [kJ]	Snaga [kW]	Duljina trajektorije [m]
1	23,03	3,94	192,96	45,40	10,39	14,74	3,91	120,74	32,20	8,44
2	14,24	3,77	79,88	39,94	6,25	14,34	3,65	73,57	32,70	5,98
3	20,84	3,82	110,42	55,21	6,14	15,56	4,11	94,93	37,97	7,18
4	24,35	3,23	125,83	35,95	10,50	24,89	4,17	116,48	51,77	5,41
5	15,01	4,05	80,88	40,44	5,81	13,92	4,12	71,51	35,76	6,11
6	14,93	3,03	100,88	40,35	7,21	18,26	4,00	99,72	36,26	6,67
7	17,07	3,85	105,87	42,35	6,86	20,84	4,31	141,85	43,65	8,19
8	20,57	2,69	191,06	44,95	9,98	20,08	2,77	80,45	35,76	5,38
9	18,51	2,73	183,21	40,71	10,70	16,77	3,80	134,40	38,40	8,72
10	15,53	3,33	131,80	35,15	9,44	35,13	3,95	36,61	18,31	12,08
11	21,97	3,76	173,31	49,52	7,96	22,85	4,47	289,59	68,14	8,69
12	13,41	3,12	68,42	34,21	5,90	23,12	4,27	223,92	49,76	9,95
13	22,74	3,68	180,82	51,66	8,57	29,95	4,76	250,69	66,85	8,96
14	16,94	3,49	98,88	43,95	6,48	24,76	4,06	209,02	64,31	9,01
15	20,33	3,68	157,29	48,40	7,93	41,03	2,91	360,98	80,22	11,36
16	16,96	3,51	159,99	35,55	10,16	36,24	4,55	336,32	84,08	10,44
17	17,83	4,06	154,76	41,27	8,94	25,13	3,45	233,61	54,97	10,37
18	10,88	3,60	64,48	28,66	6,83	1,93	3,78	8,61	3,83	7,34
19	26,14	4,01	201,96	62,14	8,19	23,88	4,51	213,72	53,43	9,32
20	23,67	3,86	177,62	47,37	8,75	43,92	5,60	385,12	77,02	8,99
21	13,70	3,11	80,20	35,64	6,25	43,34	3,42	381,16	84,70	9,68
22	27,57	3,76	133,77	66,89	5,56	15,12	4,00	135,12	33,78	10,19
23	15,10	3,72	149,73	33,27	10,06					
24	19,75	3,50	170,42	42,61	9,01					
25	18,90	3,69	78,54	44,88	4,89					
26	24,93	3,54	202,08	57,74	8,31					
27	23,09	3,15	243,30	54,07	10,87					
28	13,29	2,19	148,89	28,36	12,52					
29	15,03	2,81	65,68	32,84	5,44					
30	25,07	3,46	215,72	53,93	8,96					
31	16,78	2,80	178,08	35,62	11,46					
32	12,90	2,33	62,28	31,14	6,03					
33	20,12	3,84	168,54	39,66	9,59					
34	31,31	3,22	202,49	67,50	6,96					
35	25,28	4,03	132,38	58,84	5,85					
36	21,77	3,57	195,23	48,81	9,02					
37	19,52	4,11	208,36	43,86	9,71					
38	20,26	3,99	196,47	43,66	9,72					
39	22,83	3,67	179,80	51,37	8,31					
40	19,96	3,69	112,51	40,91	6,82					
41	17,82	2,77	151,34	40,36	10,54					
42	25,98	3,68	131,01	58,22	5,66					
43	40,01	4,23	242,46	88,17	6,60					
44	18,73	3,32	140,62	46,87	7,93					
45	25,95	3,57	170,28	61,92	6,80					
46	17,98	3,32	127,00	50,80	7,11					
47	28,03	4,19	196,63	71,50	6,97					
48	23,97	4,29	160,76	64,30	7,00					
49	17,68	3,44	102,94	45,75	6,26					
50	18,96	3,52	82,70	47,26	5,12					
51	18,14	3,77	78,35	44,77	4,95					
Prosjeak	20,30	3,52	146,06	46,95	7,91	23,90	4,02	181,73	49,27	8,57

Podatci mjerenja u svakom ciklusu na kamenolomu "Čelina"

Br.	Odmirano CE					Blokovi CE				
	Sila [kN]	Masa [t]	Utr. Energija [kJ]	Snaga [kW]	Duljina trajektorije [m]	Sila [kN]	Masa [t]	Utr. Energija [kJ]	Snaga [kW]	Duljina trajektorije [m]
1	20,03	3,94	158,00	49,38	8,74	10,01	2,67	76,16	25,39	9,45
2	24,57	4,54	184,70	48,61	8,83	16,61	2,78	153,65	53,02	9,61
3	25,27	4,33	176,92	43,15	8,92	8,73	2,74	95,78	29,02	10,76
4	18,51	4,51	210,92	57,01	11,26	12,15	2,86	88,86	42,21	9,94
5	23,04	4,43	219,88	66,63	11,11	9,43	2,82	80,82	28,47	9,27
6	20,04	4,10	206,95	55,93	11,13	7,16	2,68	63,24	29,07	10,69
7	20,11	4,24	197,06	50,53	9,96					
8	17,56	4,11	165,48	48,67	10,89					
9	13,14	4,13	119,74	44,35	10,12					
10	11,03	4,68	164,35	60,87	10,09					
11	13,68	4,57	89,57	38,94	9,16					
12	8,51	4,29	102,99	35,51	7,38					
13	5,24	4,09	67,75	22,58	6,82					
14	9,26	3,85	65,68	34,57	5,91					
15	14,06	4,20	55,54	29,23	6,19					
16	9,54	4,19	100,10	45,50	7,62					
17	3,83	4,43	96,78	33,37	8,22					
18	3,02	4,30	89,75	28,95	9,78					
19	18,41	4,40	119,15	45,83	7,54					
20	2,93	4,04	142,35	49,09	8,61					
21	20,27	4,69	115,55	35,02	8,21					
22	2,17	4,24	158,49	52,83	9,04					
23	24,14	4,28	180,55	33,44	7,74					
24	18,33	3,32	114,50	44,04	6,90					
25	20,21	4,24	148,69	53,10	7,73					
26	19,12	3,58	134,55	51,75	7,99					
27	14,23	4,39	107,26	41,25	8,66					
28	17,75	3,94	107,29	33,53	7,02					
29	19,98	4,11	121,13	40,38	6,98					
30	20,19	4,12	126,27	39,46	6,81					
31	15,68	4,28	110,66	44,26	6,84					
32	9,68	4,09	73,32	27,16	7,40					
33	19,14	4,09	123,10	47,34	6,74					
34	15,44	3,43	104,74	45,54	5,43					
35	21,09	3,77	118,18	45,46	6,75					
36	15,84	4,05	97,24	38,90	6,55					
37	19,25	4,40	109,41	47,57	6,35					
38	19,61	4,23	121,36	50,57	6,92					
39	18,76	4,49	117,86	43,65	7,25					
40	12,52	4,24	98,70	41,13	8,07					
41	10,08	4,22	99,79	34,41	9,83					
42	12,07	3,88	106,69	35,56	8,55					
43	11,13	4,26	92,18	36,87	8,55					
44	12,33	4,46	116,25	36,33	8,81					
45	9,37	4,12	78,75	31,50	9,06					
Prosjek	15,11527	4,184278	124,8041	42,66066	8,187762	10,68	2,76	93,08	34,53	9,95

Podatci mjerenja u svakom ciklusu na kamenolomu "Špica"

Br.	Frakcija SP					Blokovi SP				
	Sila [kN]	Masa [t]	Utr. Energija [kJ]	Snaga [kW]	Duljina trajektorije [m]	Sila [kN]	Masa [t]	Utr. Energija [kJ]	Snaga [kW]	Duljina trajektorije [m]
1	10,51	2,31	86,63	25,48	8,64	22,16	2,77	214,46	43,65	11,93
2	15,29	2,63	139,26	25,79	12,91	18,86	2,68	218,97	37,99	11,92
3	13,07	2,52	121,13	28,84	9,91	11,62	2,58	113,10	30,57	10,15
4	17,26	2,55	122,16	39,41	7,44	18,35	2,49	210,29	38,23	12,64
5	27,49	2,66	202,49	42,19	10,99	15,36	2,83	182,56	32,09	15,68
6	12,63	3,02	107,03	28,16	9,44	17,85	2,90	166,78	37,61	11,36
7	26,24	2,87	204,56	49,89	8,34	19,11	2,11	156,98	39,05	12,60
8	18,81	2,59	134,51	36,35	8,01	27,53	2,65	222,94	49,63	10,77
9	13,37	3,06	88,90	28,68	7,15	21,10	2,72	138,76	47,85	6,54
10	24,91	2,85	221,95	44,39	8,92	17,45	2,37	169,04	41,10	11,68
11	12,34	2,92	108,55	29,34	9,77	18,77	2,57	137,78	41,05	8,53
12	22,68	3,08	206,56	44,90	9,24	9,72	2,59	78,51	27,07	8,24
13	17,88	2,67	103,99	32,50	6,88					
14	13,56	2,68	107,04	27,45	8,61					
Prosjek	17,58	2,75	139,62	34,53	9,02	18,16	2,61	167,51	38,82	11,00

Br.	Odminirano SP					Frakcija SP				
	Sila [kN]	Masa [t]	Utr. Energija [kJ]	Snaga [kW]	Duljina trajektorije [m]	Sila [kN]	Masa [t]	Utr. Energija [kJ]	Snaga [kW]	Duljina trajektorije [m]
1	27,45	2,14	260,46	55,42	10,12	26,66	2,77	237,31	55,19	9,35
2	31,61	2,79	280,91	57,33	10,44	25,71	2,94	229,30	48,79	9,68
3	37,41	2,78	343,92	64,89	9,59	30,06	3,78	261,82	52,36	9,23
4	25,26	2,33	243,60	51,83	10,44	23,08	3,14	212,64	43,40	13,54
5	24,36	2,93	221,37	49,19	10,28	21,42	3,11	118,69	40,93	6,62
6	30,08	2,93	281,80	55,25	9,59	19,77	3,10	161,09	40,27	9,38
7	23,83	3,35	226,63	46,25	10,43	33,10	2,88	279,65	59,50	9,15
8	24,69	2,72	192,67	53,52	8,08	18,61	3,47	189,63	38,70	10,85
9	26,61	2,78	253,25	48,70	11,07					
10	20,43	3,03	216,47	40,09	11,41					
11	18,65	2,98	186,94	35,95	10,52					
Prosjek	26,40	2,80	246,18	50,77	10,18	24,80	3,15	211,27	47,39	9,72

Br.	Otkrivka SP				
	Sila [kN]	Masa [t]	Utr. Energija [kJ]	Snaga [kW]	Duljina trajektorije [m]
1	19,35658	2,690949	184,1678	40,03647	9,49209
2	34,00623	2,783002	273,2837	60,72971	8,643851
3	33,03868	2,510529	288,6393	54,46025	9,888781
4	26,47158	3,187513	175,6308	46,21863	7,710472
5	24,7309	3,133946	208,6598	52,16495	8,513968
Prosjek	27,52079	2,861188	226,0763	50,722	8,849833

ŽIVOTOPIS

Vjekoslav Herceg rođen je 12. srpnja 1990. godine u Varaždinu. Osnovnu školu završio je u Jalžabetu, a srednju (Rudarsku i kemijsku školu Varaždin – smjer rudarski tehničar) u Varaždinu. Akademske godine 2009./10. upisan je na preddiplomski sveučilišni studij rudarstva na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Završni rad pod nazivom “Usporedba učinkovitosti bagera i buldozera na vertikalnom transportu mineralne sirovine u kamenolomu” brani u rujnu 2013. Akademske godine 2013./14. upisuje diplomski sveučilišni studij rudarstva, smjer rudarstvo. Diplomski rad pod nazivom “Utjecaj fizičko-mehaničkih karakteristika stijena na učinkovitost udarno rotacijskog-bušenja” brani u srpnju 2015. Od rujna 2015. do studenog 2016. radi kao inženjer pripravnik u tvrtki TRG d.o.o. gdje stječe iskustvo na poslovima vezanim uz izvođenje bušenja i miniranja. Od studenog 2016. zaposlen je kao asistent na Zavodu za rudarstvo i geotehniku na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu u Zagrebu Kao asistent sudjeluje u izvođenju vježbi iz kolegija: Tehnologija nemetalnih mineralnih sirovina, Tehnika sigurnosti, Vjetrenje podzemnih prostorija i tunela, Vjetrenje i odvodnjavanje te Alternativne metode eksploatacije. Voditelj je prve ljetne prakse na preddiplomskom studiju Rudarstva. Sudjelovao je na znanstven-istraživačkom projektu MINERS - Mine Emergency Response and Rescue School. U koautorstvu ima objavljena četiri znanstvena rada.

POPIS RADOVA

1. Herceg, V., Klanfar, M., Herceg, K., Domitrović, D. (2023): Specific energy consumption of material handling by excavator in quarrying of crushed stone, Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 62, 83-92. doi:10.17794/rgn.2023.1.8
2. Klanfar, M., Korman, T., Domitrović, D., Herceg, V. (2021): Testing the novel method for angle of repose measurement based on area-weighted average slope of a triangular mesh. Powder technology, 387, 396-405 doi:10.1016/j.powtec.2021.04.051
3. Klanfar, M., Herceg, V., Luka, M., Šarko, M. (2022): Decreasing air humidity by ventilation control in st. Barbara mine. Mining and metallurgy engineering Bor,1/2022, 1-8 doi: 10.5937/mmeb2201001K.
4. Klanfar, M., Herceg, V., Kuhinek, D. and Sekulić, K. (2018): Construction and testing of the measurement system for excavator productivity. Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 34, 51-58. doi:10.17794/rgn.2019.2.6