

# Statička analiza dizalice

---

**Rustja, Petar**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:631293>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-01**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**STATIČKA ANALIZA DIZALICE**

Rijeka, rujan 2022.

Petar Rustja

0069086668

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**STATIČKA ANALIZA DIZALICE**

Mentor: Prof. dr. sc. Marko Čanađija

Rijeka, rujan 2022.

Petar Rustja

0069086668

Rijeka, 9. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za tehničku mehaniku**  
Predmet: **Statika**  
Grana: **2.11.01 opće strojarstvo (konstrukcije)**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Petar Rustja (0069086668)**  
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

Zadatak: **Statička analiza dizalice**

Opis zadatka:

Za zadanu konstrukciju dizalice potrebno je odrediti sile u kritičnim elementima i spojevima. Analizu provesti za nekoliko različitih položaja dizalice. Pritom se koristiti odgovarajućim softverskim alatima.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

---

Prof. dr. sc. Marko Čanđija

---

Prof. dr. sc. Kristian Lenić

## IZJAVA

Izjavljujem, da sam preddiplomski rad pod naslovom „Statička analiza dizalice“ izradio samostalno pod stručnim vodstvom Prof. dr. sc. Marka Čanadije primjenjujući znanja stečena tijekom studiranja, znanja stečena samostalnim učenjem te koristeći literaturu navedenu na kraju rada.

Rijeka, rujan 2022.

Potpis: Petar Rustja



## SADRŽAJ

<b>1. UVOD:</b> .....	<b>6</b>
<b>2. ANALIZA PROBLEMA I PROGRAMSKA PODRŠKA</b> .....	<b>8</b>
2.1. Analiza problema.....	8
2.2. Opis programske podrške .....	8
<b>3. IZRADA FUNKCIONALNOG MODELA BAGERA</b> .....	<b>10</b>
3.1. Unos modela u program i odabir početnih parametara .....	10
3.2. Definiranje veza i simulacija pokreta.....	12
<b>4. IZRAČUN MAKSIMALNIH SILA U KRITIČNIM ZGLOBOVIMA</b> .....	<b>18</b>
4.1. Opis osnovnih pojmova .....	18
4.2. Izrada grafova funkcija sila u zglobovima .....	19
4.3. Očitavanje maksimalnih sila u zglobovima .....	23
<b>5. ANALITIČKA ANALIZA KRITIČNOG ELEMENTA</b> .....	<b>25</b>
5.1. Izrada grafova raspodjele unutarnjih sila .....	25
5.2. Usporedba analitičkih rezultata sa vrijednostima iz simulacije .....	29
<b>6. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>30</b>
<b>7. LITERATURA</b> .....	<b>31</b>
<b>8. SAŽETAK</b> .....	<b>33</b>

## 1. UVOD:

Rovokopači odnosno bageri su tipični hidraulički strojevi kojima upravlja čovjek. Općenito se koriste za građevinske operacije, kao što su ravnanje tla, nošenje tereta, kopanje i rušenje ali i u mnogim drugim slučajevima. Osnovni dijelovi bagera su: grana, ruka, nastavak i kabina na rotirajućoj platformi. Ovi osnovni dijelovi gotovo uvijek su povezani zglobnim klinom (hinged pin). Upravljanje radom ruke bagera vrši se na principu hidrauličke tekućine, pomoću hidrauličkih motora i cilindara. Zbog teških uvjeta rada dijelovi bagera su opterećeni sa nepredvidivim, dinamičnim silama koje bi mogle oštetiti te dijelove. Hidraulički cilindri moraju biti otporni na kišu i blato kako se ona ne bi zavukla između klipa i cilindra. Uporaba stroja mora biti moguća u izuzetno suhim i izuzetno vlažnim područjima. Ovisno o terenu na kojem se koristi bager mora izdržati udare odlomljenih stijena i mora biti funkcionalan na teško prohodnom terenu.



*Slika 1.1. Zahtjevni uvjeti rada bagera*



Konstrukcija ruke mora biti dovoljno čvrsta kako bi se osoba koja upravlja bagerom mogla poslužiti njome kao oslonac pri kretanju. Stoga pri dizajniranju komponenti neophodno je da dizajner osigura opremu s maksimalnom izdržljivošću i snagom kako bi se osigurala pouzdanost. Također u učestaloj praksi konstruktor uzima povećani faktor sigurnosti pri dizajniranju komponenti kako bi se dodatno osigurali navedeni uvjeti [1]. Iznenađujuća promjena tla na koje je bager oslonjen može uzrokovati dodatna opterećenja na dijelove bagera. Konstruktor treba voditi računa i o takvoj vrsti opterećenja. S obzirom da su dijelovi izloženi velikom naporu to će uzrokovati potrebu za izmjenom određenih dijelova. Iz toga razloga uz navedene smjernice treba osigurati jednostavnu i brzu mogućnost zamijene istrošenih komponenti. Konstruktor također treba voditi računa da zadovolji sve navedene uvjete ali uz minimalan trošak kako bi zadovoljio uvjete poslodavca. Uobičajena je praksa pri dizajniranju dijelova uzeti 10 godina kao potrebni životni vijek glavnih komponenti.

Tržište za bagere je sve veće stoga je porasla i potražnja za povećanom proizvodnjom. U prošloj godini tj. od početka siječnja do kraja prosinca 2021. godine procjenjuje se da je prodano oko 342,8 tisuće bagera, to je povećanje od 15 tisuća jedinica godišnje ili povećanje od 4,63 % u odnosu na 2020. godinu [2]. Trenutna cijena novog prosječnog rovokopača je između 200 tisuća eura i 400 tisuća eura.

Najčešći posao koji bager obavlja je kopanje koristeći žlicu. To je repetitivan proces u kojemu se izmjenjuju iznosi sila koje djeluju na bager. Maksimalna masa tereta koji bager može podignuti ovisi o veličini bagera. Pri izračunu maksimalne nosivosti razmatraju se dva uvjeta, uvjet na prevrtanje koji je se javlja pri istegnutoj ruci bagera i drugi uvjet na nosivost hidrauličkog sustava [3]. Uvjet na prevrtanje osigurava da se bager neće prevrnuti pri podizanju maksimalnog tereta iako se podiže sa potpuno istegnutom rukom. Drugi uvjet nosivosti hidrauličkog sustava osigurava da hidraulični cilindri koji su ugrađeni mogu proizvesti dovoljno snage za pokretanje dijelova pri maksimalnom opterećenju. S obzirom da je maksimalni teret koji bager može prenositi ovisan o tipu bagera manji bageri moći će podignuti manji maksimalni teret od većih bagera. Najčešći tip bagera koji se koristi na tržištu je bager od trinaest tona. Maksimalna masa tereta koju bager od trinaest tona može podići koristeći žlicu je 4,8 tone. Prvi korak pri dizajniranju dijelova od kojih je bager sastavljen je izračun sila koje se javljaju pri njegovom korištenju. Iz toga slijedi da bi se pravilno dizajnirali dijelovi koje čine ruku bagera potrebno je poznavanje sila kojima su ti dijelovi opterećeni.

## **2. ANALIZA PROBLEMA I PROGRAMSKA PODRŠKA**

### **2.1. Analiza problema**

Za pravilnu konstrukciju dijelova od kojih se sastoji ruka bagera potrebno je proračunati statične sile u karakterističnim točkama. S obzirom da je ruka bagera sastavljena od više sekcija, karakteristične točke u kojima je potrebno izračunati sile su točke koje se javljaju u zglobovima tj. u poveznicama između tih sekcija. Opterećenja koja se javljaju na navedene dijelove također su ovisna o položaju ruke bagera u prostoru stoga je potrebno provesti izračun različitim položajima. Promjenom položaja mijenja se kut pod kojim su te sekcije međusobno povezane, što rezultira u promijeni smjera djelovanja sila. Nakon izračuna sila u karakterističnim točkama dobivene podatke možemo upotrijebiti za izračun aksijalnih i poprečnih sila te momenta savijanja za kritični element ruke rovokopača. Kako bi se bolje opisao način djelovanja unutarnjih sila u kritičnom elementu, potrebno je prikazati raspodjelu unutrašnjih sila u elementu pomoću dijagrama.

### **2.2. Opis programske podrške**

Za izračun sila u karakterističnim točkama koristit će se „MSC Adams“ jedan od svjetski najpoznatijih i najkorištenijih softvera za izračun dinamike složenih konstrukcija [4]. Inženjeri pomoću ovoga softvera mogu procijeniti i upravljati kompleksnim interakcijama složenih tijela te prikupljati informacije kako bi optimizirali konstrukciju dijelova te učinili proizvod efikasnijim sigurnijim i udobnijim za korištenje.

Koristeći sofisticiranu tehnologiju za rješavanje dinamike složenih tijela, „Adams“ provodi nelinearnu dinamiku puno brže od MKE (Metode konačnih elemenata). Opterećenja i sile izračunate simulacijama u programu poboljšavaju točnost i preciznost MKE metode zbog bolje procijene ponašanja sila i opterećenja u čitavom rasponu kretanja i radnih okruženja.

Tradicionalne metode koje su se koristile u povijesti kako bi se došlo do zadovoljavajućeg dizajna više nisu primjenjive. Izrada svake iteracija proizvoda ili u nekim slučajevima svake komponente proizvoda kako bi se mogla izvršiti testiranja, postala su metode prošlosti. Ovakav pristup dizajnu oduzima previše vremena i materijalnih resursa kompanije. Kod kompleksnih modela ovakav pristup

nije ni moguć bez adekvatne opreme za proizvodnju koja obično nije prisutna u dizajnerskim kompanijama.

Postojeći alati u čijem se središtu koriste metode oblikovanja pomoću računala pomažu u procjeni interferencija između dijelova ili osnovnog kinematičkog gibanja, ali zanemaruju pravu dinamiku složenih mehaničkih sustava temeljenih na fizici. Metode konačnih elemenata idealne su za analizu linearnih vibracija ili za proučavanja prijelazne dinamike, ali su neučinkovite za analizu velikih rotacija i drugih izrazito nelinearnih gibanja poput mehaničkih sustava.

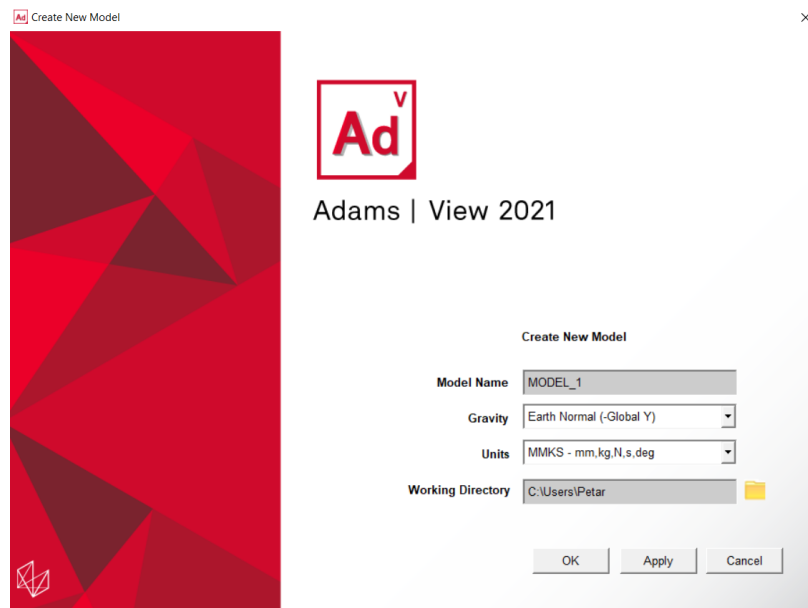
„MSC Adams“ omogućuje inženjerima jednostavno stvaranje i testiranje virtualnih prototipova mehaničkih sustava. Za razliku od drugih sustava koje se koriste oblikovanjem pomoću računala, Adams u svoje kalkulacije primjenjuje metode rješavanja kojima se rezultati približuju stvarnim ishodima [5]. Istovremenim rješavanjem jednačbi: statike, kvazistatike, kinematike i dinamike dobiva se bolja procjena ponašanja sila u dinamičnim modelima.

U ovom slučaju „MSC Adams“ će se koristiti kako bi se izračunale statične sile koje djeluju u kritičnim točkama ruke bagera tj. na spojevima elemenata od kojih je ta ruka sastavljena. Rad bagera je dinamični proces te su iznosi i smjerovi sila ovisni o vremenu. Kako bi se pojednostavio izračun statičnih sila u daljnjem proračunu koristit će se maksimalni iznos sile u zglobovima dobivene simulacijom tipičnih pokreta ruke bagera pri kopanju tla.

### 3. IZRADA FUNKCIONALNOG MODELA BAGERA

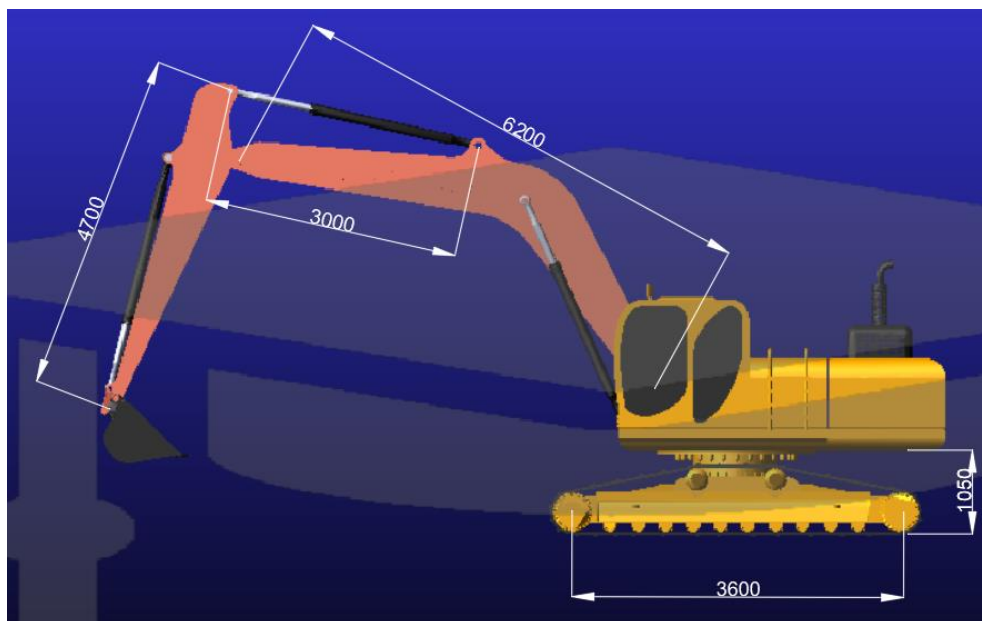
#### 3.1. Unos modela u program i odabir početnih parametara

Kako bi se postojeća tehnologija za rješavanje dinamike složenih tijela mogla upotrijebiti potrebno je unijeti trodimenzionalni složeni model bagera u program. S obzirom da bi izrada vlastitog trodimenzionalnog modela bagera bila suvišna za željeni rezultat ovoga rada, preuzima se postojeći model bagera sa interneta [6]. Nakon pokretanja „MSC Adams“ programa te odabira opcije za otvaranje novog modela postavlja se smjer djelovanja gravitacije u negativnom smjeru globalne Y osi. Također u ovom prozoru odabiru se mjerne jedinice koje će se koristiti u programu te se odabiru standardne SI mjerne jedinice [7].

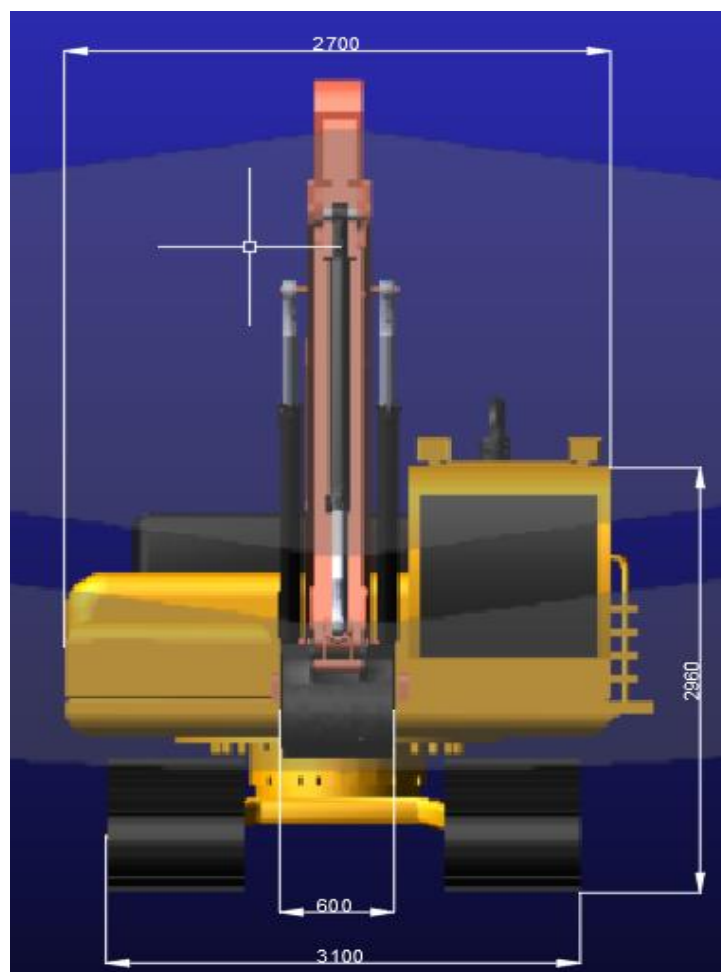


Slika 3. 1. Prozor za odabir mjernih jedinica

Nakon toga pomoću naredbe „import“ unosi se trodimenzionalni model bagera. Zbog limita u studentskoj verziji programa nije moguće unijeti više od 20 tijela. Ovaj problem moguće je riješiti unosom modela u program „Autodesk Inventor“ te spremanja modela u format .iam. Na ovaj način studentska verzija programa „MSC Adams“ ne prepoznaje da se unosi više od 20 tijela te se model može uspješno uvesti u program. Dimenzije modela označene na slikama 3.2. i 3.3. su u milimetrima.



*Slika 3. 2. Dimenzije modela*

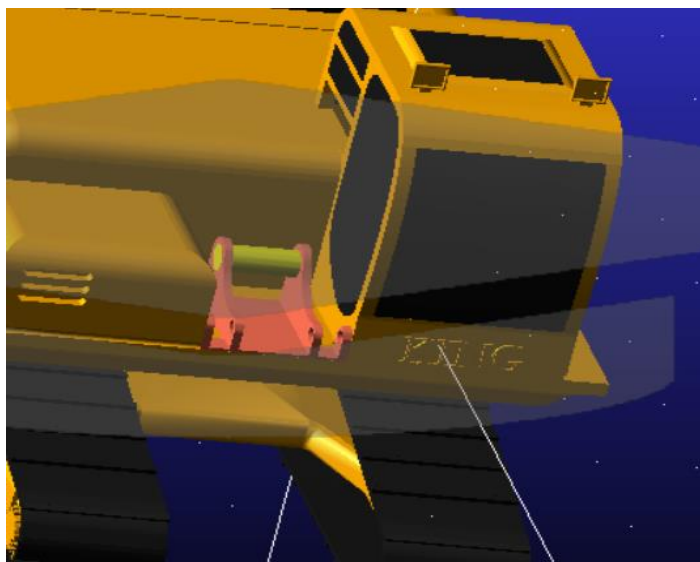


*Slika 3. 3. Dimenzije modela*

Kako bi se točno mogle odrediti sile u izračunu, potrebno je odrediti materijal od kojega su dijelovi izrađeni. Desnim klikom na željeni dio te odabirom naredbe „modify“ otvara se prozor u kojemu se odabire na koji način će se izračunati masa dijelova. Odabire se opcija za izračun mase pomoću geometrije modela i vrste materijala. Za vrstu materijala odabire se čelik. Ovaj se postupak ponavlja se za sve dijelove tj. svi dijelovi moraju imati odabranu vrstu materijala. S obzirom na volumen koji program direktno izračunava iz modela te gustoće odabranog materijala, program izračunava masu pojedinih dijelova. Ovaj podatak izuzetno je važan pri daljnjem izračunu sila u kritičnim točkama.

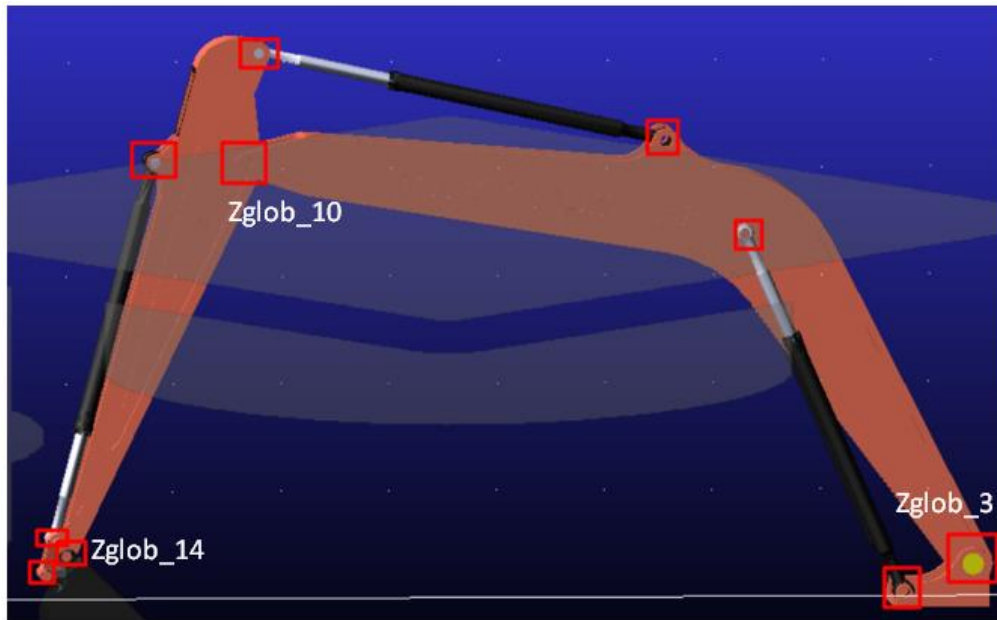
### **3.2. Definiranje veza i simulacija pokreta**

Nakon unosa modela u program nisu definirane veze i ograničenja gibanja modela. Kako bi se mogla provesti analiza sila potrebno je definirati vrstu veza tj. međusobno povezati pripadajuće dijelove. To je moguće učiniti sa tri vrste poveznica, prva od njih je poveznica fiksnim zglobovom koja onemogućava gibanje u svim smjerovima i rotaciju oko svih osi. Ovu vrstu zgloba potrebno je upotrijebiti u spoju kabine bagera i nosača grane.



*Slika 3. 4. Spoj kabine sa nosačem grane*

Druga vrsta poveznica je poveznica revolucijskim zglibom, ova vrsta dozvoljava rotaciju oko jedne osi a onemogućava sva ostala gibanja. U modelu potrebno ga je upotrijebiti na svim mjestima gdje se koristi poveznica zglobnim klinom npr. u spoju grane i ruke dizalice, na spoju nosača grane i grane dizalice te na svim hvatištima cilindara i klipova.



*Slika 3. 5. Položaji revoluciskih zglobova*

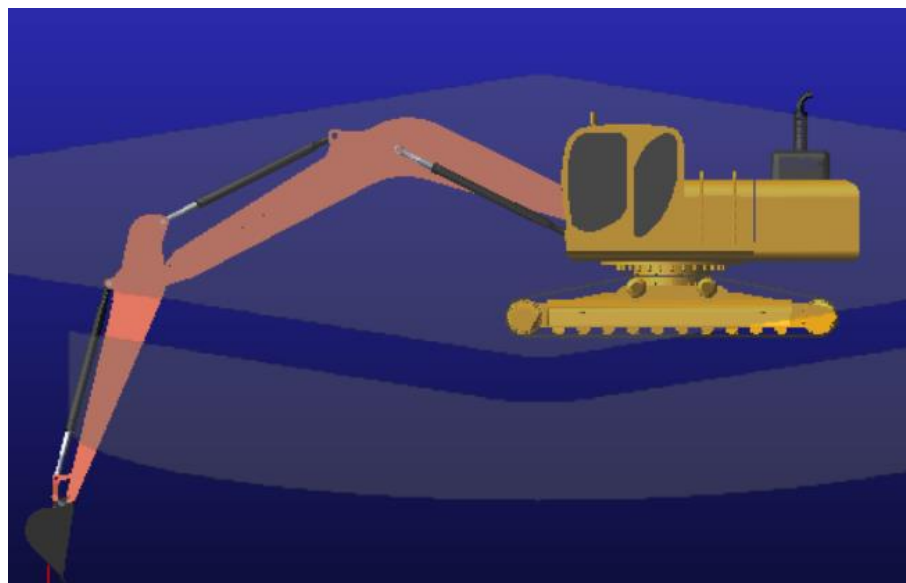
Treća vrsta poveznice je translacijski zglib. Ova vrsta spoja omogućuje jednom dijelu da se pomiče duž vektora u odnosu na drugi dio. Translacijski spoj upotrijebit će se kao veza između cilindra i odgovarajućeg klipa. Na ovaj način dozvoljavamo izvlačenje i uvlačenje klipa iz cilindra. Koristeći ove tri vrste poveznica u potpunosti smo definirali ograničenja gibanja modela te međuzavisnost komponenti.

U programu moguće je upravljanje zglibom pomoću koda. S kodom se može definirati početni i konačni položaj zglobova te treću varijablu koja je vrijeme potrebno za izvršenje toga pomaka. S obzirom da se ruka bagera pokreće sa pomakom klipova, kodom se zadaje gibanje translacijskih zglobova koji su poveznica između klipa i cilindra. Za pravilnu simulaciju pokreta koji se javljaju pri radu potrebno je dodati i jedno rotacijsko gibanje na spoju kabine bagera sa podvozjem.

Na ruci bagera pomoću hidrauličkih cilindara vrše se tri osnovne funkcije. Prva funkcija hidrauličkih cilindara je upravljanje gibanja žlice, druga funkcija je upravljanje gibanja ruke. Treća funkcija cilindra je upravljanje gibanja grane. Cilindar za upravljanje gibanja grane mogu biti dvostruki tj. jedan par cilindra obavlja ovu funkciju kao u razmatranom slučaju.

Upravljanjem ove tri vrste cilindra i jednim rotacijskim gibanjem kabine mogu se u potpunosti definirati pokrete koji se javljaju pri uporabi bagera dok je stacionaran.

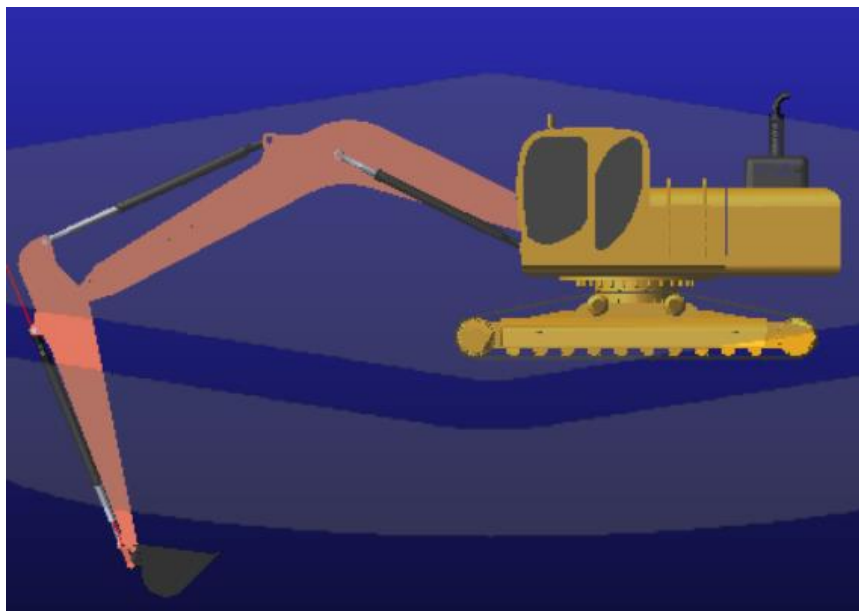
Simulacija pokreta koje bager vrši pri iskopavanju zemlje definirani su u programu kroz pet koraka. U prvom koraku iz početnog položaja do ispružene ruke bagera sudjeluju sva tri cilindra istovremeno. Sva tri zgloba vrše uvlačenje klipa u cilindar čime se doseže najveći raspon pri radu. Na slici 3.6. prikazana je pozicija bagera na kraju prvog koraka.



*Slika 3. 6. Maksimalno ispružena ruka bagera*

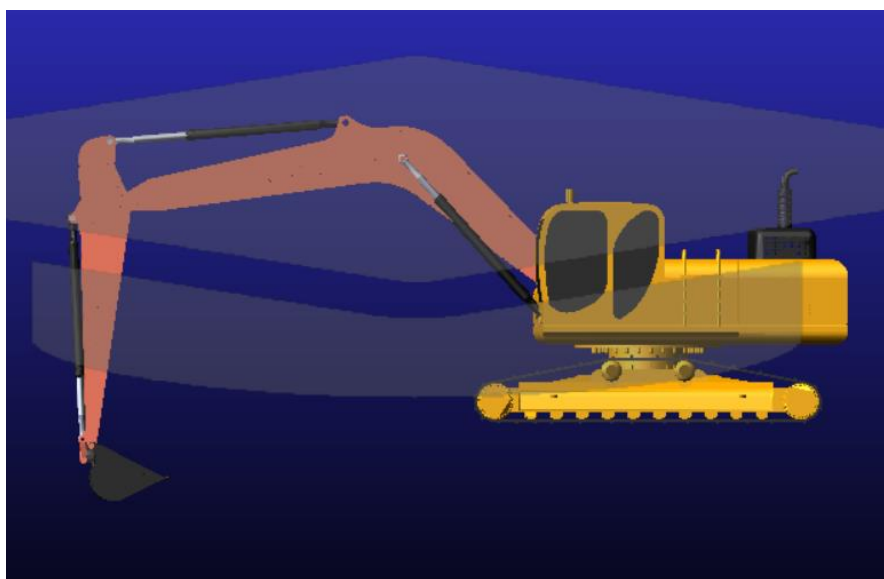


Drugi korak je uzastopno izvlačenje cilindra žlice, sa kojim se zatvara žlica i pritom se grabi teret te izvlačenje cilindra ruke kako bi se podignuo željeni teret u žlici. Položaj bagera nakon izvršenog drugog koraka prikazan je na slici 3.7.

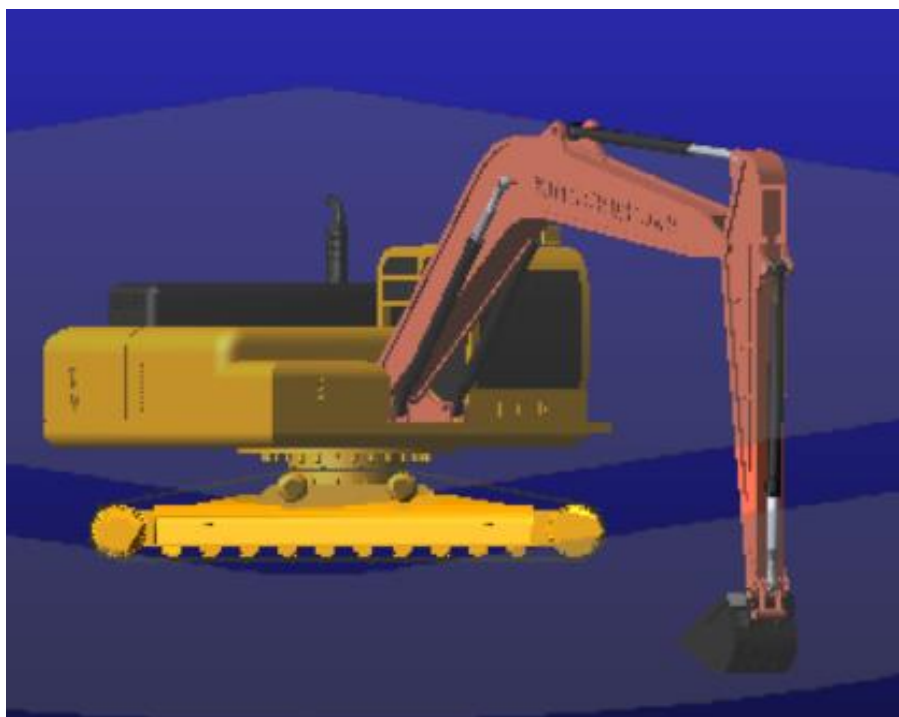


*Slika 3. 7. Grabljenje terete*

Treći korak je uvlačenje cilindra grane kako bi se teret podignuo iznad razine tla te rotacija kabine.



*Slika 3. 8. Podizanje tereta iznad razine tla*



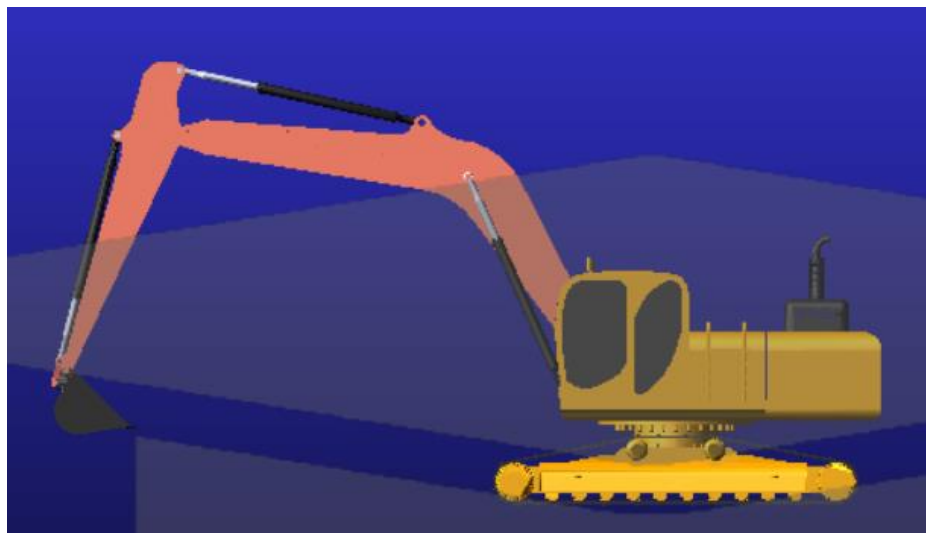
*Slika 3. 9. Rotacija kabine*

Četvrti korak je ponavljanje drugog koraka u suprotnom smjeru gdje se uzastopno uvlači cilindar ruke pa cilindar žlice kako bi se ispustio teret. Pozicija bagera u četvrtom koraku prikazana je na slici 3.10.



*Slika 3. 10. Ispuštanje tereta*

Peti korak je rotacija kabine u početni položaj te istovremeno izvlačenje sva tri cilindra kako bi se ponovo postigao početni položaj. Na slici 3.11. prikazan je početni položaj bagera iz kojega kreće simulacija gibanja.



*Slika 3. 11. Početni položaj*

Gibanje koje je opisano u pet koraka uspješno je simulirano unosom koda: „ $\text{step}(\text{time},0,0,2,20) + \text{step}(\text{time},3.5,0,4.5,-10) + \text{step}(\text{time},7.5,0,8,-10)$ “ kao matematičku funkciju gibanja cilindra grane, „ $\text{step}(\text{time},0,0,2,-30) + \text{step}(\text{time},2.5,0,3.0,30) + \text{step}(\text{time},5.5,0,6.5,-30) + \text{step}(\text{time},7.5,0,8,30)$ “ kao matematičku funkciju gibanja cilindra ruke, „ $\text{step}(\text{time},0,0,2,10) + \text{step}(\text{time},2.1,0,2.5,-10) + \text{step}(\text{time},6.5,0,7,10) + \text{step}(\text{time},7.5,0,8,-10)$ “ kao matematičku funkciju gibanja cilindra žlice i unosom „ $\text{step}(\text{time},4.5,0,5.5,-120d) + \text{step}(\text{time},6.5,0,7.5,120d)$ “ kao matematičku funkciju rotacije kabine bagera.

## 4. IZRAČUN MAKSIMALNIH SILA U KRITIČNIM ZGLOBOVIMA

### 4.1. Opis osnovnih pojmova

**Sila** je vektorska fizikalna veličina kojom se opisuje svaki utjecaj na promjenu oblika i strukture tijela, promjenu brzine tijela ili čestice. Sila također opisuje međudjelovanje fizikalnih sustava ili međudjelovanje sustava i polja. Osnovna mjerna jedinica sila je njutn [N]. Definirana je drugim Newtonovim zakonom gibanja kao promjena količine gibanja u vremenskom intervalu. Tradicionalna fizika razlikuje četiri temeljne sile: gravitaciju, elektromagnetsku, slabu i jaku nuklearnu silu. Sve ostale vrste sila posljedica su ovih temeljnih četiri [8].

**Moment sile** ili zakretni moment je vektorska fizikalna veličina koja kod rotacije ima istu ulogu kao i sila kod translatornog gibanja. Moment sile daje tijelu kutno ubrzanje. Mjerna jedinica za moment sile je njutnmetar [Nm]. Moment sile za neku točku računa se kao vektorski produkt sile i kraka okomitog na tu silu, čije ishodište je ta promatrana točka u sustavu [9].

**Vektor**, u elementarnoj matematici i fizici uključujući tehničke znanosti, označava veličinu koja ima iznos, smjer i orijentaciju, te pritom zadovoljava pravila vektorskog računa. Ovaj opis odnosi se veličine u trodimenzionalnom prostoru koji se zove Euklidski prostor. Za opis vektora u trodimenzionalnom prostoru potrebna su tri realna broja, jedan za iznos i dva za smjer i orijentaciju [10].

**Statika** je grana mehanike koja proučava skupove sila i ravnotežu tijela na koje te sile djeluju. U statici krutih tijela osnovne veličine su sila i moment sile. Teorijski dio statike bavi se metodama sastavljanja i rastavljanja sila te redukcijom skupa sila na jednu silu zvanu rezultanta i jedan moment zvan spreg. Ako su obje veličine iznosom jednake nuli, tijelo je onda u ravnoteži. Ovo stanje se u statici posebno proučava postavljanjem jednadžbi ravnoteže. U tim se jednadžbama pojavljuju poznate sile koje djeluju na tijelo i reaktivne sile kojima oslonci djeluju na tijelo, reaktivne sile su u pravilu nepoznanice sustava. Ako je broj nepoznanica jednak broju postavljenih jednadžbi, zadatak je statički određen te se nepoznanice mogu odrediti metodama statike krutih tijela [11].

## 4.2. Izrada grafova funkcija sila u zglobovima

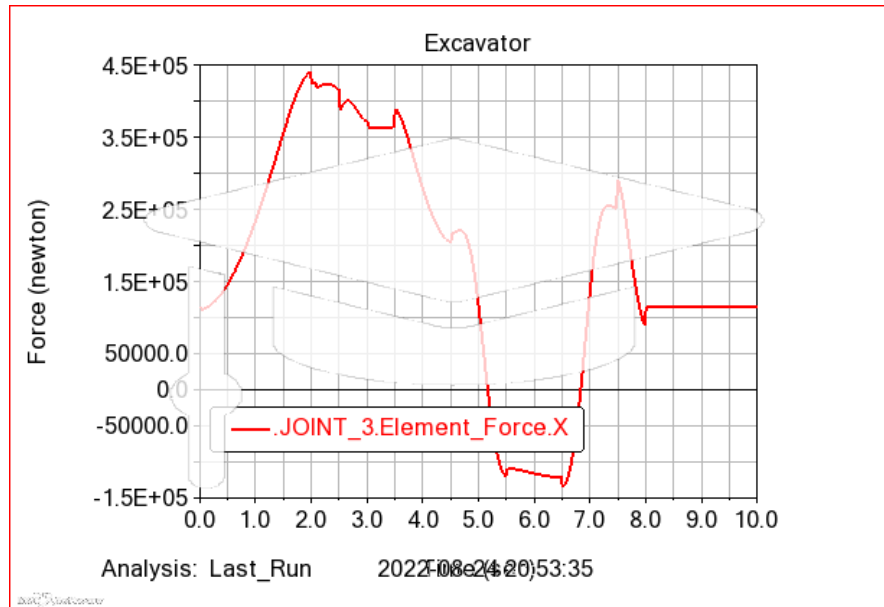
Sa uspješnom simulacijom pokreta koji se javljaju pri radu bagera mogu se iz programa iščitati željena opterećenja. Odabirom na ikonu za „Postprocessor“ otvara se novi prozor u kojemu je na jednoj polovici simulacija gibanja a na drugoj polovici prazan graf. Na grafu se krivuljom može prikazati promjenjivi iznos sila u ovisnosti o simulaciji gibanja.

Kritične točke ruke bagera u kojima je potrebno poznavanje sila smještene su na spojevima glavnih dijelova, stoga se treba vršiti provjera sila u glavnim spojevima. Ruka bagera sastavljena je od tri glavna dijela to su: grana, ruka, i nastavak koji je u ovom slučaju žlica za kopanje. Glavni spojevi u kojima treba izvršiti provjeru su zglobovi kojim se spajaju ova tri elemenata te zglob koji povezuje granu sa nosačem grane. Ovi zglobovi označeni su na slici 3.5. kao Zglob\_3, Zglob\_10 i Zglob\_14

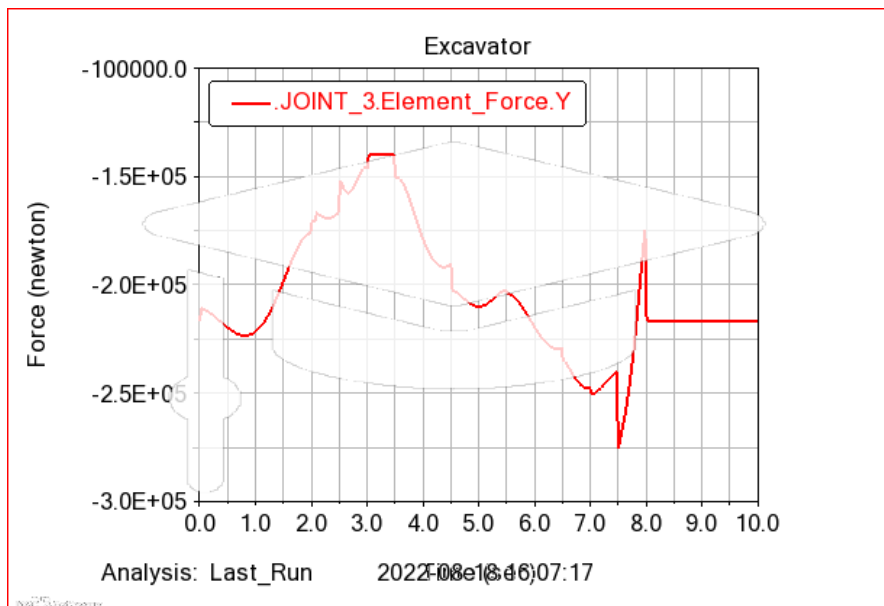
Kako bi se dobila krivulja iz koje se može iščitati maksimalna sila koja se može pojaviti u tom elementu pri radu bagera, potrebno je u programu dodati silu koja će predstavljati teret koji taj bager prenosi. Model bagera koji se učitao u program najbliži je bageru od 13 tona, za koji je u uvodnome dijelu spomenuto da je maksimalna masa koju takav bager može podignuti u žlici 4.8 tona ili 4800 kilograma. U model se stoga dodaje sila u žlici usmjerena u negativnom smjeru globalne osi Y koja predstavlja maksimalni teret.

Pokretanjem naredbe sa prikaz funkcije sila u grafu, prikazuju se pojedinačne sila u zglobovima. Na apscisi grafa prikazano je vrijeme trajanja simulacije gibanja koja je podijeljena na jednake vremenske intervale. S obzirom da je potrebno provjeriti iznose maksimalnih sila u kritičnim zglobovima, prikazuju se grafovi sila tih zglobova u smjeru osi X i u smjeru osi Y. S obzirom da je korištena studentska verzija programa „MSC Adams“ na grafovima i na modelima prisutna je kapa koje je simbol tradicionalne studentske odore.

Zglob koji spaja nosač grane sa granom u modelu označen je kao „Joint\_3“. U daljnjem tekstu ovaj zglob nazivati će se zglob\_3. U grafu može se prikazati krivulja sile za X i Y os na ovaj element. Apscisa grafa predstavlja ukupno vrijeme potrebno za izvršenje simulacije gibanja počevši od trenutka 0.0 do trenutka 10.0.

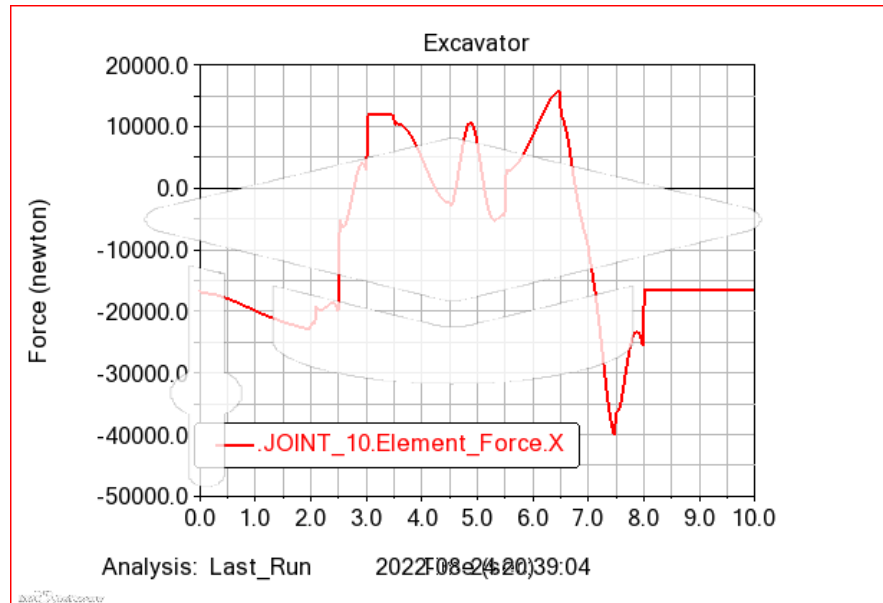


Slika 4. 1. Sila po osi X za zglob\_3

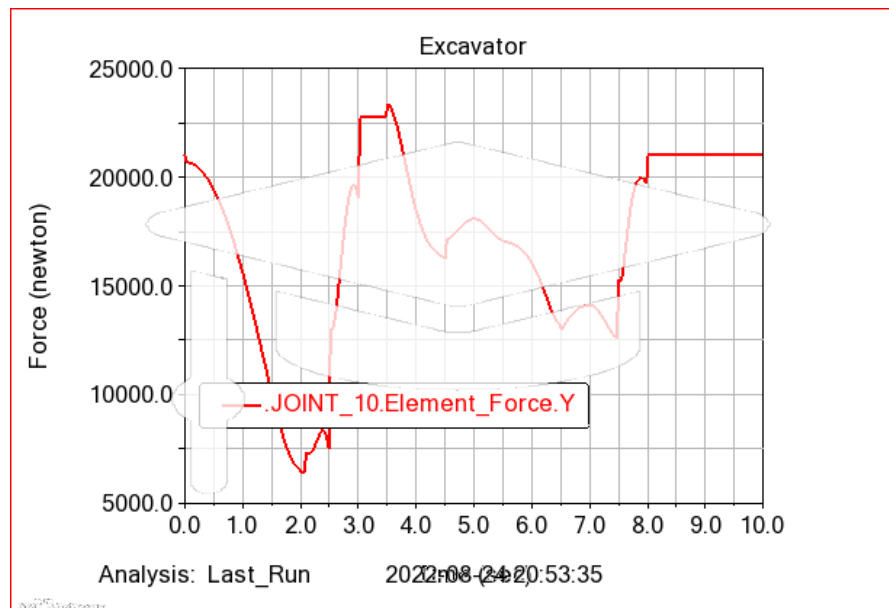


Slika 4. 2. Sila po osi Y za zglob\_3

Zglob koji spaja granu sa rukom u modelu označen je kao „Joint\_10“. U daljnjem tekstu ovaj zglob nazivati će se zglob\_10. U grafu može se prikazati krivulja sile za X i Y os na ovaj element. Apscisa grafa predstavlja ukupno vrijeme potrebno za izvršenje simulacije gibanja počevši od trenutka 0.0 do trenutka 10.0.

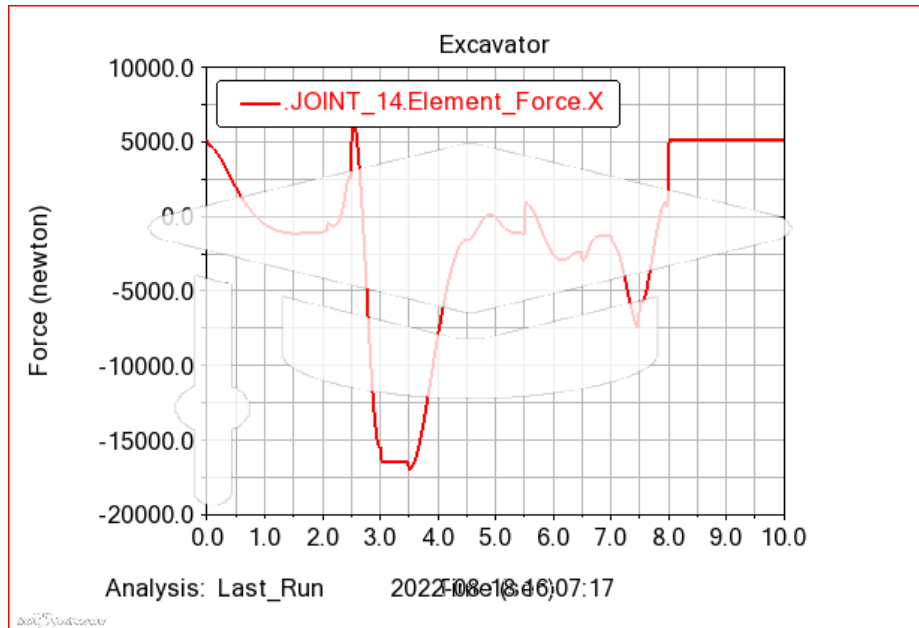


Slika 4. 3. Sila po osi X za zglob\_10

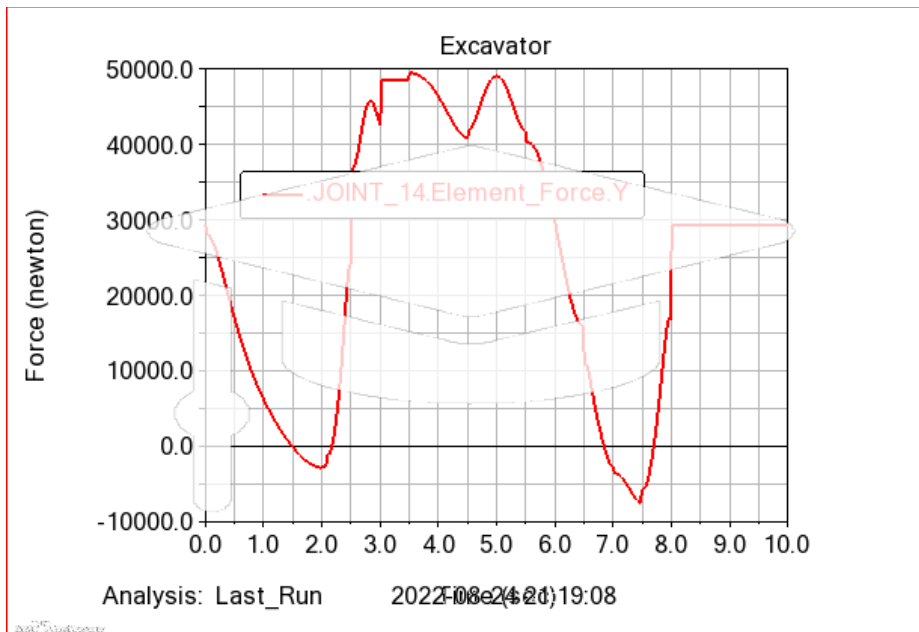


Slika 4. 4. Sila po osi Y za zglob\_10

Zglob koji spaja ruku sa žlicom u modelu označen je kao „Joint\_14“. U daljnjem tekstu ovaj zglob nazivati će se zglob\_14. U grafu može se prikazati krivulja sile za X i Y os na ovaj element,



Slika 4. 5. Sila po osi X za zglob\_14



Slika 4. 6. Sila po osi Y za zglob\_14



### 4.3. Očitavanje maksimalnih sila u zglobovima

Za zglob\_3 koji spaja nosač grane sa granom može se iz dijagrama na slici 4.1. zaključiti da se najveća sila koja djeluje na zglob\_3 po X osi javlja u trenutku 2.0. U tom trenutku ruka bagera doseže svoj maksimalni raspon te se javlja sila od 450 kN u pozitivnom smjeru X osi. Iz dijagrama na slici 4.2. može se zaključiti da se najveća sila koja djeluje na zglob\_3 po Y osi javlja u trenutku 7.5. U tom trenutku započinje izvlačenje svih triju cilindara tj. skupljanje ruke bagera do svojeg početnoga položaja. Sila koja se javlja u ovom trenutku iznosi 275 kN te je usmjerena u negativnom smjeru Y osi.

Za zglob\_10 koji spaja granu sa rukom može se iz dijagrama na slici 4.3. zaključiti da se najveća sila koja djeluje na zglob\_10 po X osi javlja u trenutku 7.5. U tom trenutku započinje izvlačenje svih triju cilindara tj. skupljanje ruke bagera do svojeg početnoga položaja te se javlja sila od 40 kN u negativnom smjeru X osi. Iz dijagrama na slici 4.4. može se zaključiti da se najveća sila koja djeluje na zglob\_10 po Y osi javlja u trenutku 3.5. U tom trenutku započinje uvlačenje cilindra grane kako bi se teret podignuo iznad visine tla. Sila koja se javlja u ovom trenutku iznosi 23 kN te je usmjerena u pozitivnom smjeru Y osi.

Iz dijagrama na slici 4.5. za zglob\_14 koji spaja ruku sa žlicom može se očitati da se najveća sila koja djeluje na zglob\_14 po osi X javlja u trenutku 3.0. U tom trenutku završava grabljenje tereta te se javlja sila od 17 kN u negativnom smjeru X osi. Iz dijagrama na slici 4.6. može se zaključiti da se najveća sila koja djeluje na zglob\_14 po Y osi javlja u trenutku 3.5. U tom trenutku započinje uvlačenje cilindra grane kako bi se teret podignuo iznad visine tla. Sila koja se javlja u ovom trenutku iznosi 50 kN te je usmjerena u pozitivnom smjeru Y osi.

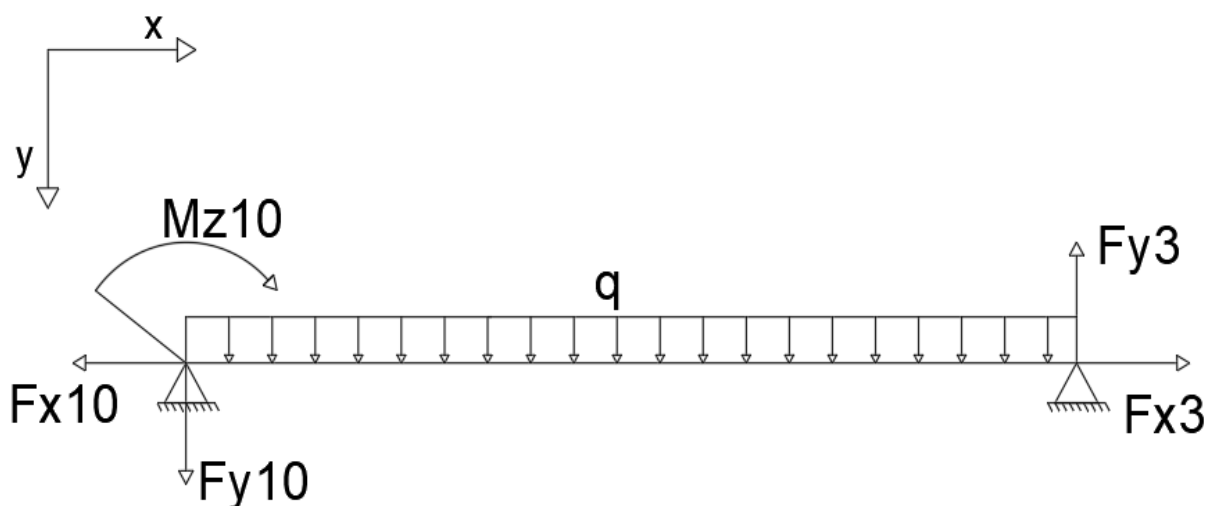
Na ovaj način dobivene su tražene sile u kritičnim točkama. Najveći iznosi sila su na poveznici grane i nosača grane (zglob\_3). Zglob\_3 je fiksni zglob te što znači da on sprječava gibanje u sva tri smjera. U zglobu\_10 i zglobu\_14 iznosi sila su znatno manje iz razloga što ovi zglobovi dozvoljavaju gibanja po osi X i rotaciju oko Z osi. Zbog toga sile koje djeluju na ove zglobove mogu se pretvoriti u gibanje ruke bagera. Uz ograničenje na gibanje, fiksni zglob također ne dozvoljava rotaciju oko X, Y ili Z osi. Još jedan faktor koji objašnjava zašto je na ovom zglobu najveća sila je taj da se ovaj element nalazi na poveznici sa kabinom bagere. S obzirom da je teret u žlici najudaljeniji od ovog zgloba, krak po kojemu djeluje moment je također najveći. To rezultira sa velikim momentom tj. velikim silama u zglobu.

Iznosi ovih sila pomnoženim sa faktorom sigurnosti moraju se upotrijebiti kod odabira tipa zgloba sa kojim će dijelovi ruke bagera biti povezani. Osim toga poznavanje ovih podataka je neophodno za bilo kakve daljnje proračune. S obzirom da se sa zglobom\_3 povezuje cijela ruka bagera sa kabinom intuitivno se može pretpostaviti ovakav ishod koji je i potvrđen pomoći simulacije. Stoga je grana kritični element ruke bagera za koji je potrebno provesti analizu sila te prikazati dijagrame raspodjele unutrašnjih sila.

## 5. ANALITIČKA ANALIZA KRITIČNOG ELEMENTA

### 5.1. Izrada grafova raspodjele unutarnjih sila

Grana ruke bagera pojednostavljeno može se shematski prikazati kao gredni nosač sa dva aksijalna ležaja, a težina grane može se prikazati pomoću kontinuiranog opterećenja koje djeluje duž grane u pozitivnom smjeru osi Y.



Slika 5. 1. Shematski prikaz grane

S obzirom da se najveće sile javljaju u zglobu\_3 one se uzimaju kao poznalice sustava dok su sile u zglobu\_10 nepoznanice. Iz modela poznata je masa grane koja iznosi 2205 kg. Množenjem mase grane sa gravitacijskim ubrzanjem Zemlje od  $9,81 \frac{m}{s^2}$  i dijeljenjem sa duljinom grane od 6,2 m može se dobiti iznos kontinuiranog opterećenja po metru koje iznosi:

$$q = 3,4889 \frac{kN}{m}$$

Iznosi ostalih poznalice sustava:

$$l = 6,2 \text{ m}$$

$$F_{x3} = 450 \text{ kN}$$

$$F_{y3} = 275 \text{ kN}$$

Gdje su:

$F_{x3}$  i  $F_{y3}$  maksimalne sile paralelne sa X i Y osi u zglobu\_3 koje su izvedene iz simulacije gibanja.

$F_{x10}$  i  $F_{y10}$  maksimalne sile u zglobu\_10 koje su nepoznanice sustava

$M_z$  je moment savijanja koji djeluje u zglobu\_10

$l$  je duljina grane

Postavljaju se jednačbe ravnoteže za cjelovitu gredu. Njihovim rješavanjem dobivaju se nepoznate reakcije.

$$\sum F_x = 0 \text{ iz čega slijedi } F_{x10} = F_{x3} \quad (5.1)$$

$$\sum F_y = 0 \text{ iz čega slijedi } F_{y10} = F_{y3} - ql \quad (5.2)$$

$$\sum M_z = 0 \text{ iz čega slijedi } M_{z10} = F_{y3} * l - q * l * \frac{l}{2} \quad (5.3)$$

Rješavanjem jednačbe (5.1) dobiva se vrijednost  $F_{x10} = 450 \text{ kN}$ .

Uvrštavanjem iznosa veličina u jednačbu (5.2) dobiva se:

$$F_{y10} = 275 - 3,4889 * 6,2$$

$$F_{y10} = 253,369 \text{ kN}$$

Dok se uvrštavanjem iznosa veličina u jednačbu (5.3) dobiva:

$$M_{z10} = 275 * 6,2 - 3,4889 * 6,2 * \frac{6,2}{2}$$

$$M_{z10} = 1637,943 \text{ kNm}$$

S obzirom da na gredu djeluje kontinuirano opterećenje mora se izračunati  $Z_{max}$  i iznos momenta na udaljenosti  $Z_{max}$  kako bi se mogli nacrtati svi dijagrami.  $Z_{max}$  označava udaljenost po X osi od zgloba\_10 za koju će druga derivacija momenta savijanja biti jednaka nuli tj. udaljenost na kojoj se nalazi ekstrem funkcije momenta savijanja.

Postavlja se jednačba momenta savijanja za udaljenost z od oslonca 10.

$$M_{fz} = M_{z10} - q * \frac{z^2}{2} - F_{y10} * z \quad (5.4)$$

Izjednačuje se prva derivacija jednačbe momenta savijanja sa nulom kako bi se dobio  $Z_{max}$ .

$$\frac{dM_{fz}}{dz} = 0 = -qz - F_{y10}$$

$$Z_{max} = -72,62 \text{ m}$$

Kako bi se točnije moglo nacrtati graf momenta savijanja izračunava se iznos momenta za  $z = 1,55 \text{ m}$ ,  $z = 3,1 \text{ m}$  i za  $z = 4,65 \text{ m}$ . Ovi iznosi uvrštavaju se u jednačbu (5.4) kako bi se dobili iznosi momenta na tim udaljenostima od zgloba\_10.

$$M_{f 1,55} = 1637,943 - 3,4889 * \frac{1,55^2}{2} - 253,369 * 1,55$$

$$M_{f 1,55} = 1241,03 \text{ kNm}$$

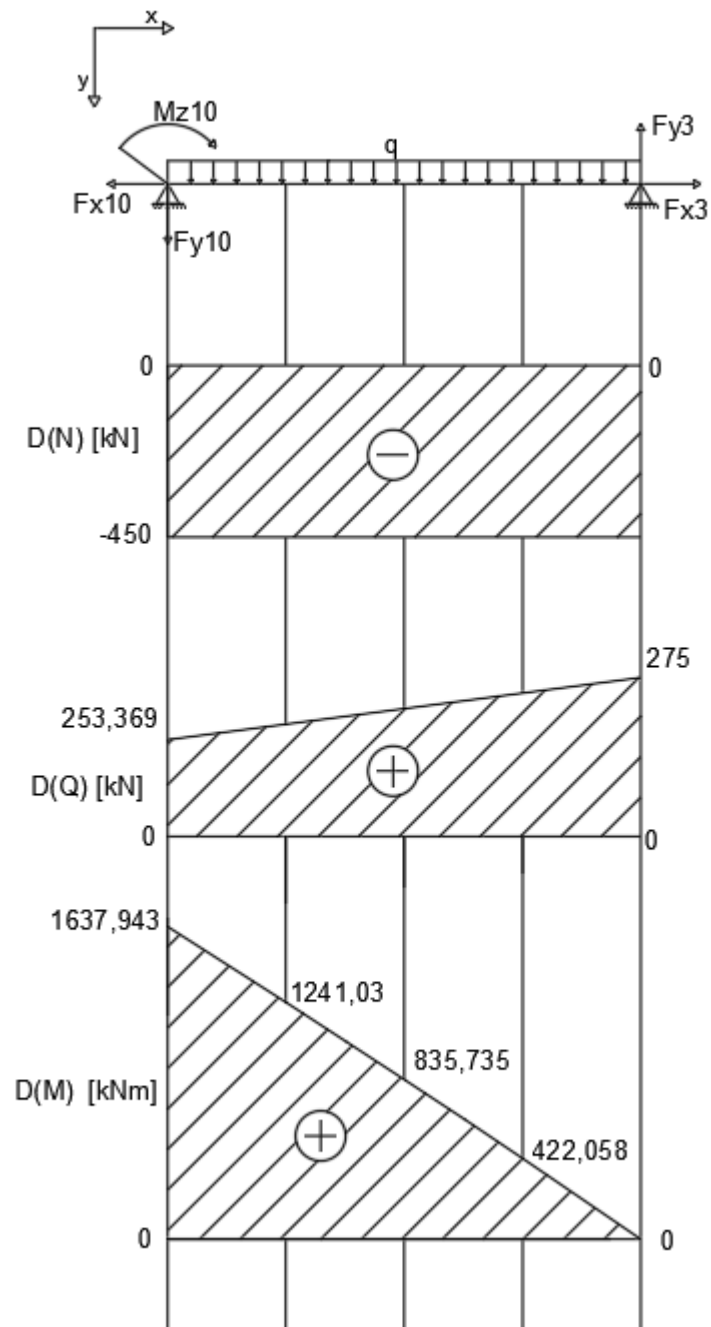
$$M_{f 3,1} = 1637,943 - 3,4889 * \frac{3,1^2}{2} - 253,369 * 3,1$$

$$M_{f 3,1} = 835,735 \text{ kNm}$$

$$M_{f 4,65} = 1637,943 - 3,4889 * \frac{4,65^2}{2} - 253,369 * 4,65$$

$$M_{f 4,65} = 422,058 \text{ kNm}$$

Iz izračunatih vrijednosti mogu se prikazati dijagrami aksijalnih i poprečnih sila te dijagram momenta savijanja za granu ruke bagera.



Slika 5. 2. Diagram raspodjele unutrašnjih sila

## 5.2. Usporedba analitičkih rezultata sa vrijednostima iz simulacije

Razlike između izračunatih vrijednosti sila u zglobu\_10 i vrijednosti dobivenih iz simulacije razlikuju se zbog pretpostavljenog aksijalnog ležaja za zglob\_10. Poznate sile za zglob\_3 uzete su iz dinamične simulacije kao najveće moguće vrijednosti koje se mogu pojaviti u radu bagera. Grana bagera pretpostavljena je kao ravna grede dok je na trodimenzionalnome modelu koji se koristio za izračun sila u zglobu\_3 zakrivljena.

Cilj analize sila je prikazati raspodjelu unutrašnjih sila kroz kritični element za istodobno djelovanje maksimalnih sila po X i Y osi. Iz tog razloga uzete su maksimalne sile koje se javljaju u zglobu\_3 kao poznalice sustava. U dijagramu aksijalnih sila može se uočiti konstantna vrijednost aksijalne sile koja iznosi 450 kN. Jedine dvije sile koje djeluju u aksijalnome smjeru na pojednostavljenom prikazu grane su sile u zglobovima. Iz ovog razloga, kako bi dobili statičan prikaz aksijalne sile u zglobovima moraju imati jednak iznos ali u suprotnim smjerovima.

Graf momenta savijanje približan je ravnoj liniji iako na gredu djeluje kontinuirano opterećenje. Takvo ponašanje grafa momenta savijanja proizlazi iz odnosa težine grane bagera i tereta koji bager prenosi. S obzirom da je maksimalna masa koju bager prenosi značajno veća od mase grane, kontinuirano opterećenje nema veliki utjecaj na krivulju momenta savijanja.

## 6. ZAKLJUČAK

Simulacijom pokreta bagera koji se javljaju pri kopanju tla koristeći se trodimenzionalnim modelom, program izračunava sile koje se javljaju u modelu koristeći se dinamikom složenih tijela. Koristeći se grafovima na kojima su prikazane krivulje sila za pojedine zglobove, očitavaju se maksimalni iznosi sila. Ovim postupkom dobivaju se iznosi sila za X i Y osi u tri osnovna zgloba.

Maksimalni iznosi sila za zglob\_3 sa kojim se povezuje grana ruke bagera i oslonca grane iznose 450 kN u pozitivnom smjeru X osi i sila od 275 kN usmjerena u negativnom smjeru Y osi. Iznosi maksimalnih sila u ovom zglobu značajno su veći od iznosa maksimalnih sila u druga dva zgloba. S obzirom da je zglob\_3 aksijalni zglob tj. ne dopušta gibanje u sva tri smjera i rotacije oko svih triju osi te se nalazi na poveznici ruke bagera sa kabinom, ovakav ishod opravdava intuitivno očekivanje.

U zglobu\_10 na spoju grane sa rukom bagera, iznosi maksimalnih sila su 40 kN u negativnom smjeru X osi i 23 kN u pozitivnom smjeru Y osi. Maksimalna sila zgloba\_3 usmjerena u istom smjeru kao i globalna os Y, javlja se u istom trenutku kao i maksimalna sila u X osi za zglob\_10. U tom trenutku započinje izvlačenje svih triju cilindara ruke bagera tj. skupljanje ruke do svojeg početnoga položaja.

Za zglob\_14 koji spaja ruku sa žlicom maksimalna sila za X os javlja se u trenutku u kojem završava grabljenje tereta. Iznos ove sile je 17 kN i usmjerena je u negativnom smjeru X osi. Za ovaj zglob također je izračunata i maksimalna sila za Y os i iznosi 50 kN.

Pomoću grednog nosača sa dva aksijalna ležaja umjesto zgloba\_3 i zgloba\_10 izrađuje se shematski prikaz grane. Dobivene maksimalne sile za X i Y os zgloba\_3 i masa grane korištene su kao poznanice sustava pri izračunu aksijalnih i poprečnih sila te momenta savijanja.

Korištenjem zakonitosti statike gdje je suma svih sila po osi jednaka nuli, izračunate su nepoznate vrijednosti. Dobivena je vrijednost vertikalne sile u zglobu\_10 koja iznosi 253,369 kN i aksijalne sile od 450 kN. Izračunata vrijednost momenta koji djeluje u zglobu\_10 iznosi 1637,943 kNm u pozitivnom smjeru rotacije oko Z osi. Izračunati su iznosi momenta savijanja za različite udaljenosti od zgloba\_10 po X osi kako bi se graf momenta savijanja mogao točnije ucrtati. Izračunata je i pozicija ekstrema funkcije momenta savijanja koja iznosi  $-72,62$  m po osi X od zgloba\_10.

Sa izračunatim vrijednostima sila u zglobovima i momentima savijanje u više točaka prikazani su dijagrami raspodjele unutrašnjih sila za aksijalne i poprečne sile te za moment savijanja oko Z osi.



## 7. LITERATURA

- [1] Bhaveshkumar, P.: “Static Analysis of mini hydraulic backhoe attachment using FEA approach“, s Interneta, <http://www.ijmerr.com/uploadfile/2015/0409/20150409122653633.pdf>, 5. Rujna 2022.
- [2] Shengpeng, X.: “Excavator sales hit a new high in 2021, and exports doubled year-on-year“, s Interneta, <https://www.seetao.com/details/134001.html>, 5. Rujna 2022.
- [3] Jadhav, A.; Kulkarni, V.; Kulkarni, A.; Ravi, K.: “ Static, Modal and Kinematic Analysis of Hydraulic Excavator“, s Interneta, <https://www.ijert.org/research/static-modal-and-kinematic-analysis-of-hydraulic-excavator-IJERTV3IS050100.pdf>, 5. Rujna 2022.
- [4] Hexagon.: “Adams The Multibody Dynamics Simulation Solution” , s Interneta, <https://www.mscsoftware.com/product/adams>, 5. Rujna 2022
- [5] Wolfgang, K.: “MSC Adams“, s Interneta, <https://www.cae-sim-sol.com/en/software/msc-software/msc-adams>, 5. Rujna 2022.
- [6] Technocrafts.: “Excavator.zip“, s Interneta, [https://drive.google.com/file/d/1d6v\\_VMCde\\_4yG4V1rVCeDKX7MAXBgnFe/view](https://drive.google.com/file/d/1d6v_VMCde_4yG4V1rVCeDKX7MAXBgnFe/view), 5. Rujna 2022.
- [7] Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje.: “Mjerne jedinice“, s Interneta, <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=41311>, 5. Rujna 2022.

- [8] Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje.: “Sila“, s Interneta, <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=55937>, 5. Rujna 2022.
- [9] Kruz, V.: “Tehnička fizika za tehničke škole“, Školska knjiga, Zagreb, 1969.
- [10] Wikipedija.: “Vektor“, s Interneta, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Vektor>, 5. Rujna 2022.
- [11] Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje.: “Statika“, s Interneta, <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=57891>, 5. Rujna 2022

## 8. SAŽETAK

Cilj ovog zadatka je izvršiti statičku analizu ruke bagera na način da se izračunaju maksimalne sile u kritičnim spojevima. Za dodatno pojašnjenje unutarnjih sila u kritičnom elementu, izrađen je grafički prikaz raspodjele aksijalnih i poprečnih sila te momenta oko Z osi.

Koristeći se „MSC Adams“ softverom izrađen je trodimenzionalni model bagera. Kako bi se mogli simulirati pokreti koje bager izvodi pri kopanju tla, dijelovi grane bagera povezani su odgovarajućim zglobovima. Na spojevima klipova i cilindara korišteni su translacijski zglobovi a na spoju nosača grane sa kabinom korišten je fiksni zglob. Na svim mjestima u kojim se koristi poveznica zglobnim klinom poput spoja grane sa rukom ili ruke sa nastavkom i na svim hvatištima cilindara i klipova upotrijebljen je revolucijski zglob.

Kako bi program mogao izračunati sile koje se javljaju u modelu potrebno je odabrati vrstu materijala za sve dijelove modela. Koristeći volumene dijelova koje program izračunava iz trodimenzionalnog modela i svojstvima odabranih materijala poput gustoće, program izračunava masu dijelova i sve ostale podatke koji su potrebni za izračun sila.

Unosom matematičkih funkcija kao kodove za upravljanje izvlačenja klipa iz cilindra stvorena je simulacija tipičnih pokreta bagera. Simulacijom pokreta bagera koji se javljaju pri kopanju tla, program izračunava sile koje se javljaju u modelu koristeći se dinamikom složenih tijela.

Grafičkim prikazom uspješno su prikazane funkcije promjenjivih sila u zglobovima koje nastaju pri radu. Iz grafova funkcija za X i Y os očitani su maksimalni iznosi sila u glavnim spojevima. Poznavanje ovih podataka nužan je korak pri daljnjim izračunima s obzirom da se koriste pri odabiru veličine zglobova ili za odabir tipa profila i debljine stijenke profila.

Kako bi se detaljnije objasnilo ponašanje unutarnjih sila u grani bagera izrađuje se pojednostavljeni prikaz koristeći običnu gredu sa dva aksijalna ležaja. Dobivene maksimalne vrijednosti za zglob na poveznici grane sa nosačem grane i masa grane koriste se kao poznanice sustava.

Vrijednosti nepoznatih sila i momenta u zglobu na spoju ruke i grane bagera izračunate su pomoću sustava triju nepoznanica sa tri jednadžbe. Izračunata je pozicija ekstrema funkcije momenta savijanja koristeći nul-točku prve derivacije te funkcije. Dodatno se računaju iznosi momenta savijanja za različite udaljenosti po X osi od zgloba na poveznici grane sa rukom.

Koristeći poznate i izračunate vrijednosti u zglobovima te dodatno izračunate iznose momenta savijanja izrađuju se grafički prikazi raspodjele unutrašnjih sila za aksijalne i poprečne sile te za moment oko Z osi. Na ovaj način izvršena je statična analiza bagera te je prikazan smjer, način i iznos sila koje se javljaju u zglobovima pri njegovom radu.

**Ključne riječi:** Statička analiza, Sila u zglobovima, Bager, Raspodjela unutrašnjih sila,

## SUMMARY

The goal of this task is to perform a static analysis of the excavator arm in such a way as to calculate the maximum forces in the critical joints. For additional clarification of the internal forces in the critical element, a graphic representation of the distribution of axial and transverse forces and moments around the Z axis was created.

Using "MSC Adams" software, a three-dimensional model of the excavator was created. In order to simulate the movements that the excavator performs when digging the ground, the parts of the excavator are connected with appropriate joints. Translational joints were used as the connection between pistons and the cylinders, and a fixed joint was used at the joint connecting the boom carrier with the cabin. A revolutionary joint is used in all places where a hinged pin link is used, such as the connection between boom and arm or between arm and excavator attachments, revolutionary joint is also used on all grips of cylinders and pistons.

For the program to be able to calculate the forces occurring in the model, it is necessary to select the type of material for all parts of the model. Using the volumes of the parts that the program calculates from the three-dimensional model and the properties of the selected materials, such as density, the program calculates the mass of the parts and all other data that is necessary for the calculation of forces.

A simulation of typical excavator movements was created by entering mathematical functions as codes for managing the piston extraction from the cylinder. By simulating the movements of the excavator that occur when digging the soil, the program calculates the forces that occur in the model using multibody dynamics.

On the graphic display, functions of variable forces in the joints that arise during work are successfully shown. Maximum forces in the main joints were read from the function graphs for the X and Y axes. Knowing these data is a necessary step in further calculations, considering that they are used when selecting the size of joints or for choosing the type of profile and the thickness of the profile wall.

To explain in more detail, the behavior of internal forces in the excavator boom, a simplified scheme representation is made using a beam with two axial bearings. The obtained maximum values for the joint on the connection between boom and the boom carrier and the mass of the boom are used as acquaintances of the system.

The values of the unknown forces and moments in the joint between the arm and the boom of the excavator were calculated using a system with three variables three equations. The position of the extremum for function of the bending moment was calculated using the zero-point of the first derivative of that function. In addition, the amounts of the bending moment are calculated for different distances along the X axis from the joint connecting excavator boom with the arm.

Using the known and the calculated values in the joints and the additionally calculated values of the bending moment, graphic representations for the distribution of internal forces for axial and transverse forces including the bending moment around the Z axis were created. The graphic representation of the distribution of internal forces further explains the behavior of internal forces in the critical element of the excavator arm. In this way, a static analysis of the excavator was performed and the direction, manner and amount of the forces that occur in the joints during its operation were shown.

**Key words:** Static analysis, Force in joints, Excavator, Distribution of internal forces,