

# Platforma za simulaciju potresa

---

**Romić, Dominik**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2025**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:904871>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-29**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering  
and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Dominik Romić**

Zagreb, 2025. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **Platforma za simulaciju potresa**

Mentor:

prof. dr. sc. Dragan Žeželj

Student:

Dominik Romić

0035215111

Zagreb, 2025. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedene literature.

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr. sc. Draganu Žeželju, na stručnim savjetima, usmjerenju i podršci tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji na neizmjernom strpljenju, razumijevanju i podršci tijekom cijelog obrazovanja. Posebnu zahvalnost dugujem roditeljima koji su mi omogućili studiranje i uvijek bili uz mene, pružajući mi sigurnost i motivaciju u svim izazovima. Također, želim zahvaliti svom bratu i rodbini na ohrabrenju i pomoći te prijateljima i kolegama koji su svojim savjetima, podrškom i zajedničkim radom učinili moje studentske dane ljepšim.

Dominik Romić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu               |        |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum                               | Prilog |
| Klasa: 602 - 04 / 25 - 06 / 1       |        |
| Ur.broj: 15 - 25 -                  |        |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Dominik Romić**

JMBAG: 0035215111

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Platforma za simulaciju potresa**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Earthquake simulation platform**

Opis zadatka:

Potres je prirodna pojava koja može imati katastrofalne posljedice za društvo i pojedince. Uglavnom nastaje međusobnom dinamikom tektonskih ploča. Utjecaj potresa na građevine i načine gradnje istražuje se upotrebom simulacijskih platformi.

U uvodnom dijelu rada potrebno je dati pregled vezano uz izvore i vrste potresa, osnovne pojmove o potresima te pregled ponude simulacijskih platformi i njihovih mogućnosti, s naglaskom na platforme s dva stupnja slobode gibanja. Za potonju izvedbu i potrebno je napraviti funkcijsku dekompoziciju i morfološku matricu te generirati najmanje dva koncepta. Za daljnju razradu i konstrukcijsko rješenje odabrati koncept koji je pogodniji za nosivost od 1.000 kg i radne frekvencije u rasponu od 0 Hz do 30 Hz.

Vrijednosti potrebne za proračun i odabir pojedinih komponenti usvojiti iz postojećih rješenja sličnih sustava, iskustvenih vrijednosti te u dogovoru s mentorom. Računalni model odabranog rješenja uređaja izraditi u 3D CAD sustavu, cjelovito konstrukcijsko rješenje prikazati sklopnim crtežom, a dijelove odabrane u dogovoru s mentorom razraditi do razine radioničkih crteža.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu, norme kao i možebitno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

28. studeni 2024.

30. siječnja 2025.

6., 7. i 10. veljače 2025.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr.sc. Dragan Žeželj

Prof. dr.sc. Tanja Jurčević Lulić

# SADRŽAJ

|                                                                              |      |
|------------------------------------------------------------------------------|------|
| SADRŽAJ.....                                                                 | I    |
| POPIS SLIKA .....                                                            | III  |
| POPIS TABLICA.....                                                           | V    |
| POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....                                           | VI   |
| POPIS OZNAKA.....                                                            | VII  |
| SAŽETAK.....                                                                 | VIII |
| SUMMARY .....                                                                | IX   |
| 1. Uvod .....                                                                | 1    |
| 1.1. Tektonske ploče.....                                                    | 2    |
| 2. Osnovni pojmovi potresa .....                                             | 4    |
| 2.1. Potres .....                                                            | 4    |
| 2.2. Definiranje mjesta nastanka potresa .....                               | 4    |
| 2.3. Seizmički valovi.....                                                   | 5    |
| 2.3.1. Prostorni valovi.....                                                 | 5    |
| 2.3.2. Površinski valovi .....                                               | 7    |
| 2.4. Određivanje jakosti potresa .....                                       | 9    |
| 2.4.1. Jakost potresa prema magnitudi.....                                   | 9    |
| 2.4.2. Jakost potresa prema intenzitetu .....                                | 10   |
| 2.5. Posljedice potresa .....                                                | 11   |
| 3. Platforme za simulaciju potresa .....                                     | 13   |
| 3.1. Pregled postojećih platformi za simulaciju potresa na tržištu .....     | 13   |
| 3.1.1. ATOM.....                                                             | 13   |
| 3.1.2. SHAKETABLE II XY .....                                                | 16   |
| 3.1.3. BIAXIAL IRON CORE .....                                               | 17   |
| 3.1.4. TDG platforma za simulaciju potresa .....                             | 18   |
| 3.1.5. MTS platforma za simulaciju potresa .....                             | 19   |
| 3.1.6. Najveća vanjska platforma za simulaciju potresa .....                 | 21   |
| 3.2. Način ležištenja platforme .....                                        | 23   |
| 3.2.1. Ležištenje linearnim kliznim ili kugličnim ležajem.....               | 23   |
| 3.2.2. Ležištenje linearnim vodilicama s križnim valjkastim elementima ..... | 24   |
| 3.2.3. Ležištenje hidrauličkim aktuatorima .....                             | 25   |
| 4. Razvoj platforme za simulaciju potresa .....                              | 26   |
| 4.1. Funkcijska dekompozicija i morfološka matrica.....                      | 26   |
| 4.2. Izrada koncepata .....                                                  | 32   |
| 4.2.1. Koncept 1.....                                                        | 32   |
| 4.2.2. Koncept 2.....                                                        | 33   |
| 4.3. Ocjenjivanje koncepata .....                                            | 34   |
| 4.4. Razrada odabranog koncepta .....                                        | 36   |
| 5. Proračun platforme za simulaciju potresa .....                            | 38   |
| 5.1. Potrebna sila za pokretanje platforme.....                              | 38   |

|        |                                                               |    |
|--------|---------------------------------------------------------------|----|
| 5.2.   | Simulacija opterećenja pomične platforme .....                | 40 |
| 5.2.1. | Opterećenje masom uzorka .....                                | 40 |
| 5.2.2. | Opterećenje masom uzorka i silama pokretanja .....            | 42 |
| 5.3.   | Hidraulički servo aktuator .....                              | 44 |
| 5.3.1. | Radna frekvencija i pomak .....                               | 45 |
| 5.3.2. | Hod klipa.....                                                | 48 |
| 5.3.3. | Sila hidrauličkog cilindra.....                               | 48 |
| 5.3.4. | Dodatni elementi hidrauličkog cilindra .....                  | 49 |
| 5.4.   | Vijek trajanja linearnih profilnih vodilica .....             | 50 |
| 6.     | Konstruktivsko rješenje platforme za simulaciju potresa ..... | 54 |
| 7.     | Zaključak.....                                                | 56 |
|        | Literatura .....                                              | 57 |

## POPIS SLIKA

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1. Geološka razdoblja Zemlje [1.].....                                                                                   | 1  |
| Slika 2. Pomicanje tektonskih ploča kontinenata [1.] .....                                                                     | 1  |
| Slika 3. Granice tektonskih ploča u ovisnosti o načinu pomicanja ploča [1.].....                                               | 2  |
| Slika 4. Tektonske ploče [1.].....                                                                                             | 3  |
| Slika 5. Definiranje potresa u odnosu na seizmološku postaju [3.] .....                                                        | 4  |
| Slika 6. Shematski prikaz P-vala [3.] .....                                                                                    | 5  |
| Slika 7. Shematski prikaz SV-vala i SH-vala [3.] .....                                                                         | 6  |
| Slika 8. Shematski prikaz Loveov val [3.] .....                                                                                | 7  |
| Slika 9. Shematski prikaz Rayleighjev val [3.] .....                                                                           | 8  |
| Slika 10. Jakost potresa izražena magnitudom i oslobođenom energijom u tonama eksploziva [4.] .....                            | 10 |
| Slika 11. Posljedice tsunamija, Selo Aceh (otok Sumatra, Indonezija) [1.] .....                                                | 11 |
| Slika 12. Šteta nastala u pokrajini Tohoku (Japan) nakon potresa i tsunamija [5.] .....                                        | 12 |
| Slika 13. Model uređaja za simulaciju potresa ATOM, DTG [6.] .....                                                             | 14 |
| Slika 14. Izvedba pomicanja platforme ATOM, DTG [6.] .....                                                                     | 14 |
| Slika 15. Tlocrt i bokocrt uređaja ATOM s prikazanim dimenzijama [6.] .....                                                    | 15 |
| Slika 16. Uređaj za simulaciju potresa SHAKETABLE II XY, QUANSER [7.].....                                                     | 16 |
| Slika 17. Uređaj za simulaciju potresa ili drugog dinamičkog opterećenja BIAxIAL IRON CORE, TDG [6.] .....                     | 17 |
| Slika 18. Platforma za simulaciju potresa nosivosti 30 tona, proizvođača TDG [6.] .....                                        | 18 |
| Slika 19. Platforma za simulaciju potresa s 6 stupnjeva slobode gibanja, proizvođača MTS [8.] .....                            | 19 |
| Slika 20. Komponente laboratorija velikih platformi za simulaciju potresa [8.] .....                                           | 20 |
| Slika 21. Vertikalni aktuatori [9.].....                                                                                       | 21 |
| Slika 22. Horizontalni aktuatori [9.].....                                                                                     | 21 |
| Slika 23. Izvedba platforme za simulaciju potresa, San Diego - Kalifornija [9.] .....                                          | 22 |
| Slika 24. Linearne vodilice u obliku krajnjih blokova i potpornih šina s kliznim ležajem i kućištem [10.].....                 | 23 |
| Slika 25. Vodilica s križnim valjkastim elementima [11.].....                                                                  | 24 |
| Slika 26. Crossed Roller table, Del-Tron [11.] .....                                                                           | 24 |
| Slika 27. Pokretna platforma PS-6TL-1500, MotionSystems [12.] .....                                                            | 25 |
| Slika 28. Funkcijska dekompozicija platforme za simulaciju potresa (općenito).....                                             | 27 |
| Slika 29. Funkcijska dekompozicija platforme za simulaciju potresa s hidrauličkim aktuatorom .....                             | 30 |
| Slika 30. Koncept 1 .....                                                                                                      | 32 |
| Slika 31. Koncept 2 .....                                                                                                      | 33 |
| Slika 32. Prikaz dimenzija pomične platforme .....                                                                             | 36 |
| Slika 33. Izvedba pomičnog dijela platforme.....                                                                               | 37 |
| Slika 34. Prikaz ležištenja pomične platforme .....                                                                            | 37 |
| Slika 35. Rubni uvjeti pomične ploče .....                                                                                     | 40 |
| Slika 36. Rezultati simulacije: ekvivalentno naprezanje (HMH), ukupni pomak, faktor sigurnosti .....                           | 41 |
| Slika 37. Rezultati simulacije pri opterećenju platforme s masom uzorka i silom pokretanja: ukupni pomak.....                  | 42 |
| Slika 38. Rezultati simulacije pri opterećenju platforme s masom uzorka i silom pokretanja: ekvivalentno naprezanje .....      | 42 |
| Slika 39. Rezultati simulacije pri opterećenju platforme s masom uzorka i silama pokretanja: minimalni faktor sigurnosti ..... | 43 |

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 40. Dimenzije dvoradnog hidrauličkog cilindra [13.].....                                                            | 44 |
| Slika 41. Dijagram kombinacije radne frekvencije i pomaka u ovisnosti o brzini / ubrzanju                                 | 46 |
| Slika 42. Dijagram s naznačenom površinom kombinacija pomaka i radne frekvencije ( $a = 3g$ , $v = 1 \text{ m/s}$ ) ..... | 46 |
| Slika 43. Odabrani spojni elementi nominalne nosivosti 50 kN [13.] .....                                                  | 49 |
| Slika 44. Specifikacija odabranog modela vodilice [14.].....                                                              | 50 |
| Slika 45. Parametri gibanja vozača po profilnoj vodilici [14.] .....                                                      | 51 |
| Slika 46. Parametri uvjeta opterećenja [14.] .....                                                                        | 51 |
| Slika 47. Rezultat tehničkog alata <i>Life Calculation</i> HIWIN, pri zadanim parametrima [14.]                           | 52 |
| Slika 48. Dimenzije odabrane profilne vodilice [14.] .....                                                                | 53 |
| Slika 49. Konstrukcijsko rješenje platforme za simulaciju potresa .....                                                   | 54 |
| Slika 50. Pogled platforme, smjer osi X.....                                                                              | 54 |
| Slika 51. Pogled platforme, smjer osi Z .....                                                                             | 55 |
| Slika 52. Ojačanje za smanjenje savijanja krajeva profilnih vodilica .....                                                | 55 |

## POPIS TABLICA

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 1. Specifikacije uređaja za simulaciju potresa ATOM, TDG [6.].....                                 | 14 |
| Tablica 2. Specifikacije uređaja za simulaciju potresa SHAKETABLE II XY, QUANSER [7.]<br>.....             | 16 |
| Tablica 3. Specifikacije uređaja za simulaciju potresa BIAXIAL IRON CORE, TDG [6.]....                     | 17 |
| Tablica 4. Specifikacije uređaja za simulaciju potresa proizvođača MTS [8.] .....                          | 19 |
| Tablica 5. Specifikacije platforme za simulaciju potresa, San Diego - Kalifornija [9.] .....               | 22 |
| Tablica 6. Morfološka matrica općenite platforme za simulaciju potresa .....                               | 28 |
| Tablica 7. Morfološka matrica hidrauličkog sustava .....                                                   | 31 |
| Tablica 8. Ocjenjivanje koncepata .....                                                                    | 34 |
| Tablica 9. Značajke dvoradnog hidrauličkog cilindra [13.] .....                                            | 44 |
| Tablica 10. Izračun parametra pomaka u ovisnosti o frekvenciji i brzini / ubrzanju .....                   | 45 |
| Tablica 11. Krajnje vrijednosti brzine klipa i radne frekvencije za odabrani hidraulički cilindar<br>..... | 47 |
| Tablica 12. Proračun vijeka trajanja profilnih vodilica za različite parametre gibanja.....                | 53 |
| Tablica 13. Specifikacije konstruirane platforme za simulaciju potresa.....                                | 56 |

**POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

|             |                                 |
|-------------|---------------------------------|
| DR25.01.00. | Platforma za simulaciju potresa |
| DR25.01.02. | Nosač profilne vodilice         |
| DR25.01.03. | Element osiguranja paralelnosti |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka                  | Jedinica | Opis                                                           |
|-------------------------|----------|----------------------------------------------------------------|
| $A$                     | m        | Pomak platforme u jednom smjeru                                |
| $A_0$                   | m        | Hod klipa u jednom smjeru                                      |
| $A_{min}$               | m        | Minimalna potrebna duljina hoda klipa                          |
| $A_{odabrano}$          | m        | Hod klipa odabranog hidrauličkog cilindra                      |
| $a$                     | $m/s^2$  | Ubrzanje platforme                                             |
| $a(t)$                  | $m/s^2$  | Ubrzanje platforme u ovisnosti o vremenu                       |
| $a_0$                   | $m/s^2$  | Puni iznos ubrzanja                                            |
| $a_{max}$               | $m/s^2$  | Maksimalan iznos ubrzanja platforme                            |
| $d_u$                   | m        | Promjer radnog dijela klipa                                    |
| $d_v$                   | m        | Promjer glave klipa                                            |
| $E$                     | MPa      | Modul elastičnosti                                             |
| $F(t)$                  | N        | Sila pokretanja platforme u ovisnosti o vremenu                |
| $F_0$                   | N        | Puni iznos sile pokretanja platforme                           |
| $F_{klipa}$             | N        | Sila odabranog hidrauličkog cilindra na radnoj strani klipa    |
| $F_{max}$               | N        | Maksimalan iznos sile pokretanja platforme                     |
| $f$                     | Hz       | Frekvencija                                                    |
| $f_{SL}$                | /        | Statički faktor sigurnosti profilnih vodicica                  |
| $f_{SL_{min}}$          | /        | Minimalni statički faktor sigurnosti pri vibracijama / udarima |
| $f_W$                   | /        | Faktor opterećenja profilnih vodicica                          |
| $g$                     | $m/s^2$  | Gravitacija Zemlje                                             |
| $L$                     | km       | Vijek trajanja profilnih vodicica                              |
| $L_h$                   | h        | Nazivni vijek trajanja profilnih vodicica                      |
| $M_L$                   | /        | Lokalna magnituda                                              |
| $M_W$                   | /        | Momentna magnituda                                             |
| $M_b$                   | /        | Magnituda tjelesnog vala                                       |
| $M_s$                   | /        | Magnituda površinskog vala                                     |
| $m$                     | kg       | Masa                                                           |
| $m_{HEA_{140}}$         | kg       | Masa dva HEA profila s rebrima i graničnicima za montažu       |
| $m_{aktuator}$          | kg       | Masa hidrauličkog aktuatora                                    |
| $m_{sklop_{platforme}}$ | kg       | Masa platforme zajedno s masom pojačanja                       |
| $m_{sklop_{vodilica}}$  | kg       | Masa dviju vodicica sa svojim nosačima                         |
| $m_{uk}$                | kg       | Ukupna masa sustava koju aktuator pokreće                      |
| $m_{uzorka}$            | kg       | Masa uzorka                                                    |
| $p$                     | bar      | Standardni tlak odabranog cilindra                             |
| $t$                     | s        | Vrijeme                                                        |
| $v$                     | m/s      | Brzina gibanja klipa                                           |
| $v_0$                   | m/s      | Puni iznos brzine                                              |
| $v_{max}$               | m/s      | Maksimalna brzina klipa hidrauličnog cilindra                  |
| $v_{min}$               | m/s      | Minimalna brzina klipa hidrauličnog cilindra                   |
| $x(t)$                  | m        | Elongacija                                                     |
| $\nu$                   | /        | Poissonov koeficijent                                          |
| $\omega$                | $s^{-1}$ | Kutna brzina                                                   |

## **SAŽETAK**

U ovom diplomskom radu istražuje se i razvija platforma za simulaciju potresa s dva stupnja slobode gibanja. U uvodnom dijelu rada obuhvaćena je analiza nastanka potresa, vrsta potresa, osnovni pojmovi vezani uz potrese te pregled dostupnih simulacijskih platformi i njihovih mogućnosti. Slijedi funkcijska dekompozicija i generiranje morfološke matrice, te kombinacijom rješenja izrađena dva koncepta. Za daljnju razradu odabran je koncept koji ispunjava zahtjeve nosivosti od 1000 kg i radne frekvencije u rasponu od 0 Hz do 30 Hz. Konstruiranje platforme uključuje odabir i dimenzioniranje komponenata na temelju proračuna sile pokretanja platforme. Na temelju toga izrađen je računalni model u 3D CAD sustavu te cjelovito konstrukcijsko rješenje koje je prezentirano sklopnim crtežom te jednim podsklopnim i radioničkim crtežom. Rad donosi sveobuhvatan prikaz koraka konstruiranja te temeljene parametre za konstruiranje platforme za simulaciju potresa.

Ključne riječi: platforma za simulaciju potresa, simulacija potresa

## **SUMMARY**

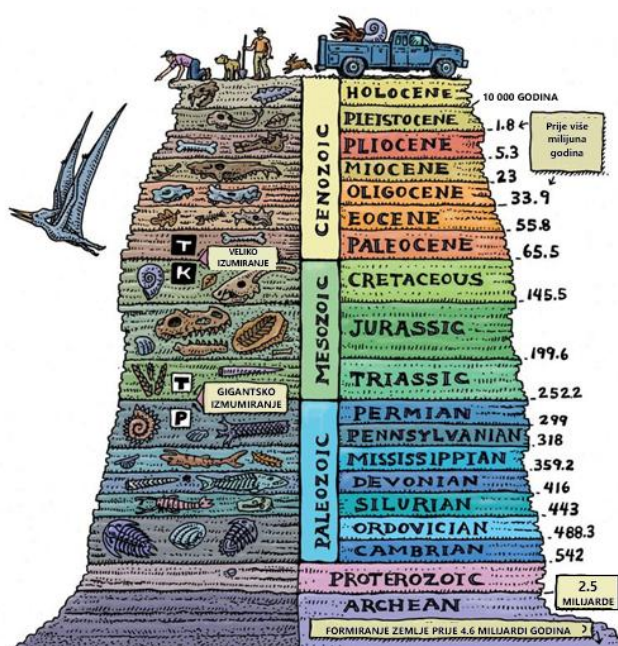
This thesis explores and develops an earthquake simulation platform with two degrees of freedom. The introductory part of the thesis covers the analysis of earthquake origins, types of earthquakes, basic earthquake-related concepts, and an overview of available simulation platforms and their capabilities. This is followed by a functional decomposition and the generation of a morphological matrix, leading to the creation of two conceptual solutions. The concept that meets the requirements of a load capacity of 1000 kg and an operating frequency range from 0 Hz to 30 Hz was selected for further development. The design of the platform includes the selection and dimensioning of components based on the calculation of the forces required to move the platform. Based on these parameters, a 3D CAD model and a complete structural solution were developed, presented through an assembly drawing, one subassembly drawing, and one workshop drawing. The thesis provides a comprehensive overview of the design process and the fundamental parameters for designing an earthquake simulation platform.

Key words: earthquake simulation platform, earthquake simulation

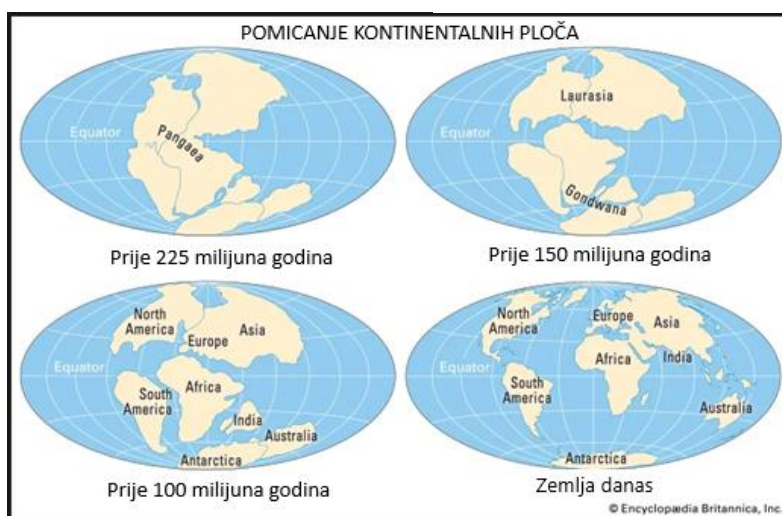
## 1. Uvod

Milijunima godina pomicanje tektonskih ploča oblikuje Zemljine kontinente tako što ih razdvaja i spaja te time formira sadašnji oblik i položaj na Zemaljskoj kugli. Od razdoblja samog formiranja Zemlje do završetka geološkog razdoblja paleozoika kontinenti su se konstantno spajali i razdvajali nekoliko puta u geološkoj povijesti. Najznačajnije spajanje kontinenata se odvija na kraju geološkog razdoblja paleozoika (prije 299 - 273 milijuna godina) u kojem se formira jedan superkontinent koji se naziva Pangea i koji je uključivao gotovo sve kopnene mase na Zemlji. Slika 1. prikazuje geološka razdoblja Zemlje od nastanka do današnjeg vremena.

Raspad takvog superkontinenta je započeo prije otprilike 200 milijuna godina na početku geološkog razdoblja mezozoik. Tokom dugog vremena formirao se današnji raspored i oblik kontinenata. Proces formiranja još uvijek traje te se tektonske ploče i dalje pomiču i time tvore novi izgled Zemljine površine, a kao posljedica pomicanja nastaju potresi na Zemljinoj površini. Slika 2. prikazuje pomicanje kontinenata od superkontinenta Pangea do današnjeg rasporeda.



Slika 1. Geološka razdoblja Zemlje [1.]

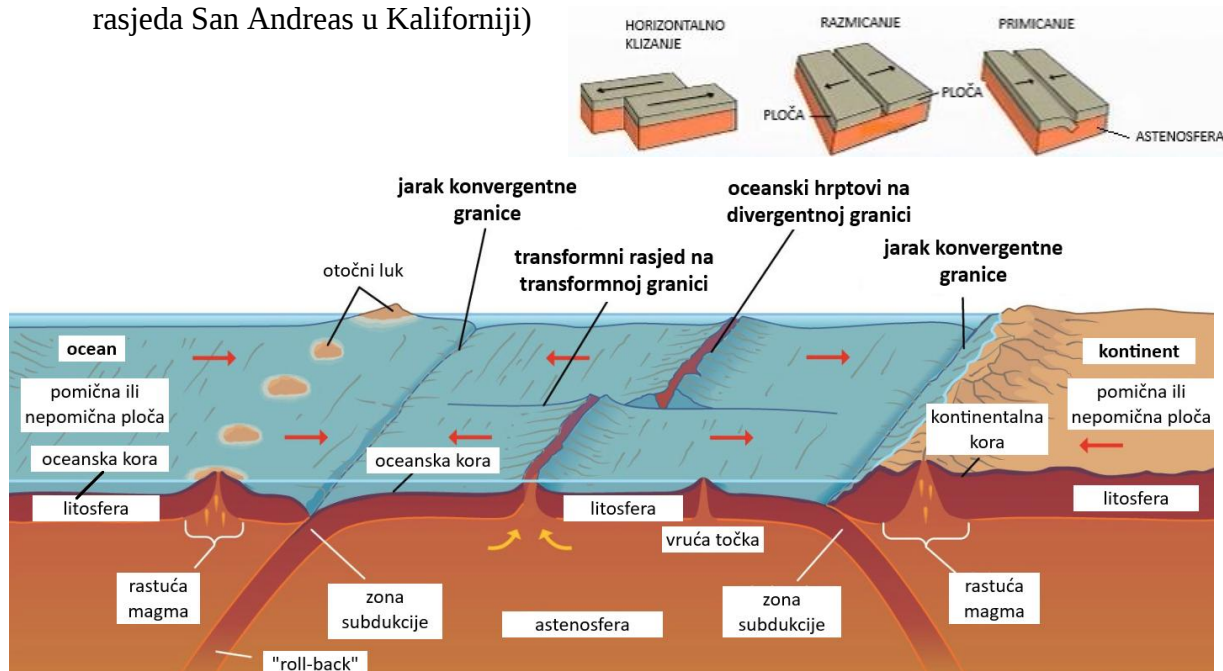


Slika 2. Pomicanje tektonskih ploča kontinenata [1.]

### 1.1. Tektonske ploče

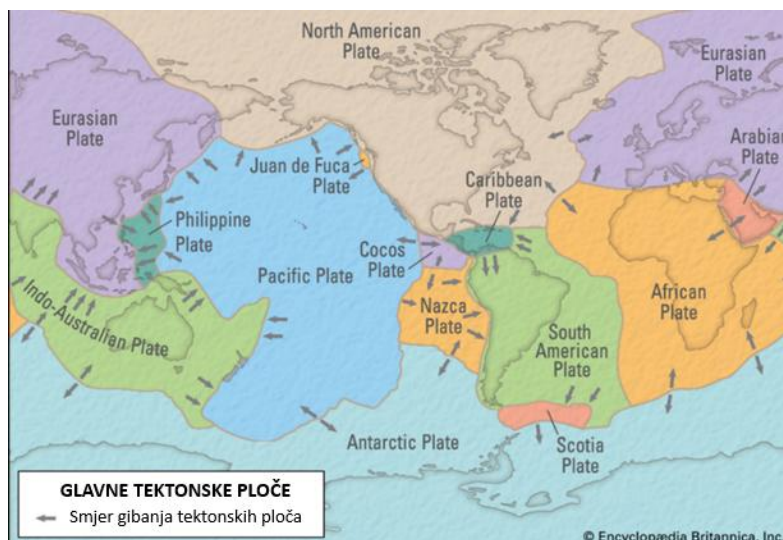
Tektonske ili litosferne ploče se nalaze na vanjskom sloju Zemlje koja se naziva litosfera a koja se sastoji od gornje krutog plašta Zemlje i Zemljine kore (debljina litosfere 30-200 km). Ploče se mogu međusobno primicati, razmicati ili kliziti jedna uz drugu uz to da svaka vrsta pomicanja ploča ima svoju vrstu granice. Način pomicanja prema [2.] i vrste granica ploča su prikazane slikom 3.

1. Primicanje tektonskih ploča - nastaju na mjestima gdje se dvije ploče pomiču jedna na drugu te tvore konvergentnu granicu koja može imati dvije vrste zona. Zona subdukcije koja označava podvlačenje jedne ploče pod drugu tvoreći otočni vulkanski luk poput Marijanskog otočja ili kontinentalnu koliziju kao sudar dviju kontinentalnih ploča uz nastajanje ulančanog gorja poput Himalajskog ili Alpskog planinskog vijenca
2. Razmicanje tektonskih ploča - nastaje na mjestima gdje se ploče odmiču jedna od druge tvoreći divergentnu granicu gdje nastaju oceanski hrptovi tj. dolazi do izbijanja magme na površinu oceanskog dna gdje se formira nova oceanska kora (razmicanje Sjevernoameričke i Euroazijske ploče uz stvaranje Srednjoatlanskog oceanskog hrpta)
3. Horizontalno klizanje tektonskih ploča - nastaje na mjestima gdje ploče klize jedna pokraj druge duž transformnog rasjeda tvoreći transformnu granicu, ne dolazi do stvaranja nove kore međutim duž linije rasjeda nastaje trenje koje uzrokuje seizmičku aktivnosti tj. potrese (klizanje Tihooceanske uz Sjevernoameričku ploču po dužini rasjeda San Andreas u Kaliforniji)



Slika 3. Granice tektonskih ploča u ovisnosti o načinu pomicanja ploča [1.]

Na Zemlji postoji 7 veliki i nekoliko manjih tektonskih ploča koje su prikazane slikom 4. Strelice prikazuju smjer gibanja tektonskih ploča. Najaktivniji dio je pacifički pojas gdje je procijenjeno da se na tom dijelu oslobađa do 80% energije svih potresa na Zemlji, uz to da je sam pojas povezan s vulkanskim aktivnostima po čemu je dobio naziv pacifički vatreni pojas.



Slika 4. Tektonske ploče [1.]

## 2. Osnovni pojmovi potresa

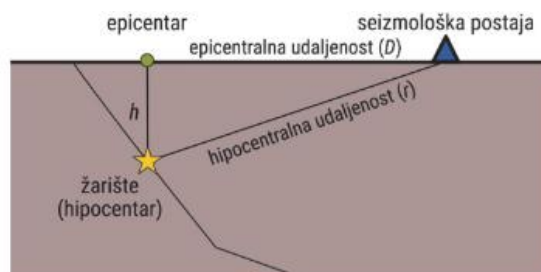
### 2.1. Potres

Prilikom pomicanja tektonskih ploča dolazi do „zapinjanja“ jedne ploče o drugu te stvaranje povišenog tlaka između ploča. Nakon što sila trenja između ploča postane manja od sile pomicanja (vrijedi za klizanje i primicanje ploča) jedna od tektonskih ploča popusti te time dolazi do naglog klizanja jedne ploče o drugu i oslobađanja velike količine energije. Oslobodena energija prolazi kroz zemljino kamenje u različitim oblicima seizmičkih valova i uzrokuje podrhtavanje tla. Takvo oslobađanje akumulirane energije se ne mora desiti u jednom velikom potresu, već postoje i naknadni (aftershock) te prethodni (foreshock) potresi koji također žele sustav vratiti u ravnotežu. Pojednostavljeno možemo reći da je potres iznenadno oslobađanje pohranjene energije na Zemljinoj površini.

Prethodni opisan postupak nastajanja potresa nazivamo tektonski potresi. Tektonske ploče svojim gibanjem pohranjuju potencijalnu energiju te je oslobađanjem pretvaraju u energiju elastičnih deformacija koja izaziva tektonske potrese. Osim tektonskih potresa razlikujemo urušni potres u kojem je oslobodena energija gravitacijsko potencijalna, vulkanski potres s hidrodinamičkom oslobodjenom energijom, impaktni potres te umjetni potres izazvan nuklearnim eksplozijama ili punjenjem, pražnjenjem akumulacijskih jezera.

### 2.2. Definiranje mjesta nastanka potresa

Mjesto nastanka potresa u Zemljinoj unutrašnjosti naziva se žarište ili hipocentar, projekcijom te točke na Zemljinu površinu dobivamo epicentar. Nazivi udaljenosti između definiranih točaka i seizmološke postaje su prikazani slikom 5. Ovisno o dubini potresa  $h$  razlikujemo plitke potrese (do 60 km), srednje duboke potrese (od 60 do 350 km) i duboke potrese (dubine veće od 350 km).



Slika 5. Definiranje potresa u odnosu na seizmološku postaju [3.]

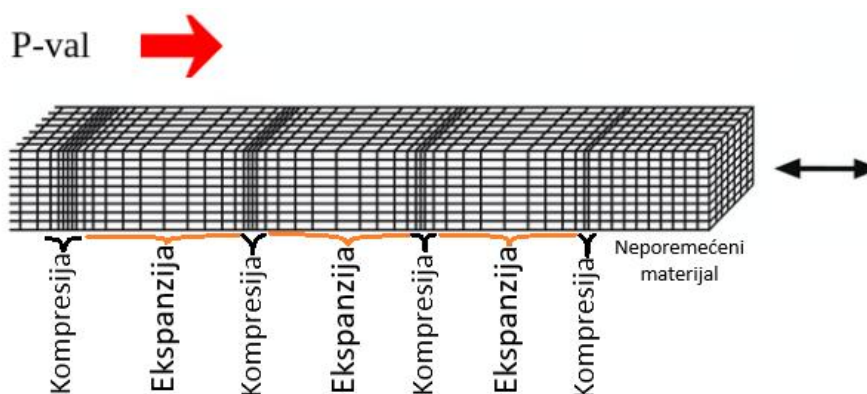
## 2.3. Seizmički valovi

Seizmički valovi su zapravo elastični valovi koji nastaju na površini loma rasjedne plohe. Rezultat su potresa, vulkanskih erupcija, velikih klizišta, a bilježi ih seizmograf, hidrofon (u vodi) ili akcelerometar. Prilikom potresa 90% ukupne energije se utroši na trenje i razne toplinske efekte, dok će se 10% osloboditi u vidu seizmičkih valova. Postoje dvije osnovne skupine seizmičkih valova: prostorni (eng. *body waves*) i površinski valovi (eng. *surface waves*).

### 2.3.1. Prostorni valovi

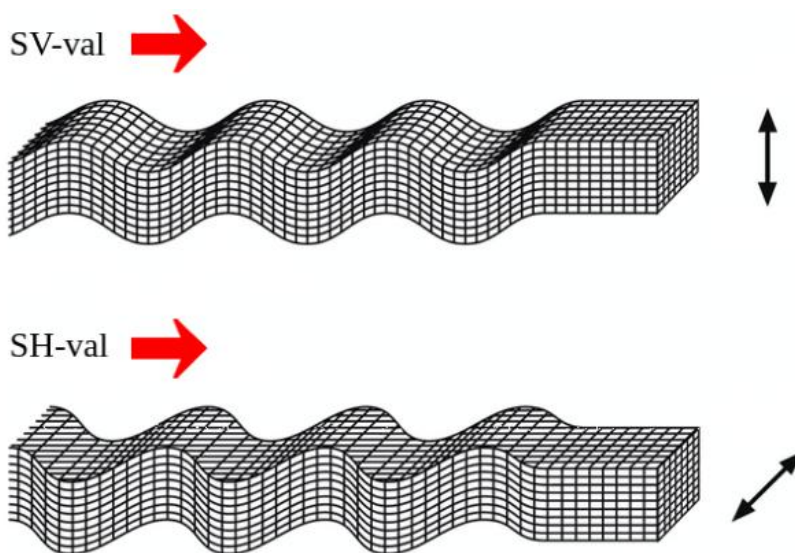
Prostorni valovi nastaju u samom žarištu (hipocentru) potresa, i putuju kroz Zemljinu unutrašnjost te time ovise o gustoći i krutosti zemlje kroz koju prolaze. Ovisno o vrsti gibanja čestica prostorni valovi se mogu podijeliti na P-valove i S-valove.

P-valovi (eng. *primary waves*) su longitudinalni valovi kod kojih čestice titraju oko svog ravnotežnog položaja u smjeru rasprostiranja vala (takvi su npr. Zvučni valovi). Često se nazivaju i kompresijskim valovima jer uzrokuju kompresiju sredstava kroz koje prolaze te time mogu putovati kroz bilo koju vrstu materijala, uključujući i tekućine. P-valovi su najbrža vrsta seizmičkih valova, približne prosječne brzine 6 km/s u Zemljinoj kori, i stoga uvijek prvi nailaze na seizmograf. Slika 6. prikazuje shematski prikaz P-vala, gdje crna strelica pokazuje smjerove gibanja čestica ako se valovi rasprostiru u smjeru naznačenom crvenom strelicom.



Slika 6. Shematski prikaz P-vala [3.]

S-valovi su transversalni valovi kod kojih čestice titraju okomito na smjer samog putovanja vala (kao i kod npr. valovi na vodi). Također se nazivaju i posmičnim valovima jer uzorkuju smicanje dijelova kroz koje se šire. S-valovi su sporiji, približne brzine 3,5 km/h u Zemljinoj kori ( $\approx 1,7$  puta sporiji od P – vala) te time nailaze na seizmograf nakon P-valova. Amplitude S-valova mogu biti višestruko veće od amplituda P-valova, stoga uzrokuju jače podrhtavanje površine. S obzirom na geometrijsku orijentaciju oscilacija u prostoru (polarizaciju) razlikuju se SH-valovi i SV-valovi. SH-valovi su S-valovi polarizirani u horizontalnoj ravnini, dok su SV-valovi polarizirani u vertikalnoj ravnini. Slika 7. prikazuje shematski prikaz SV-vala i SH-vala, gdje crne strelice pokazuje smjerove gibanja čestica ako se valovi rasprostiru u smjeru naznačenom crvenom strelicom.



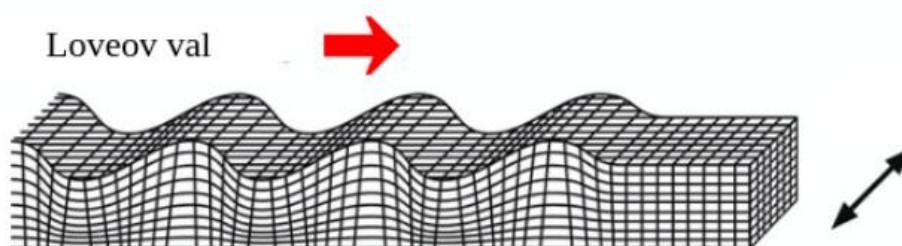
Slika 7. Shematski prikaz SV-vala i SH-vala [3.]

Zaključujemo da prilikom potresa možemo osjetiti dva podrhtavanja tla: slabije podrhtavanje uzrokovano nailaskom P-valova i jače podrhtavanje koje uzrokuju S-valovi. Ukoliko je žarište (hipocentar) potresa relativno blizu, obje vrste valova stići će u isto vrijeme, pa ćemo moći osjetiti samo jednu trešnju. Također većina ljudi će kod slabijih potresa osjetiti samo podrhtavanje koje je uzrokovano S-valovima.

### 2.3.2. Površinski valovi

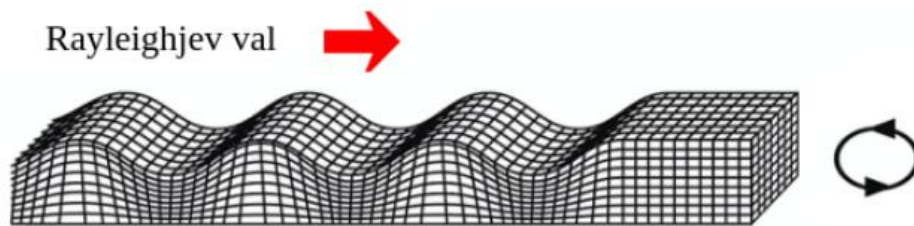
Površinski valovi putuju uz površinu Zemlje i njihova amplituda opada s dubinom. Karakterizirani su izraženim amplitudama, velikim periodima i poprilično pravilnim harmonijskim oblicima. Nastaju međudjelovanjem prostornih valova sa strukturom Zemlje (diskontinuitetom) tj. interakcijom P-valova i S-valova. Površinski valovi putuju sporije od S-valova međutim mogu imati mnogo veće amplitude i time su najrazorniji tip seizmičkih valova, zbog toga se najbolje uočavaju na seizmogramu u slučaju dalekih i snažnih potresa. Postoje dvije vrste površinskih valova: Loveovi i Rayleighjevi valovi.

Loveovi ili L-valovi su transverzalni valovi koji su polarizirani u horizontalnoj ravnini. Nastaju od reflektiranih i superponiranih SH-valova, uzrokuju pomicanje čestica s jedne strane na drugu. Polarizirani su u horizontalnoj ravnini, pa ih je moguće uočiti samo na horizontalnim komponentama seizmograma. Također imaju veću brzinu u odnosu na Rayleighjeve valove i time prije dolaze do seizmografa. Slika 8. prikazuje shematski prikaz Loveovog vala, gdje crna strelica pokazuje smjerove gibanja čestica ako se valovi rasprostiru u smjeru naznačenom crvenom strelicom.



Slika 8. Shematski prikaz Loveov val [3.]

Rayleighjevi ili R-valovi su složeni longitudinalni i transverzalni valovi koji se prenose eliptičnim titranjem čestica tla. Nastaju kombinacijom P-valova i SV-valova na lokalnim diskontinuitetima (prijelazi između različitih vrsta tla) tj. zonama s naglim promjenama svojstava. Pri prolasku Rayleighjevog vala, čestice osciliraju po eliptičnim putanjama poput kruženja vode u oceanu tijekom valova. Osciliranje može biti retrogradno (pomaci čestica na uzdignutom dijelu elipse usmjereni su kao i smjer rasprostiranja vala) ili suprotno od toga. Slika 9. prikazuje shematski prikaz Rayleighjevog vala, gdje crna strelica pokazuje smjerove gibanja čestica ako se valovi rasprostiru u smjeru naznačenom crvenom strelicom.



**Slika 9. Shematski prikaz Rayleighjev val [3.]**

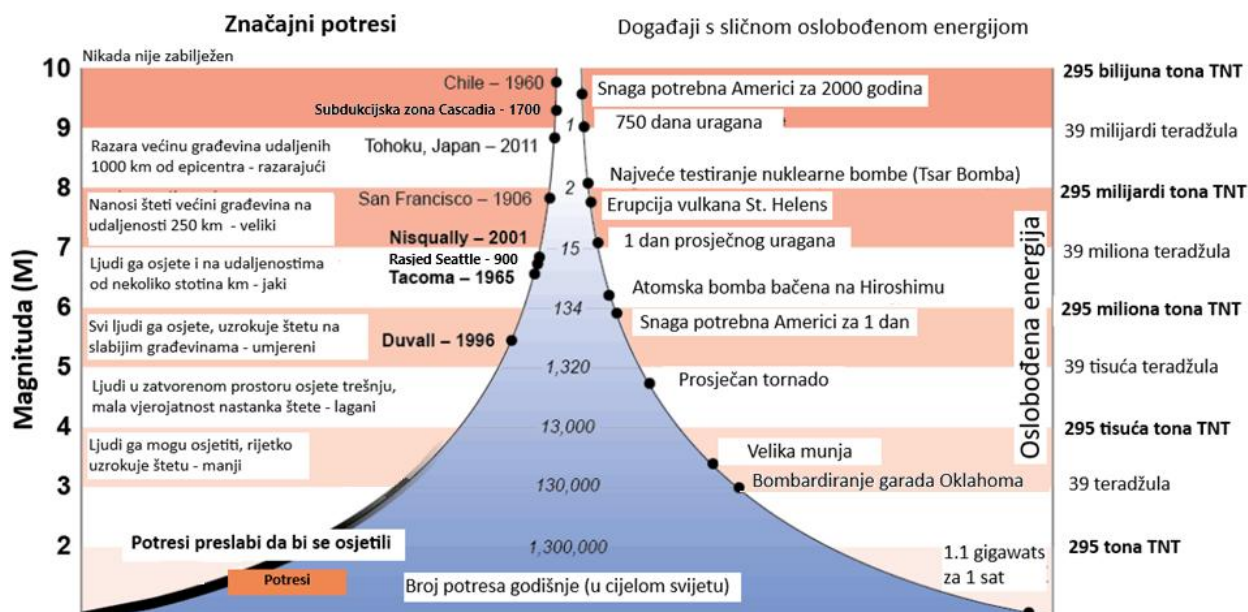
## 2.4. *Određivanje jakosti potresa*

Postoje dva načina određivanja jakosti odnosno veličine potresa. Prvi način određivanje jakosti potresa je pomoću magnitude potresa koja je nastala s pojavom seizmografa kako bi se moglo precizno odrediti gibanje tla uzrokovano prolaskom seizmičkih valova. Drugi način je utvrđivanje pomoću intenziteta potresa korištenjem ljestvice makroseizmičkog intenziteta koja se temelji na učinku koje je potres imao na objekte na površini, te opažanja i doživljaj ljudi.

### 2.4.1. *Jakost potresa prema magnitudi*

Veličina / jačina potresa se najčešće iskazuje prema magnitudi potresa, koja opisuje relativnu veličinu ili količinu oslobođene energije. Magnituda ima logaritamsku ljestvicu pomoću koje se brojevima (magnitudama) do 10 opisuje energija oslobođena u hipocentru potresa. Ljestvica je raspoređena tako da povećanje magnitude za jedan cijeli broj nastaje kao posljedica povećanja amplitude za 10 puta odnosno povećanje oslobođene energije za 32 puta.

Magnitudu je u seizmologiju uveo Charles Richter i po njemu je dobila naziv „magnituda po Richtheru“ odnosno Richtherova ljestvica, međutim ispravan naziv je lokalna magnituda ( $M_L$ ) jer je definirana za male epicentralne udaljenosti i za specifični seizmograf. Određuje se mjerenjem najveće amplitude pomaka seizmičkog vala koje je zabilježio seizmograf tijekom podrhtavanja i razlike vremena dolaska P-vala i S-vala te samim time nije pogodna za opisivanje velikih i jakih potresa (do magnitude 8). Zbog toga se danas kao najbolja mjera koristi momentna magnituda ( $M_W$ ) koja je jednaka umnošku površine rasjeda na kojem je došlo do pomaka rasjednih krila i samog pomaka te prosječne krutosti stijena. Osim momentne i lokalne magnitude postoje još i magnituda tjelesnog vala ( $M_b$ ) te magnituda površinskog vala ( $M_s$ ). Svaka od tih magnituda je u svom rasponu valjanosti ekvivalentna Richterovoj (lokalnoj) magnitudi. Slika 10. prikazuje dijagram jakosti potresa u magnitudi koja je ekvivalentna određenoj količini tona eksploziva te ostalim korisnim informacijama poput značajnih potresa, učestalost potresa s određenom magnitudom te određeni događaji s sličnom oslobođenom energijom.



Slika 10. Jakost potresa izražena magnitudom i oslobođenom energijom u tonama eksploziva [4.]

#### 2.4.2. Jakost potresa prema intenzitetu

Postoje različite makroseizmičke ljestvice koje opisuju intenzitet potresa poput europska makroseizmička ljestvica (EMS), Mercalli-Cancani-Siebergova ljestvica, modificirana Mercallijeva ljestvica i Medvedev-Sponheuer-Karnikova (MSK). Takve ljestvice su prilagođene područjima za koje su nastajale zbog karakteristika gradnje objekata. Kako bi se moglo odrediti točan intenzitet potresa i posljedice nastale nakon potresa vrlo je važno imati povratnu informaciju šire populacije. Zbog takvog pristupa stupanj potresa se ne može utvrditi na nenaseljenim područjima jer nema osobe koje bi dala svoja opažanja. Također stupanj potresa ovisi o tlu na kojem se desio. Ako je tlo mekano, rastresito, može pojačati oštećenja objekata na većoj udaljenosti nasuprot tvrdom tlu. Osobe koje su na višim katovima zgrada mogu bolje osjetiti i slabije potrese u odnosu na osobe koje se nalaze u prizemlju zgrada. Zbog toga je takav način određivanja jakosti potresa vrlo promjenjiv i ne relevantan nasuprot magnitudi potresa koja daje direktne vrijednosti.

## 2.5. Posljedice potresa

Jaki potresi svojim djelovanjem mogu narušiti statiku građevina, prouzrokovati rušenje i potonuće građevina, tsunamije, izazvati odrone i lavine, dovesti velike gradove u situacije u kojima se mjesecima ne može uspostaviti miran i normalan život ljudi. Iz potresa koji su se do sada odvijali potrebno je naučiti kakve se posljedice mogu očekivati te na koji način ih prevenirati.

Najsnažniji potres ikada zabilježen na Zemlji je pogodio Čile 1960. godine. Potres je imao magnitudu  $9,5 M_W$ , 40% grada je u potpunosti razorio te se procjenjuje da je odnio 6000 života samo u Čileu. Nakon potresa uslijedio je tsunami koji je pogodio Japan, Filipine i Novi Zeland i time povećao broj žrtava za još 230. Takva jačina potresa je uzrokovala rascjep na tlu dugačak 1000 kilometara te aktiviranje vulkana Cordon-Caulle nakon 40 godina mirovanja. Osim glavnog potresa postojali su prethodni potresi magnitude  $8,1 M_W$ ,  $6,8 M_W$  i  $7,9 M_W$  koji spadaju u grupu jakih i velikih potresa.

U novom tisućljeću, 2004. godine zabilježen je najsmrtonosniji potres, magnitude  $9,1 M_W$  ( $\approx 3.98$  puta slabiji po oslobođenoj energiji od magnitude  $9,5 M_W$ ), koji je pogodio Indijski ocean. Epicentar potresa je bio udaljen 160 km zapadno od Indonezijskog otoka Sumatre. Potres je uzrokovao najduži rasjed ikad zabilježen (približno 1 250 km) te je uzrokovao vibriranje Zemlje do 10 mm. Također izazvao je potrese na udaljenim mjestima poput Aljaske. Pogubni dio potresa su posljedični tsunamiji koji su dosežali visinu vala do 30 m. Tsunami je pogodio 15 zemalja uz katastrofalne posljedice gdje je broj žrtava premašio 225 000, s milijunima koji su ostali bez doma.



Slika 11. Posljedice tsunamija, Selo Aceh (otok Sumatra, Indonezija) [1.]

2011. godine potres magnitude  $9 M_W$  ( $\approx 5.62$  puta slabiji po oslobođenoj energiji od magnitude  $9,5 M_W$ ) u trajanju od 6 minuta pogodio je Japan. Svojom jačinom pomaknuo je istočni dio Japana prema Sjevernoj Americi za 3,9 metara te skratio dan za 1,6 mikrosekundi. Potres je prouzrokovao tsunami sa visinom vala od 40 metara koji je potopio grad Sendaiju (najveći grad regije Tohoku), valovi tsunamija su se proširili po svim kontinentima koji okružuju Tihi ocean. Potres zajedno s tsunamijem i požarima je odnio približno 18 500 života, međutim najveći dio života odnio je tsunami svojim potapanjem. Građevine u Japanu su u to vrijeme bile projektirane da izdrže potrese magnitude  $7 M_W$  te se puno ulagalo u educiranje ljudi na ponašanje tijekom potresa kako bi se mogli zaštititi. Takav pristup gradnji i edukaciji je pomogao da se smanji broj žrtava nastalih od samog potresa.



**Slika 12. Šteta nastala u pokrajini Tohoku (Japan) nakon potresa i tsunamija [5.]**

### 3. Platforme za simulaciju potresa

Kako bi bolje razumjeli utjecaj potresa na građevine, električne ili mehaničke sustave unutar građevina ili izvan njih te time mogli pružiti bolju sigurnost osoba koje se nalaze u okruženju, potrebno je provoditi ispitivanja i analize ponašanja tijekom potresa. Građevina ili sustav se podvrgava umjetnom potresu proizvedenom na platformi za simulaciju potresa te se bilježi njihovo ponašanje i time donose zaključci kako projektirati i graditi otpornu građevinu ili sustav na potrese određene magnitude.

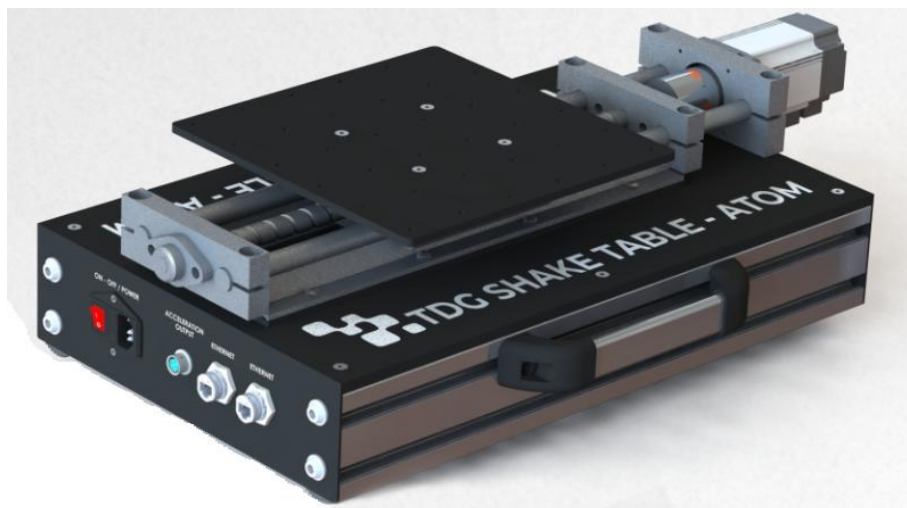
Platforma za simulaciju potresa može proizvesti realističnu simulaciju potresa ili bilo kojeg drugog dinamičkog opterećenja (rezonancija) koje bi željeli nametnuti ispitnom modelu ili konstrukciji. Cilj podvrgavanja modela simuliranom potresu je utvrđivanje potencijalne slabosti, potvrđivanje analitičkih modela i razvijanje poboljšane metodologije projektiranja za seizmičke otporne konstrukcije.

Prilikom projektiranja platforme za simulaciju potresa neophodno je odrediti željene mogućnosti te primarne aspekte poput veličine platforme, snage i hoda aktuatora, stupnjeve slobode gibanja. U ovisnosti o načinu stvaranja uzbude i vibracija razlikuju se električni pokretane platforme, hidraulički pokretane platforme ili ručno pokretane platforme. Ručno pokretane platforme za simulaciju potresa se većinom koriste za edukaciju te nisu pogodne za konkretna ispitivanja zbog točnosti uzroka uzbude. Također platforme se dijele prema nosivosti: male platforme imaju nosivost 0 do 1 000 kg, srednje platforme imaju nosivost 1 000 do 5 000 kg, dok velike platforme imaju nosivost veću od 5 000 kg.

#### 3.1. Pregled postojećih platformi za simulaciju potresa na tržištu

##### 3.1.1. ATOM

Model uređaja ATOM prikazan slikom 13., proizvođača TDG, je vrsta male prijenosne platforme za simulaciju potresa koja ima jedna stupanj slobode gibanja (jednoosni način uzbude) u horizontalnom smjeru pomoću servomotora, kandžaste spojke i kugličnog navojnog vretena. Platforma klizi po cilindričnim vodilicama koje su spojene nosačima na kućište uređaja prikazano slikom 14. Takav način ležištenja omogućuje simuliranje samo jedne vrste valova u vremenu tj. P ili SH seizmičkih valova. Platforma može simulirati potrese koristeći stvarne zapise potresa, mijenjati ubrzanje i pomak platforme tijekom simulacije te upravljati seizmičkim valovima. Koristi se za mehaniku konstrukcija, potrese, kalibraciju akcelometra i seizmičkih instrumenata.



Slika 13. Model uređaja za simulaciju potresa ATOM, DTG [6.]

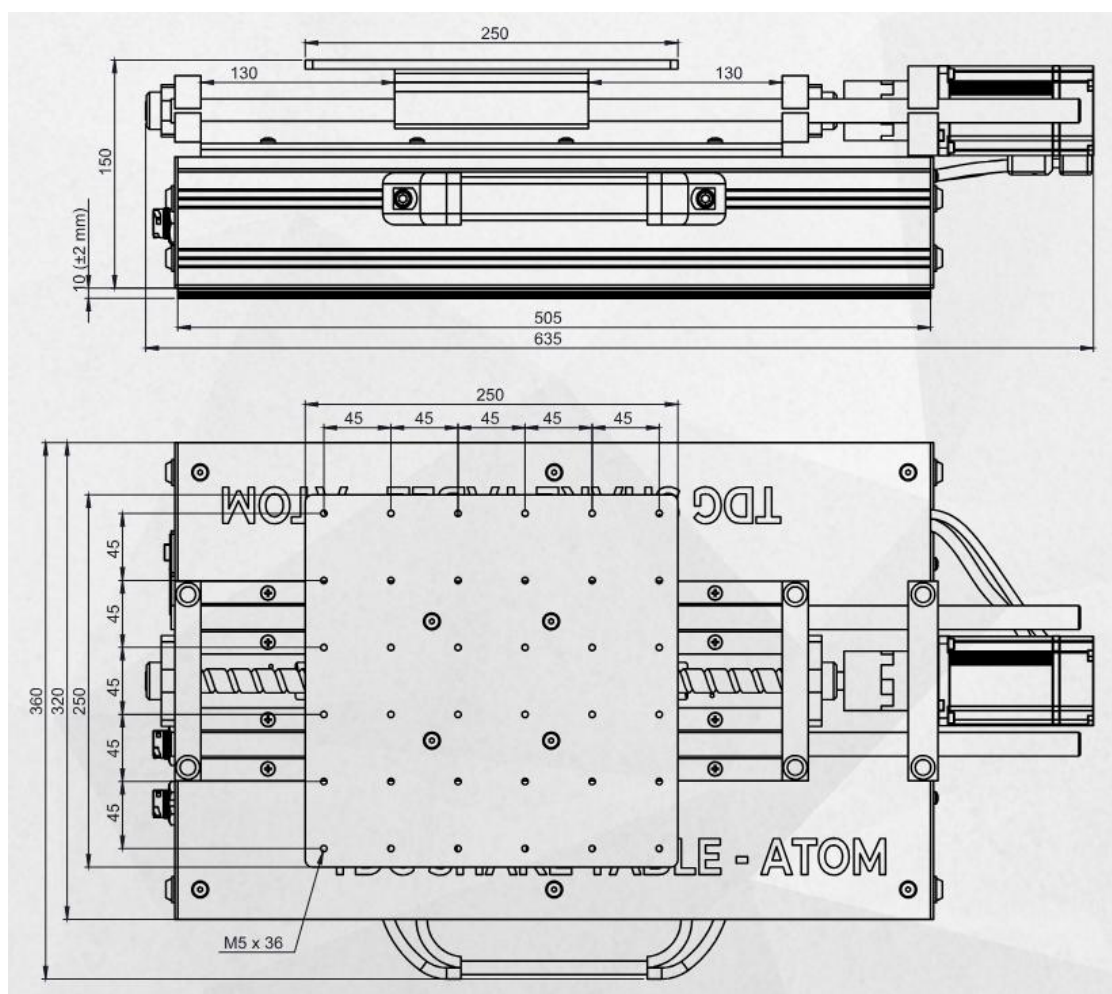


Slika 14. Izvedba pomicanja platforme ATOM, DTG [6.]

Karakteristike platforme za simulaciju potresa ATOM, prikazane su tablicom 1., a dimenzije cijelog uređaja su prikazane slikom 15.

Tablica 1. Specifikacije uređaja za simulaciju potresa ATOM, TDG [6.]

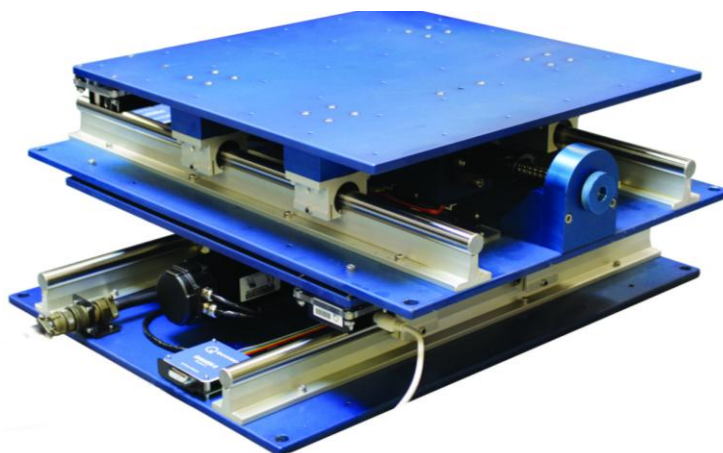
| Karakteristika                     | Vrijednost               |
|------------------------------------|--------------------------|
| Stupanj slobode gibanja            | 1                        |
| Dimenzija platforme                | 250 mm x 250 mm          |
| Dimenzija uređaja                  | 635 mm x 320 mm x 150 mm |
| Masa uređaja                       | 18 kg                    |
| Nosivost platforme (pri $\pm 1g$ ) | 50 kg                    |
| Mogućnost ubrzanja                 | $\pm 4g$                 |
| Radna frekvencija                  | 0 – 30 Hz                |
| Hod platforme                      | $\pm 125$ mm             |
| Maksimalna potrebna snaga          | 0,6 kW                   |



Slika 15. Tlocrt i bokocrt uređaja ATOM s prikazanim dimenzijama [6.]

### 3.1.2. SHAKETABLE II XY

Uređaj SHAKETABLE II XY, proizvođača Quanser je mala platforma za simulaciju potresa s dva stupnja slobode gibanja (dvoosna uzbuda) u horizontalnom smjeru. Uređaj je izveden kao dvije platforme s po jednim stupnjem slobode gibanja koje se nalaze jedna na drugoj te su međusobno zakrenute za  $90^\circ$  i time su ukupno omogućena dva stupnja slobode gibanja. Gibanje stvaraju dva kuglična navojna vretena (uspona 1,27 cm/okretaju) pogonjena s dva odvojena servo motora dok platforme klize po linearnim cilindričnim vodilicama. Takav način ležištenja platforme u dva smjera s linearnim vodilicama omogućuje simulaciju P i SH seizmičkih valova, koji se mogu kombinirati istovremeno ili svaki val posebno. Uređaj se primjenjuje u potresnom inženjerstvu te pronalasku krivulja propusnosti. Slika 16. prikazuje uređaj za simulaciju potresa SHAKETABLE II XY, a tablica 2. prikazuje njegove karakteristike.



Slika 16. Uređaj za simulaciju potresa SHAKETABLE II XY, QUANSER [7.]

Tablica 2. Specifikacije uređaja za simulaciju potresa SHAKETABLE II XY, QUANSER [7.]

| Karakteristika                                       | Vrijednost               |
|------------------------------------------------------|--------------------------|
| Stupanj slobode gibanja                              | 2                        |
| Dimenzija platforme                                  | 460 mm x 460 mm          |
| Dimenzija uređaja                                    | 610 mm x 460 mm x 254 mm |
| Masa uređaja                                         | 54,4 kg                  |
| Nosivost platforme (pri $\pm 1g$ , X smjer donja)    | 34,7 kg                  |
| Nosivost platforme (pri $\pm 2,5g$ , Y smjer gornja) | 7,5 kg                   |
| Mogućnost ubrzanja                                   | $\pm 2,5g$               |
| Radna frekvencija                                    | 0 – 10 Hz                |
| Hod platforme                                        | $\pm 76,2$ mm            |
| Maksimalna potrebna snaga                            | 0,4 kW                   |

### 3.1.3. BIAXIAL IRON CORE

Uređaj za simulaciju potresa BIAXIAL IRON CORE proizvođača TDG može replicirati kretanje koje je nastalo stvarnim potresnom, spada u kategoriju malih platformi simulacije potresa. Platforma ima dva stupnja slobode gibanja (dvoosni način uzbude) u X i Y smjeru. Pogoni ju linearni motor koji omogućava stvaranje vrlo realističnih potresa uz velike brzine valova (do 1000 mm/s). Ležištenje i pogon platforme s linearnim magnetnim aktuatorima omogućava simuliranje P i SH seizmičkih valova. Koristi se za ispitivanje otpornosti struktura, materijala i sustava u simuliranim uvjetima potresa. Primjeri ispitivanja su ponašanja modela zgrada, mostova, cesta, cjevovoda i drugu infrastrukturu tijekom potresa. Slika 17. prikazuje uređaj BIAXIAL IRON CORE u pomaknutom položaju platforme u odnosu na kućište.



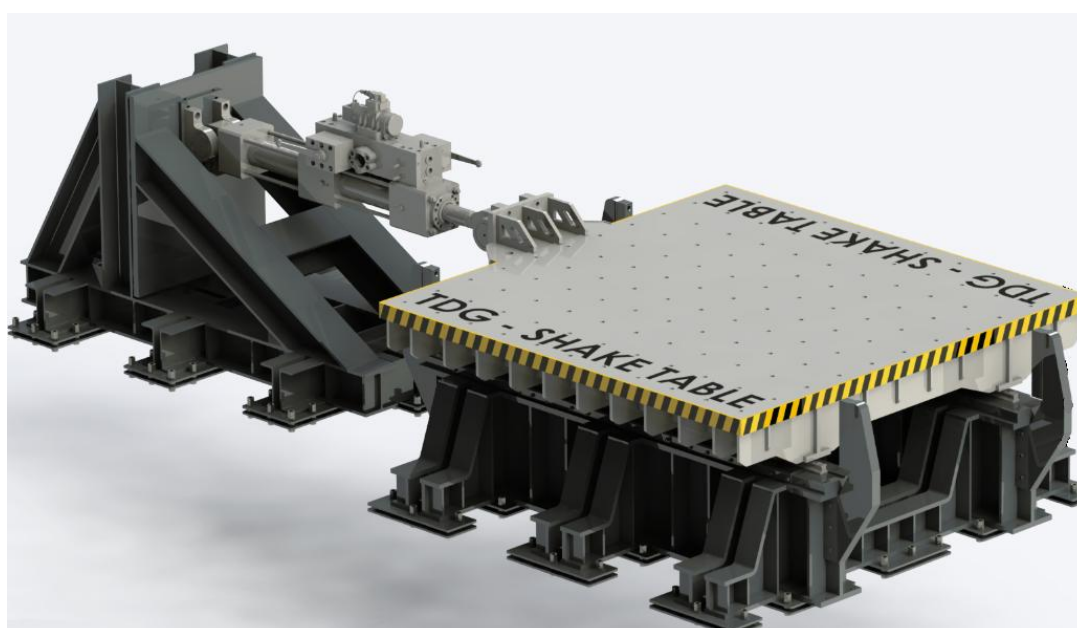
**Slika 17. Uređaj za simulaciju potresa ili drugog dinamičkog opterećenja BIAXIAL IRON CORE, TDG [6.]**

**Tablica 3. Specifikacije uređaja za simulaciju potresa BIAXIAL IRON CORE, TDG [6.]**

| Karakteristika                         | Vrijednost                |
|----------------------------------------|---------------------------|
| Stupanj slobode gibanja                | 2                         |
| Dimenzija platforme                    | 750 mm x 750 mm           |
| Dimenzija uređaja                      | 1155 mm x 910 mm x 150 mm |
| Masa uređaja                           | 96 kg                     |
| Nosivost platforme (pri $\pm 1g$ )     | 100 kg                    |
| Mogućnost ubrzanja za nosivost < 10 kg | $\pm 4g$                  |
| Radna frekvencija                      | 0 – 30 Hz                 |
| Hod platforme                          | $\pm 100$ mm              |
| Maksimalna potrebna snaga              | 4 kW                      |

### 3.1.4. TDG platforma za simulaciju potresa

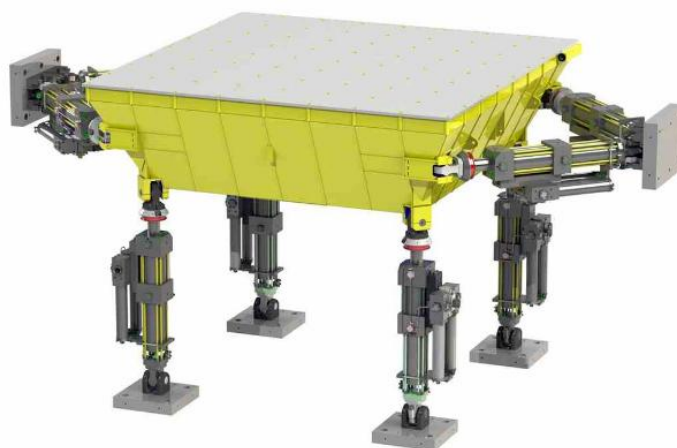
Platforma za simulaciju potresa proizvođača TDG je varijabilna platforma različite nosivosti koja se prilagođava potrebama, time može spadati u srednju ili veliku kategoriju platformi. Platforma ima jedan ili dva stupnja slobode gibanja ovisno o izvedbi, dok se pomicanje platforme vrši hidrauličkim aktuatorima (hidrauličkim cilindrima). Ležištenje platforme je izvedeno pomoću linearnih vodilica i time je u kombinaciji s hidrauličkim aktuatorom omogućeno simuliranje pojedinačnih P ili SH seizmičkih valova. Koristi se za testiranje velikih komponenti ili dijelova građevina na seizmičku otpornosti. Slika 18. prikazuje dizajn platforme za simulaciju potresa nosivosti 30 000 kg, proizvođača TDG. Platforma bez kućišta te nosača aktuatora i samog aktuatora je dimenzije 4 000 mm x 4 000 mm.



**Slika 18. Platforma za simulaciju potresa nosivosti 30 tona, proizvođača TDG [6.]**

### 3.1.5. MTS platforma za simulaciju potresa

Platforma za simulaciju potresa proizvođača MTS sadržava 6 stupnjeva slobode gibanja koje je izvedeno pomoću 8 hidrauličkih aktuatora, i time je omogućeno gibanje u sva tri smjera X,Y i Z. Svi aktuatori su vezani s jedne strane na platformu zglobnim vezama dok je druga strana aktuatora spojena zglobnim vezama, ali na krutu podlogu. Korištenjem hidrauličkih aktuatora za uzbudu i korištenjem zglobnih veza za ležištenje platforme s aktuatorom omogućavaju simuliranje P, SH, SV seizmičkih valova te njihove refleksije odnosno kombinacije više seizmičkih valova istovremeno. Takva vrsta platforme s velikim brojem stupnjeva slobode se koristi za testiranje civilnih građevina, manjih građevina i određenih komponenata građevina poput cijevnog sustava za plin na seizmičku otpornost. Slika 19. prikazuje platformu za simulaciju potresa s 6 stupnjeva slobode gibanja proizvođača MTS, a tablica 4. prikazuje specifikaciju te platforme.

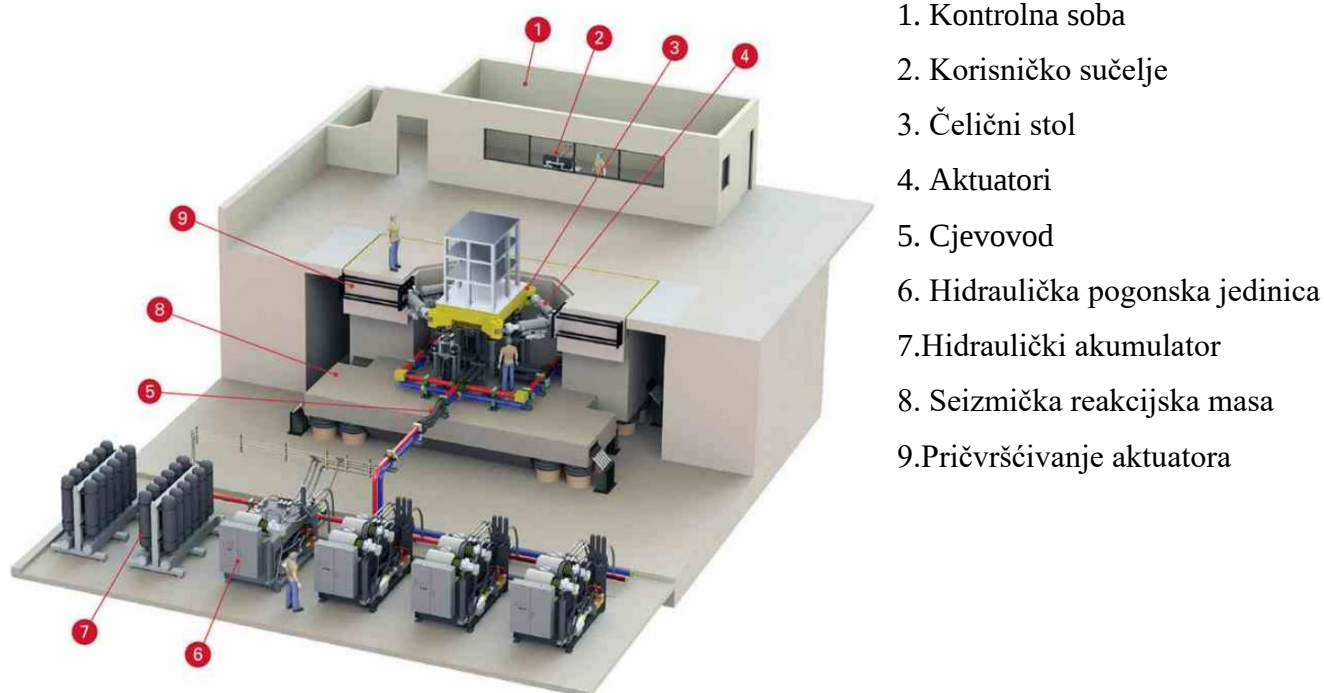


**Slika 19. Platforma za simulaciju potresa s 6 stupnjeva slobode gibanja, proizvođača MTS [8.]**

**Tablica 4. Specifikacije uređaja za simulaciju potresa proizvođača MTS [8.]**

| Karakteristika                     | Vrijednost          |
|------------------------------------|---------------------|
| Stupanj slobode gibanja            | 6                   |
| Broja aktuatora                    | 8                   |
| Dimenzija platforme                | 5 000 mm x 5 000 mm |
| Nosivost platforme (pri $\pm 1g$ ) | 30 000 kg           |
| Mogućnost ubrzanja po X-osi        | $\pm 1,5g$          |
| Mogućnost ubrzanja po Y-osi        | $\pm 1,5g$          |
| Mogućnost ubrzanja po Z-osi        | $\pm 1g$            |
| Radna frekvencija                  | 0 – 50 Hz           |
| Hod platforme po X-osi             | $\pm 400$ mm        |
| Hod platforme po Y-osi             | $\pm 400$ mm        |
| Hod platforme po Z-osi             | $\pm 250$ mm        |

Za ovako velike platforme potrebne su hidrauličke pogonske jedinice koje mogu pogoniti takvu vrstu aktuatora, spremišta gdje se akumulira fluid te cijeli sustav cjevovoda vrlo velike debljine kako bi mogli izdržati vrlo velike tlakove. Slika 20. prikazuje potrebne komponente u laboratoriju za izvođenje simulacija potresa na velikim platformama s većim brojem aktuatora.



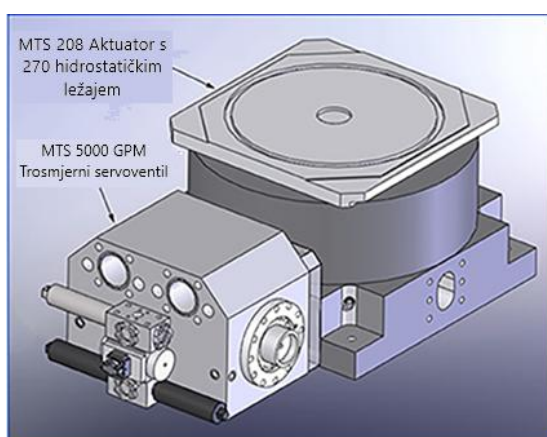
**Slika 20. Komponente laboratorija velikih platformi za simulaciju potresa [8.]**

### 3.1.6. Najveća vanjska platforma za simulaciju potresa

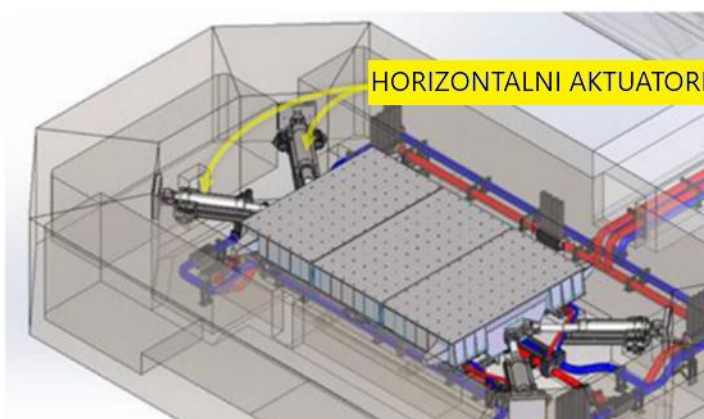
Najveća vanjska platforma za simulaciju potresa nalazi se na sveučilištu u San Diegu, Kalifornija. Platforma može uzrokovati realistične potrese sa 6 stupnjeva slobode gibanja na građevinama u punoj veličini, od višekatnica do stupova mostova, vjetroturbina i drugih struktura.

Platforma sadržava 6 vertikalnih aktuatora i 4 horizontalna aktuatora. Spoj platforme na kojoj se nalazi građevina i vertikalnih aktuatora je izveden pomoću vakuuma ispunjenog uljem tako da platforma može nesmetano klizati u horizontalnom smjeru, slika 21. prikazuje model vertikalnih aktuatora. Također na platformu su vezana dodatna 3 pasivna vertikalna aktuatora koji platformu konstantno povlače prema dolje kako bi se spriječilo odvajanje platforme od aktivnih aktuatora odnosno prevrtanje. Horizontalni aktuatori prikazani slikom 22. su spojeni u V oblik po dva aktuatora na dvije strane platforme te time mogu vršiti gibanje po X i Y osi. Ležištenje platforme na vertikalnim aktuatorima pomoću ulja i vakuuma te horizontalnim aktuatorima pomoću zglobnih veza omogućava simuliranje P, SH, SV seizmičkih valova te njihove refleksije odnosno kombinacije više valova u isto vrijeme.

Fluid koji pokreće aktuatore je skladišten i stlačen unutar hidrauličkih akumulator na tlak od 344,7 bara. Hidrauličke pogonske jedinice uzimaju fluid iz hidrauličkih akumulatora i pogone taj fluid cijevima cjevovoda do hidrauličkih aktuatora vrlo velikim brzinama. Postupkom organiziranog doziranja fluida na svaki aktuator posebno vrši se pomicanje platforme. Cjevovodima protječe fluid pod tlakom od 206,8 bara, cijevi imaju promjer 304,8 mm, te debljinu 25,4 mm.

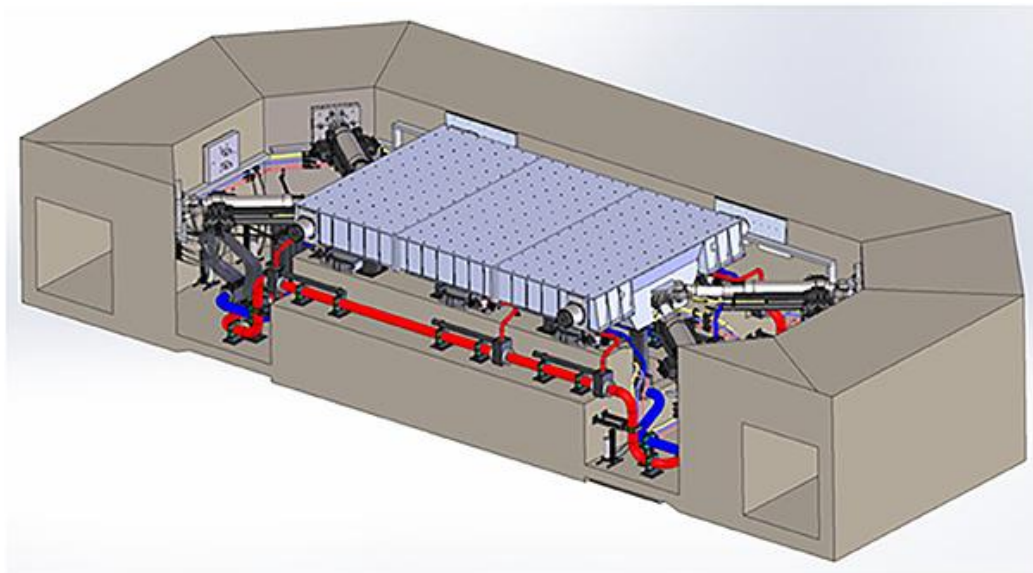


Slika 21. Vertikalni aktuatori [9.]



Slika 22. Horizontalni aktuatori [9.]

Slika 23. prikazuje izvedbu platforme za simulaciju potresa unutar betonskih temelja, raspored cjevovoda te način spajanja aktuatora s platformom i temeljem. Tablica 5. prikazuje specifikaciju platforme.



**Slika 23. Izvedba platforme za simulaciju potresa, San Diego - Kalifornija [9.]**

**Tablica 5. Specifikacije platforme za simulaciju potresa, San Diego - Kalifornija [9.]**

| Karakteristika                                | Vrijednost     |
|-----------------------------------------------|----------------|
| Stupanj slobode gibanja                       | 6              |
| Broja aktivnih aktuatora + pasivnih aktuatora | 10 + 3         |
| Dimenzija platforme                           | 12,2 m x 7,6 m |
| Nosivost platforme                            | 2000 tona      |
| Mogućnost rotacije po X osi                   | 2,5°           |
| Mogućnost rotacije po Y osi                   | 1,5°           |
| Mogućnost rotacije po Z osi                   | 4°             |
| Radna frekvencija                             | 0 – 33 Hz      |
| Hod platforme po X-osi                        | ±0,89 m        |
| Hod platforme po Y-osi                        | ±0,38 m        |
| Hod platforme po Z-osi                        | ±0,127 m       |

### 3.2. Način ležištenja platforme

Prilikom djelovanja sile hidrauličkog aktuatora, električnog aktuatora ili elektromotora preko kugličnog navojnog vretena, platforma mora klizati s minimalnim učinkom trenja na uzbuđu. Odabir načina ležištenja ovisi o nekoliko čimbenika poput nosivosti, mase platforme, složenosti sustava, zahtjeva za održavanje, cijene te stupnju slobode gibanja platforme kojim se određuje koje se vrste seizmičkih valova može izazvati. Također, potrebno je poznavati kombinacije aktuatora i vrste elemenata za ležištenje koji se mogu upotrebljavati unutar platforme.

#### 3.2.1. Ležištenje linearnim kliznim ili kugličnim ležajem

Ležištenja platforme pomoću linearnog kliznog ili kugličnog ležaja s cilindričnim vodilicama odnosno šipkama je vrlo precizan i jeftin način ležištenja platforme manjih nosivosti. Platforma je vijcima spojena na kućište kliznog ili kugličnog ležaja dok su linearne vodilice po kojima ležaj klizi pričvršćene na kućište uređaja. Vodilice mogu biti pričvršćene na kućište u obliku linearnih potpornih šina ili u obliku krajnjih blokova ovisno o potrebnoj nosivosti i duljini vodilica. Time je omogućeno pomicanje platforme u jednom smjeru (smjeru postavljenih vodilica). Takav način ležištenja omogućava simuliranje P i SH seizmičkih valova te je pogodan za uporabu električnog aktuatora zbog svoje manje nosivosti u odnosu na hidrauličke aktuatore. Električni aktuator može biti servo motor koji pomoću kugličnog navojnog vretena vrlo brzo i precizno vrši pomicanje platforme. Takvu vrstu primjene ležištenja platforme s odabranim aktuatorom se može vidjeti u navedenim uređajima koje su pronađeni na tržištu, poput uređaja Atom i Shaketable II XY.

Odabir između kliznog ili kugličnog ležaja ovisi o specifičnim zahtjevima primjene. Ako je primarni cilj simulacije primjena preciznih glatkih pokreta s niskim trenjem pod umjerenim opterećenjem onda je linearni kuglični ležaj bolji izbor. Međutim ako platforma mora podnijeti veća opterećenja (nekoliko tona), uz manje troškove pogodniji je linearni klizni ležaj.



**Slika 24. Linearne vodilice u obliku krajnjih blokova i potpornih šina s kliznim ležajem i kućištem [10.]**

### 3.2.2. Ležištenje linearnim vodilicama s križnim valjkastim elementima

Platforme koje se podvrgavaju visokom jednoosnom ili dvoosnom opterećenju zahtijevaju vrlo visoku preciznost i krutost prilikom vođenja i zbog toga se najčešće za ležištenje primjenjuju vodilice s križnim valjkastim elementima prikazane slikom 25. Linearne vodilice omogućavaju da platforma može simulirati P i SH seizmičke valove. Vodilice se nalaze unutar gornjeg i donjeg kućišta te čine jedan element (eng. *crossed roller table* prikazan slikom 26.) koji je s gornje strane vijcima spojen na platformu dok je s donje strane vijcima spojen na kućište cijelog uređaja ili betonski temelj. Primjena takvog elementa ležištenja omogućava vrlo veliku operativnost platforme (desetine tona), visoku krutost i preciznost pokreta koji su potrebni za simuliranje potresa. Također križni valjkasti ležajevi mogu prihvatiti opterećenje u više smjerova (radijalno, aksijalno i opterećenje uslijed momenta), pogodni su za primjenu u kombinaciji s hidrauličkim aktuatorom.



**Slika 25. Vodilica s križnim valjkastim elementima [11.]**



**Slika 26. Crossed Roller table, Del-Tron [11.]**

### 3.2.3. Ležištenje hidrauličkim aktuatorima

Platforme koje koriste hidrauličke aktuatore za uzбудu i način ležištenja imaju više stupnjeva slobode gibanja u odnosu na platforme koje su ležištene linearnim vodilicama te time mogu simulirati sve vrste prostornih seizmičkih valova (P, SH, SV) i njihove refleksije u obliku površinskih valova. Primjena hidrauličkih aktuatora omogućava kontroliranje kretanja platforme u sva tri translacijska smjera i tri rotacijska smjera (eng. *roll, pitch, yaw*) i omogućava dobivanje visoke preciznosti u repliciranju kompleksnih pokreta potresa u odnosu na druge načine uzbuđe. Platforma je vezana s hidrauličkim aktuatorima pomoću zglobnih veza koje omogućavaju izvedbu navedenih kretanja.

U ovisnosti o kombinaciji i rasporedu hidrauličkih aktuatora, osim platformi za simulaciju potresa, postoje i platforme za općenite simulacije poput ispitivanja izdržljivosti komponenata, simulaciju vibracija, simulator leta i vožnje, ispitivanje dijelova i pribora vozila. Takve platforme za općenite simulacije mogu imati radnu frekvenciju do 100 Hz nasuprot platformama za simulaciju potresa koje imaju nekoliko puta manju radnu frekvenciju. Zbog potrebne manje nosivosti za takve simulacije češće se upotrebljavaju elektromehanički aktuatori. Slika 27. prikazuje pokretnu platformu za više vrsta simulacija, između ostalog i kao dio simulatora potresa za Civilnu zaštitu Republike Hrvatske tvrtke DOK-ING d.o.o., gdje se mogu simulirati različiti intenziteti i uvjeti potresa kako bi se pružilo korisnicima da iskuse potres.



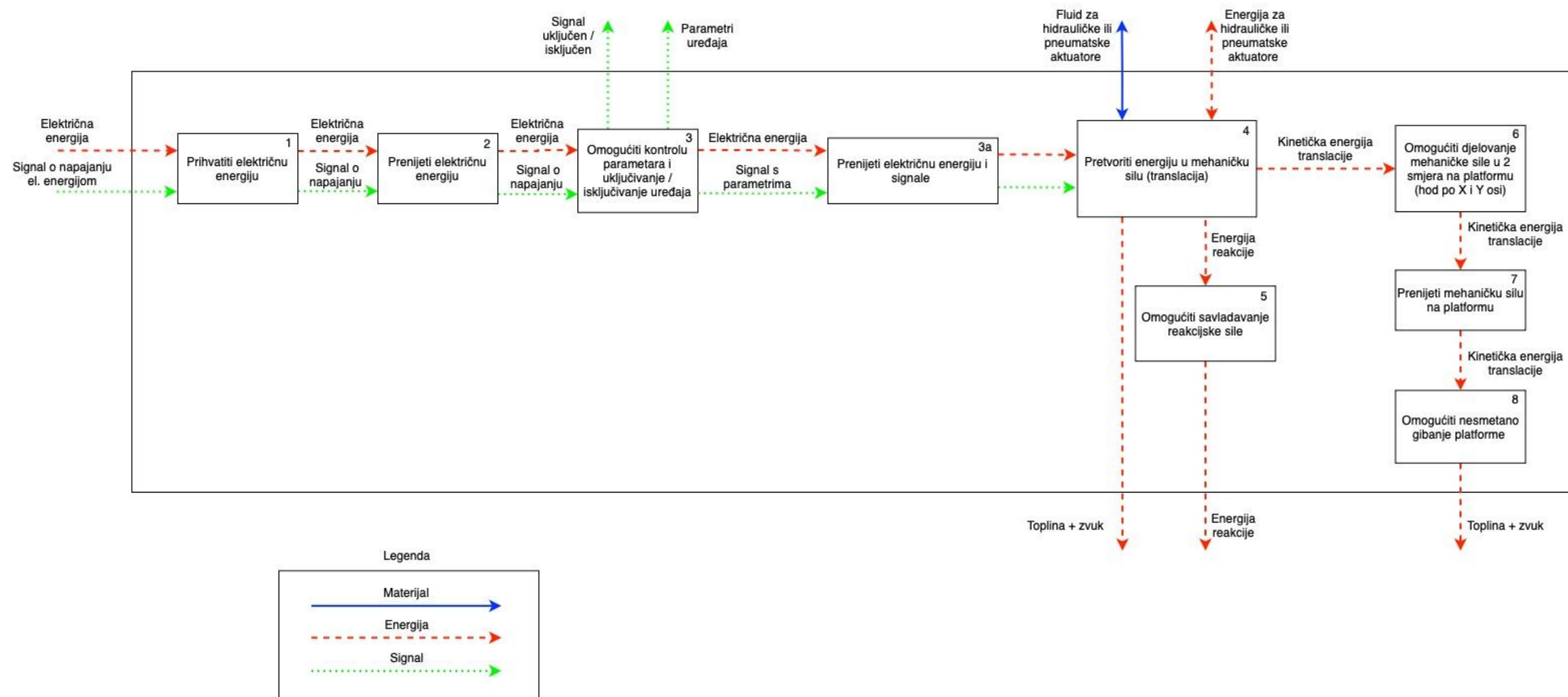
Slika 27. Pokretna platforma PS-6TL-1500, MotionSystems [12.]

## 4. Razvoj platforme za simulaciju potresa

Prvi korak razvoja platforme za simulaciju potresa je otkrivanje pojedinačnih funkcija uređaja te njihovo razumijevanje, odnosno kako su te funkcije međusobno povezane u jednu cjelinu tj. funkcijsku dekompoziciju. Svaka pojedinačna funkcija ima jedno ili više mogućih rješenja koje se mogu opisati pomoću morfološke matrice. Povezivanjem funkcija s različitim rješenjima omogućuje stvaranje više različitih koncepata koji će poslužiti za daljnji razvoj.

### 4.1. *Funkcijska dekompozicija i morfološka matrica*

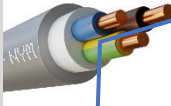
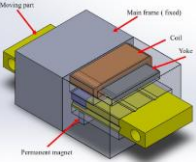
Istraživanjem je utvrđeno da na tržištu postoje platforme za simulaciju potresa približno sličnih karakteristika poput karakteristika koje su zadane zadatkom: nosivost 1 000 kg, radne frekvencije u rasponu od 0 do 30 Hz. Takve platforme koriste električne linearne aktuatora ili hidrauličke servo aktuatora za pretvorbu energije u mehaničku silu. Zbog velikih razlika u načinu rada između te dvije vrste aktuatora napravljena je općenita funkcijska dekompozicija platforme za simulaciju potresa koja ne uzima u obzir način napajanja aktuatora te je prikazana slikom 28. Tablicom 6. je prikazana morfološka matrica općenite platforme za simulaciju potresa.

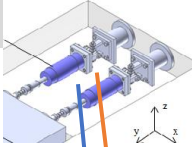
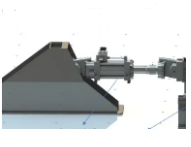
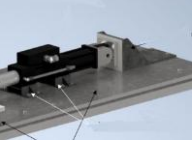
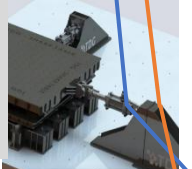
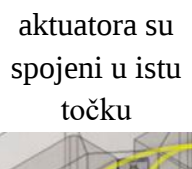
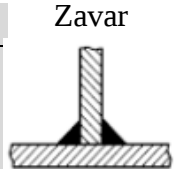
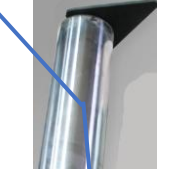
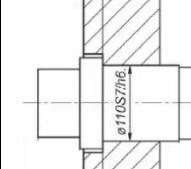


Slika 28. Funkcijska dekompozicija platforme za simulaciju potresa (općenito)

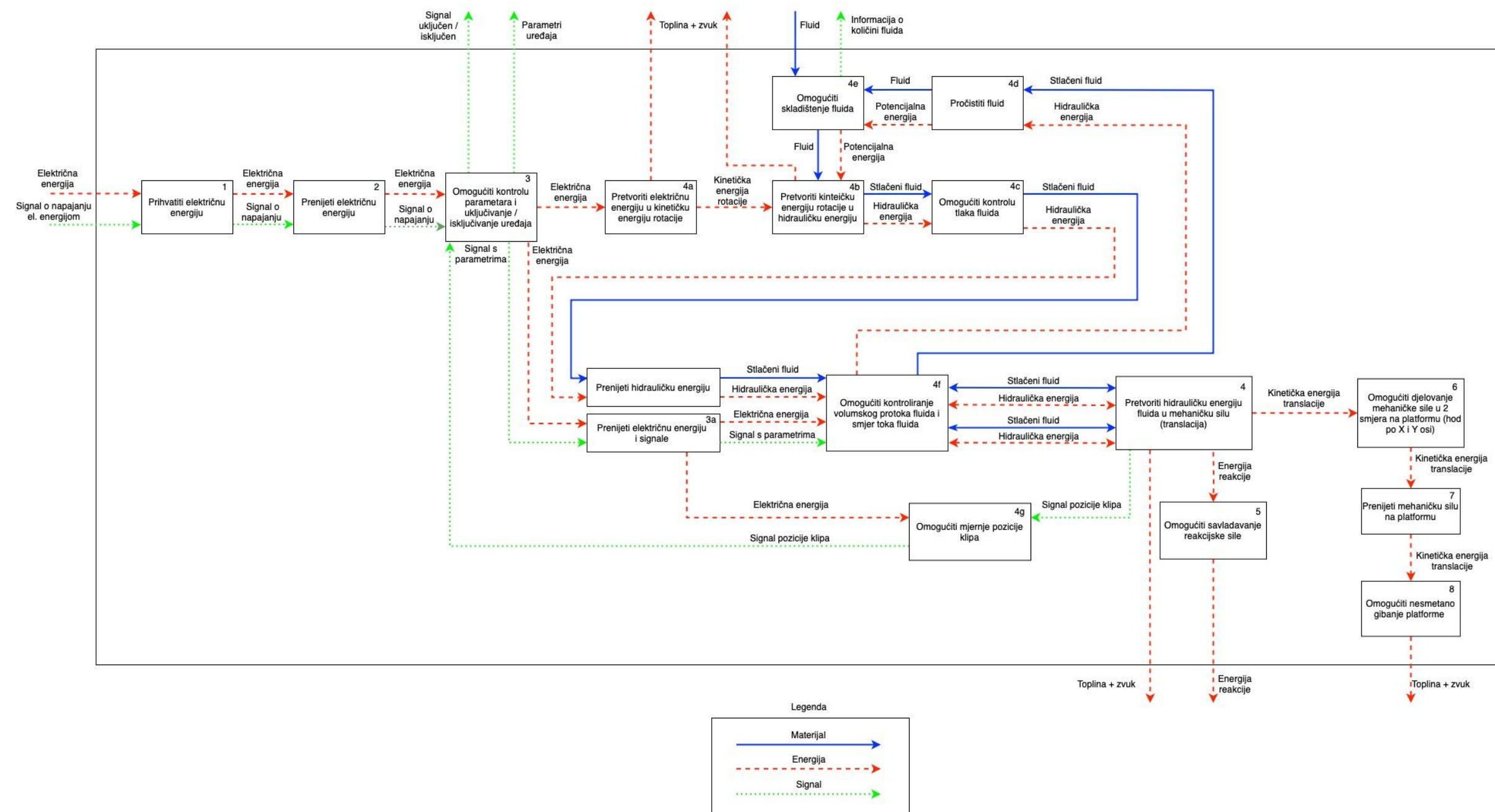


Tablica 6. Morfološka matrica općenite platforme za simulaciju potresa

|                                                                 | Okaste stopice                                                                                                              | Cilindrične stopice                                                                                                                        | Viličaste stopice                                                                                                | Vijčane stezaljke                                                                                                   | Utikač                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1<br>Prihvatiti električnu energiju                             |                                            |                                                           |                                |                                  |                                     |
| 2<br>Prenijeti električnu energiju                              | Kabel NYM<br>                              | Kabel H07RN-F<br>                                         | Kabel SY<br>                   |                                                                                                                     |                                                                                                                        |
| 3<br>Omogućiti kontrolu parametara te ON / OFF                  | Digitalni servo kontroler-Controlbox<br> | Razvodni ormar s sklopkama, prekidačima i lampicama<br> |                                                                                                                  |                                                                                                                     |                                                                                                                        |
| 3a<br>Prenijeti zajedno električnu energiju i kontrolne signale | ÖLFLEX SERVO FD 7DSL<br>                 | Chainflex Servo kabel CF270.UL.D<br>                    | 3a<br>Prenijeti pojedinačno električnu energiju i kontrolne signale                                              | ÖLFLEX Classic 110 + UNITRONIC FD CP                                                                                | Igus Chainflex CF310 + data cable CF11                                                                                 |
| 4<br>Pretvoriti energiju u mehaničku silu                       | Električni linearni aktuator<br>         | Servo hidraulički aktuator<br>                          | Servo pneumatski aktuator<br> | Elektro-magnetski aktuator<br> | Servomotor + kuglično vreteno<br> |

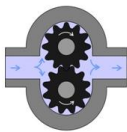
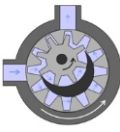
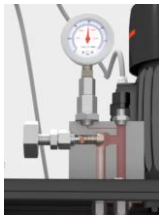
|   |                                                           |                                                                                     |                                                                                                                             |                                                                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |
|---|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 5 | Omogućiti savladavanje reakcije sile                      | Spajanje kraja aktuatora na postojeći temelj                                        | Spajanje kraja aktuatora na samostojeću konstrukciju                                                                        | Spajanje kraja aktuatora na konstrukciju vezanu za platformu                                                                         |                                                                                       |                                                                                       |
|   |                                                           |    |                                            |                                                    |                                                                                       |                                                                                       |
| 6 | Omogućiti djelovanje mehaničke sile u 2 smjera (X i Y os) | Platforma s dva odvojena horizontalno aktuatora (X i Y os)                          | Jednodijelna platforma s četiri horizontalna aktuatora i 2 vertikalna aktuatora, par horizontalnih aktuatora su spojeni u V | Jednodijelna platforma s četiri horizontalna aktuatora i 2 vertikalna aktuatora, par horizontalnih aktuatora su spojeni u istu točku |                                                                                       |                                                                                       |
|   |                                                           |   |                                           |                                                   |                                                                                       |                                                                                       |
| 7 | Prenijeti mehaničku silu na platformu                     | Zavar                                                                               | Vijčani spoj + zavar                                                                                                        | Oblikom: svornjak                                                                                                                    | Stezni spoj                                                                           |                                                                                       |
|   |                                                           |  |                                          |                                                  |  |                                                                                       |
| 8 | Omogućiti nesmetano gibanje platforme                     | Linearni klizni ležaj + okrugle vodilice                                            | Linearni kuglični ležaj + okrugle vodilice                                                                                  | Linearna vodilica s križnim elementima                                                                                               | Aktuatori kao nosači platforme                                                        | Linearne profilne vodilice s kugličnim ili valjkastim vozačima                        |
|   |                                                           |  |                                          |                                                  |  |  |

Prvi koncept sadržava servo hidraulički aktuator. Takva vrsta aktuatora koristi stlačeni fluid koji puni cilindra te time gura klip prema unutra odnosno prema van i time uzrokuje linearno gibanje klipa tj. generiranje mehaničke sile. Zbog drugačijeg načina rada nasuprot električnom linearnom aktuatoru izrađena je nova funkcijska dekompozicija koja je prikazana slikom 29. Tablica 7. prikazuje morfološku matricu s funkcijama koje su potrebne kako bi se generirao tlak fluida.



Slika 29. Funkcijska dekompozicija platforme za simulaciju potresa s hidrauličkim aktuatorom

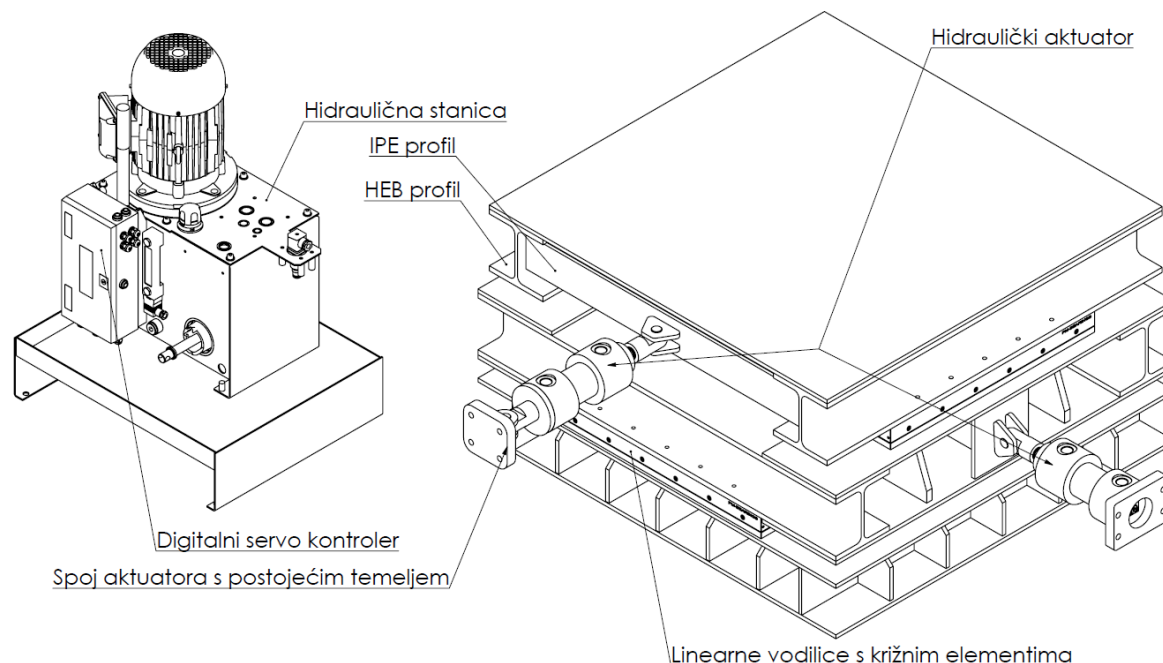
Tablica 7. Morfološka matrica hidrauličkog sustava

|                                                                     |                                                                                                                                 |                                                                                                                           |                                                                                                              |                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4a<br>Pretvoriti električnu energiju u kinetički energiju rotacije  | Elektromotor (asinkroni, sinkroni, servo)<br>  | Motor s unutarnjim izgaranjem<br>        |                                                                                                              | Hidraulična stanica<br> |
| 4b<br>Pretvoriti kinetičku energiju rotacije u hidrauličku energiju | Vanjska zupčasta hidraulična pumpa<br>         | Unutarnja zupčasta hidraulična pumpa<br> | Aksijalna klipna pumpa<br> |                                                                                                             |
| 4c<br>Omogućiti kontrolu tlaka fluida                               | Redukcijski ventil<br>                        |                                                                                                                           |                                                                                                              |                                                                                                             |
| 4d<br>Pročistiti fluid                                              | Povratni filter<br>                          |                                                                                                                           |                                                                                                              |                                                                                                             |
| 4e<br>Omogućiti skladištenje fluida                                 | Rezervoar fluida<br>                         |                                                                                                                           |                                                                                                              |                                                                                                             |
| 4f<br>Omogućiti kontrolu V. protoka i smjera                        | Elektronički upravljani razvodni ventili<br> | Mehanički upravljani razvodni ventili                                                                                     |                                                                                                              |                                                                                                             |
| 4g<br>Omogućiti mjerenje pozicije klipa                             | Linearni potencijometar (senzor)<br>         | Magnetostriktivni senzori<br>          |                                                                                                              |                                                                                                             |

## 4.2. Izrada koncepta

Na temelju odabranih rješenja svake funkcije te međusobnim povezivanjem rješenja dobivamo dva različita koncepta.

### 4.2.1. Koncept 1

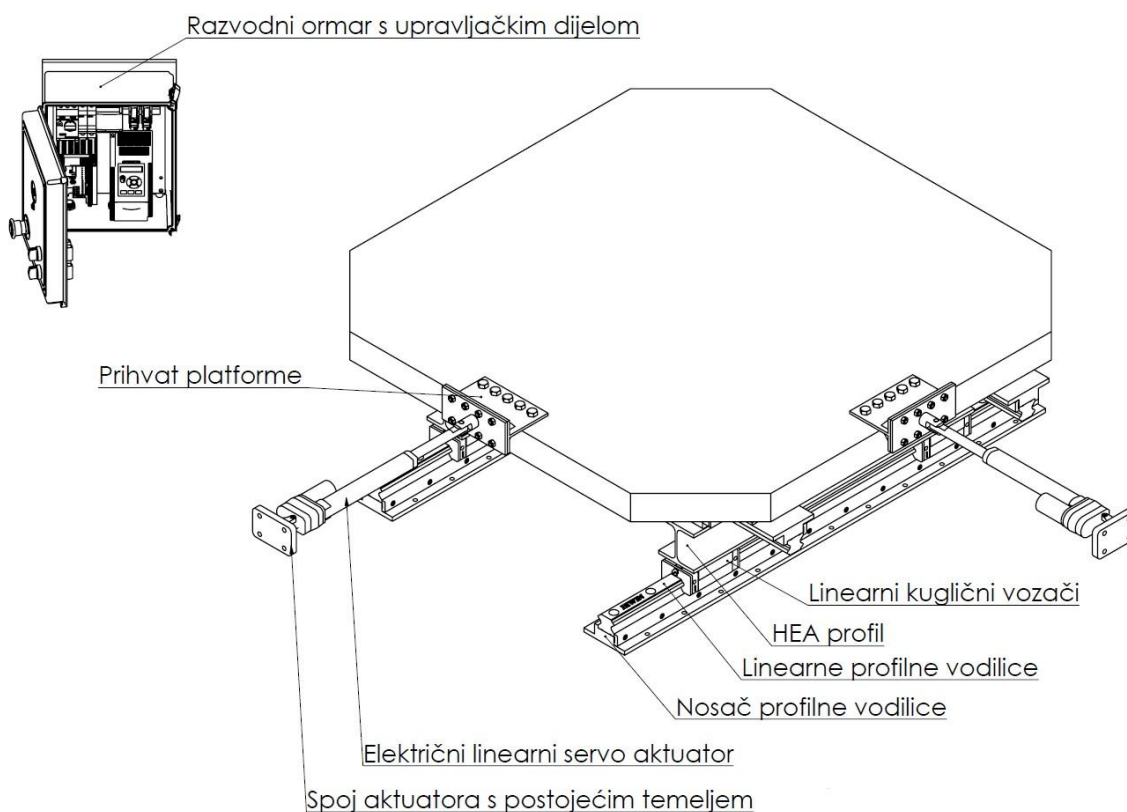


**Slika 30. Koncept 1**

Koncept 1 prikazuje platformu za simulaciju potresa koja upotrebljava dva hidraulička aktuatora montirana mimosmjerno. U kombinaciji s linearnim vodilicama s križnim elementima omogućeno je gibanje platforme u dva smjera. Nosivi dio platforme je sastavljen iz 3 segmenta tj. donjeg, srednjeg i gornjeg segmenta gdje se između svakog para segmenata nalaze dvije linearne vodilice s križnim elementima. Donji segment se veže vijcima na postojeći temelj i predstavlja fiksni dio platforme te je izrađen od čeličnih ploča (kvadratnih i pravokutnih) i dodatnih rebara zbog povećanja čvrstoće. Srednji i gornji segment su pomični dio platforme te su izrađeni od HEB i IPE profila koji su međusobno zavareni, unutarnji dio segmenta je ojačan hladno oblikovanim kvadratnim cijevima, dok su čelične ploče spojene vijcima na profile.

Za pogon hidrauličkih aktuatora koristi se fluid pod tlakom koji je doveden crijevima iz hidrauličke stanice. Stanica se također koristi za povrat fluida iz cilindra, gdje fluid ulazi kroz filter u hidraulički spremnik stanice. Servo kontroler pomoću računalnog softvera upravlja smjerom i tokom fluida iz hidrauličke stanice u aktuator pomoću kontrolnih elektro-ventila koje se nalaze na hidrauličkoj stanici.

## 4.2.2. Koncept 2



Slika 31. Koncept 2

Koncept 2 prikazuje sklop platforme za simulaciju potresa koja se sastoji od same platforme, električnih linearnih servo aktuatora te razvodnog ormara koji omogućava upravljanje i napajanje aktuatora za pogon platforme. Električni linearni servo aktuatori su postavljeni okomito jedan u odnosu na drugog te su s jedne strane vezani na postojeći temelj dok je druga pomična strana vezana na platformu pomoću nosača koji je izrađen kombinacijom zavara i vijčanog spoja.

Platforma se sastoji od fiksnog i pomičnog dijela koji su međusobno povezani HEA profilom, fiksni dio koristi dvije paralelno postavljene linearne profilne vodilice po kojima se voze linearni kuglični vozači. Linearne vodilice su vezane vijcima za nosač vodilice koji se spaja na postojeći temelj. Pomični dio također koristi paralelno postavljene linearne profilne vodilice spojene na nosač i kuglične vozače ali postavljene mimosmjerno u odnosu na fiksni dio. Nosač vodilica pomičnog dijela se spaja vijcima na zavarenu konstrukciju na kojoj se postavljaju uzorci za simulaciju. Takva izvedba linearnih profilnih vodilica omogućava pomicanje platforme po X i Y osi gdje aktuator pojedinačno pogoni svaku os.

#### 4.3. Ocjenjivanje koncepata

Za ocjenjivanje i određivanje koncepta koji je pogodniji za daljnju konstrukcijsku razradu potrebno odrediti kriterije i težinske faktore kriterija. Težinski faktori se određuju prema važnosti kriterija u ovisnosti o zadanim specifikacijama platforme. Svakom konceptu se dodjeljuje ocjena od 1 do 10 prema kriteriju te se množi s težinskim faktorom i zbraja s ostatkom. Suma umnoška ocjene i težinskog faktora za svaki kriterij daje ukupnu ocjenu koncepta.

Kriterij:

- Nosivost vodilice prikazuje opterećenje vodilice ( $\geq 1000$  kg) bez da izgubi preciznost gibanja ili funkcionalnost
- Krutost platforme prikazuje koja je od platformi pogodnija za dinamičko opterećenje tako da ne dolazi do značajnijih deformacija koje bi utjecale na preciznost pomaka platforme
- Složenost sustava prikazuje broj komponenata (manji broj komponenata  $\rightarrow$  bolja ocjena)
- Jednostavnost izrade i prilagodbe platforme govori o potrebnom vremenu za montažu i kalibraciju sustava

**Tablica 8. Ocjenjivanje koncepata**

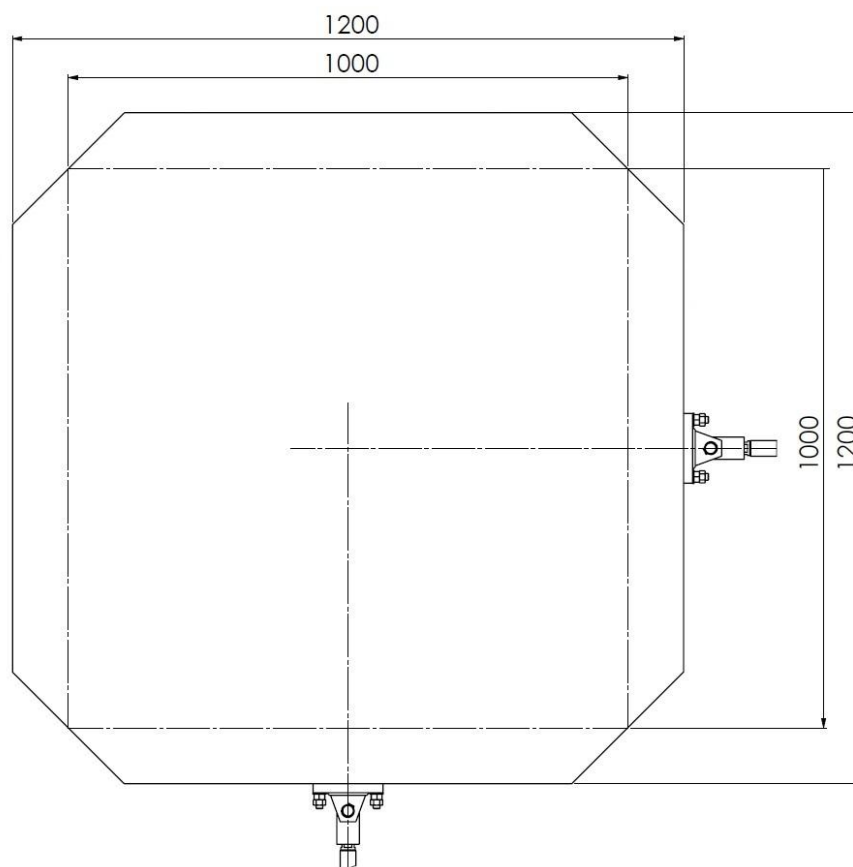
| Kriterij               | Koncept 1 | Koncept 2 | Težinski faktor |
|------------------------|-----------|-----------|-----------------|
| Nosivost (vodilice)    | 5         | 9         | 5               |
| Krutost platforme      | 8         | 5         | 5               |
| Složenost sustava      | 3         | 6         | 4               |
| Masa sustava           | 3         | 7         | 4               |
| Jednostavnost izrade   | 4         | 8         | 3               |
| Visina uređaja         | 3         | 8         | 2               |
| Razina buke tokom rada | 3         | 8         | 2               |
| Ukupna ocjena          | 113       | 178       | -               |

Ukupna ocjena koncepta 2 je približno 1,6 puta veća od ukupne ocjene koncepta 1 te se zaključuje da je konstrukcija koncepta 2 pogodnija za daljnju razradu. Međutim istraživanjem je zaključeno da hidraulični servo aktuator ima veću ukupnu silu, veću duljinu gibanja (duljine do 5 m nasuprot 1.5 m) te fleksibilniju brzinu gibanja (rad do 50 Hz bez problema nasuprot 15 Hz uz maksimum 30 Hz s mogućim pregrijavanjem) u odnosu na električni linearni aktuator. Jedini nedostatak hidrauličnog servo aktuatora je povećanje buke zbog hidrauličkih pumpi, protoka fluida i rada samih ventila.

Za daljnju razradu i konstrukcijsko rješenje odabrana je kombinacija oba koncepta, gdje će se za pogon platforme koristiti dva hidraulička servo aktuatora postavljena okomito, pogonjena stlačenim fluidom iz hidrauličke stanice te upravljana kompjuterskim softverom. Platforma će biti ležištena s linearnim profilnim vodilicama s kugličnim vozačima dok će konstrukcija platforme biti slična izvedbi koncepta 2.

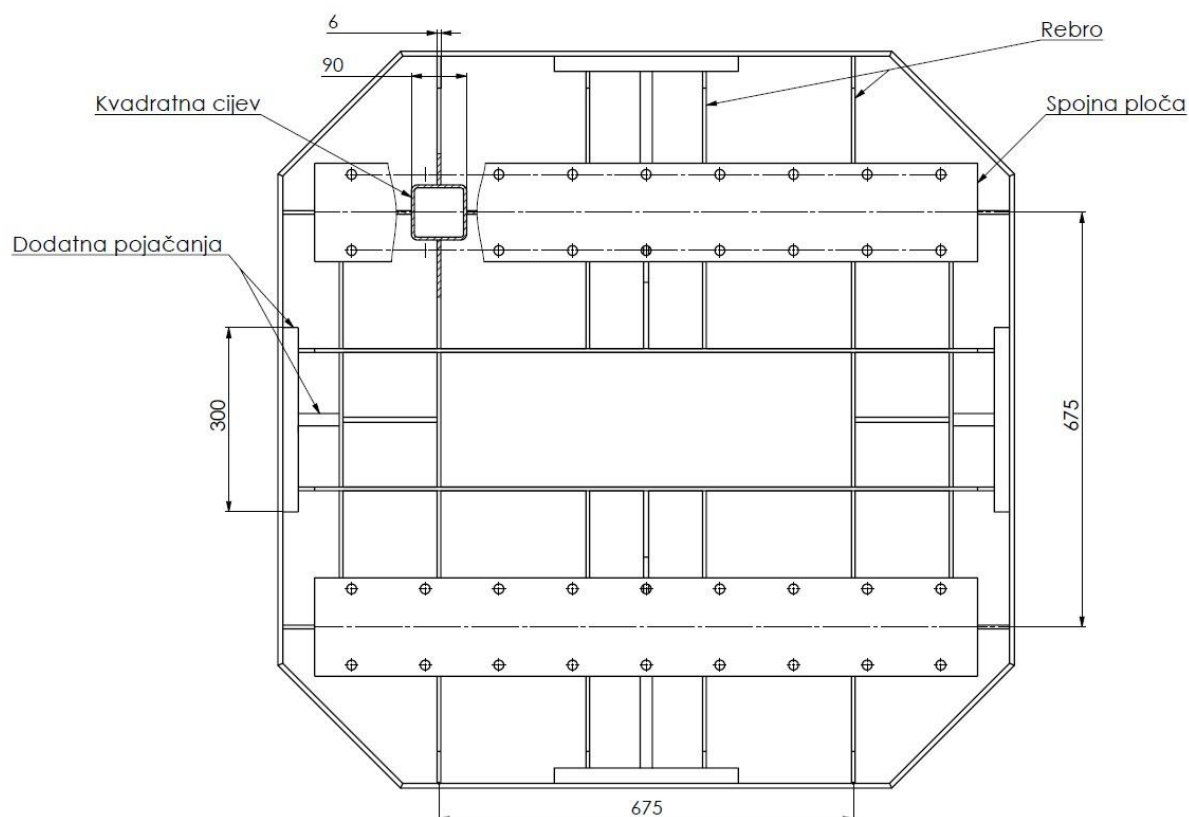
#### 4.4. Razrada odabranog koncepta

Dimenzije pomičnog dijela platforme prikazane su slikom 32. Za prijenos sile s aktuatora na platformu korišteni su spojni elementi koji se međusobno povezani svornjakom. Spoj između bočne strane platforme i spojnice platforme je izveden pomoću vijaka, te takva izvedba prijenosa sile ne zauzima određenu površinu na platformi nasuprot spoju prikazanom u konceptu 2.



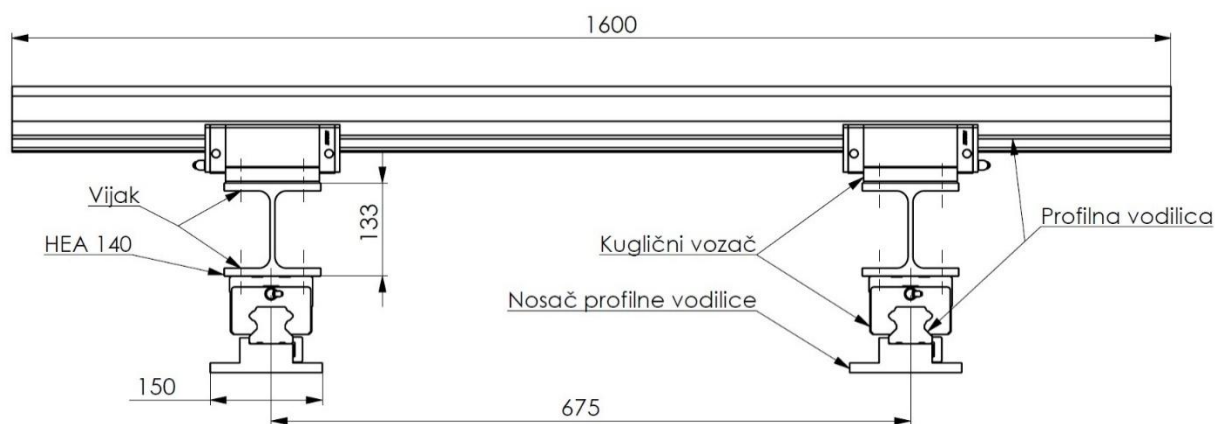
Slika 32. Prikaz dimenzija pomične platforme

Pomični dio platforme je izrađena od čeličnih ploča (pravokutnih i kvadratnih) i kvadratnih cijevi koje su međusobno zavarene u nosivu konstrukciju, debljina ploča je odabrana te iznosi 6 mm međutim daljnjim proračunom i načinom izvedbe postoji mogućnost izmjene debljine. Slika 33. prikazuje dimenzije koje su potrebne pri izradi pomične platforme tj. razmak između dvije spojne ploče koje se vežu na nosače profilnih vodilica. Spojne ploče se zavaruju na ostatak pomične platforme.



Slika 33. Izvedba pomičnog dijela platforme

Slikom 34. je prikazan način ležištenja pomične platforme s dimenzijom (duljina) vodilice i razmakom kugličnih vozača. Parovi linearnih profilnih vodilica su postavljeni mimosmjerno, odnosno takav način omogućuje gibanje platforme po x i y osi.



Slika 34. Prikaz ležištenja pomične platforme

## 5. Proračun platforme za simulaciju potresa

Sljedeći korak konstruiranje platforme za simulaciju potresa je proračun. Proračun daje potrebnu silu za pokretanje platforme, na kojoj se nalazi uzorak mase 1 000 kg, te se na temelju sile odabire potreban hidraulički aktuator. Pomična platforma se analizira pomoću *SolidWorks* simulacije (*FEA*) kako bi se, uzimajući u obzir djelovanje sile pokretanja i mase uzorka, utvrdilo zadovoljavaju li debljine rebara i pravokutnih ploča predviđena opterećenja. Djelovanjem ukupne mase platforme, uzorka i dodatnih komponenti utvrđuje se vijek trajanja linearnih profilnih vodilica s kugličnim vozačima.

### 5.1. Potrebna sila za pokretanje platforme

Za određivanje potrebne sile pokretanja platforme koristi se drugi Newtonov zakon gibanja prikazan jednačbom (1). Oznaka  $m$  predstavlja ukupnu masu koju aktuator mora pokrenuti, dok oznaka  $a(t)$  predstavlja funkcija ubrzanja u ovisnosti o vremenu.

$$F(t) = m \cdot a(t) \quad (1)$$

Određivanje funkcije ubrzanja u ovisnosti o vremenu dobiva se dvostrukim deriviranjem funkcije elongacije  $x(t) = A \cdot \sin(\omega t)$ , funkcija ubrzanja prikazan je jednačbom 2.

$$a(t) = -A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t) \quad (2)$$

Gdje je:

$$\omega = 2\pi f - \text{kutna brzina } [s^{-1}]$$

$$f - \text{frekvencija } [s^{-1}]$$

Minus u formuli (2) označava da je smjer ubrzanja uvijek orijentiran prema ravnotežnom položaju, što je suprotno od smjera pomaka čestice koja titra. Puni iznos ubrzanja postiže se u položaju amplitude kada je  $\sin(\omega t) = 1$ :

$$a_0 = A \cdot \omega^2 \quad (3)$$

Shodno tome možemo prikazati brzinu kao prvu derivaciju elongacije:

$$v_0 = A \cdot \omega \quad (4)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (3) u jednadžbu (1) dobivamo silu potrebnu za pokretanje platforme:

$$F_0 = m \cdot a_0 = m \cdot A \cdot \omega^2 \quad (5)$$

Sljedeći korak je odabiranje najvećeg ubrzanje platforme i uzorka koji se nalazi na platformi te izračuna maksimalne sile pokretanje s ukupnom masom. Za proračun je odabran aktuator koji mora pokretati veću masu odnosno masu platforme, uzorka, duplih vodicica s nosačima i masu duplih HEA profila s rebrima u odnosu na drugi aktuator koji mora pokretati samo masu platforme i uzorka. Odabrano maksimalno ubrzanje iznosi  $a_0 = a_{max} = 3g$ .

Maksimalna sila pokretanja platforme iznosi:

$$F_{max} = m_{uk} \cdot a_{max} = 48\,560 \text{ N} \approx 50\,000 \text{ N} \quad (6)$$

Gdje je:

$$m_{uk} = m_{uzorka} + m_{sklop\_platforme} + m_{sklop\_vodilica} + 2m_{HEA\_140} + m_{aktuator} \approx 1650$$

$$m_{uzorka} = 1000 \text{ kg}$$

$$m_{sklop\_platforme} = 275 \text{ kg}$$

$$m_{sklop\_vodilica} = 248,1 \text{ kg}$$

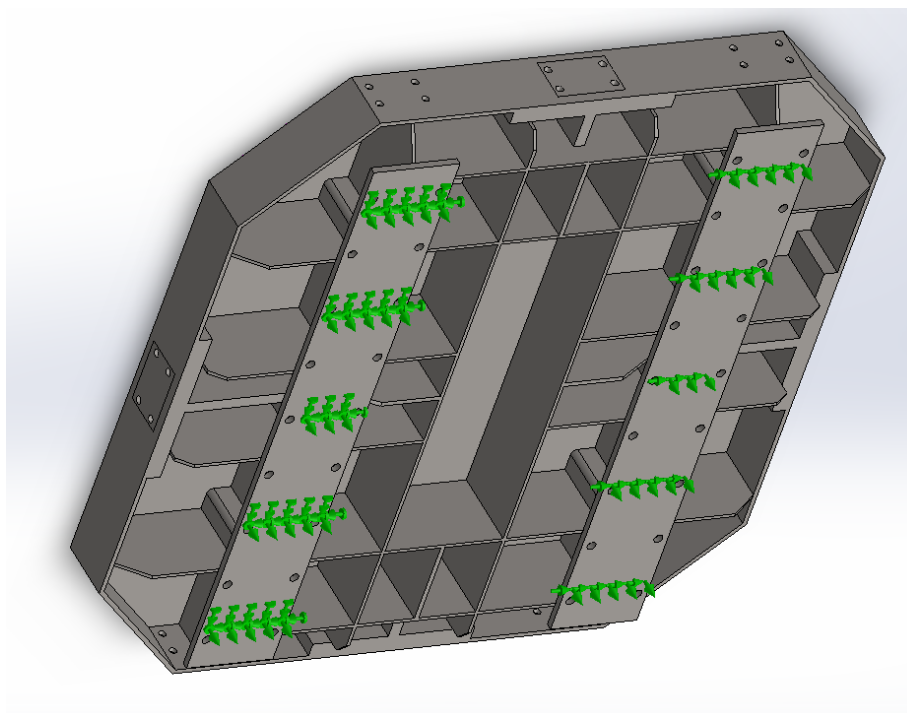
$$m_{HEA\_140} = 30,7 \text{ kg}$$

$$m_{aktuator} = 28,6 \text{ kg}$$

Napomena: cijela masa drugog hidrauličkog aktuatora je uzeta u obzir iako aktuator nije cijelom težinom oslonjen na platformu, jedna strana je vezan za noseći zid.

## 5.2. Simulacija opterećenja pomične platforme

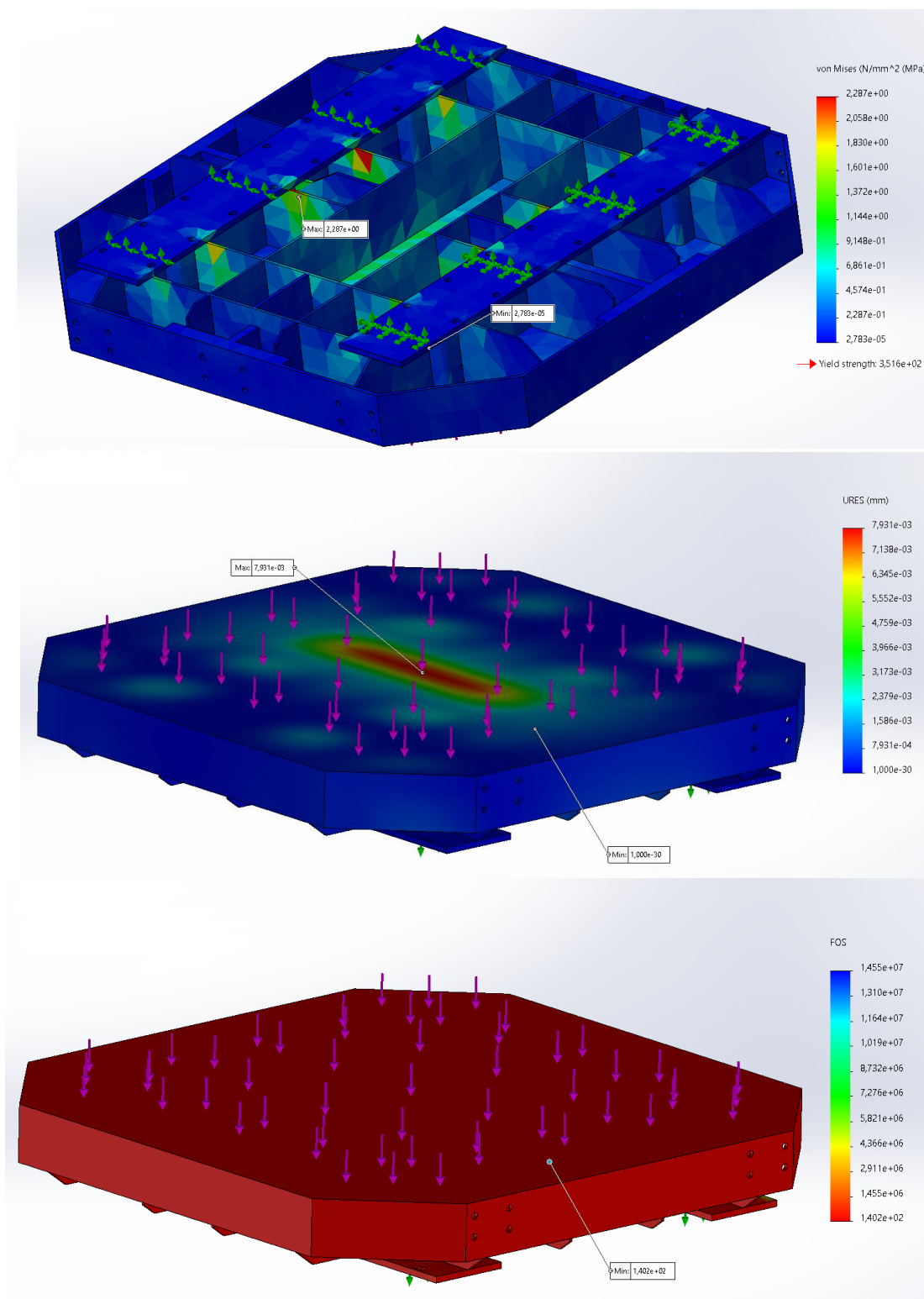
Na pomičnu platformu se stavlja uzorak koji ima zadanu masu od 1 000 kg, platforma se giba po x i y osi pomoću hidrauličnih aktuatora koji djeluju silom od 50 000 N na dvije bočne strane platforme. Kako bi se utvrdilo da li je konstrukcija platforme zajedno s odabranom debljinom ploča / rebara dovoljna da zadovolji zadana opterećenja, platforma će se podvrgnuti dvjema simulacijama u programu *SolidWorks (FEA)*. Obje simulacije će imati jednake rubne uvjete prikazane slikom 35. Na lijevoj spojnoj ploči je uklještenje dok desna ploča ima slobodu gibanja samo po dužini ploče. Pomičnoj platformi je dodijeljen materijal AISI 1020 iz *SolidWorks Library*, modul elastičnosti  $E = 200\,000\text{ MPa}$ , Poissonov koeficijent  $\nu = 0,29$ .



Slika 35. Rubni uvjeti pomične ploče

### 5.2.1. Opterećenje masom uzorka

Za prvu simulaciju će se koristiti samo masa uzorka bez dodatnih sila pokretanja platforme. Masa uzorka od 1 000 kg je postavljena na sredinu platforme u obliku kontinuiranog opterećenja na dimenziji 1 000 mm x 1 000 mm. Slika 36. prikazuje rezultate simulacije.



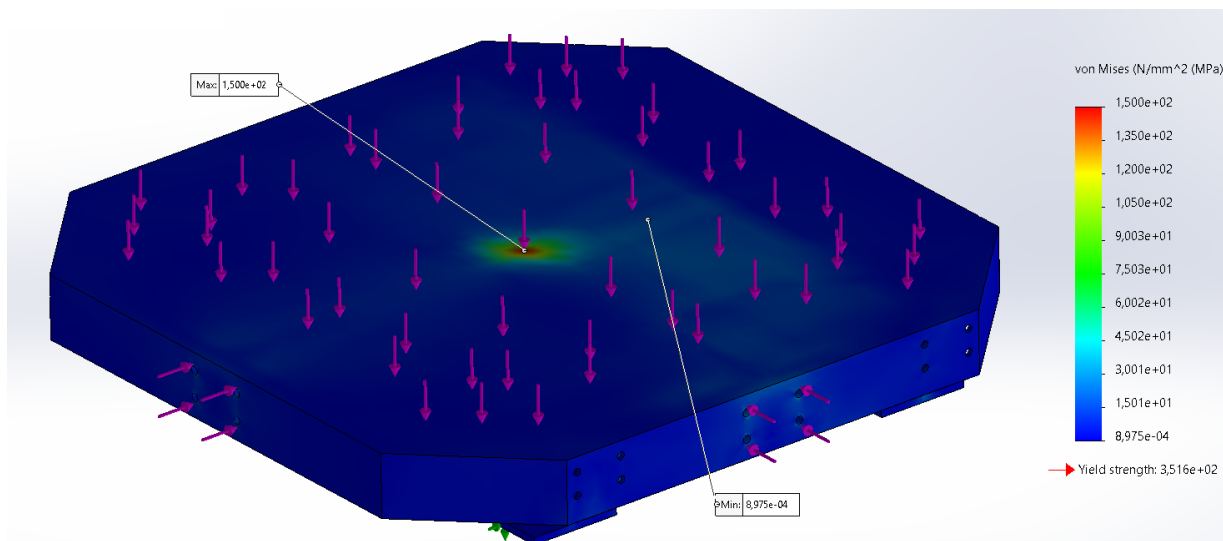
**Slika 36. Rezultati simulacije: ekvivalentno naprezanje (HMH), ukupni pomak, faktor sigurnosti**

Pregledom dobivenih rezultata uočavamo da je granica tečenja  $\gg$  ekvivalentnog naprezanja, ukupni pomak je 0,0079 mm, dok je faktor sigurnosti 140.

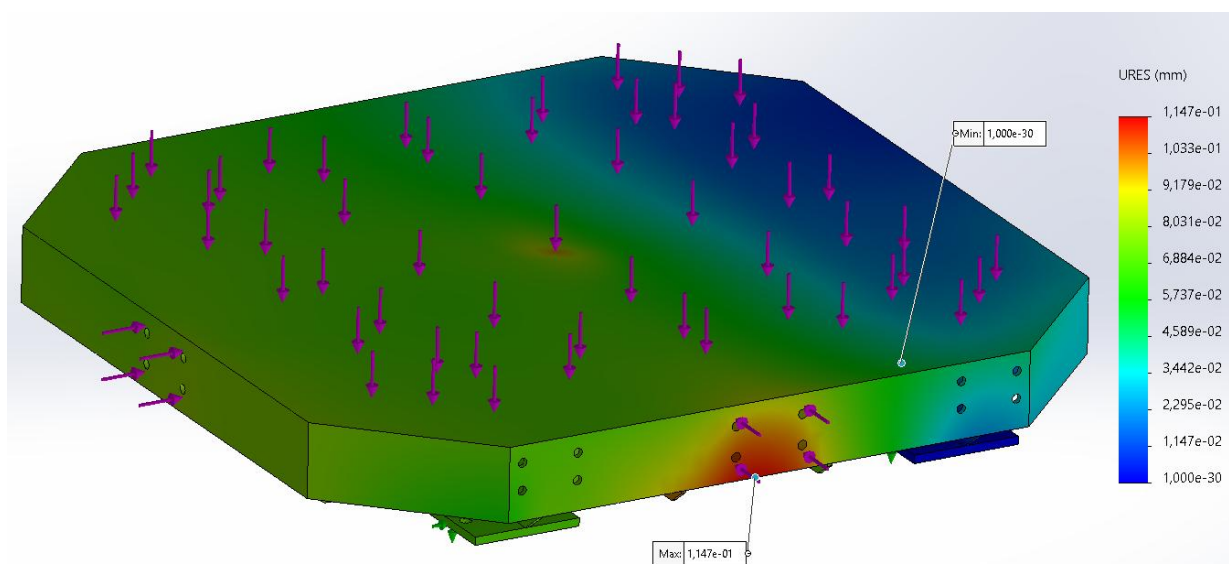
**ZADOVOLJAVA!**

### 5.2.2. Opterećenje masom uzorka i silama pokretanja

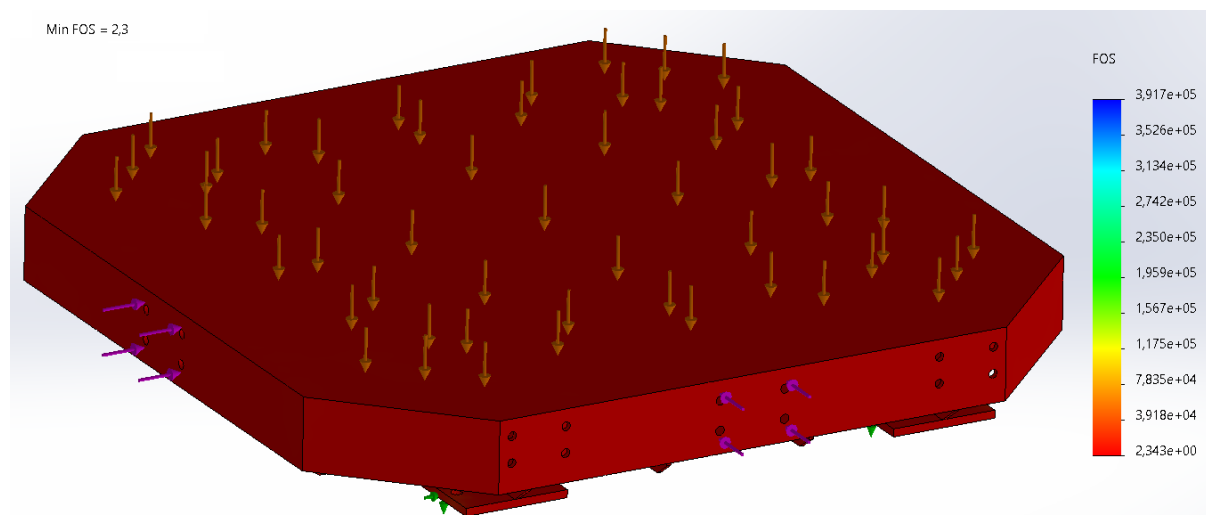
Za drugu simulaciju platforma će se opteretiti masom uzorka od 1 000 kg te silama pokretanja platforme na dva boka u iznosu od 50 000 N. Masa tereta je postavljena u sredini platforme kao u prošloj simulaciji, sile pokretanja su postavljene na površinu kontakta hidrauličkog aktuatora i platforme u obliku kontinuiranog opterećenja. Rezultat ekvivalentnog naprezanja po HMH teoriji čvrstoće prikazan je slikom 37., ukupni pomak prikazan je slikom 38., dok je najmanji faktor sigurnosti platforme prikazan slikom 39.



**Slika 37. Rezultati simulacije pri opterećenju platforme s masom uzorka i silom pokretanja: ukupni pomak**



**Slika 38. Rezultati simulacije pri opterećenju platforme s masom uzorka i silom pokretanja: ekvivalentno naprezanje**



**Slika 39. Rezultati simulacije pri opterećenju platforme s masom uzorka i silama pokretanja: minimalni faktor sigurnosti**

Pregledom rezultata simulacije uočava se da je granica tečenja odabranog materijala > najvećeg ekvivalentnog naprezanja u centru platforme (HMH teorija čvrstoće), najveći ukupni pomak iznosi 0,12 mm na mjestu gdje se jedan hidraulički aktuator spaja s platformom. Taj hidraulički aktuator zapravo neće nikada doseći silu od 50 000 N, zbog toga jer on pogoni masu platforme i uzorka (1 275 kg) nasuprot drugom aktuatoru koji pogoni ukupnu masu dobivenu jednadžbom (6). Također očitano je minimalni faktor sigurnosti platforme koji iznosi 2.3.

Iznos faktora sigurnosti je vrlo konzervativan jer dostizanje sile od 50 000 N za aktuator koji pogon ukupnu masu, za drugi aktuator nikada, je isključivo onda kada ubrzanje platforme iznosi 3g. U većini slučajeva ubrzanje ima manju vrijednost te se time može zaključiti da konstrukcija platforme zadovoljava kao i odabir debljine rebara i ploča. Kombinacije frekvencija i pomaka su detaljnije objašnjene poglavljem 5.3.1.

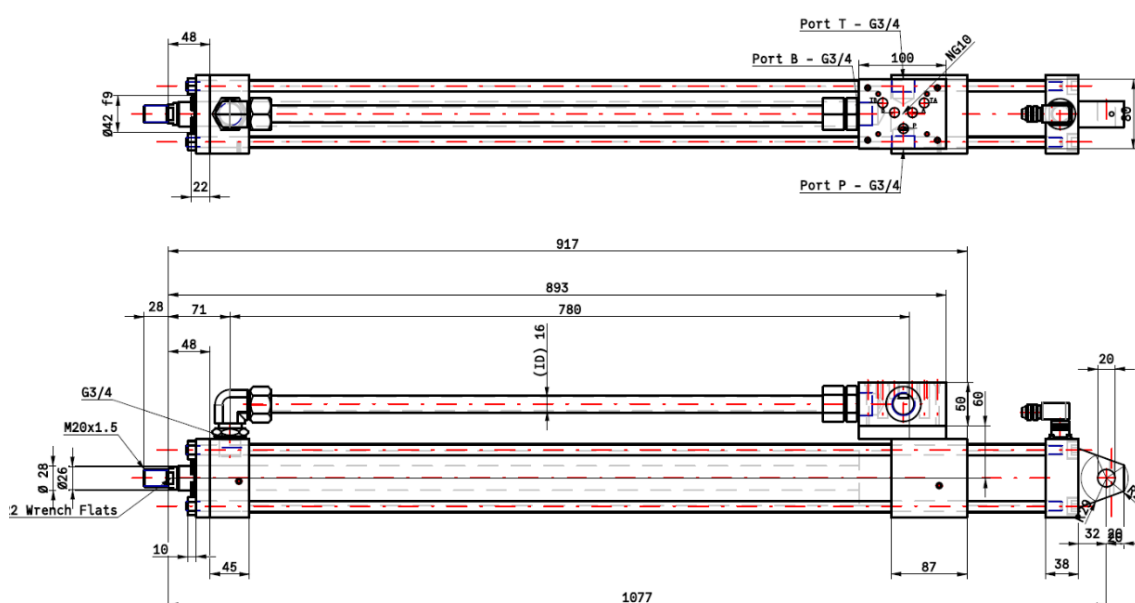
**ZADOVOLJAVA!**

### 5.3. Hidraulički servo aktuator

Odabran je hidarulički servo aktuator, odnosno dvoradni hidraulički cilindar, proizvođača Parker [13.], na kojem je montiran električni upravljan razvodnik. Razvodnik omogućuje upravljanje smjerom, volumnim protokom i tlakom fluida koji ulazi u cilindar te na taj način može vršiti male / velike pomake bez promijene tlaka hidrauličke stanice. Primjenom razvodnika hidraulična crijeva ne mijenjaju ulogu dovoda / odvoda fluida već crijevo dovoda uvijek ostaje dovod fluida i obrnuto. Unutar cilindra je ugrađen mangnetnostriktivni pretvornik (senzor) koji mjeri točnu poziciju klipa te time pomaže razvodniku u preciznom usmjeravanju fluida unutar cilindra. Tablica 9. prikazuje značajke odabranog dvoradnog hidrauličkog cilindra, slika 40. prikazuje dimenzije cilindra.

**Tablica 9. Značajke dvoradnog hidrauličnog cilindra [13.]**

| Značajka                    | Vrijednost                                        |
|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| Broj modela                 | 63BHMIXRLF11M700.00M1122LRPC                      |
| Promjer glave klipa         | 63 mm                                             |
| Promjer radnog dijela klipa | 28 mm                                             |
| Navoj kraja klipa           | M20x1.5 mm                                        |
| Hod klipa                   | 700 mm                                            |
| Standardni tlak             | 210 bar                                           |
| Brzina fluida               | 5 m/s (60,3 l/min, 46,2 l/min)                    |
| Brzina klipa                | do 1 m/s                                          |
| Fluid                       | Grupa 1 Mineralno ulje HH, HL, HLP, HLP-D, HM, HV |
| Razvodnik                   | NG10                                              |
| Vrsta pretvornika           | Magnetostriktivni                                 |
| Signal izlaza               | 4 – 20 mA                                         |



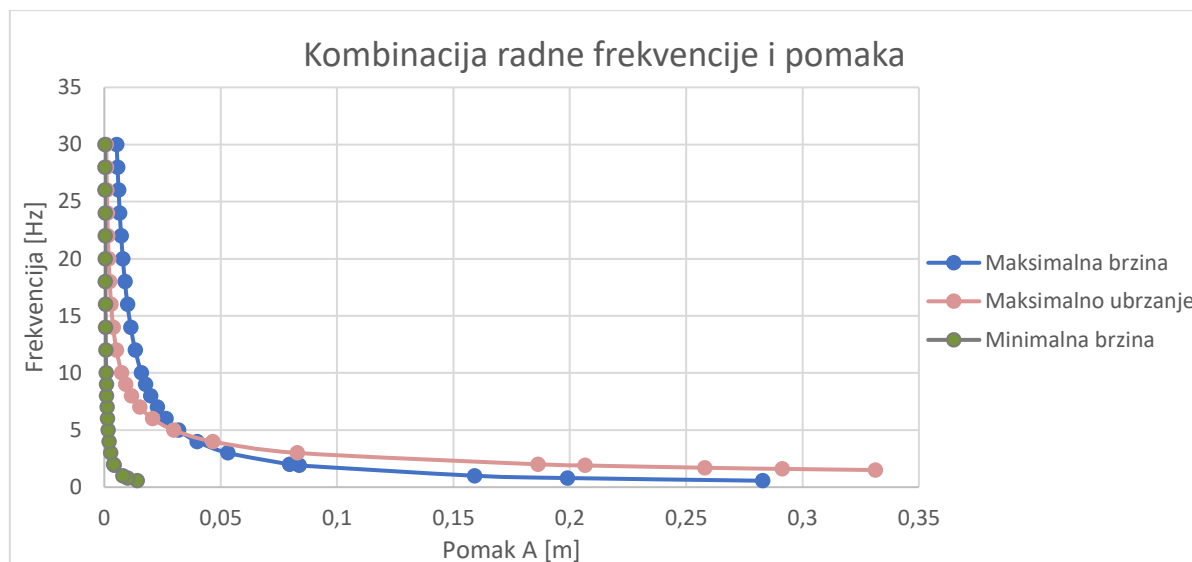
**Slika 40. Dimenzije dvoradnog hidrauličkog cilindra [13.]**

### 5.3.1. Radna frekvencija i pomak

Nakon odabira hidrauličnog dvoradnog cilindra, potrebno je odrediti koje su realne kombinacije radne frekvencije i pomaka tako da ubrzanje platforme i uzorka ne prelazi  $3g$  (maksimalna sila pokretanja platforme ne prelazi 50 000 N) uz to da brzina klipa (maksimalna 1 m/s, minimalna 0,05 m/s) može ostvariti takvo gibanje. Za izračun pomaka u ovisnosti o frekvenciji i brzini / ubrzanju klipa koristile su se preoblikovane formule (3) i (4), izračun je prikazan tablicom 10. Dobivene vrijednosti unutar tablice 10. korištene su za izradu dijagrama prikazan slikom 41.

**Tablica 10. Izračun parametra pomaka u ovisnosti o frekvenciji i brzini / ubrzanju**

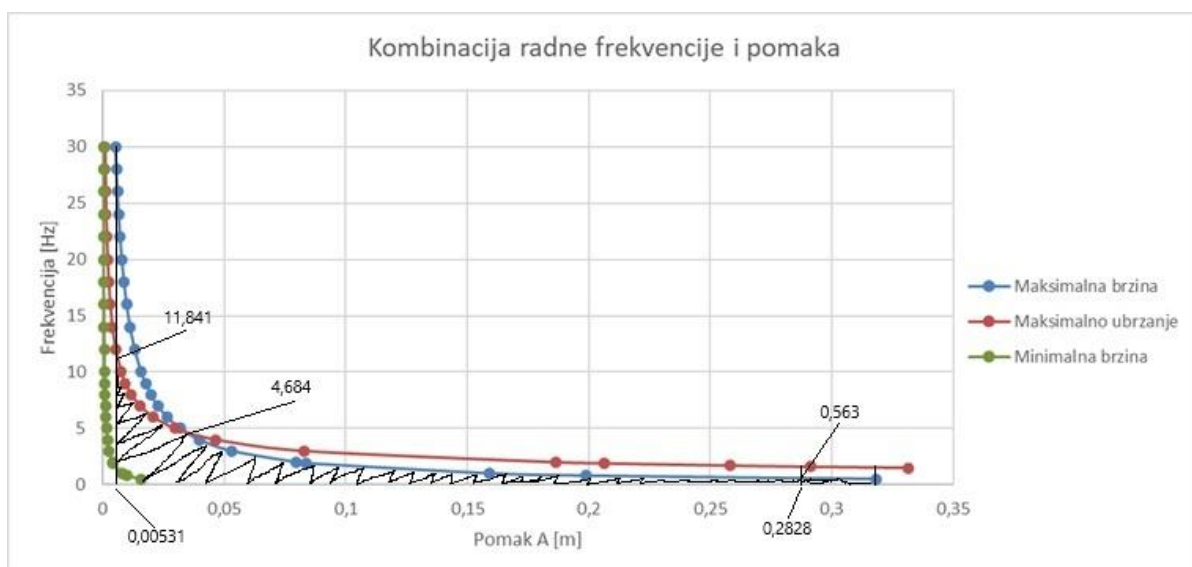
| $v_{max} = 1 \text{ m/s}$ $v_{min} = 0,05 \text{ m/s}$ |                |                | $a_{max} = 29,43 \text{ m/s}^2$ |                |
|--------------------------------------------------------|----------------|----------------|---------------------------------|----------------|
| $f / \text{Hz}$                                        | $A / \text{m}$ | $A / \text{m}$ | $f / \text{Hz}$                 | $A / \text{m}$ |
| 0,5                                                    | 0,31831        | 0,01592        | 1,5                             | 0,33132        |
| 0,8                                                    | 0,19894        | 0,00995        | 1,6                             | 0,29119        |
| 1                                                      | 0,15915        | 0,00796        | 1,7                             | 0,25795        |
| 1,9                                                    | 0,08377        | 0,00419        | 1,9                             | 0,20650        |
| 2                                                      | 0,07958        | 0,00398        | 2                               | 0,18637        |
| 3                                                      | 0,05305        | 0,00265        | 3                               | 0,08283        |
| 4                                                      | 0,03979        | 0,00199        | 4                               | 0,04659        |
| 5                                                      | 0,03183        | 0,00159        | 5                               | 0,02982        |
| 6                                                      | 0,02653        | 0,00133        | 6                               | 0,02071        |
| 7                                                      | 0,02274        | 0,00114        | 7                               | 0,01521        |
| 8                                                      | 0,01989        | 0,00099        | 8                               | 0,01165        |
| 9                                                      | 0,01768        | 0,00088        | 9                               | 0,00920        |
| 10                                                     | 0,01592        | 0,00080        | 10                              | 0,00745        |
| 12                                                     | 0,01326        | 0,00066        | 12                              | 0,00518        |
| 14                                                     | 0,01137        | 0,00057        | 14                              | 0,00380        |
| 16                                                     | 0,00995        | 0,00050        | 16                              | 0,00291        |
| 18                                                     | 0,00884        | 0,00044        | 18                              | 0,00230        |
| 20                                                     | 0,00796        | 0,00040        | 20                              | 0,00186        |
| 22                                                     | 0,00723        | 0,00036        | 22                              | 0,00154        |
| 24                                                     | 0,00663        | 0,00033        | 24                              | 0,00129        |
| 26                                                     | 0,00612        | 0,00031        | 26                              | 0,00110        |
| 28                                                     | 0,00568        | 0,00028        | 28                              | 0,00095        |
| 30                                                     | 0,00531        | 0,00027        | 30                              | 0,00083        |



**Slika 41. Dijagram kombinacije radne frekvencije i pomaka u ovisnosti o brzini / ubrzanju**

Površine ispod pojedinačne linije, kao i same linije (plava, crvena, zelena) označavaju moguće kombinacije frekvencija i pomaka uz to da ne dolazi do prekoračenja jednog od parametra koji je naveden u legendi dijagrama. Crvena linija ograničava maksimalno ubrzanje od  $3g$ , time je stvoreno ograničenje da sila pokretanja platforme neće prekoračiti vrijednost od  $50\,000\text{ N}$ .

Presjekom površine ispod plave linije i površine ispod crvene linije, prikazano slikom 42., dobiva se nova površina koja daje sve kombinacije radne frekvencije i pomaka koje odabrani hidraulični cilindar može izvesti uz ograničenja maksimalnog ubrzanja i maksimalne brzine.



**Slika 42. Dijagram s naznačenom površinom kombinacija pomaka i radne frekvencije ( $a = 3g$ ,  $v = 1\text{ m/s}$ )**

Iz dijagram prikazan slikom 42., može se uočiti da pri maksimalnoj brzina klipa od 1 m/s i maksimalnom ubrzanja od  $3g$ , najveća frekvencija iznosi 11,841 Hz pri pomaku od 0,00531 m. Za postizanje frekvencije od 30 Hz potrebno je smanjiti brzinu klipa odnosno izvršiti presjek površina ispod linija maksimalnog ubrzanja (crvena) i najmanje brzine gibanja klipa (zeleni). Tablica 11. prikazuje granične vrijednosti frekvencija koje se mogu postići odabranim hidrauličnim cilindrom s zadanom brzinom gibanja klipa.

**Tablica 11. Krajnje vrijednosti brzine klipa i radne frekvencije za odabrani hidraulički cilindar**

|                      |         |         |         |        |        |
|----------------------|---------|---------|---------|--------|--------|
| $v / (\text{m/s})$   | 0,05    | 0,1561  | 0,396   | 1      | 1      |
| $f / \text{Hz}$      | 30      | 30      | 11,841  | 4,684  | 0,5627 |
| $A / \text{m}$       | 0,00027 | 0,00083 | 0,00531 | 0,0340 | 0,2828 |
| $a / (\text{m/s}^2)$ | 9,4248  | 29,4242 | 29,43   | 29,43  | 3,5355 |

Najveće opterećenje hidrauličkog cilindra i linearnih vodicica je pri najvećoj brzini pomicanja klipa od 1 m/s i maksimalnog ubrzanja od  $3g$ , odnosno to je presjek crvene i plave linije gdje radna frekvencija iznosi 4,684 Hz

### 5.3.2. Hod klipa

Maksimalan hod klipa ovisi o duljini hoda platforme. Ako uzmemo u obzir da je platforma simetrična po x i y osi, a početna točka se nalazi na presjeku osi, odabrana duljina hoda platforme po osima x i y (u pozitivnom i negativnom smjeru) je  $\pm 200$  mm. Ako je klip postavljen tako da je kreće iz centra cilindra, maksimalni hod klipa se nalazi u najizduženijem / najpovučenijem položaju oba cilindra, onda za jedan smjer možemo definirati hod klipa koji iznosi:

$$A_0 = \sqrt{200^2 + 200^2} = 282,85 \text{ mm} \quad (7)$$

Odabrani hod klipa hidrauličnog cilindra ( $A_{odabrano} = 700$  mm) mora biti veći ili jednak dvostrukoj vrijednosti hoda u jednom smjeru uz dodanih 80 mm kako preporučuje proizvođač [13.] u katalogu, te minimalan potreban hod klipa iznosi:

$$A_{min} = 2A_0 + 80 = 645,7 \text{ mm} \leq 700 \text{ mm} \quad (8)$$

ZADOVOLJAVA!

### 5.3.3. Sila hidrauličkog cilindra

Sila hidrauličkog cilindra mora biti veća ili jednaka od maksimalne sile pokretanja platforme koja je dobivena jednadžbom (6). Sila hidrauličkog cilindra ovisi o površini i tlaku unutar cilindra preko koje fluid generira silu, prema tome uzima se radna strana klipa koja ima manju površinu u odnosu na glavu klipa, tj. uzima se strana klipa koja služi za povlačenje klipa unutar cilindra. Sila hidrauličnog klipa iznosi:

$$F_{klipa} = \left( \frac{d_v^2 \pi}{4} - \frac{d_u^2 \pi}{4} \right) \cdot p = 52\,531 \text{ N} \geq 50\,000 \text{ N} \quad (9)$$

ZADOVOLJAVA!

Gdje je:

$d_v = 0,063$  m –promjer glave klipa

$d_u = 0,028$  m – promjer radnog dijela klipa

$p = 210$  bar =  $210 \cdot 10^5$  Pa – standardni tlak odabranog cilindra

#### 5.3.4. Dodatni elementi hidrauličkog cilindra

Elementi za spajanje hidrauličnog cilindra na platformu te na postojeći zid su odabrani iz gotovih proizvoda proizvođača Parker [13.] Nakon konfiguriranja željenog hidrauličkog cilindra, konfigurator daje preporuke koje elemente za spajanje upotrijebiti, uz dodatak da postoje za iste dimenzije cilindra različite nosivosti spojnih elementa.

Prvi odabran spojni element je spojnica klipa na temelju M20 navoja, navoj je odabran u konfiguratoru. Drugi odabran element je svornjak s uskočnicima prema promjeru rupe od 20 mm (spojnica klipa Ø20H9) i nominalne sile od 50 000 N. Treći odabran spojni element je spojnica platforme / zida na temelju promjera svornjaka i nominalne sile od 50 kN. Izvršen je proračun vijka M12 kvalitete 8.8, koji spaja platformu / zid s hidrauličkim cilindrom, na vlačnu silu (maksimalna sila pokretanja platforme podijeljena s četiri) te je dobiven faktor sigurnosti 4,42

| Spojnica klipa |         |         |                            |                            |
|----------------|---------|---------|----------------------------|----------------------------|
| Broj modela    | CK Ø H9 | M navoj | Dostupni crteži            |                            |
|                |         |         | PDF                        | STP                        |
| 1434610000     | 20      | M20x1.5 | <a href="#">1434610000</a> | <a href="#">1434610000</a> |



| Svornjak s uskočnicima |         |                   |                            |                            |
|------------------------|---------|-------------------|----------------------------|----------------------------|
| Broj modela            | EK Ø f8 | Nominalna sila kN | Dostupni crteži            |                            |
|                        |         |                   | PDF                        | STP                        |
| 1434800000             | 20      | 32                | <a href="#">1434800000</a> | <a href="#">1434800000</a> |
| 1434800000             | 20      | 50                | <a href="#">1434800000</a> | <a href="#">1434800000</a> |



| Spojnica platforme / zida |         |                   |                            |                            |
|---------------------------|---------|-------------------|----------------------------|----------------------------|
| Broj modela               | CK Ø H9 | Nominalna sila kN | Dostupni crteži            |                            |
|                           |         |                   | PDF                        | STP                        |
| 1436490000                | 20      | 32                | <a href="#">1436490000</a> | <a href="#">1436490000</a> |
| 1436490000                | 20      | 50                | <a href="#">1436490000</a> | <a href="#">1436490000</a> |



Slika 43. Odabrani spojni elementi nominalne nosivosti 50 kN [13.]

#### 5.4. Vijek trajanja linearnih profilnih vodicica

Linearne profilne vodilice su opterećene dinamičkom silom koja nastaje ubrzavanjem, vožnjom i usporavanjem mase koja je postavljena na vodilice (masa platforme + masa uzorka + masa dodatnih elemenata) također sila mijenja smjer i iznos u ovisnosti o ubrzanju. Za proračun vijeka trajanja para profilnih vodicica uzete su vodilice (donje) koje su opterećenije odnosno vodilice koje nose ukupnu masu koja je dobivena formulom (6). Uzima se u obzir da su gornje vodilice s platformom i uzorkom pomaknute za 200 mm (ispružen hidraulički cilindar) kako bi dobili najveće opterećenje jedne strane donjih vodicica zbog pomaka težišta bliže jednoj strani vozača. Proračun vijeka trajanja je izveden pomoću tehničkog alata *Life Calculation* proizvođača HIWIN [14.], nakon kojeg se konfigurira željeni model vodilice pomoću 2D/3D CAD tehničkog alata [14.].

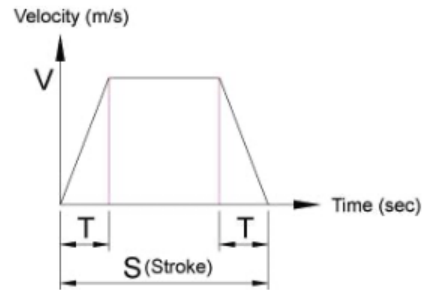
Prvi korak pri proračunu vijeka trajanja pomoću alata *Life Calculation* je odabir modela koji želimo ispitati. Model HGH55H označava vodilicu za teža opterećenja (HG) koja ima kvadratni oblik vozača (H) s širinom vodilice od 55 mm te je predviđena za vrlo veliko opterećenje (H). Opterećenje ugradnjom (oznake ZA, 0,05C – 0,07C) omogućava preciznije gibanje vozača i veću krutost ali smanjuje vijek trajanja vodilice.

| Identify Spec.                |            |
|-------------------------------|------------|
| Model No.                     | HGH55H     |
| Preload                       | ZA         |
| Installation Position         | Horizontal |
| Basic static load rating (C0) | 276230(N)  |
| Basic dynamic load rating (C) | 184900(N)  |
| Number of Rails               | 2          |
| Number of blocks on a rail    | 2          |

Slika 44. Specifikacija odabranog modela vodilice [14.]

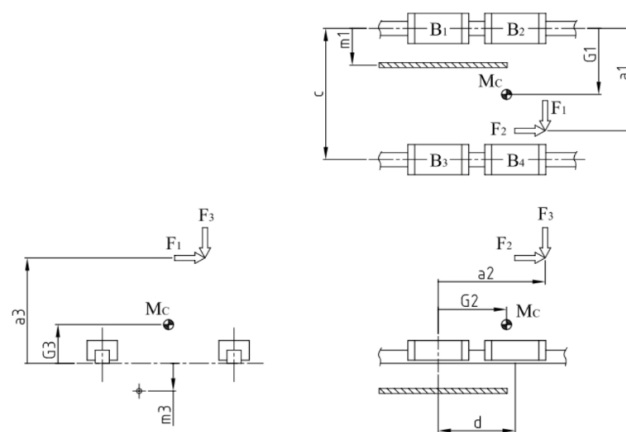
Drugi korak je odabir parametara gibanja. Najveće opterećenje vodilice je pri uvjetima najvećeg ubrzanja ( $3g$ ) i najveće brzine (1 m/s). Potrebna frekvencija je izračunata na kraju poglavlja 5.3.1. i iznosi 4.684 Hz. Prilikom upisivanja parametara gibanja potrebno je točno upisati brzinu, vrijeme, pomak i frekvenciju [1/min] koja odgovara ubrzanju jer u suprotnom alat za izračun izbacuje grešku. Odabrani parametri su prikazani slikom 45.

| Speed Conditions                     |                                       |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Maximum velocity (V)                 | 1(m/sec)                              |
| Acceleration (Deceleration) (a)      | 29.4290759270159(m/sec <sup>2</sup> ) |
| Load factor (fw)                     | 1.5                                   |
| Accelerating (Decelerating) time (T) | 0.03398(sec)                          |
| Stroke(S)                            | 34(mm)                                |
| Frequency (cycles per minute) (n)    | 281.04(1/min)                         |



Slika 45. Parametri gibanja vozača po profilnoj vodilici [14.]

Treći korak je unos potrebnih dimenzija prema zadanom crtežu. Za izračun je korištena ukupna masa dobivena jednadžbom (6) te je centar te mase pomaknut za 200 mm, kako je navedeno u uvodu ( $G_1 = 537,5$  mm, masa platforme  $M_c = 1650$  kg). Razmak između centra gravitacije ukupne mase i donjeg dijela vodilice ( $G_3$ ) je dobiven kao razmak između donjeg dijela vodilice i platforme uz dodatak od 335 mm zbog nepoznavanja dimenzija uzorka a time i centra gravitacije uzorka. Slika 46. prikazuje parametre pri uvjetima opterećenja.



| Load Conditions                          |           |                                                          |           |
|------------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------|-----------|
| Distance between blocks (d1)             | 675(mm)   | Distance between rails (c1)                              | 675(mm)   |
| Distance between blocks (d2)             | N/A       | Distance between rails (c2)                              | N/A       |
| Distance between blocks (d3)             | N/A       | Distance between rails (c3)                              | N/A       |
| (Maximum)External force (F1)             | 0(N)      | Center of gravity(Mc) to geometric center of rails (G1)  | 537.5(mm) |
| (Maximum)External force (F2)             | 0(N)      | Center of gravity(Mc) to geometric center of blocks (G2) | 337.5(mm) |
| (Maximum)External force (F3)             | 0(N)      | Center of gravity(Mc) to rail bottom (G3)                | 840(mm)   |
| F2(F3) to geometric center of rails (a1) | 337.5(mm) | Driving axis to geometric center of rails (m1)           | 337.5(mm) |
| F1(F3) to geometric center of blocks(a2) | 337.5(mm) | Driving axis to rail bottom (m3)                         | 53(mm)    |
| F1(F2) to rail bottom (a3)               | 337.5(mm) | Mass of table (Mc)                                       | 1650(kg)  |

Slika 46. Parametri uvjeta opterećenja [14.]

Nakon ispunjava sva tri koraka dobiva se rezultat proračuna vijeka trajanja vodicica kao i dobivene sile pri određenim uvjetima (ubrzanje, vožnja, usporavanje). Slika 47. prikazuje dobivene sile i pomake pri određenim uvjetima te minimalni vijek trajanja linearnih vodicica uz statički faktor sigurnosti.

| Equivalent Load Calculation        |                             |                          |             |
|------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------|
| Accelerating, Equivalent load      | 32869.36(N)                 | Accelerating stroke      | 16.99(mm)   |
| Constant velocity, Equivalent load | 6444.62(N)                  | Constant velocity stroke | 0.02(mm)    |
| Decelerating, Equivalent load      | 45758.6(N)                  | Decelerating stroke      | 16.99(mm)   |
| Maximum equivalent load            | 40331.09(N)                 | Mean effective load      | 40331.09(N) |
| Result of Nominal Life Calculation |                             |                          |             |
| Minimum Nominal Life of Block      | Block 3 (B3) · Block 4 (B4) |                          |             |
| Static safety factor               | 6.85                        |                          |             |
| Nominal life                       | 1244.97(hr)                 |                          |             |
| Nominal life                       | 1427.54(km)                 |                          |             |

**Slika 47. Rezultat tehničkog alata *Life Calculation* HIWIN, pri zadanim parametrima [14.]**

Pregledom dobivenih rješenja uočava se da statički faktor sigurnosti za jednostavno opterećenje iznosi  $f_{SL} = 6,85 > f_{SL,min} = 3 - 5$  za udare / vibracije prema [14.]. Vijek trajanja profilnih vodicica u kilometrima iznosi  $L = 1427,54$  km, dok je nazivni vijek trajanja u satima  $L_h = 1244,97$  h za vozače B3 i B4 sa slike 46.

Proračun vijeka trajanja je vrlo konzervativan jer su primijenjeni parametri gibanja s najvećim opterećenjem na vodilice. To znači da će vodilice izdržati  $L_h = 1244,97$  h rada s najvećim ubrzanjem i najvećom brzinom. Dok realno opterećenje vodicica ima varirajuće parametre uz rijetko dostizanje najvećih vrijednosti.

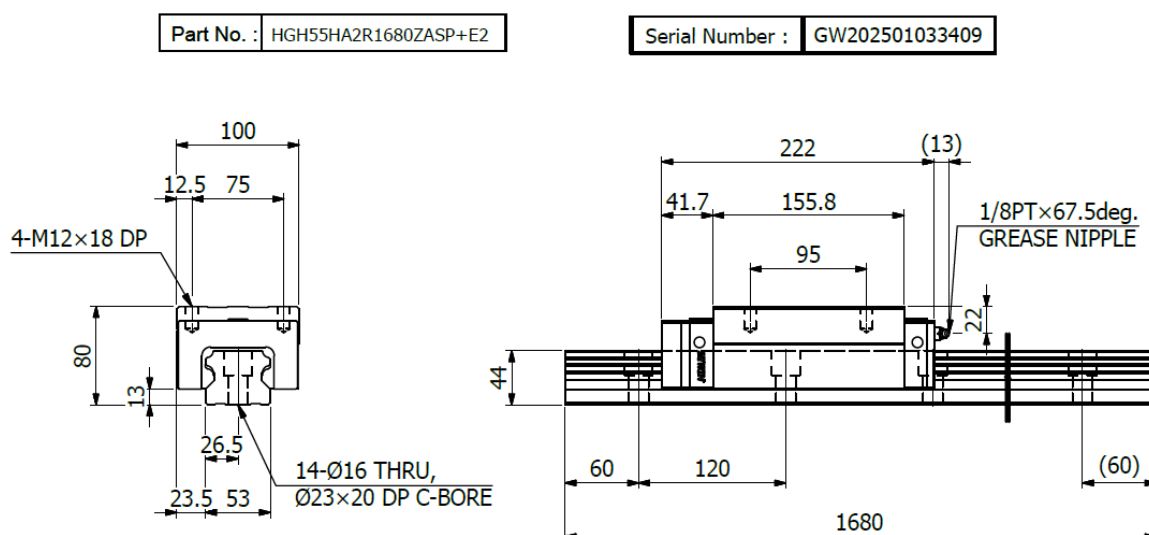
**ZADOVOLJAVA!**

Proračun vijeka trajanja profilnih vodicica s krajnjim parametrima gibanja iz tablice 11. prikazan je tablicom 12. Za proračun su korišteni isti faktori opterećenja  $f_w = 1,5$  kao i parametri uvjeta opterećenja (slika 46.) kao i u prethodnom proračunu.

Tablica 12. Proračun vijeka trajanja profilnih vodilica za različite parametre gibanja

|                          |           |          |          |           |
|--------------------------|-----------|----------|----------|-----------|
| $v$ /(m/s)               | 0,05      | 0,1561   | 0,396    | 1         |
| $f$ /(1/min)             | 1800      | 1800     | 710,46   | 33,762    |
| $A$ /mm                  | 0,27      | 0,83     | 5,38     | 282,8     |
| $a$ /(m/s <sup>2</sup> ) | 9,4248    | 29,425   | 29,43    | 3,536     |
| $t$ /s                   | 0,00531   | 0,005305 | 0,0134   | 0,2828    |
| $f_{SL}$                 | 13,06     | 6,88     | 6,85     | 16,19     |
| $L$ /(km)                | 9 894,7   | 1 444,59 | 1 436    | 18 859,47 |
| $L_h$ /(h)               | 169 662,7 | 8 057,73 | 3 119,87 | 16 461,39 |

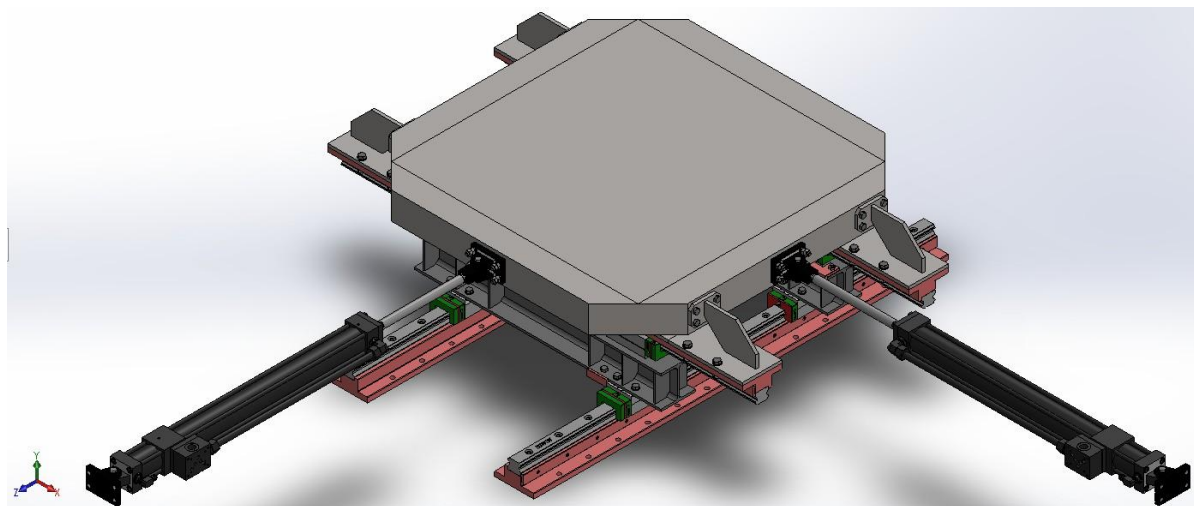
Slika 48. prikazuje dimenzije odabrane profilne vodilice s kugličnim vozačem prema [14.] uz napomenu da crtež nije u mjerilu.



Slika 48. Dimenzije odabrane profilne vodilice [14.]

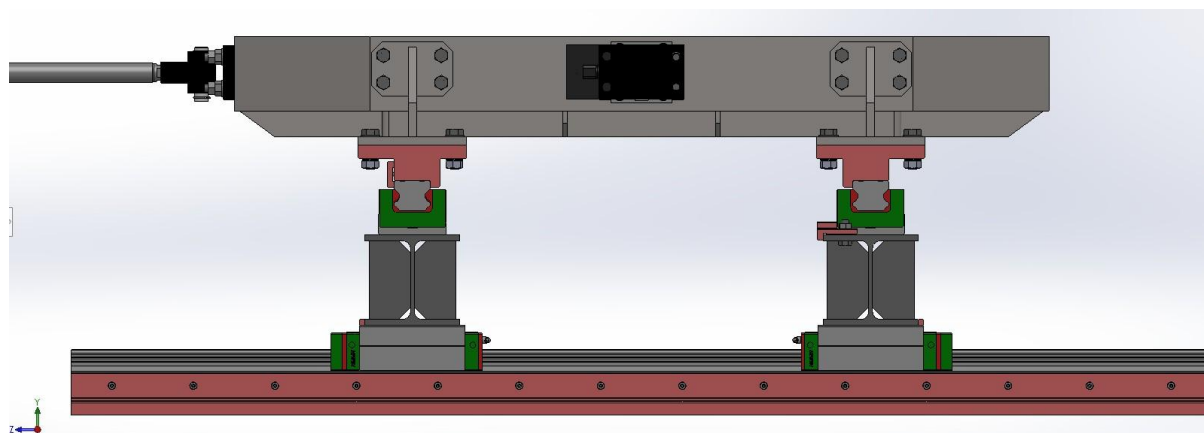
## 6. Konstrukcijsko rješenje platforme za simulaciju potresa

Temeljem odabranih komponenata i izradom modela pomične platforme kao i drugih potrebnih modela izrađeno je konstrukcijsko rješenje platforme za simulaciju potresa. Konstrukcijsko rješenje cijelog uređaja prikazano je slikom 49.

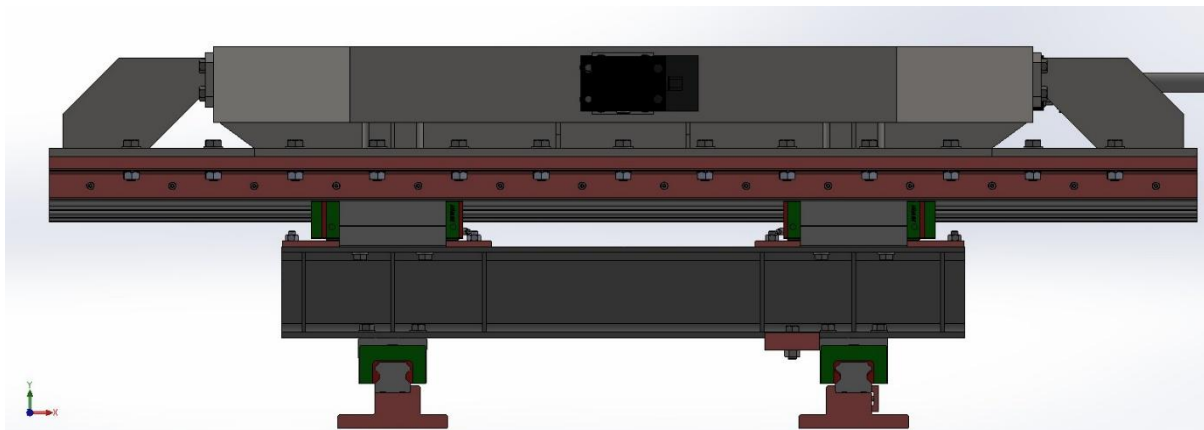


Slika 49. Konstrukcijsko rješenje platforme za simulaciju potresa

Slike 50. prikazuje način montaže profilnih vodilica na nosač vodilica i montažu vozača na HEA profil s ciljem održavanja paralelnosti. Obje montaže se vrše pomoću graničnika prema preporuci proizvođača [14.]. Za montažu vodilica na nosač postoje dva graničnika sa svake strane dok za montažu vozača na profil mora biti samo jedan graničnik. Graničnici služe za održavanje paralelnosti između dvije vodilice odnosno dva HEA profila. Slika 51. prikazuje isti načini montaže samo za drugi par vodilica.

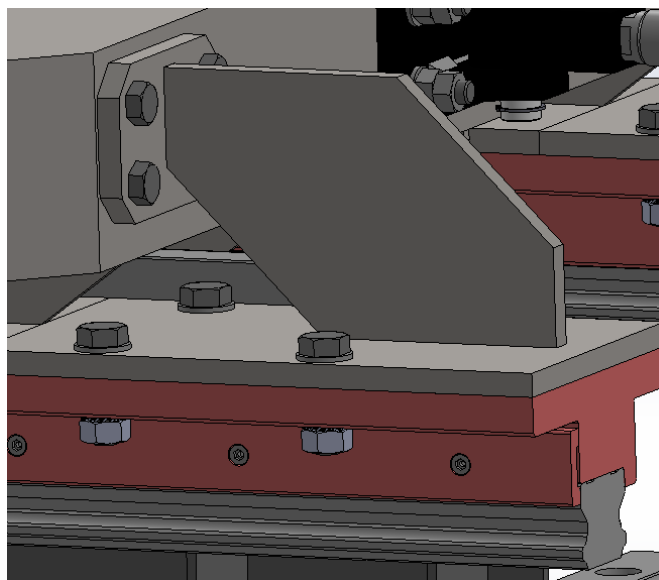


Slika 50. Pogled platforme, smjer osi X



**Slika 51. Pogled platforme, smjer osi Z**

Slika 52. prikazuje rebro zavareno na dvije pravokutne ploče koje se vijcima vežu za pomičnu platformu i nosač vodilice. Takvo rješenje ima funkciju smanjenja savijanja krajeva profilnih vodilica jer se na tom mjestu ne nalazi spojna ploča. Kada je hidraulički cilindar u najispruženijem položaju cijela pomična platforma se pomiče zajedno s vodilicama i nosačem vodilica, dok je vozač fiksiran u odnosu na HEA profil. U tom trenutku vozač se nalazi na mjestu ojačanja te time neće doći do savijanja vodilica.



**Slika 52. Ojačanje za smanjenje savijanja krajeva profilnih vodilica**

## 7. Zaključak

Izradom konstrukcijskog rješenja platforme za simulaciju potresa uz navedeni proračun potrebno je doći do zaključka koji su najbitniji parametri platforme koji bi bili temelj procesa konstruiranja. Zadavanje maksimalnog ubrzanja i mase uzorka su temeljni parametri prema kojima se platforma konstruira. Izračunom sile pokretanja, korištenjem navedenih parametara, odabire se hidraulički cilindar, konstruira pomična platforma koja nosi uzorak te kao završni postupak proračunava vijek trajanja linearnih profilnih vodicica. Vijek trajanja vodicica se proračunava korištenjem mase svi komponenata koje se nalaze na njoj. Isti postupak bi se koristio i za druge načine ležištenja platforme.

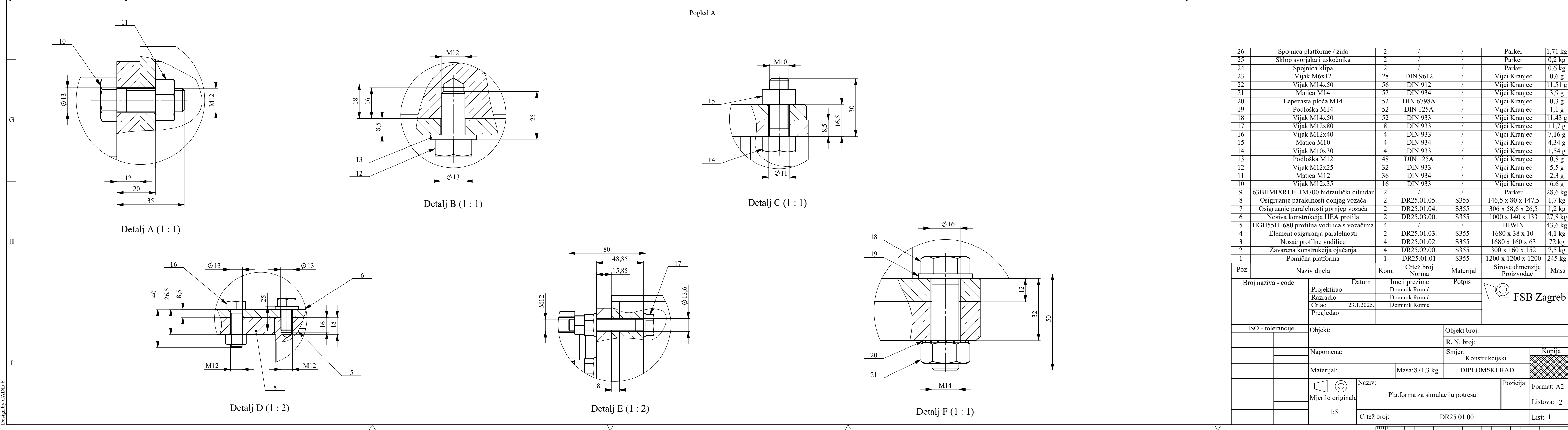
Za definiranje karakteristika platforme bitno je poznavati koji je raspon i koje su kombinacije radne frekvencija i pomaka koju platforma može izvesti. Raspon frekvencije i pomaka su definirani vrstom aktuatora dok realne kombinacije pomaka i frekvencije ovise o maksimalnom ubrzanju i najvećoj / najmanjoj brzini gibanja klipa. Tablica 13. prikazuje karakteristike konstruirane platforme za simulaciju potresa.

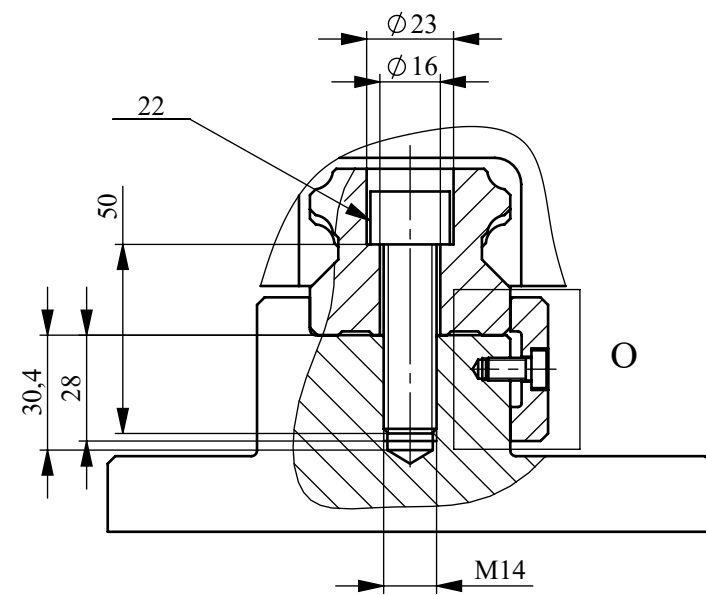
**Tablica 13. Specifikacije konstruirane platforme za simulaciju potresa**

| Karakteristika          | Vrijednost          |
|-------------------------|---------------------|
| Stupanj slobode gibanja | 2                   |
| Broja aktuatora         | 2                   |
| Dimenzija platforme     | 1 000 mm x 1 000 mm |
| Nosivost platforme      | 1 000 kg            |
| Mogućnost ubrzanja      | $\pm 3g$            |
| Radna frekvencija       | 0 – 30 Hz           |
| Hod platforme po X-osi  | $\pm 200$ mm        |
| Hod platforme po Z-osi  | $\pm 200$ mm        |

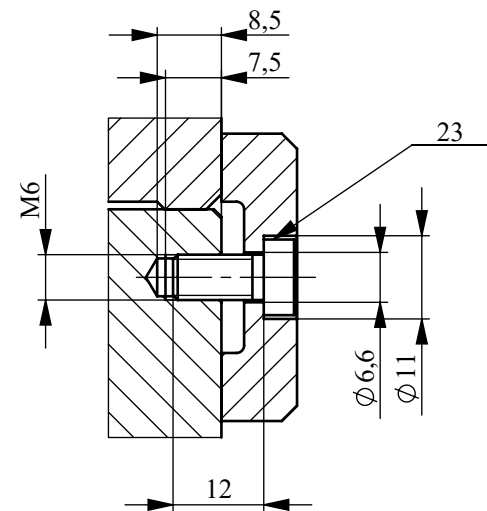
## Literatura

- [1.] <https://www.britannica.com>
- [2.] <https://enciklopedija.hr/clanak/tektonika-ploca>
- [3.] [https://www.pmf.unizg.hr/geof/popularizacija\\_geofizike/seizmoloski\\_pojmovnik#](https://www.pmf.unizg.hr/geof/popularizacija_geofizike/seizmoloski_pojmovnik#)
- [4.] <https://ttweathercenter.com/2022/01/01/earthquake-magnitude-intensity/>
- [5.] <https://www.nature.com/articles/484296a>
- [6.] <https://tdg.com.tr/en>
- [7.] <https://www.quanser.com>
- [8.] <https://www.mts.com/en>
- [9.] <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2020.580333/full>
- [10.] <https://www.thomsonlinear.com/en/index>
- [11.] <https://deltron.com>
- [12.] <https://motionsystems.eu>
- [13.] <https://www.parker.com/us/en/home.html>
- [14.] <https://www.hiwin-support.com>

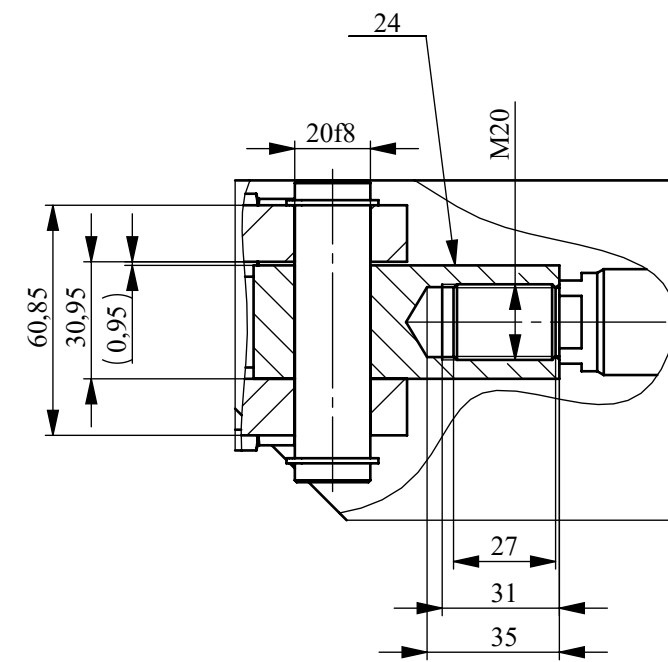




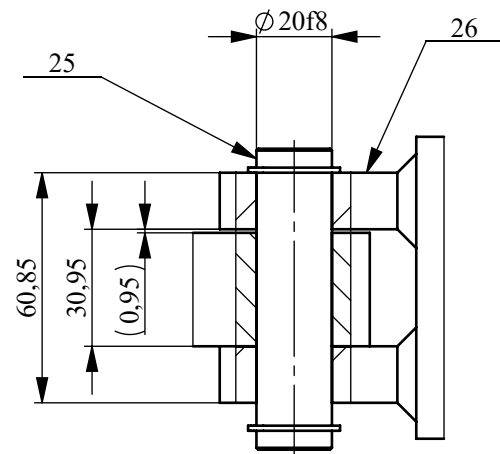
Detalj G (1 : 2)



Detalj O (1 : 1)



Detalj K (1 : 2)



Detalj H (1 : 2)

|                    |        |                                 |               |               |                                                                                                                        |  |
|--------------------|--------|---------------------------------|---------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Broj naziva - code |        | Datum                           | Ime i prezime | Potpis        |  FSB Zagreb<br>Studij strojarstva |  |
|                    |        | Projektirao                     | Dominik Romić |               |                                                                                                                        |  |
|                    |        | Razradio                        | Dominik Romić |               |                                                                                                                        |  |
|                    |        | Crtao                           | 23.1.2025.    | Dominik Romić |                                                                                                                        |  |
|                    |        | Pregledao                       |               |               |                                                                                                                        |  |
| ISO - tolerancije  |        | Objekt:                         |               |               | Objekt broj:                                                                                                           |  |
| Ø 20f8             | -0,02  |                                 |               |               | R. N. broj:                                                                                                            |  |
|                    | -0,053 |                                 |               |               |                                                                                                                        |  |
|                    |        | Napomena:                       |               |               | Smjer:                                                                                                                 |  |
|                    |        |                                 |               |               | Konstrukcijski                                                                                                         |  |
|                    |        | Materijal:                      |               |               | Masa: 871,3 kg                                                                                                         |  |
|                    |        |                                 |               |               | DIPLOMSKI RAD                                                                                                          |  |
|                    |        | Naziv:                          |               |               | Pozicija:                                                                                                              |  |
|                    |        | Platforma za simulaciju potresa |               |               | Format: A3                                                                                                             |  |
|                    |        | Mjerilo originala               |               |               | Listova: 2                                                                                                             |  |
|                    |        | 5:1                             |               |               | List: 2                                                                                                                |  |
|                    |        | Crtež broj:                     |               |               | DR25.01.00                                                                                                             |  |

