

Numerički proračun krutosti i optimiranje prihvatnog alata za podizanje teških tereta mostnog granika HROC u fuzijskoj elektrani DONES

Meštrović, Denis

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:743735>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-02**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Denis Meštrović

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Zvonimir Tomičević, dipl. ing.

Dr. sc. Ante Bakić, dipl. ing.

Student:

Denis Meštrović

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Ovom prilikom zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Zvonimiru Tomičeviću i njegovim cijenjenim suradnicima Ani Vrgoč, mag. ing. mech. i Andriji Zaplatiću, mag. ing. mech., na velikoj pomoći i nadasve korisnim savjetima koje su mi pružili tijekom izrade ovog rada. Zahvaljujem i dr. sc. Anti Bakiću na pruženoj prilici i vrijednim stečenim iskustvima tijekom industrijske prakse u INETEC-u.

Denis Meštrović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Denis Meštrović Mat. br.: 0035214226

Naslov rada na hrvatskom jeziku: Numerički proračun krutosti i optimiranje prihvatnog alata za podizanje teških tereta mostnog granika HROC u fuzijskoj elektrani DONES
Naslov rada na engleskom jeziku: Deformation analysis and optimization of the acceptance tool for lifting heavy weights of the HROC bridge crane in DONES fusion power plant

Opis zadatka:

DONES fuzijsko postrojenje bit će izgrađeno s ciljem ispitivanja ozračenih materijala za dizajn, licenciranje, izgradnju i siguran rad DEMO elektrane koja se razvija na eksperimentalnom reaktoru nuklearne fuzije ITER. Uvjeti ispitivanja simulirat će fuzijsko okruženje DEMO elektrane s ciljem pouzdanog određivanja degradacije materijalnih svojstava predloženih konstrukcijskih materijala. Zbog velike doze zračenja tijekom eksploatacije, postrojenje DONES mora biti opremljeno sustavima za autonomno ili daljinsko rukovanje (*eng. Remote Handling Equipment - RHE*) s ciljem izvršavanja svih aktivnosti održavanja i ispitivanja. U prihvatnoj ćeliji (*eng. Access Cell - AC*) DONES-a je iznad sobe za ispitivanje (*eng. Test Cell - TC*) smješten mosni granik HROC sa šest stupnjeva slobode gibanja. Glavna funkcija HROC-a je podizanje i prenošenje teških tereta do 120 t. Osim toga, HROC mosni granik mora zadovoljiti vrlo stroge zahtjeve preciznog pozicioniranja tereta.

U ovom radu potrebno je numerički proračunati alat za prihvat i prenošenje teških tereta (*eng. suspended plate*), te provjeriti zadovoljava li predložena okvirna konstrukcija kriterije krutosti. Budući da će HROC mosni granik biti daljinski upravljani, prihvat tereta bit će ostvaren pomoću *twistlock* mehanizma koji se uobičajeno koristi kod prenošenja brodskih kontejnera. Konstrukcijske komponente mosnog granika koje se koriste u okolini s visokim zračenjem prema normi NUREG-0554 moraju zadovoljiti *single-proof-failure* kriterije koji definiraju redundantnu sigurnost cijelog sustava. Naime, u slučaju otkazivanja određene komponente mosnog granika ne smije doći do prekida rada RHE sustava, već on mora sigurno do kraja izvesti propisanu naredbu. S obzirom na navedene kriterije definirane normom NUREG-0554 potrebno je optimirati konstrukciju prihvatnog alata.

Dodatne informacije i nacrti dostupni su prema potrebi.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
30. studenoga 2020.	1. rok: 18. veljače 2021. 2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021. 3. rok: 23. rujna 2021.	1. rok: 22.2. – 26.2.2021. 2. rok (izvanredni): 9.7.2021. 3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Zvonimir Tomičević dr.sc. Ante Bakić

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Projekt DONES.....	2
1.2. <i>Heavy rope overhead crane</i> (HROC)	3
1.3. <i>Suspended plate</i> i njegova zadaća	7
2. Verifikacija i prilagodba modela	11
2.1. Priprema i verifikacija jednodimenzijskog numeričkog modela	11
2.2. Priprema i verifikacija trodimenzijskog numeričkog modela.....	16
3. Numerička analiza inicijalne konstrukcije <i>suspended platea</i>	23
3.1. Prilagodba modela.....	23
3.2. Simetrično opterećenje.....	27
3.3. Otkazivanje <i>twistlocka</i>	34
4. Odabir idealnog oblika i profila <i>suspended platea</i>	43
4.1. Prilagodba modela.....	43
4.2. Konfiguracija <i>twistlockova</i> i odabir profila	48
5. ZAKLJUČAK.....	64
LITERATURA.....	65
PRILOZI.....	66

POPIS SLIKA

Slika 1.	ITER u presjeku [2].....	1
Slika 2.	Prikaz fuzijske reakcije deuterija i tricija [4]	2
Slika 3.	Presjek ispitne prostorije [5].....	4
Slika 4.	Glavne komponente granika [5].....	5
Slika 5.	Rotacijski stupnjevi slobode po: a) x-osi, b) y-osi, c) z-osi [5]	6
Slika 6.	Inicijalna geometrija <i>suspended platea</i> : a) tlocrt, b) nacrt [5]	7
Slika 7.	<i>Twistlock</i> mehanizam [7].....	9
Slika 8.	Aksonometrije <i>suspended platea</i> a) pogled odozgo, b) pogled odozdo [5]	10
Slika 9.	Profil HE400×299 [9].....	12
Slika 10.	Narinuta opterećenja i rubni uvjeti na četvrtini modela diskretiziranog jednodimenzijskim elementima.....	13
Slika 11.	Mreže četvrtine okvira diskretizirane sa: a) 6, b) 8, c) 22 i d) 42 gredna elementa	14
Slika 12.	Raspodjela: a) pomaka i b) naprezanja za analizu jednodimenzijskim elementima provedenoj na jednoj četvrtini okvira s renderiranim profilom greda.....	15
Slika 13.	Četvrtinski model okvira renderiran u <i>Solidworksu</i>	16
Slika 14.	Particionirane površine na mjestu: a) prihvata užeta, b) djelovanja opterećenja ..	17
Slika 15.	Rubni uvjeti i opterećenje narinuto na konstrukciju: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo	18
Slika 16.	Četvrtina okvira diskretizirana sa: a) 4880, b) 7265 i c) 9735 C3D10 elemenata	19
Slika 17.	Raspodjela naprezanja: a) analiza trodimenzijskim elementima i b) po [5]	20
Slika 18.	Raspodjela vertikalnih progiba: a) analiza trodimenzijskim elementima i b) po [5]	21
Slika 19.	Povezivanje opruga i okvira – spoj i rubni uvjeti.....	24
Slika 20.	Particioniranje tereta: a) po visini i b) na kontaktnoj površini	26
Slika 21.	Teret diskretiziran sa: a) 6139, b) 12870, c) 22165 C3D20 elemenata.....	27
Slika 22.	Okvir diskretiziran s 39005 C3D10 elemenata	27
Slika 23.	Načini zadavanja opterećenja i modeliranja tereta: a) i b) – koncentrirana sila na referentnu točku, c) i d) – teret kao kruto tijelo, e) i f) – teret kao čvrsto tijelo....	28
Slika 24.	Raspodjela naprezanja za simetrično opterećenje – opterećenje zadano na referentnu točku: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo.....	29
Slika 25.	Raspodjela naprezanja za simetrično opterećenje – teret modeliran kao kruto tijelo: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo	30
Slika 26.	Raspodjela naprezanja za simetrično opterećenje – teret modeliran kao čvrsto tijelo modula elastičnosti 27 GPa: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo	31
Slika 27.	Raspodjela naprezanja za simetrično opterećenje – teret modeliran kao čvrsto tijelo modula elastičnosti 2000 GPa: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo	32
Slika 28.	Raspodjela vertikalnih progiba za simetrično opterećenje na usvojenom modelu: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo	33
Slika 29.	Načini modeliranja spoja tereta i okvira za slučaj otkazivanja jednog <i>twistlocka</i> : a) koncentrirana sila na referentnu točku, b) teret kao kruto tijelo i c) teret kao čvrsto tijelo.....	35
Slika 30.	Okvir diskretiziran s: a) 19342, b) 28671 i c) 39005 C3D10 elemenata.....	36
Slika 31.	Raspodjela naprezanja za slučaj otkazivanja jednog <i>twistlocka</i> – opterećenje zadano na referentnu točku: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo.....	37
Slika 32.	Raspodjela naprezanja za slučaj otkazivanja jednog <i>twistlocka</i> – teret modeliran kao kruto tijelo: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo.....	38

Slika 33.	Raspodjela naprezanja za slučaj otkazivanja jednog <i>twistlocka</i> – teret modeliran kao čvrsto tijelo modula elastičnosti 27 GPa: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo	39
Slika 34.	Raspodjela naprezanja za slučaj otkazivanja jednog <i>twistlocka</i> – teret modeliran kao čvrsto tijelo modula elastičnosti 2000 GPa: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo	40
Slika 35.	Raspodjela vertikalnih progiba za slučaj otkazivanja jednog <i>twistlocka</i> : a) pogled odozgo, b) pogled odozdo	41
Slika 36.	Povezivanje opruga i okvira – spoj i rubni uvjeti.....	44
Slika 37.	Načini zadavanja opterećenja i modeliranja tereta za okvir diskretiziran jednodimenzijskim konačnim elementima: a) i b) – koncentrirana sila na RP, c) i d) – teret kao kruto tijelo	45
Slika 38.	Okvir bez zaobljenja diskretiziran sa: a) 14555, b) 30164 i c) 41593 C3D10 elemenata.....	47
Slika 39.	Raspodjela vertikalnih progiba za slučaj otkazivanja jednog <i>twistlocka</i> na modelu bez zaobljenja: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo	48
Slika 40.	Inicijalna konfiguracija <i>twistlockova</i> na <i>suspended plateu</i> izvedenom kutijastim profilima: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo	49
Slika 41.	Mreže profila: a) SHS400×20, b) RHS500×300×20.....	49
Slika 42.	Okvir izveden RHS500×300×20 profilom: a) usvojena orijentacija, b) okvir zakrenut za 90°	50
Slika 43.	Raspodjela vertikalnih progiba za slučaj otkazivanja jednog <i>twistlocka</i> , profil SHS400×20: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo.....	51
Slika 44.	Raspodjela vertikalnih progiba za slučaj otkazivanja jednog <i>twistlocka</i> , profil RHS500×300×20: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo	52
Slika 45.	Raspodjela vertikalnih progiba za slučaj otkazivanja jednog <i>twistlocka</i> , profil RHS500×300×20 zakrenut za 90°: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo	53
Slika 46.	Konfiguracija <i>suspended platea</i> sa šest <i>twistlockova</i>	54
Slika 47.	Mreže za konfiguraciju sa šest <i>twistlockova</i> : a) okvir, b) teret	55
Slika 48.	Raspodjela vertikalnih progiba za profil HE400×299 opterećen simetrično na šest <i>twistlockova</i> : a) pogled odozgo, b) pogled odozdo	56
Slika 49.	Raspodjela vertikalnih progiba za profil HE400×299 u konfiguraciji sa šest <i>twistlockova</i> za slučaj otkazivanja rubnog <i>twistlocka</i> : a) pogled odozgo, b) pogled odozdo	57
Slika 50.	Raspodjela vertikalnih progiba za profil HE400×299 u konfiguraciji sa šest <i>twistlockova</i> za slučaj otkazivanja središnjeg <i>twistlocka</i> : a) pogled odozgo, b) pogled odozdo	58
Slika 51.	Mreža za konfiguraciju sa šest <i>twistlockova</i> i profil RHS500×300×20	59
Slika 52.	Raspodjela vertikalnih progiba za profil HE400×299 u konfiguraciji sa šest <i>twistlockova</i> za slučaj otkazivanja središnjeg <i>twistlocka</i> : a) pogled odozgo, b) pogled odozdo	60
Slika 53.	Modificirani <i>suspended plate</i> : a) prva varijanta, b) druga varijanta	61
Slika 54.	Mreža modificiranog <i>suspended platea</i> : a) prva varijanta, b) druga varijanta.....	61
Slika 55.	Raspodjela vertikalnih progiba za prvu varijantu modificiranog <i>suspended platea</i> : a) pogled odozgo, b) pogled odozdo	62
Slika 56.	Raspodjela vertikalnih progiba za drugu varijantu modificiranog <i>suspended platea</i> : a) pogled odozgo, b) pogled odozdo	63

POPIS TABLICA

Tablica 1. Zahtjevi na točnost i brzinu kretanja granika	4
Tablica 2. Karakteristične veličine profila HE400×299 [9]	11
Tablica 3. Usporedba rezultata dobivenih u [5] s rezultatima numeričke analize modela	16
Tablica 4. Prikaz konvergencije vrijednosti pomaka i naprezanja dobivenih različitim mrežama C3D8 elemenata	20
Tablica 5. Prikaz konvergencije vrijednosti vertikalnih progiba i naprezanja s obzirom na gustoću mreže tereta za slučaj simetričnog opterećenja	28
Tablica 6. Naprezanja i progibi za simetrično opterećen okvir	29
Tablica 7. Prikaz konvergencije vrijednosti vertikalnih progiba i naprezanja s obzirom na gustoće mreža okvira i tereta za slučaj otkazivanja jednog <i>twistlocka</i>	36
Tablica 8. Naprezanja i progibi za slučaj otkazivanja <i>twistlocka</i>	37
Tablica 9. Naprezanja i vertikalni progibi za jednodimenzijski model opterećen simetrično i na 3 <i>twistlocka</i> u usporedbi s usvojenim trodimenzijskim modelom	46
Tablica 10. Progibi okvira sa i bez zaobljenja za slučaj otkazivanja <i>twistlocka</i>	47
Tablica 11. Progibi okvira u ovisnosti o izboru profila i orijentaciji tereta – konfiguracija s četiri <i>twistlocka</i>	53
Tablica 12. Progibi okvira u ovisnosti o konfiguraciji opterećenja – konfiguracija sa šest <i>twistlockova</i>	55

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
c	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$	konstanta opruge za opružne elemente
d	mm	promjer užeta
E	MPa	modul elastičnosti čelika
E_2	MPa	modul elastičnosti tereta
F	N	koncentrirana sila
g	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	ubrzanje sile teže
h	mm	dubina spuštanja tereta maksimalne mase
k_{dyn}	/	faktor sigurnosti s obzirom na dinamička opterećenja
l_k	mm	karakteristična duljina konstrukcije
n	/	broj užadi korištenih u setu
n_{okvira}	/	broj konačnih elemenata kojima je diskretiziran okvir
n_{tereta}	/	broj konačnih elemenata kojima je diskretiziran teret
S	MPa	naprezanje
S_{max}	MPa	vršno naprezanje
U	mm	pomak
U_{max}	mm	maksimalni pomak
u_x	mm	pomak po osi x
u_y	mm	pomak po osi y
u_z	mm	pomak po osi z
w	mm	vertikalni progib
w_{dop}	mm	dopušteni vertikalni progib
w_{max}	mm	vršni vertikalni progib
w_{max90°	mm	vršni vertikalni progib okvira zakrenutog za 90°
α_{dop}	$^\circ$	dopuštena inklinacija tereta
α_{max}	$^\circ$	maksimalna inklinacija tereta
β	$^\circ$	prostorna inklinacija užadi
ν	/	Poissonov faktor
φ_x	$^\circ$	zakret po osi x
φ_y	$^\circ$	zakret po osi y
φ_z	$^\circ$	zakret po osi z

SAŽETAK

U ovom radu prikazan je numerički proračun krutosti i optimiranje u kontekstu *single failure proof* konstruiranja ploče za precizni prihvat alata mosnog granika HROC predviđenog za ugradnju u nuklearnom postrojenju DONES.

Proračun je započet izradom modela ploče za precizni prihvat diskretizirane trodimenzijskim i jednodimenzijskim konačnim elementima. Tako dobiveni modeli uspoređeni su na temelju rezultata numeričke analize metodom konačnih elemenata s postojećim preliminarnim proračunom ploče za precizni prihvat alata.

Potom je model modificiran s ciljem zornijeg opisivanja ponašanja konstrukcije pri asimetrično narinutom opterećenju. Razmatrano je više različitih varijanti modeliranja spoja ploče za precizni prihvat alata s teretom, a pozornost je posvećena i modeliranju elastične veze vozička i ploče za precizni prihvat alata ostvarene pomoću čelične užadi.

Nad usvojenim modelom provedeni su numerički proračuni za slučaj nominalne sheme opterećivanja konstrukcije i za slučaj otkazivanja jednog od *twistlockova*. Na koncu su izvršene modifikacije konfiguracije i geometrije ploče za precizni prihvat alata, kojima je osigurano ispunjenje kriterija krutosti i *single failure proof* konstrukcije. Predložene su dvije varijante izvedbe ploče za precizni prihvat alata za koje su navedeni kriteriji zadovoljeni.

Ključne riječi: krutost, granik, metoda konačnih elemenata, *single failure proof*, *suspended plate*, *twistlock*

SUMMARY

The topic of this thesis is the numerical stiffness calculation and optimization of the suspended plate of the HROC, meant for installation in the DONES facility, in view of the single failure proof design requirements imposed on it.

The calculation begins with the creation of both one- and three-dimensional discretized suspended plate models. These models were compared to the preliminary calculation of the suspended plate stiffness by evaluation of results obtained via numerical analysis using the finite element method.

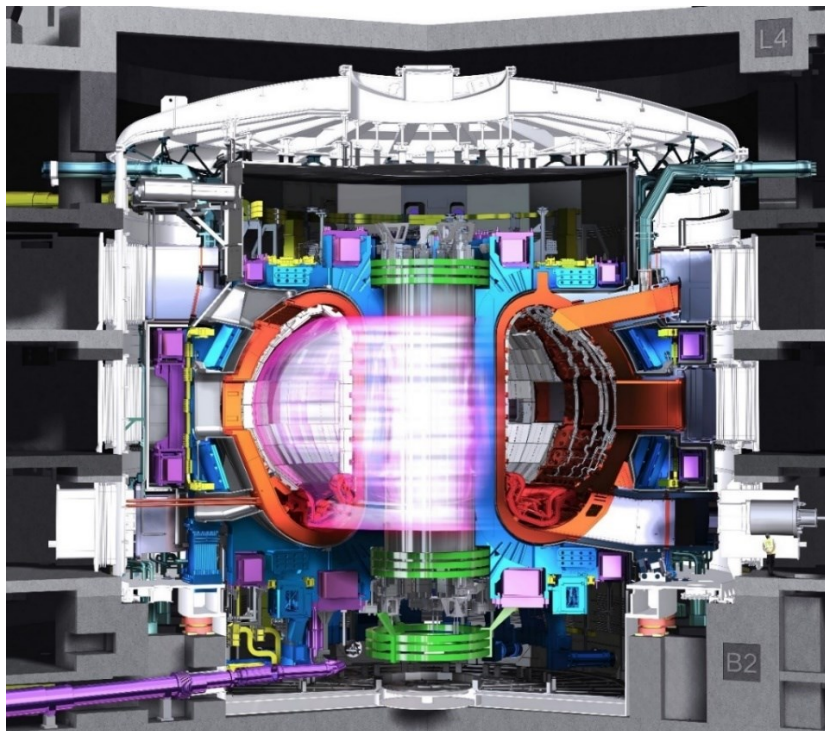
The obtained calculation models were further modified with the aim of achieving a more accurate representation of the behaviour of the suspended plate under asymmetric loading conditions. Multiple approaches regarding the interaction between the suspended plate and the weight that is to be lifted by it were considered. Additionally, the elastic joint between trolley and suspended plate achieved by means of steel ropes was evaluated.

The calculation model obtained by this process was then used to perform numerical analyses of both symmetric loading conditions and loading conditions in case of a twistlock failure. Finally, the geometry and configuration of the suspended plate was modified to ensure that both stiffness and single failure proof criteria are met. Two variants were proposed which fulfilled the aforementioned criteria.

Key words: crane, finite element method, single failure proof, stiffness, suspended plate, twistlock

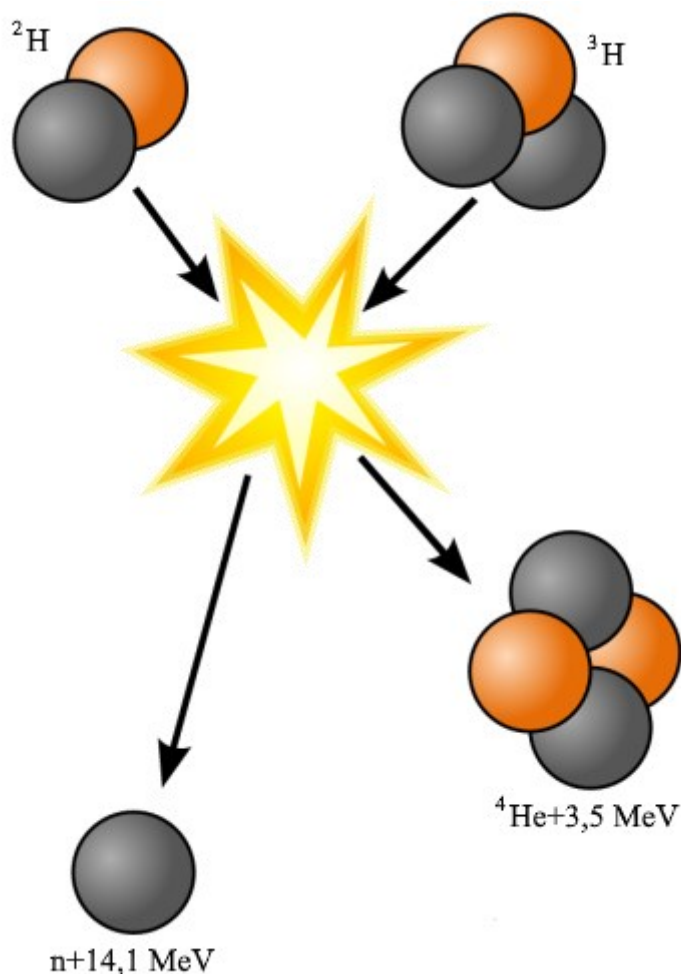
1. UVOD

Jedna od velikih zadaća koju društvo stavlja pred znanost jest pronalaženje čistog, obilnog, ekološki prihvatljivog, a ujedno i sigurnog izvora energije. Oslobađanje energije nuklearnom fuzijom, glavnim izvorom energije u svemiru, predstavlja jedno od mogućih rješenja danog problema. Međutim, za kontrolirano odvijanje nuklearne fuzije na Zemlji potrebno je udovoljiti trima uvjetima: osigurati dovoljno visoku temperaturu, reda veličine $1,5 \cdot 10^8$ K, osigurati dovoljno veliku gustoću čestica plazme, kako bi se osigurala dovoljno visoka vjerojatnost za odvijanje sudara među česticama, te osigurati dovoljno visoko vrijeme zadržavanja energije τ_E (eng. *confinement time*) τ_E , da se plazma dovoljno dugo zadrži u predviđenom prostoru [1]. Međunarodna znanstvena zajednica nastoji odgovoriti na taj tehnički izazov izgradnjom internacionalnog termonuklearnog eksperimentalnog reaktora (eng. *International Thermonuclear Experimental Reactor* – ITER), postrojenja za ispitivanje ozračenih materijala za dizajn, validaciju prikladnosti, licenciranje, izgradnju i siguran rad (eng. *International Fusion Materials Irradiation Facility* – IFMIF) i demonstracijske elektrane DEMO. ITER bi trebao biti prvi fuzijski reaktor koji ostvaruje pozitivnu energetska bilancu. ITER je reaktor tipa tokamak, tj. sastoji se od torusne komore s magnetskim zavojnicama za stvaranje i zadržavanje visokotemperaturne plazme (Slika 1.).



Slika 1. ITER u presjeku [2]

Stijenke reaktorskih posuda fuzijskih elektrana će biti izložene visokom neutronsom toku reda veličine $10^{18} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ i vršne energije od 14,1 MeV [3], uslijed fuzijske reakcije deuterija i tricija (Slika 2.).



Slika 2. Prikaz fuzijske reakcije deuterija i tricija [4]

Stoga je potrebno pouzdano odrediti kako će svojstva materijala degradirati, čime se osigurava sigurna izvedba fuzijskih elektrana. Nepostojanje podatkovne baze o degradaciji materijala izloženih intenzivnom neutronsom zračenju, a koja bi se uz primjenu računalnih metoda znanosti o materijalima mogla koristiti za ocjenu prikladnosti materijala za uporabu u fuzijskim elektranama, predstavlja jednu od ključnih zapreka u koncipiranju budućih fuzijskih elektrana poput DEMO-a.

1.1. Projekt DONES

DEMO-Oriented Neutron Source (DONES) je osmišljen kao izvor neutronskega zračenja pomoću kojeg bi se moglo provesti ispitivanje materijala u uvjetima sličnim onima u budućim fuzijskim elektranama. Stoga DONES čini drugu fazu IFMIF-a nakon validacije svih ključnih

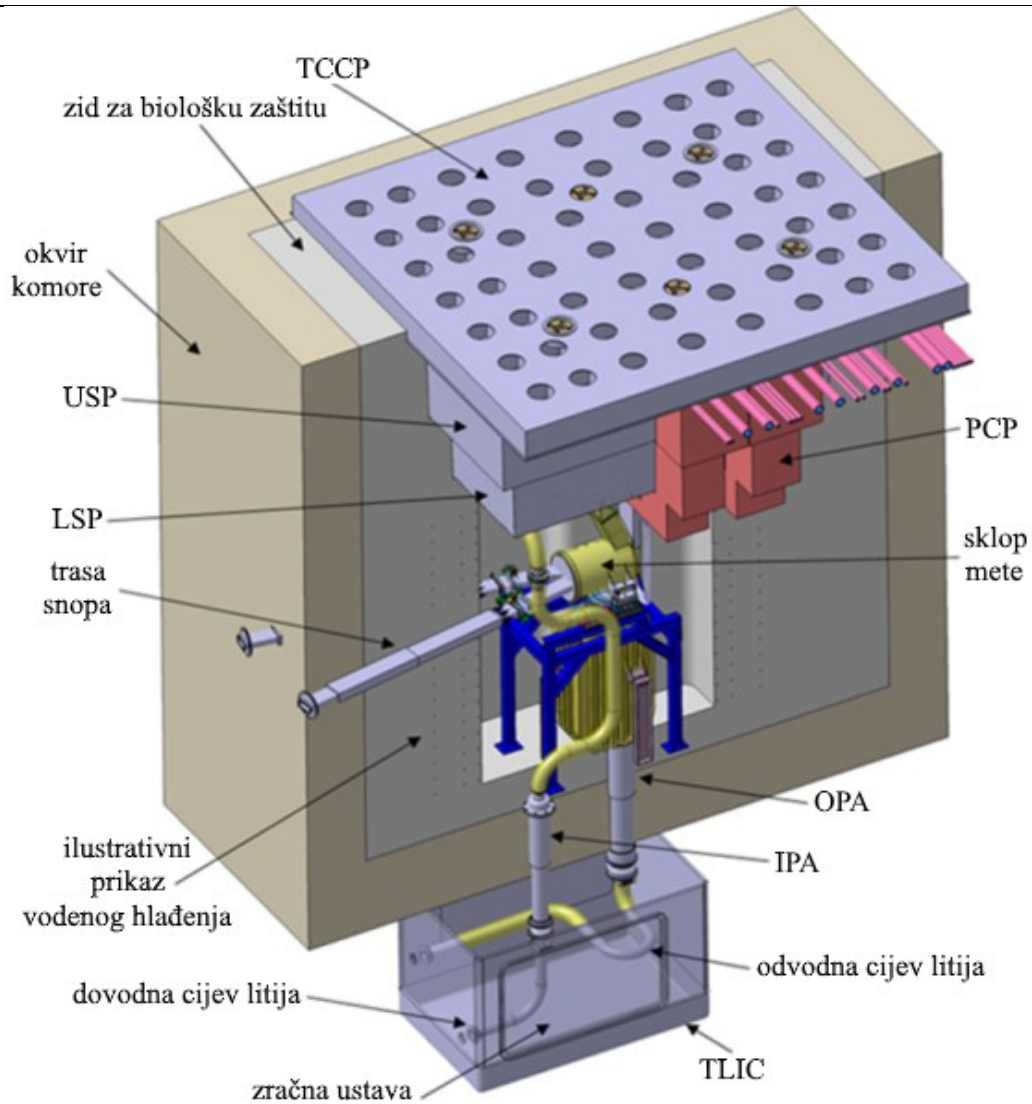
komponenti u sklopu *Engineering Validation and Engineering Design Activity* (EVEDA).

DONES generira neutronske zračenje bombardiranjem mete kapljevito litija koji struji brzinom $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ snopom deuterijevih iona energije 40 MeV, ubrzanih linearnim akceleratorom jakosti struje 125 mA. Neutronske zračenje generirano na ovaj način ozračuje volumen veličine $5\cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ u kojem je smješteno 1000 ispitnih uzoraka [3].

Uzorci su smješteni u ispitnoj prostoriji (eng. *test cell*), koja uz uzorke ispitnog modula za visoke (neutronske) tokove (eng. *high flux test module*), sadrži i dijelove litijskog kruga, uključujući litijsku metu i rashladni spremnik (Slika 3.). Zbog velike doze zračenja tijekom eksploatacije koja onemogućuje fizički pristup ključnim dijelovima postrojenja, DONES mora biti opremljen sustavima za autonomno ili daljinsko rukovanje (eng. *remote handling equipment*). Ispitna prostorija se, kao najozračeniji dio postrojenja, mora izolirati od ostatka građevine masivnim betonskim zaštitnim pločama s ciljem zadržavanja radijacije. Kako bi se mogao ostvariti pristup ispitnoj prostoriji u svrhu održavanja, uklanjanja uzoraka i eventualnih popravaka, predviđena je ugradnja mosnog granika HROC-a u prihvatnoj ćeliji (eng. *access cell*) iznad sobe za ispitivanje.

1.2. *Heavy rope overhead crane (HROC)*

Glavna zadaća mosnog granika HROC, predviđenog za podizanje tereta maksimalne mase do 140 tona, je rukovanje najtežim komponentama ispitne prostorije, kako za potrebe redovnog održavanja, tako i u slučaju abnormalnog rada ili otkazivanja komponenti ispitne prostorije. Među tim komponentama najvažnije su pokrovna (TCCP), gornja (USP) i donja zaštitna ploča (LSP) ispitne prostorije, kao i zaštitne ploče prostorije za tricij, za zbrinjavanje ozračenog materijala (IWTC) i za cijevi i kablove (PCP-ovi), te transportni spremnici litijske mete i modula za visoke (neutronske) tokove (Slika 3.). Uz to je u slučaju abnormalnog rada ili otkazivanja komponenti nužno omogućiti podizanje i spuštanje čeličnog dvostjenog okvira i hlađenih zidova ispitne prostorije. Radno područje HROC-a je čitava prihvatna ćelija, dimenzija $52,72 \text{ m}\times 20 \text{ m}$, s maksimalnom dubinom spuštanja od 17 m. Najzahtjevnija zadaća HROC-a je precizno pozicioniranje navedenih komponenti. Po sigurnosnoj klasifikaciji opreme nuklearnih postrojenja komponente poput LSP-a, USP-a i TCCP-a pripadaju klasi 1, kod kojih bi defekt ili pogrešno pozicioniranje dovelo do potrebe za prekidom rada postrojenja [6]. Dvostjeni okvir i PCP-ovi pripadaju klasi 3. Njihovo pogrešno pozicioniranje bi negativno utjecalo na pouzdanost i sigurnost sustava [6]. Zbog zadaće koju obavljaju moraju biti pozicionirane još preciznije od navedenih komponenti klase 1. Zahtjevi na točnost i brzinu kretanja granika dani su u Tablici 1.

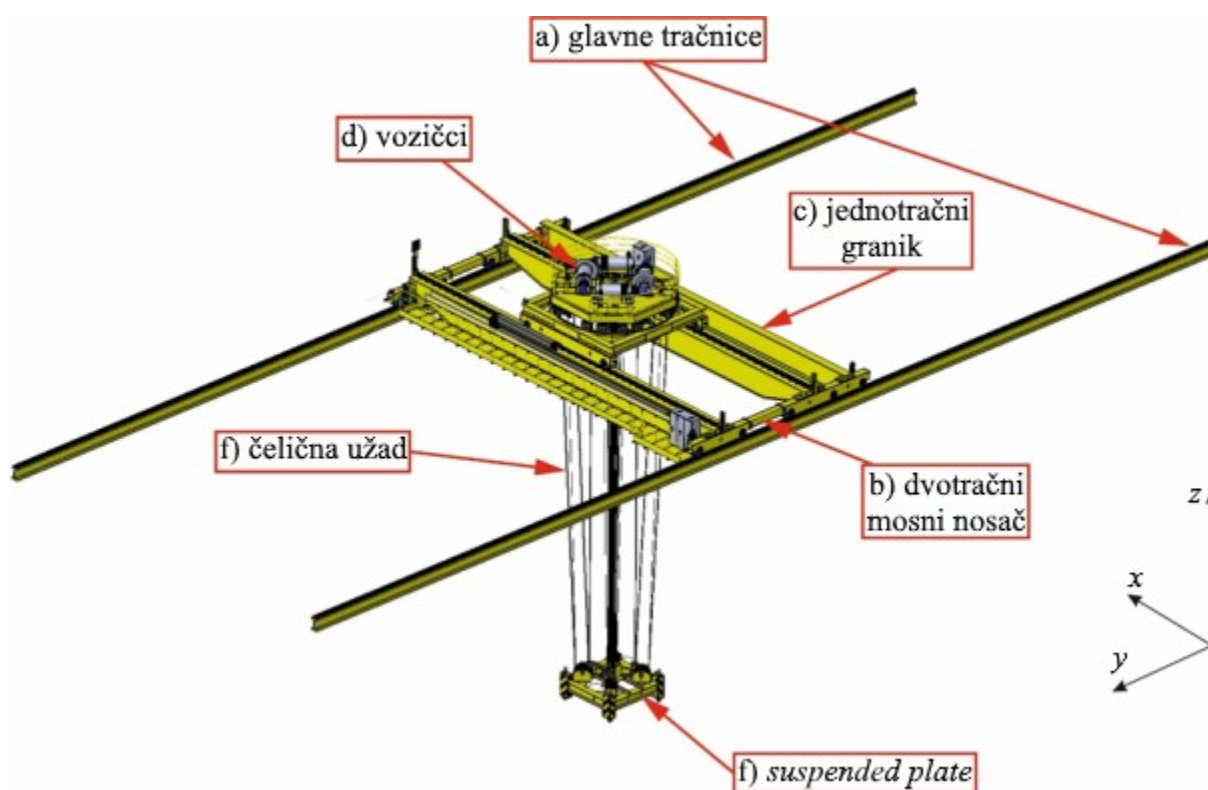


Slika 3. Presjek ispitne prostorije [5]

Tablica 1. Zahtjevi na točnost i brzinu kretanja granika

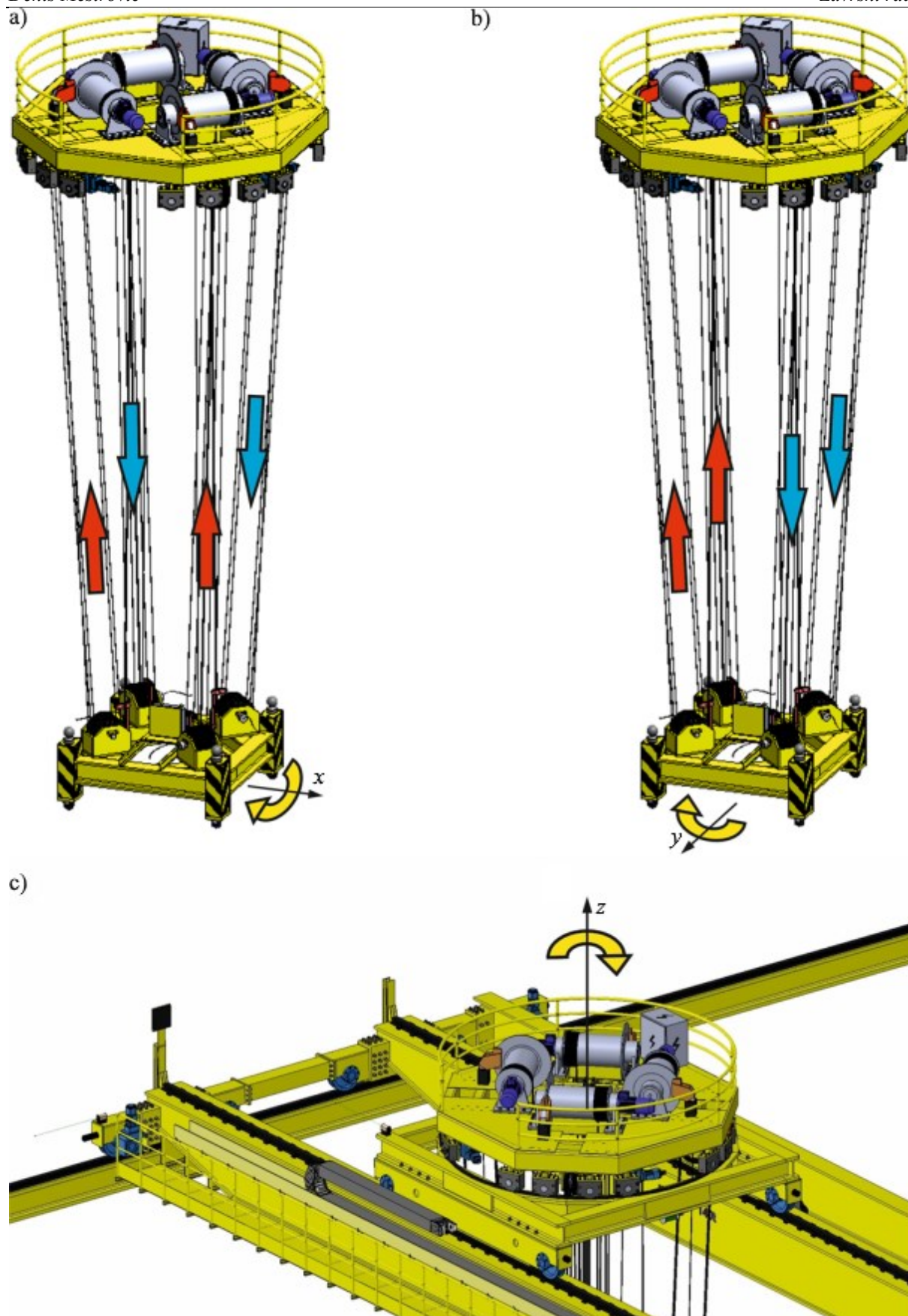
Brzina pod maksimalnim teretom	
Translacija po x -, y - i z -osima	$0,1-50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$
Rotacija po x -, y - i z -osima	$0,2-2^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$
Točnost pozicioniranja	
x - i y -os	$\pm 5 \text{ mm}$
z -os	$\pm 1 \text{ mm}$
Rotacijski stupnjevi slobode	$\pm 1^{\circ}$
Maksimalna dopuštena inklinacija u xy -ravnini	$\pm 10^{\circ}$

Glavne komponente mosnog granika su glavne tračnice (Slika 4. a)), postavljene na visini od približno 10 m (mjereno od poda prihvatne ćelije) duljine 53 m. Razmak između glavnih tračnica iznosi 10 m, a na njima se translata dvotračni mosni nosač (Slika 4. b)) predviđen za podizanje teških tereta te jednotračni mosni nosač za podizanje tereta mase do 15 tona (Slika 4. c)). Na dvotračnom mosnom nosaču nalazi se translatorni vozičak (Slika 4. d)) koji omogućuje translaciju po x -osi. Na translatornom vozičku nalazi se rotacijski vozičak oktogonalnog okvira (Slika 4. d)) koji omogućuje punu rotaciju tereta oko vertikalne osi. Nadalje, rotacijski vozičak je povezan s pločom za precizni prihvat tereta (eng. *suspended plate*, Slika 4. e)) pomoću četiriju užadi (Slika 4. f)) inklinacije 5° u odnosu na x - i y -os, s ciljem smanjenja njihanja *suspended platea* tijekom rada granika.



Slika 4. Glavne komponente granika [5]

Zbog elastičnog spoja sustava za autonomno ili daljinsko rukovanje kranom putem užadi, za točno pozicioniranje tereta potrebno je omogućiti mijenjanje inklinacije tereta uz uobičajena tri translatorna stupnja slobode dizalice. Simultanim radom vitala ostvaruje se spuštanje i podizanje tereta, a uporabom vitala u parovima ostvaruje se promjena inklinacije, kao što to prikazuje Slika 5. Uz već navedene translatorne stupnjeve slobode te rotaciju oko vertikalne osi, HROC ima ukupno šest stupnjeva slobode.

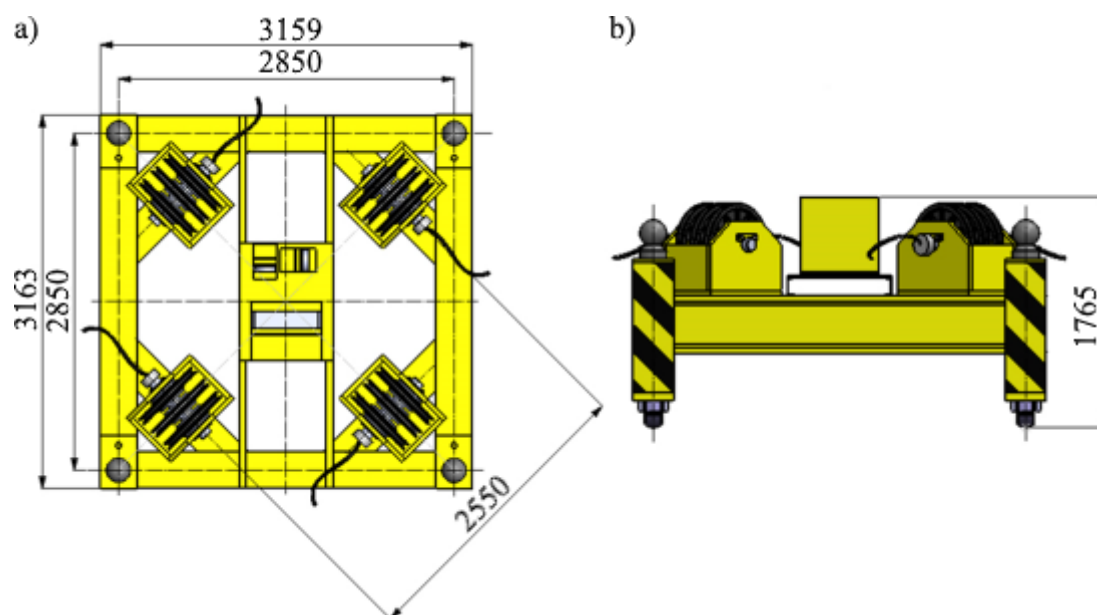


Slika 5. Rotacijski stupnjevi slobode po: a) x-osi, b) y-osi, c) z-osi [5]

HROC mora ispuniti niz zahtjeva s obzirom na autonomni rad – elektroničke komponente ugrađene u HROC moraju biti otporne na zračenje, cijeli granik se mora moći sigurno i jednostavno održavati i dekontaminirati, te sve komponente moraju biti lako dostupne kako bi se u slučaju oštećenja svi standardni i nestandardni dijelovi lako mogli zamijeniti. Uz to, granik mora biti *single failure proof* konstrukcija, kako je to definirano normom *NUREG-0554*. Prema toj normi se u slučaju otkazivanja proizvoljne komponente cijeli sustav mora moći vratiti u siguran položaj i isključiti bez oslobađanja zračenja u okoliš. Stoga regulacijski sustav HROC-a mora biti iznimno robusan i opremljen brojnim redundantnim elementima, posebno u vidu izvršnih članova, tj. elektromotora i kočionih sustava. Kako bi se osigurala robusnost i točnost regulacijskog sustava, regulacijska petlja se za svaki stupanj slobode zatvara pomoću zasebnih enkodera, očitavanja jednodimenzijskih i trodimenzijskih laserskih sustava i inklinometara.

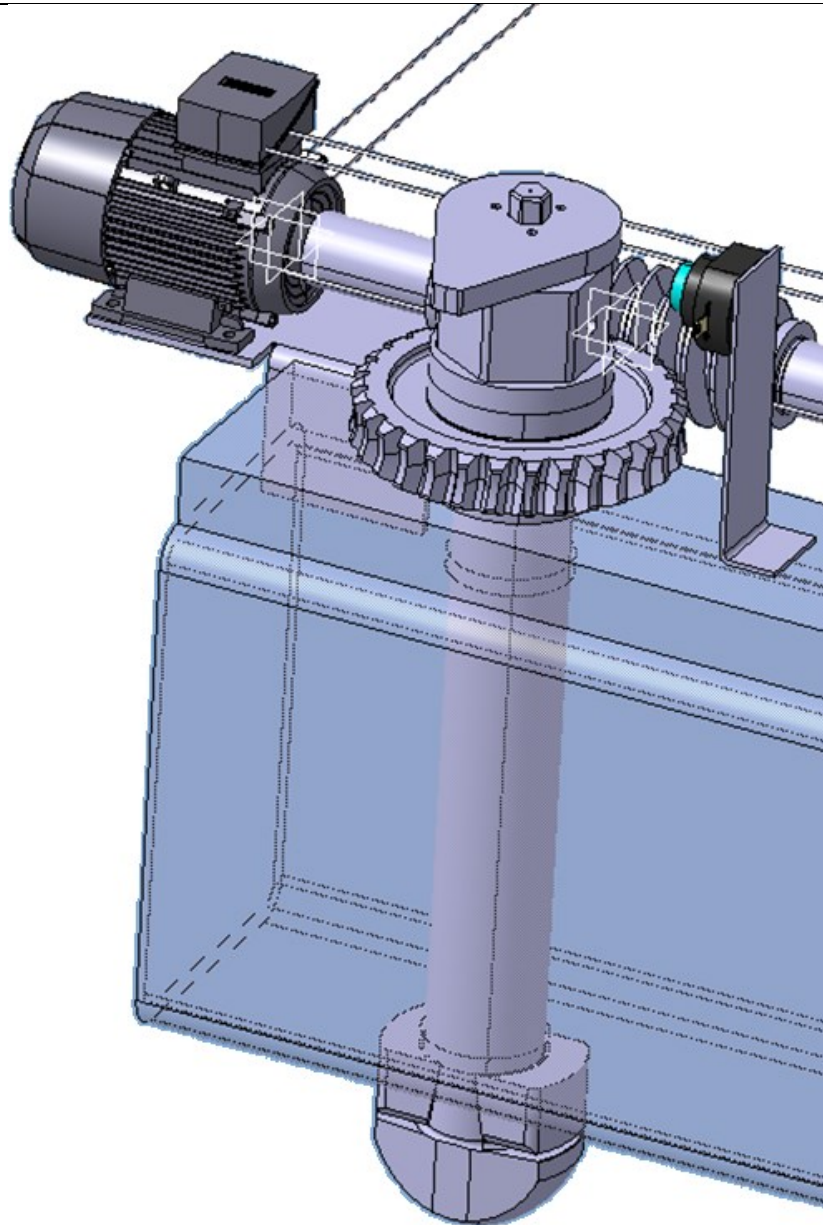
1.3. *Suspended plate* i njegova zadaća

Nosivi elementi konstrukcije, poput nosača, ne moraju biti *single failure proof* u smislu da sustav ostaje siguran i funkcionalan ako dođe do otkazivanja jedne takve komponente. Međutim, moraju biti konzervativno proračunate i za slučaj otkazivanja proizvoljne druge komponente moraju i dalje zadovoljiti postavljene zahtjeve na čvrstoću, krutost i stabilnost, kao i na dopustivi raspon položaja tereta. U ovome radu će se numeričkom analizom utvrditi udovoljava li tim zahtjevima *suspended plate*, te će se u slučaju nezadovoljavajućih rezultata analize inicijalne konstrukcije izvesti zahvati kojima će se osigurati udovoljavanje navedenim zahtjevima. Glavne dimenzije *suspended plate*-a dane su na Slici 6.



Slika 6. Inicijalna geometrija *suspended platea*: a) tlocrt, b) nacrt [5]

Suspended plate je okvirna konstrukcija za prihvat tereta, elastično povezana s ostatkom granika pomoću četiri čelična užeta (i električnim kabelom), a svako je uže omotano oko triju užnica promjera 450 mm na *suspended plateu*, odnosno dvaju užnica i vitla na rotacijskom vozičku. Položaj užnica odabran je s ciljem minimiziranja progiba pokrovne zaštitne ploče (TCCP), najtežeg tereta kojim granik mora rukovati. Osi užnica paralelne su s pripadnom osi vitla, a spoj užnica s okvirom je predviđen za realizaciju vijčanim spojem. Uobičajeno rabljena osovina na setu užnica zamijenjena je dinamometarskom osovinom (eng. *load cell*) za mjerenje opterećenja do 100 tona na setu užnica, a time i užetu. Informacija o opterećenju pojedinog užeta rabi se za sprječavanje oštećenja komponenti granika i reduciranje vjerojatnosti blokiranja mehanizma podizanja i spuštanja tereta. Na kućišta užnica montirani su enkoderi, koji su u stalnom kontaktu s užadi te mjere pomak tereta tijekom rada granika. Pri mijenjanju nagiba *suspended platea*, enkoderi se sinkroniziraju u parovima, kako bi se ostvarilo reguliranje nagiba preko dvije petlje. Uz enkodere, na *suspended plate* su postavljena i dva inklinometra, pod međusobnim kutem od 90° , podudarno s globalnim x - i y -osima, koji služe za točno mjerenje nagiba tereta. Uz to, na vrhovima okvira se nalaze četiri sferna markera, koji služe za određivanje pozicije *suspended platea* sustavom za videonadzor. Uz to mogu služiti i trodimenzijskom laserskom sustavu montiranom na vozičku kao meta, čime je ostvarena dodatna redundancija u određivanju položaja *suspended platea* po svih šest stupnjeva slobode. Na vrhovima okvira su smještena četiri *twistlocka* - zaporna mehanizma za osiguranje tereta pri manipuliranju teretom pomoću dizalice. Jedan od mogućih mehanizama upravljanja *twistlockom* prikazan je na Slici 7., a sastoji se od elektromotora koji pužnim prijenosom zakreće *twistlock* do krajnje pozicije ograničene graničnom sklopkom. Trenje između *twistlocka* i kontaktnih površina na teretu onemogućuje naknadno zakretanje *twistlocka* za vrijeme manipuliranja teretom.



Slika 7. *Twistlock* mehanizam [7]

Budući da za zadovoljenje norme *NUREG-0554* nije potrebno analizirati otkazivanje kućišta užnica ili pucanje užadi, a mjerna instrumentacija je višestruko redundantna, numeričkom analizom je potrebno provjeriti zadovoljava li *suspended plate* najstroži zahtjev krutosti u slučaju otkazivanja jednog od *twistlockova* prema [8]:

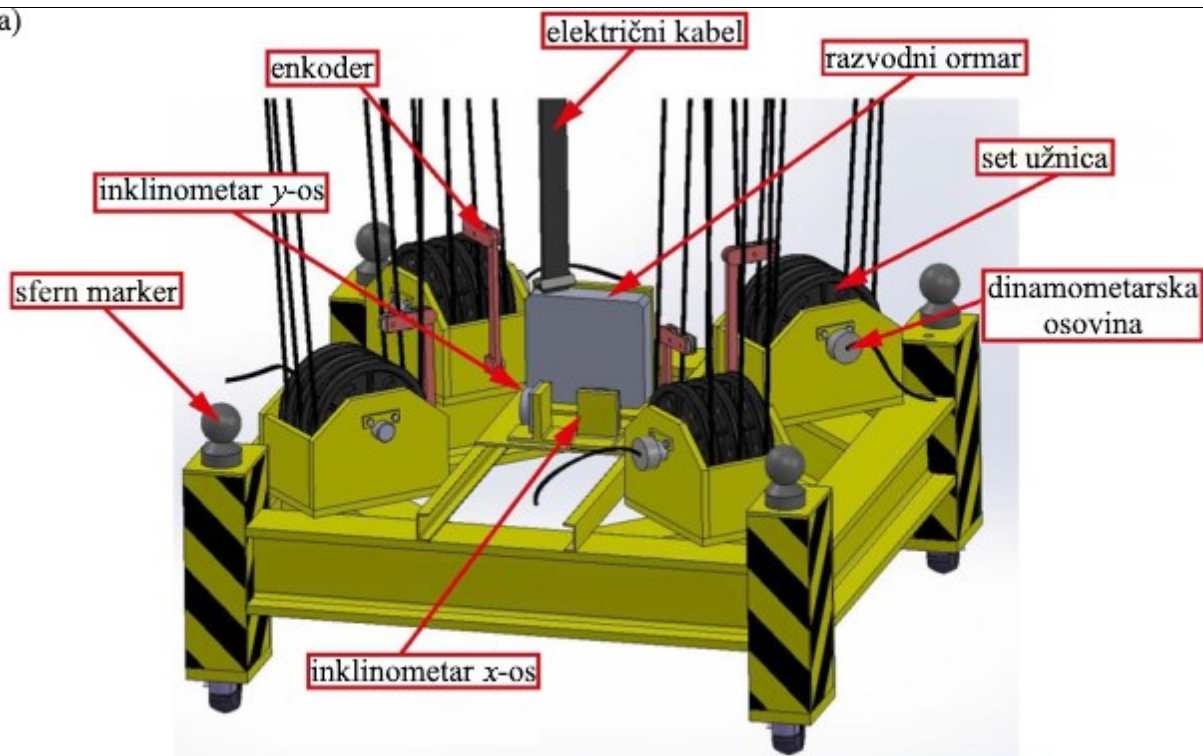
$$\frac{w_{dop}}{l_k} = \frac{w_{dop}}{2850} = \frac{1}{1000}. \quad (1)$$

Pri tome mora biti zadovoljen i zahtjev na maksimalnu dopustivu inklinaciju tereta:

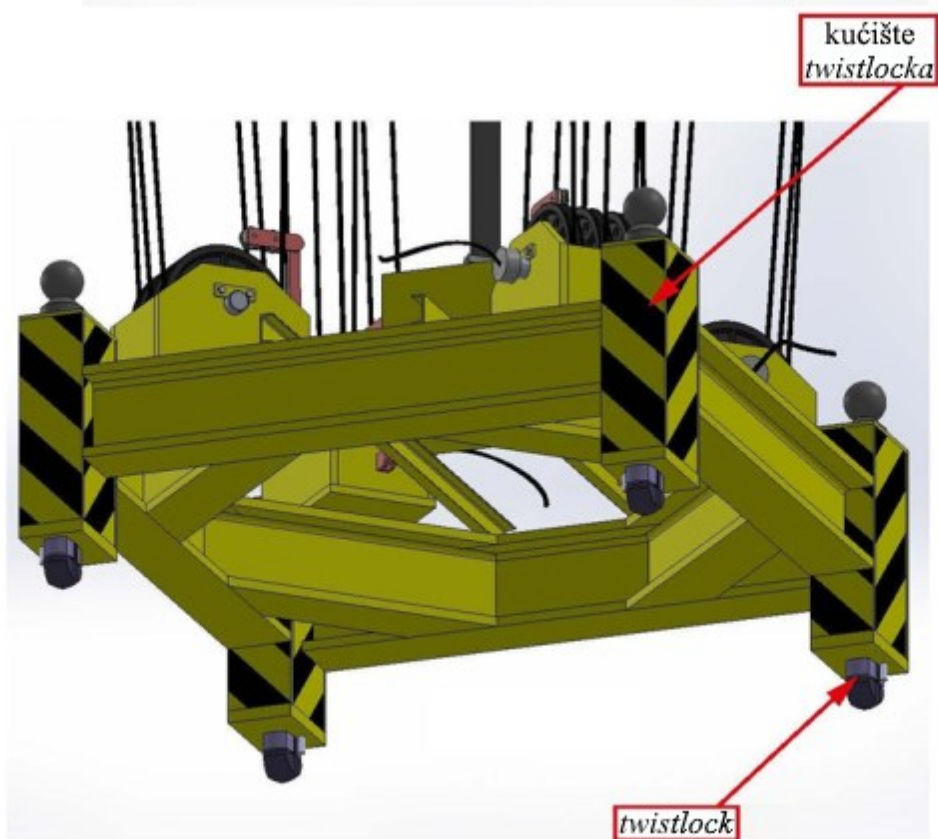
$$\alpha_{dop} = 10^\circ. \quad (2)$$

Originalna konfiguracija *suspended platea* sa svim istaknutim komponentama prikazana je na Slici 8.

a)



b)



Slika 8. Aksonometrije *suspended platea* a) pogled odozgo, b) pogled odozdo [5]

2. Verifikacija i prilagodba modela

U ovom poglavlju će se postaviti pojednostavljeni modeli *suspended platea* s jednodimenzijskim i s trodimenzijskim elementima. Za konstrukciju nije moguće dobiti analitička rješenja koja bi dobro opisala pomake i naprezanja, jer je riječ o konstrukciji niske vitkosti, zbog čega teorije savijanja štapova ne mogu dati dovoljno točne rezultate. Uz to je dio konstrukcije torzijski opterećen, što zbog nekružnog poprečnog presjeka bitno otežava svaki analitički proračun. Budući da bi svaki jednostavniji problem, kojim bi se pokušalo provjeriti pogodnost korištenih elemenata, rubnih uvjeta i načina opterećivanja za primjenu na okvir *suspended platea* nužno morao imati takva svojstva po pitanju vitkosti i oblika poprečnog presjeka, verifikacija modela bit će provedena usporedbom s modelima prihvaćenim u [5] na temelju rezultata numeričke analize. Nakon toga će se modeli prilagoditi kako bi mogli dobro opisati slučaj otkazivanja *twistlocka* te što jednostavnije provesti konstrukcijske zahvate kojima bi se optimirao odziv konstrukcije za navedeni slučaj. Sve analize će biti provedene za slučaj opterećenja maksimalnim teretom uvećanim za faktor sigurnosti s obzirom na dinamička opterećenja $k_{dyn}=1,25$. U obzir je uzeta i težina samog okvira, te je pri tome za ubrzanje sile teže uzeta vrijednost $9,81 \text{ m/s}^2$. Za provedbu numeričkih analiza korištena su naredna svojstva čelika preuzeta iz [5]: Youngov modul iznosa 200000 MPa , Poissonov faktor jednak je $0,3$, gustoća čelika je iznosa 7850 kg/m^3 .

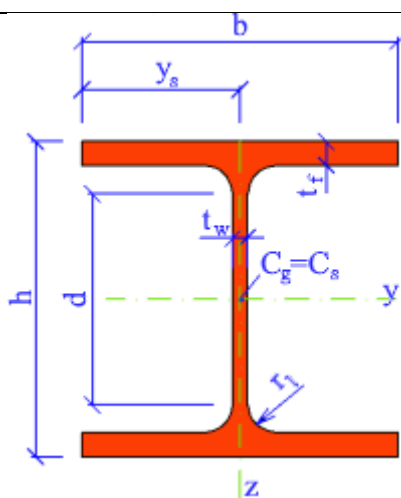
Model *suspended platea* s jednodimenzijskim elementima orijentiran je tako da je vertikalna os z -os, dok je to za model s trodimenzijskim elementima y -os.

2.1. Priprema i verifikacija jednodimenzijskog numeričkog modela

Budući da je cilj ovog rada određivanje maksimalnih progiba konstrukcije, pri postavljanju modela se mogu unijeti određena pojednostavljenja. Nema potrebe za detaljnim modeliranjem *twistlockova* i spoja užnica s okvirom *suspended platea*, jer lokalne koncentracije naprezanja za ovu analizu nisu od velikog interesa. Zbog male mase mogu se zanemariti mjerni instrumenti i razvodni ormar montirani na okviru. Karakteristične veličine presjeka okvira dane su u Tablici 2. i prikazane na Slici 9.

Tablica 2. Karakteristične veličine profila HE400×299 [9]

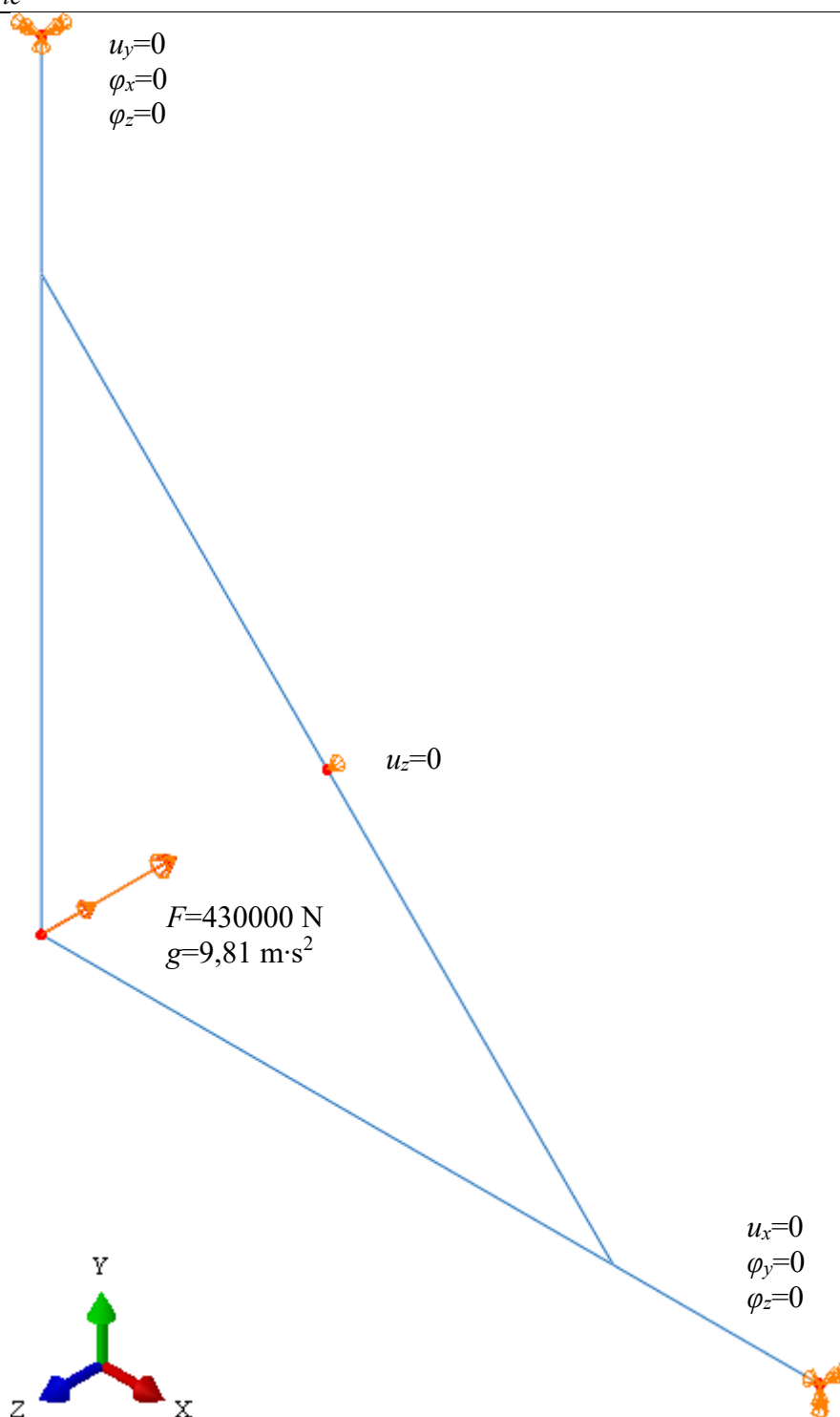
h ,	b ,	t_f ,	t_w ,	r_1 ,	y_s ,	d ,	A ,	G ,	I_{11} ,	I_{22} ,
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm ²	kg/m	mm ⁴	mm ⁴
444	309	46	25,5	27	154,5	298	38030	299	$1,24 \cdot 10^9$	$2,27 \cdot 10^8$



Slika 9. Profil HE400×299 [9]

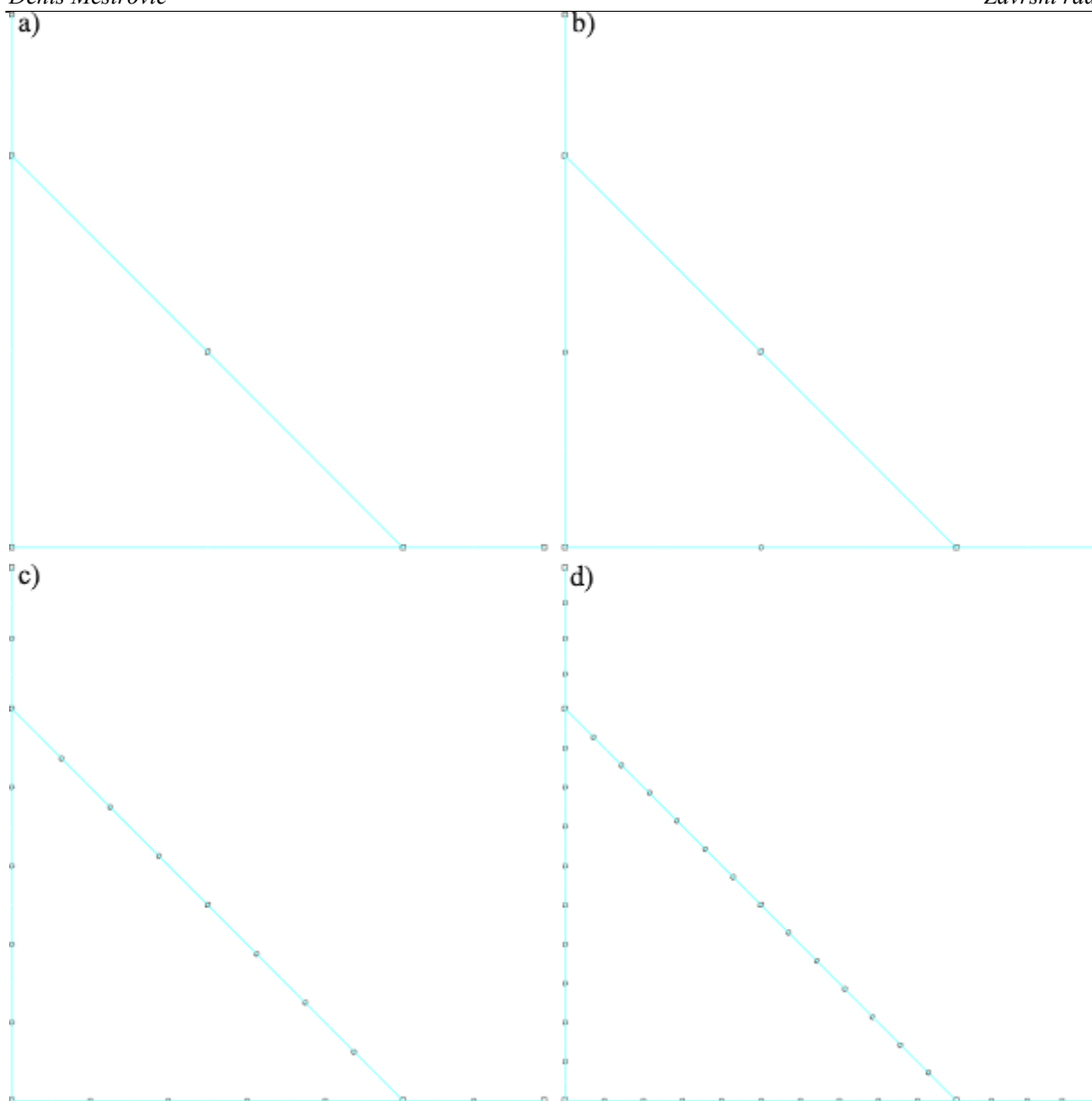
Model s jednodimenzijским elementima diskretiziran je grednim elementima drugog reda B32, te je iskorištena dvostruka simetrija konstrukcije, zahvaljujući čemu je bilo dovoljno modelirati samo četvrtinu konstrukcije. Pri izradi modela su zbog jednostavnijeg modeliranja zanemareni prevjesi nosača preko sjecišta središnjica. Treba naglasiti da je za numeričku analizu jednodimenzijским konačnim elementima presjek definiran u *Abaqusu* kao preddefiniran I-profil, a ne kao generalizirani profil. Budući da je izostavljanjem zaobljenja I-profila efektivna vrijednost momenata tromosti manja od tablične, proračun je na strani sigurnosti. Tako dobiveni rezultati ni u idealnom slučaju ne uzimaju u obzir koncentracije naprezanja uslijed same geometrije profila i spojeva greda u okvir. U ovom slučaju na točnost tako dobivenih rezultata utječe i po [10] nedovoljna vitkost greda korištenih u konstrukciji. Zbog toga rezultati analize jednodimenzijским elementima ne mogu biti usvojeni kao mjerodavni pri analizi konstrukcije okvira. Analiza jednodimenzijским elementima će se u nastavku rada koristiti isključivo s ciljem dobivanja kvalitativnih rezultata, u slučaju da za te potrebe pokaže zadovoljavajuću točnost. Prednosti analize jednodimenzijским elementima su lakoća izvođenja konstrukcijskih zahvata izmjenom oblika, načina prihvata tereta i izmjenom profila okvira.

Rubni uvjeti su zadani na točki prihvata užadi ukidanjem stupnja slobode translacije u smjeru osi z . Pri tome inklinacija užadi nije uzeta u obzir, jer se radi o proračunu krutosti konstrukcije pri osnovnim eksploatacijskim radnim uvjetima. Uz to su korišteni rubni uvjeti simetrije kojima su eliminirani stupnjevi slobode translacije po osi x i rotacije po osima y i z , odnosno stupnjevi slobode translacije po osi y i rotacije po osima x i z na ravninama simetrije modela. Opterećenje je zadano putem koncentrirane sile na čvoru na vrhu okvira i ubrzanjem sile teže, kao što je to prikazano na Slici 10.

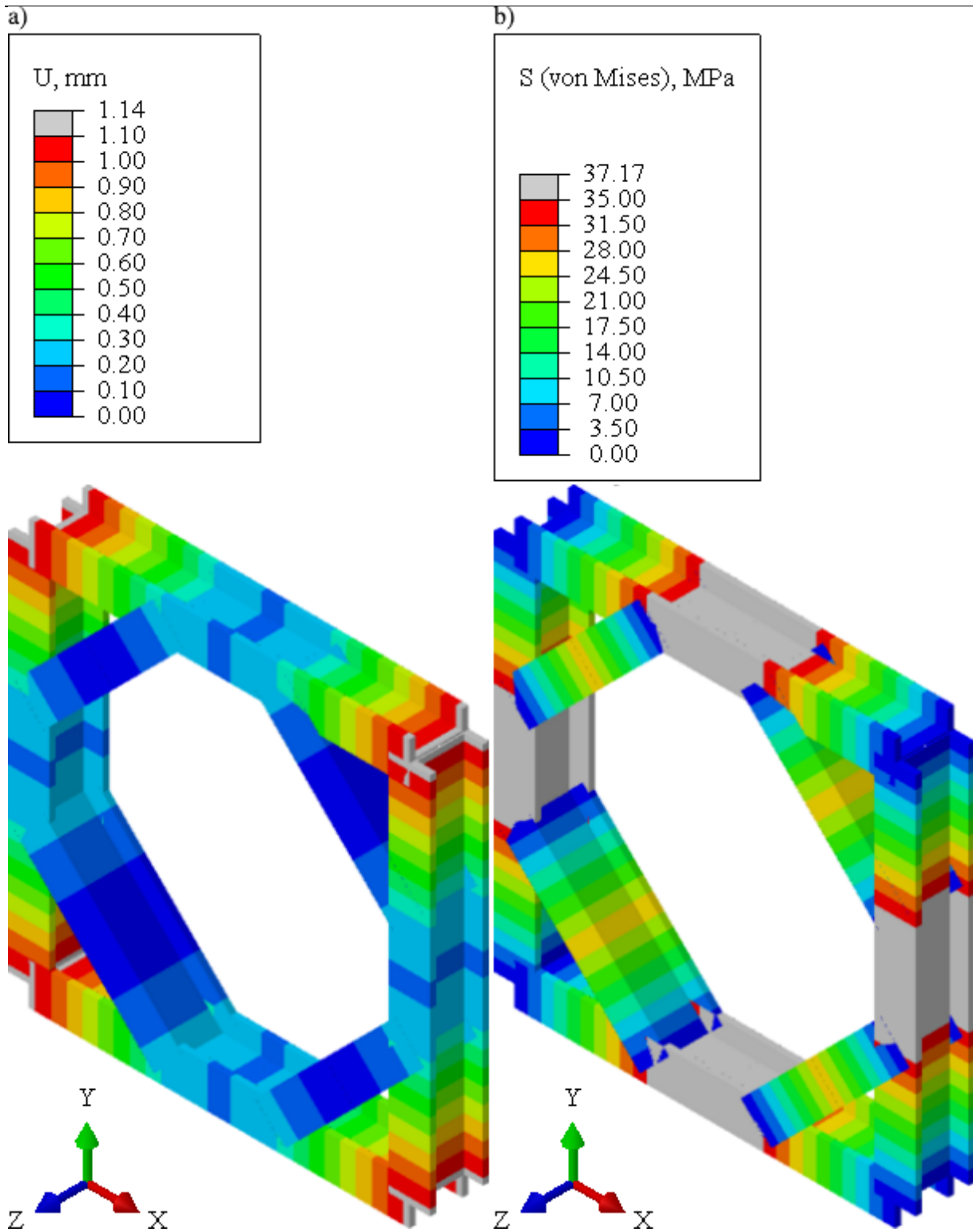


Slika 10. Narinuta opterećenja i rubni uvjeti na četvrtini modela diskretiziranog jednodimenzijskim elementima

Numeričke analize su provedene na jednoj četvrtini modela diskretiziranog sa 6, 8, 22 i 42 gredna elementa (Slika 11.) drugog reda (B32).



Slika 11. Mreže četvrtine okvira diskretizirane sa: a) 6, b) 8, c) 22 i d) 42 gredna elementa
Budući da su maksimalna naprezanja i pomaci dobiveni numeričkom analizom identični za sve četiri mreže, prikaz konvergencije za ovu jednodimenzijску analizu je izostavljen. Na Slici 12. prikazane raspodjele pomaka i naprezanja dobivene diskretizacijom sa 6 grednih elemenata.



Slika 12. Raspodjela: a) pomaka i b) naprezanja za analizu jednodimenzijskim elementima provedenoj na jednoj četvrtini okvira s renderiranim profilom greda

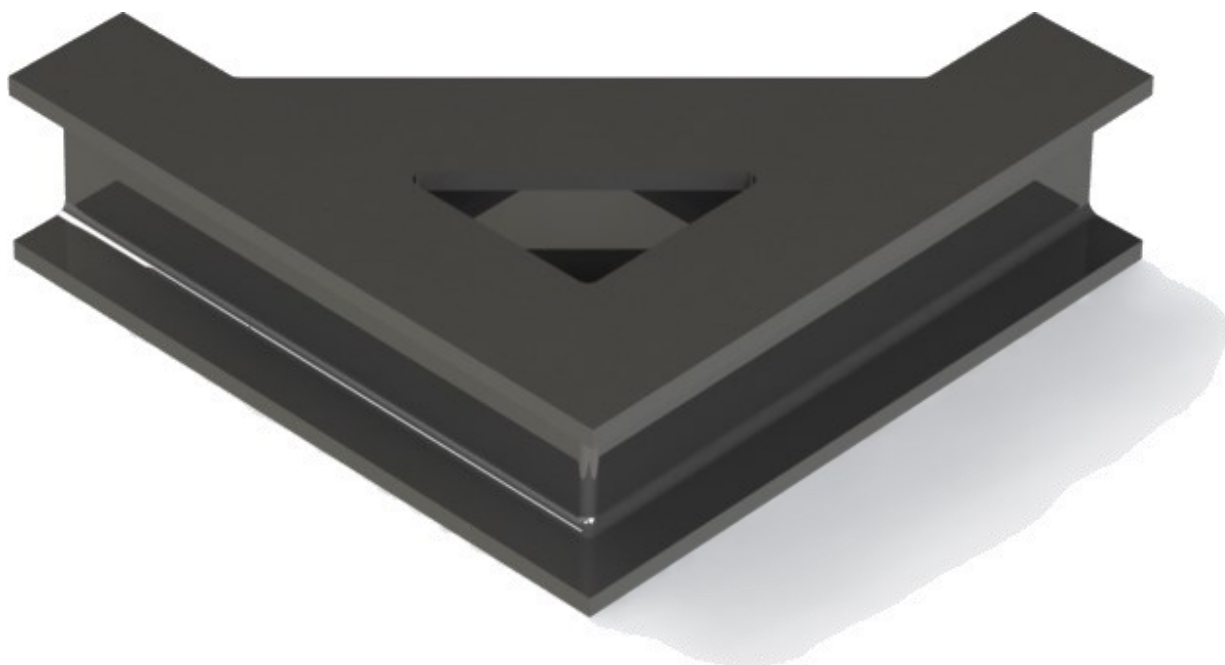
Usporede li se dobivene maksimalne vrijednosti pomaka i naprezanja s vrijednostima u [5] (Tablica 3.), može se zaključiti da su odstupanja navedenih vrijednosti zanemarivo mala.

Tablica 3. Usporedba rezultata dobvenih u [5] s rezultatima numeričke analize modela

Promatrana veličina	Vrijednosti dobivene u [5]	Vrijednosti po modelu	Relativna razlika
S_{max} , MPa	37,18	37,17	0,03%
U_{max} , mm	1,14	1,14	0%

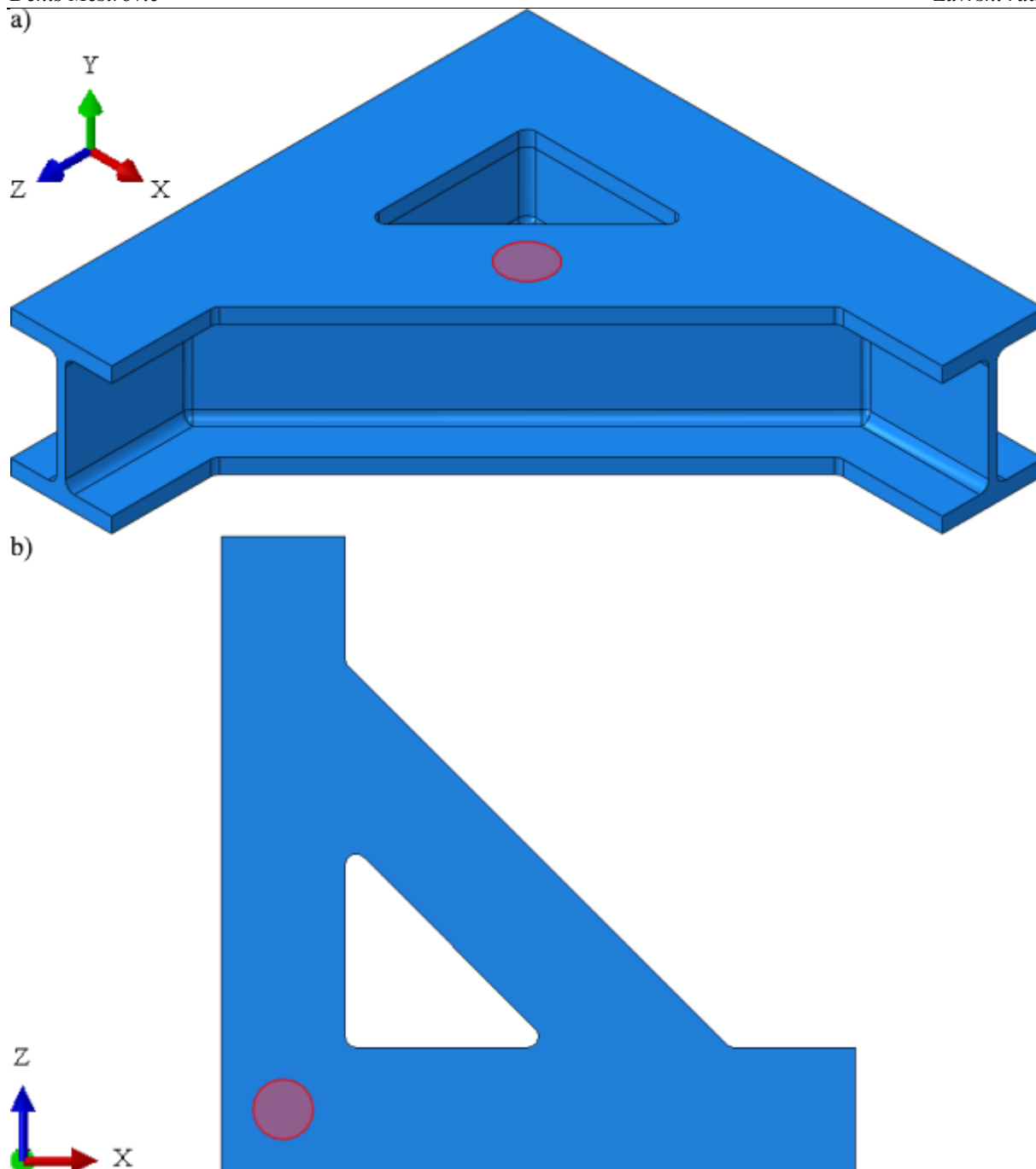
2.2. Priprema i verifikacija trodimenzijskog numeričkog modela

Za potrebe analize trodimenzijskim elementima geometrija četvrtine modela izrađena je u *Solidworksu* (Slika 13.), dok je numerički model pripremljen u programskom paketu *Abaqus*. Na oštrim rubovima na kojima bi se na realno izvedenoj konstrukciji nalazili zavari, dodani su radijusi zaobljenja koji odgovaraju radijusima zaobljenja profila. Na ovaj način je umanjen fenomen pojave singularnosti na rubovima.



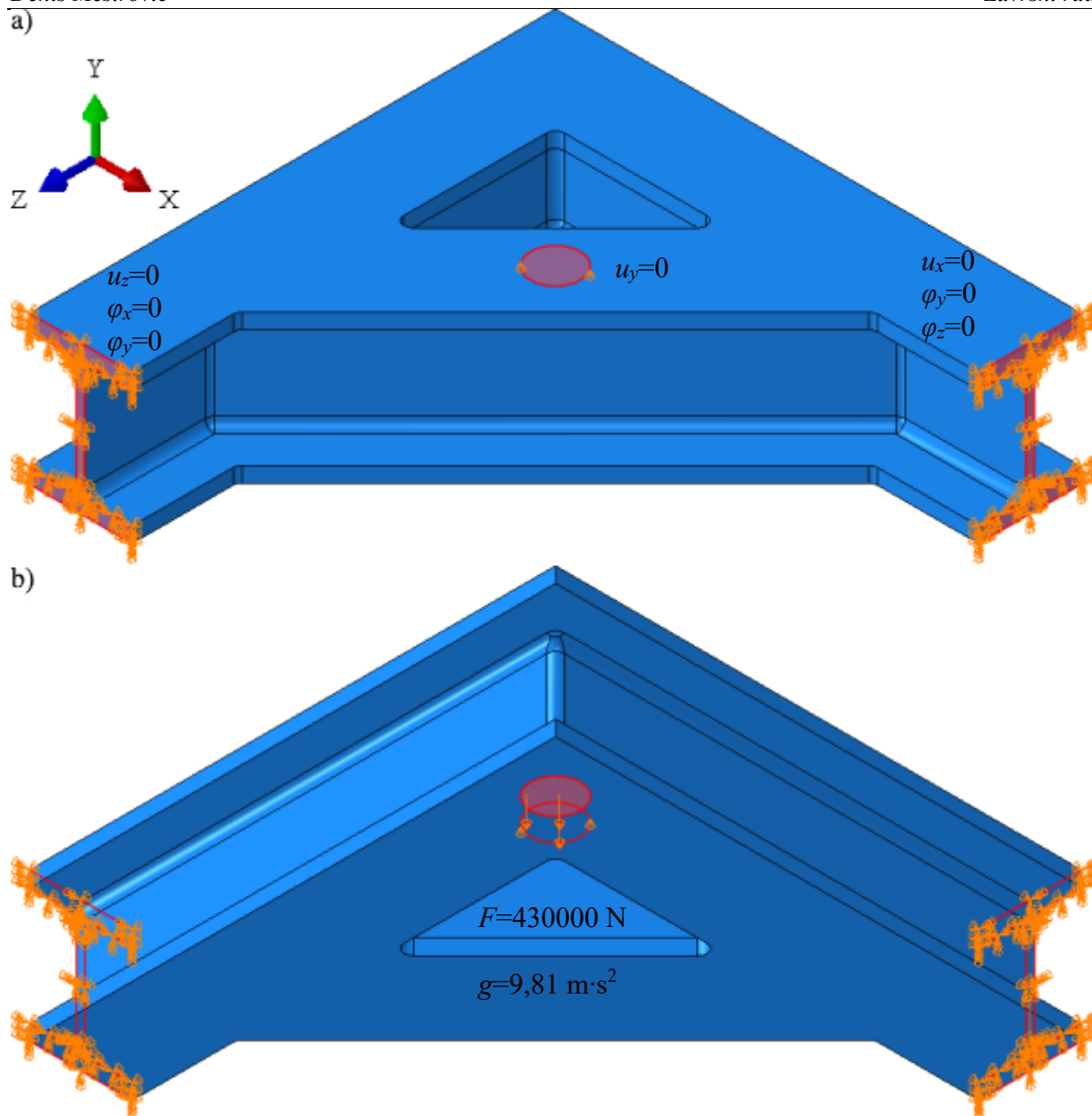
Slika 13. Četvrtinski model okvira renderiran u *Solidworksu*

Particioniranje površina na poziciji djelovanja sile i točki prihvata užeta provedeno je u *Abaqusu* te prikazano na Slici 14.



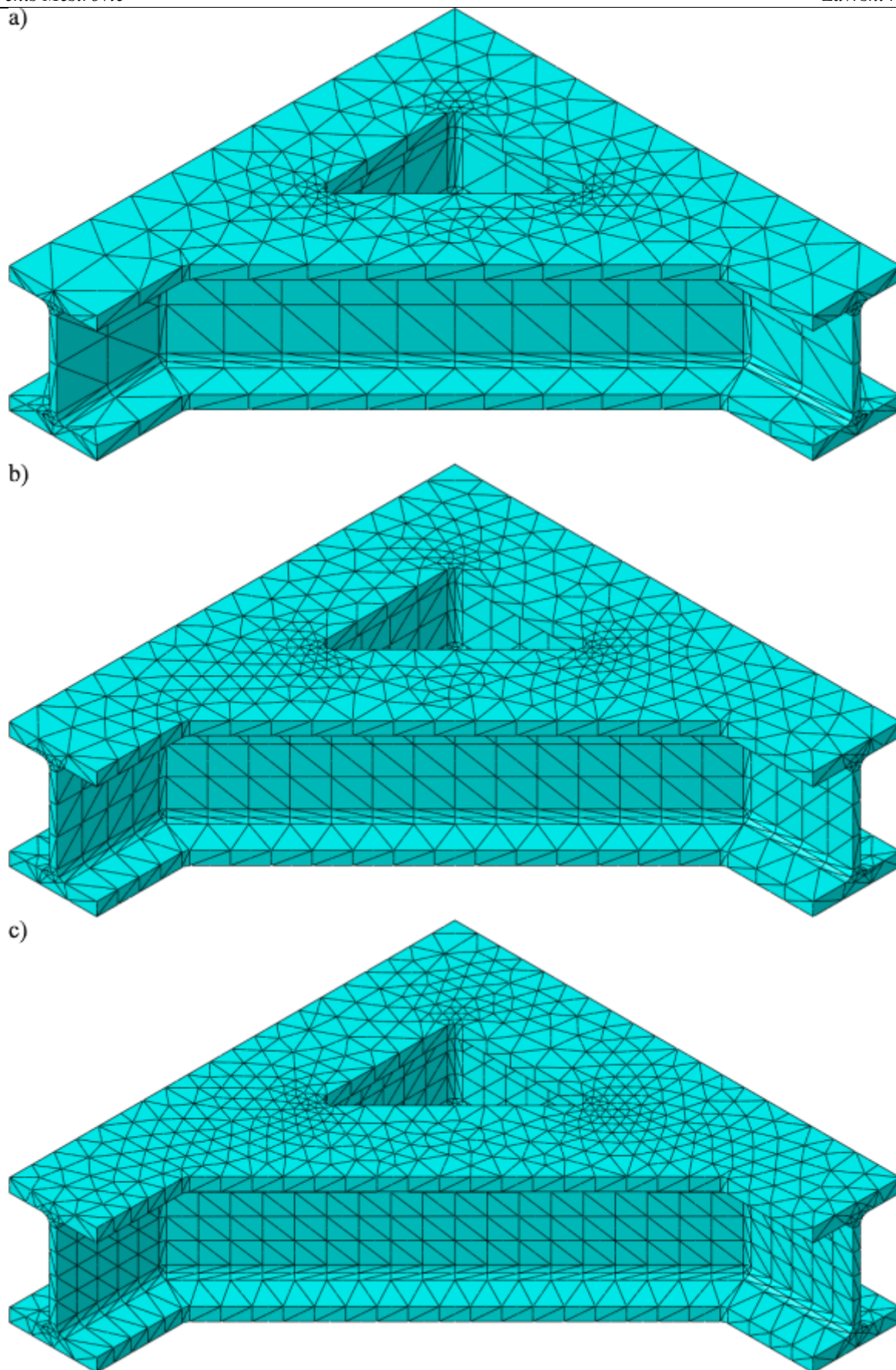
Slika 14. Partitionirane površine na mjestu: a) prihвата užeta, b) djelovanja opterećenja

Na mjestu prihвата užeta implementiran je rubni uvjet kojim je onemogućena translacija u vertikalnom smjeru. Na mjestu djelovanja opterećenja nametnut je jednoliko raspoređen tlak koji na površini daje silu jednake magnitude i smjera djelovanja kao što je korištena i u analizi s jednodimenzijskim elementima. Uz to, korišteni su rubni uvjeti simetrije na ravninama simetrije, kojima je onemogućena translacija po x -osi i rotacije po y - i z -osi na yz -ravnini, odnosno translacija po z -osi i rotacije po x - i y -osi na xy -ravnini (Slika 15.).



Slika 15. Rubni uvjeti i opterećenje narinuto na konstrukciju: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo

Numeričke analize su provedene s mrežama od 4880, 7265 i 9735 C3D10 tetraedarskih elemenata drugog reda (Slika 16., Tablica 4.). Progušćivanjem mreže uklonjen je problem distorziranih elemenata na zaobljenjima geometrije prisutan u prvoj mreži.

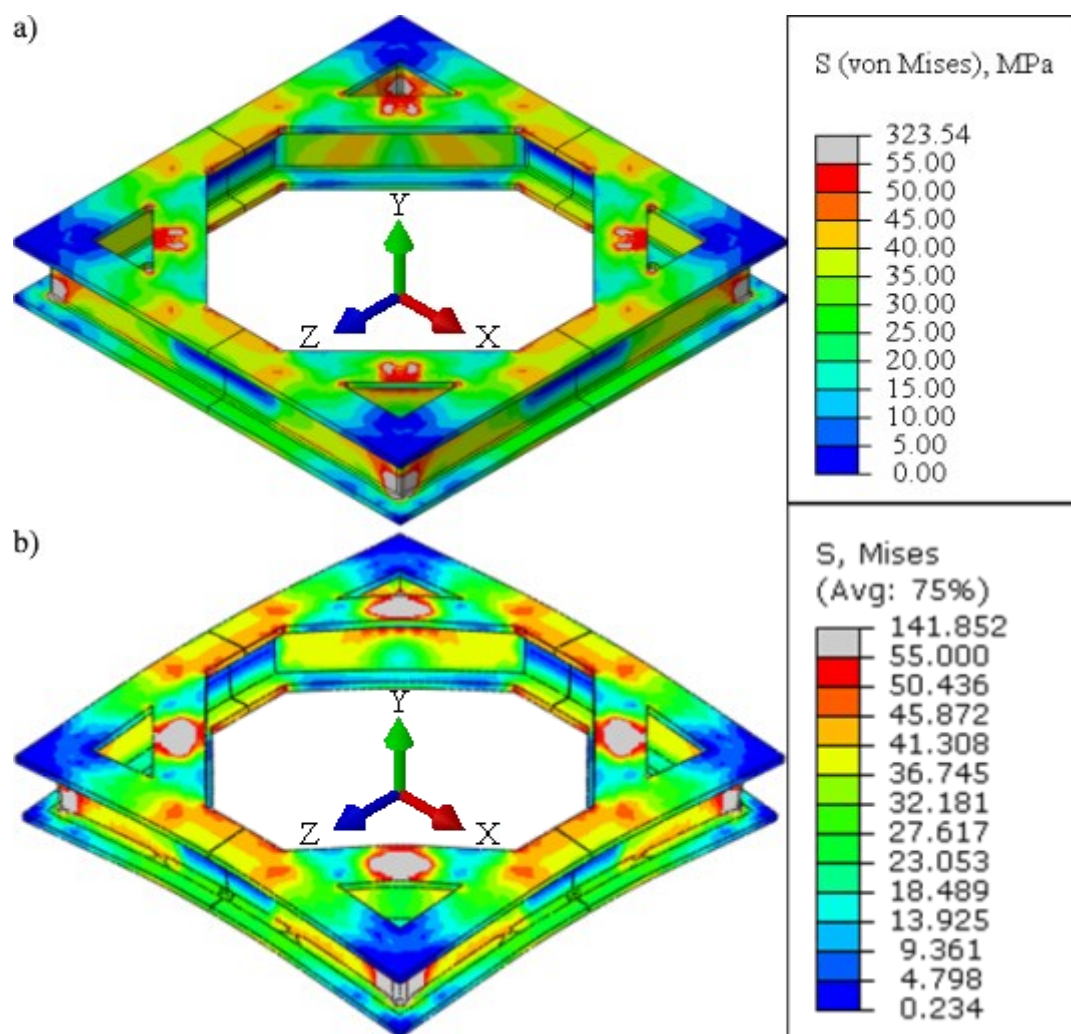


Slika 16. Četvrtina okvira diskretizirana sa: a) 4880, b) 7265 i c) 9735 C3D10 elemenata

Tablica 4. Prikaz konvergencije vrijednosti pomaka i napreznja dobivenih različitim mrežama C3D8 elemenata

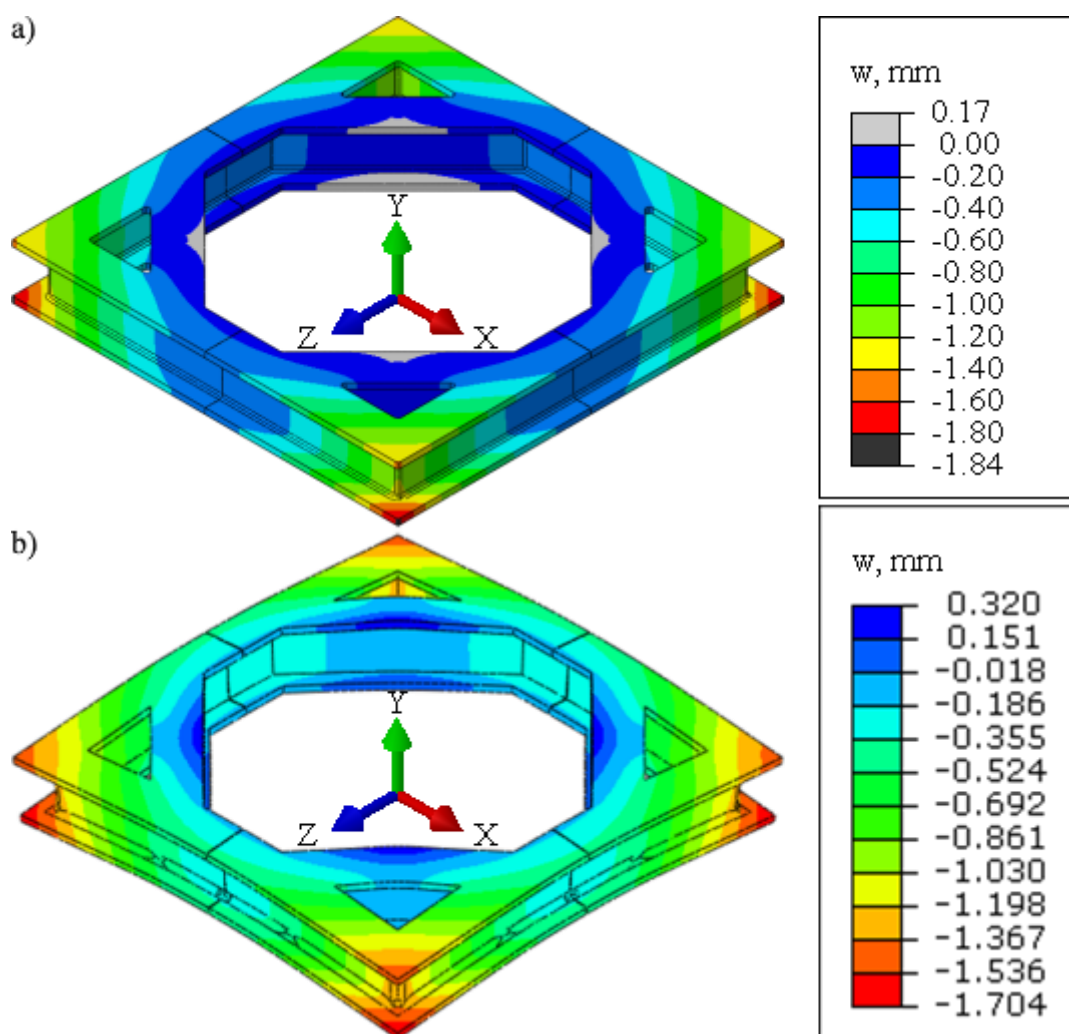
n_{okvira}	U_{max} , mm	S_{max} , MPa
4880	1,84	271,84
7265	1,86	284,78
9735	1,87	323,54

Vrijednost maksimalnog napreznja se povećanjem broja elemenata mijenjala relativno značajno i nije do kraja konvergirala. Maksimalni pomaci se s progušćivanjem mreže monotono približavaju konačnoj vrijednosti s donje strane. Budući da su maksimalni pomaci za mreže sa 7265 i 9735 elemenata bili gotovo jednaki i nisu značajno odudarali od vrijednosti dobivenih mrežom s bitno manje elemenata, kao što to pokazuje Tablica 4., smatra se da je mreža s 9735 elemenata dovoljno točna za potrebe preliminarnog proračuna krutosti. Raspodjele napreznja i vertikalnih progiba uspoređene su s raspodjelama dobivenim u [5] na Slikama 17. i 18.



Slika 17. Raspodjela napreznja: a) analiza trodimenzijskim elementima i b) po [5]

Može se uočiti da se povišene vrijednosti naprezanja javljaju na mjestima narinutih rubnih uvjeta te geometrijskih diskontinuiteta. Stoga je posebna pažnja potrebna pri izvedbi zavara i montiranju okvira užnice na *suspended plate*. Raspodjele pomaka i naprezanja se relativno dobro poklapaju s raspodjelama prikazanim u [5], što potvrđuje da je model dobro postavljen. Razlike u naprezanjima na mjestima većih koncentracija naprezanja su posljedica različitog pristupa definiranju opterećenja u [5], koje nije riješeno identičnim particioniranjem geometrije, jer su jedino na tim površinama uočljiva odstupanja u naprezanju. Nominalne vrijednosti naprezanja su više od onih dobivenih analizom jednodimenzijskim elementima, što je i očekivano s obzirom na pojednostavljenja uvedena analizom jednodimenzijskim elementima.



Slika 18. Raspodjela vertikalnih progiba: a) analiza trodimenzijskim elementima i b) po [5]
 Kvalitativno promatrano se raspodjele vertikalnih progiba vrlo dobro poklapaju. Primjetna su odstupanja u vršnim vrijednostima, koja se mogu objasniti različitim pristupima definiranju opterećenja. Za realističnije rezultate na površinama na kojima su narinuti rubni uvjeti te

opterećenje bi bilo potrebno detaljno modelirati spoj *twistlocka* i okvira, kao i vijčani spoj okvira užnice sa *suspended plateom*. Međutim, odabrani pristup s particioniranjem površina daje zadovoljavajuće rezultate s obzirom na dobivene pomake konstrukcije u cjelini, koji su s obzirom na raspodjele po [5] na strani sigurnosti, pa će se i u narednim analizama s trodimenzijskim elementima rabiti.

3. Numerička analiza inicijalne konstrukcije *suspended platea*

U ovom poglavlju prikazat će se rezultati detaljnije analize inicijalne konstrukcije *suspended platea* s obzirom na postavljene zahtjeve krutosti i maksimalnu dopuštenu inklinaciju tereta u kontekstu *single failure proof* konstruiranja. Kako bi se dobiveni model s trodimenzijskim elementima mogao primijeniti za numeričku analizu slučaja otkazivanja jednog od *twistlockova*, potrebno je izvršiti određene preinake.

3.1. Prilagodba modela

Iako je za otkazivanje jednog od četiriju *twistlockova* problem i dalje dvostruko simetričan, ravnine simetrije više ne leže na rubovima mreža definiranih u poglavlju 2.2.. Stoga nije svrsishodno uvoditi rubne uvjete simetrije, već će se za slučaj otkazivanja *twistlocka* analizirati čitava geometrija s istim parametrima mreža okvira kao u poglavlju 2.2. Kako bi se mogao provjeriti uvjet maksimalne inklinacije tereta i kako bi se vjerno opisali rubni uvjeti, potrebno je simulirati i elastičnu vezu između *suspended platea* i vozička. Budući da se *twistlockovi* već nakon relativno malog pomaka ukliješte, ne očekuje se intenzivno njihanje, kao što bi nastupilo za slučaj pucanja užeta, što ujedno znači i da će užad ostati napregnuta. To omogućuje simuliranje užadi opružnim elementima. Time masa užadi nije uzeta u obzir, jer je zanemarivo mala u usporedbi s ukupnom masom *suspended platea* i tereta. Konstanta opruge za opružne elemente izračunata je za slučaj maksimalne moguće dubine spuštanja TCCP-a. Pri tome je uzeta u obzir inklinacija užadi u prostoru i faktor punjenja užadi, te tako dobivena vrijednost iznosi:

$$c = n \cdot f \cdot d^2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot E \cdot h^{-1} \cdot \cos \beta, \quad (3)$$

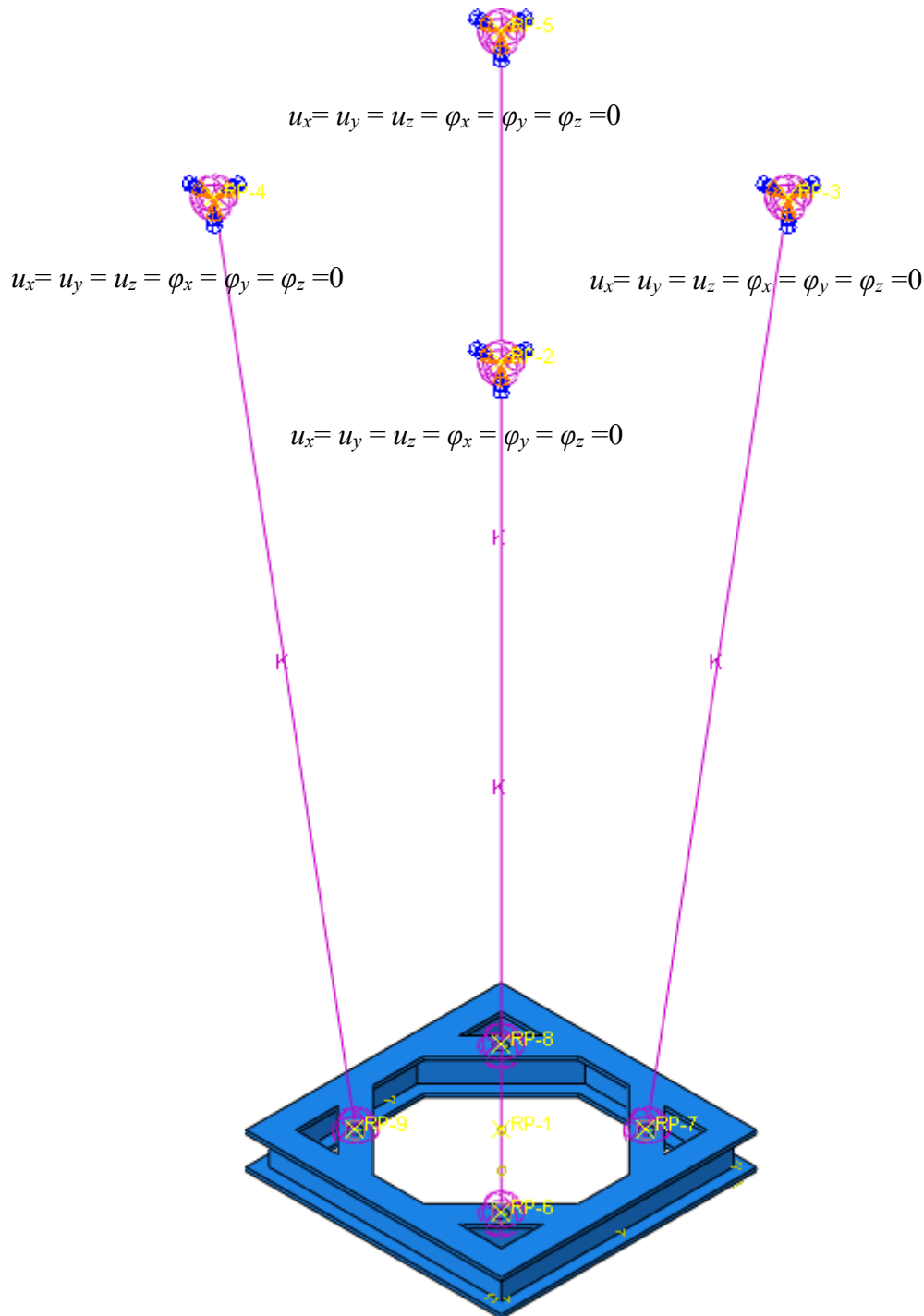
$$c = 6 \cdot 0,5 \cdot 24^2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 200000 \cdot 10000^{-1} \cdot \cos 7,053^\circ, \quad (4)$$

$$c = 26940 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}. \quad (5)$$

Svaka opruga povezuje dvije referentne točke, od kojih je jedna točka prihvatna užeta na dizalici, kojoj su ukinuti svi stupnjevi slobode. Druga točka je referentna točka na sredini particionirane kružne površine, koja je potom s tom površinom povezana kinematičkim *couplingom* (Slika 19.).

Rubni uvjeti sila na okviru ne mogu se dobiti primjenom principa mehanike krutog tijela, jer bi inače u slučaju otkazivanja jednog od *twistlockova* i dijagonalno od njega pozicioniran *twistlock*

prestao nositi teret, dok se u stvarnosti fiksiranjem *twistlocka* za okvir i djelovanjem sile užeta uvijek javljaju deformacije, a time i sila na dijagonalno postavljenom *twistlocku*. Time se pojavljuje potreba za modeliranjem interakcije tereta i *suspended platea* u proračunu. Analizirano je više pristupa modeliranju te interakcije, prvo za slučaj simetričnog opterećenja, zatim za slučaj otkazivanja jednog od *twistlockova*.

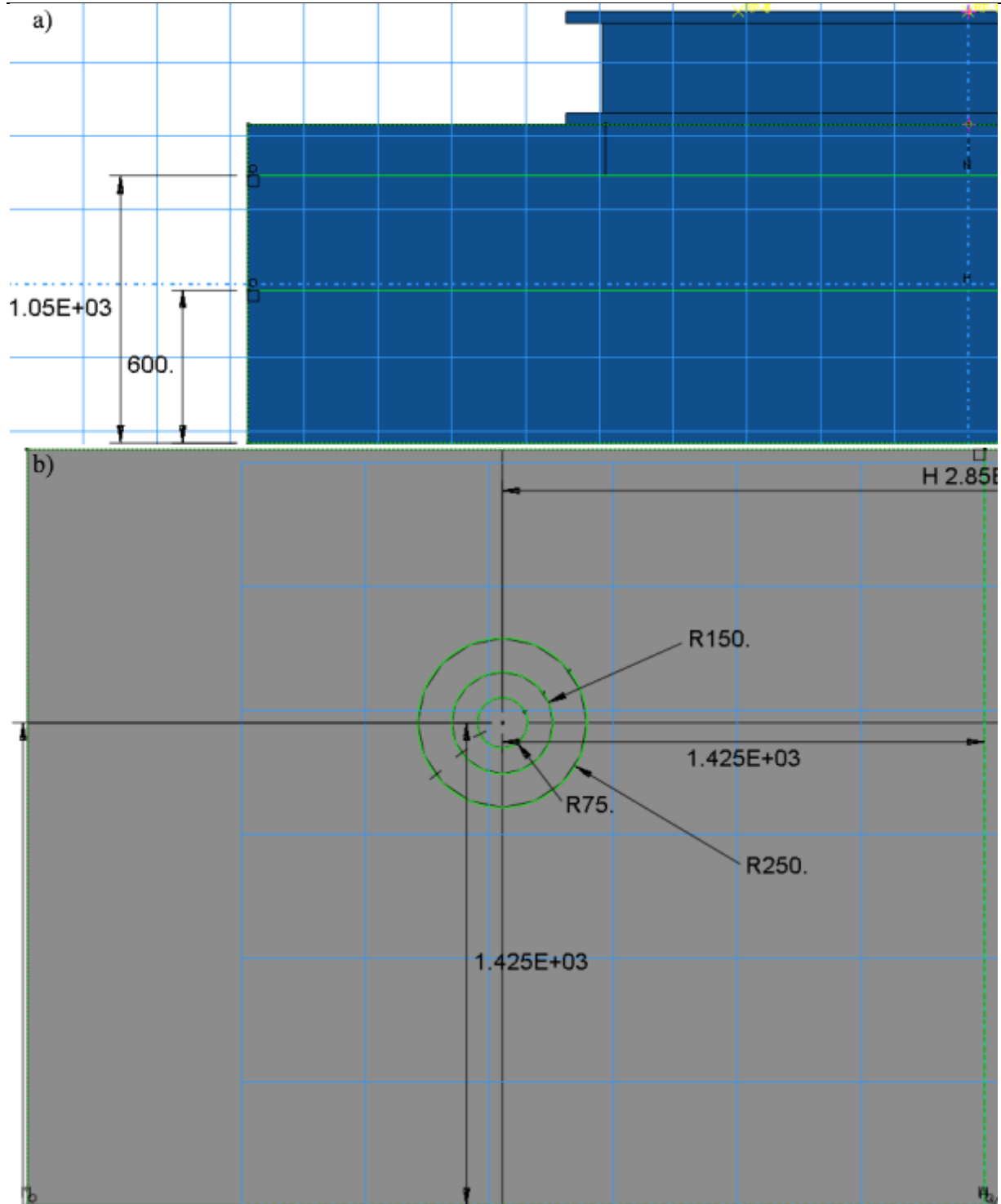


Slika 19. Povezivanje opruga i okvira – spoj i rubni uvjeti

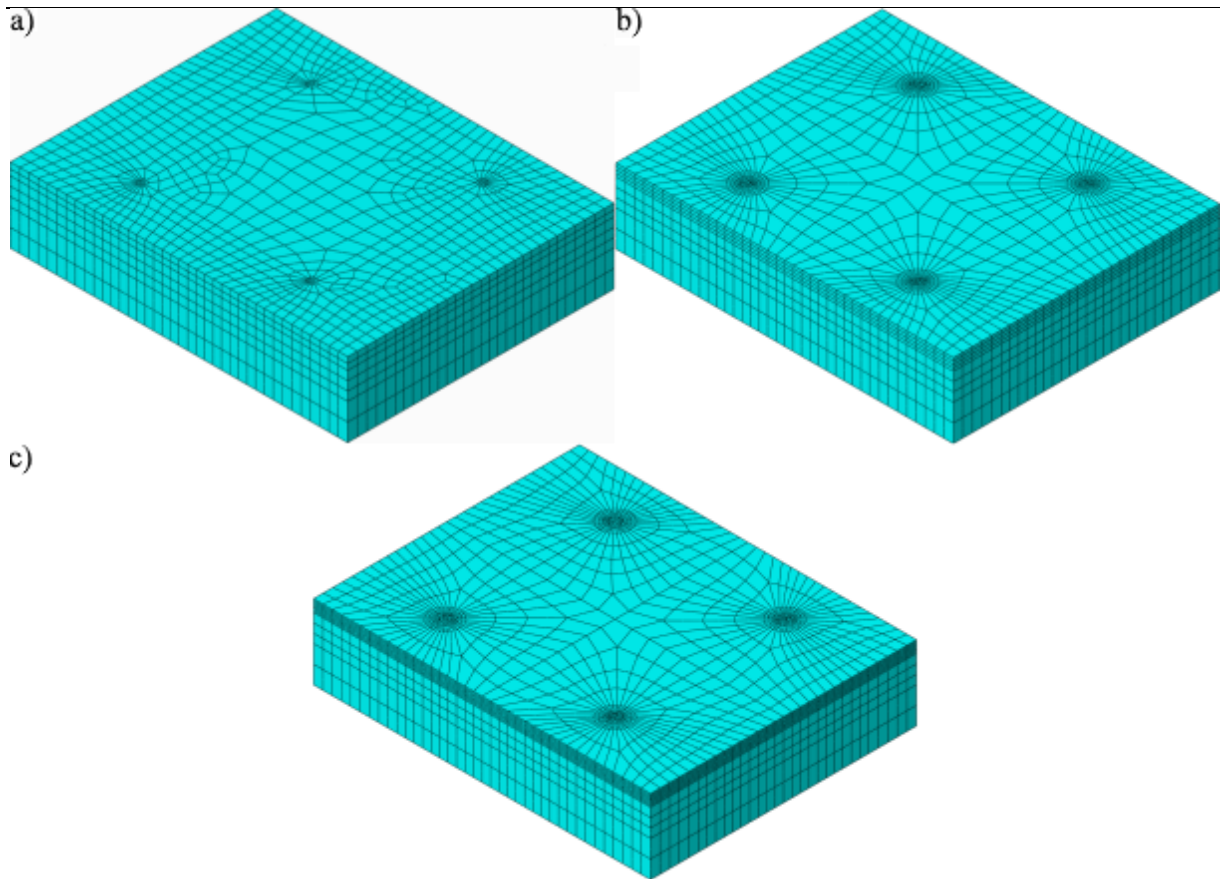
Prvo je teret modeliran zadavanjem opterećenja na referentnu točku pozicioniranu u težištu TCCP-a, koja je potom kinematskim *couplingom* povezana s čvorovima na kojima se nalaze *twistlockovi*.

U drugoj varijanti teret je modeliran u obliku kvadra dimenzija 5657 mm×4465 mm×1250 mm, kojem je dodijeljena gustoća uvećana za faktor sigurnosti na dinamička opterećenja. Teretu su zatim dodijeljena svojstva krutog tijela *rigid body constraintom*, s referentnom točkom u težištu kvadra. Ova je referentna točka kinematskim *couplingom* povezana s čvorovima na kojima se nalaze *twistlockovi*. Model tereta diskretiziran je jednim C3D8R heksaedarskim elementom prvog reda s reduciranom integracijom.

U zadnjoj varijanti je uklonjen *rigid body constraint* na teret, te je geometrija tereta diskretizirana sa 6139, 12870 i 22165 C3D20 heksaedarskih elemenata drugog reda. Prilagodбом modela pojavila se potreba za provođenjem numeričke analize s velikim pomacima, što zahtijeva približavanje rješenju u inkrementima s više iteracija. Stoga je svrsishodnije i vremenski ekonomičnije particionirati teret i selektivno progušćivati mrežu na području kontakta s okvirom nego homogeno progušćivati mrežu tereta kako bi se odredila konvergencija numeričkih analiza. Teret je po visini najprije particioniran na tri dijela visina 600, 450 i 200 mm (Slika 20. a)). U najnižem dijelu određena je veličina stranica od približno 300 mm, u idućem od približno 150 mm, a najvišoj particioniranoj sekciji koja je zbog kontakta s okvirom ujedno i najvažnija za točnost rezultata dodijeljena je visina elemenata od približno 50 mm. Tako dobivena mreža sadrži 6139 C3D20 elemenata. Potom su iz gornjeg particioniranog dijela oko svake kontaktne površine izdvojene regije promjera 150, 300 i 500 mm (Slika 20. b)), te je na te regije nametnuta prosječna veličina stranica od 50 mm. Tako je dobivena mreža od 12870 C3D20 elemenata. Na koncu su regije promjera 150 i 300 mm dodatno progušćene nametanjem prosječne veličine stranica od 25 mm, čime je dobivena mreža od 22165 C3D20 elemenata. Navedene mreže prikazane su na Slici 21. Particionirane kružne površine okvira i tereta povezane su vezom *tie*. Numerička analiza je provedena s Poissonovim faktorom za beton $\nu=0,2$ [11] i modulima elastičnosti od 2000000 MPa i 27000 MPa dodijeljenim teretu (najniži modul elastičnosti betona [12]), kako bi se odredilo u kojoj mjeri krutost tereta utječe na rezultate.



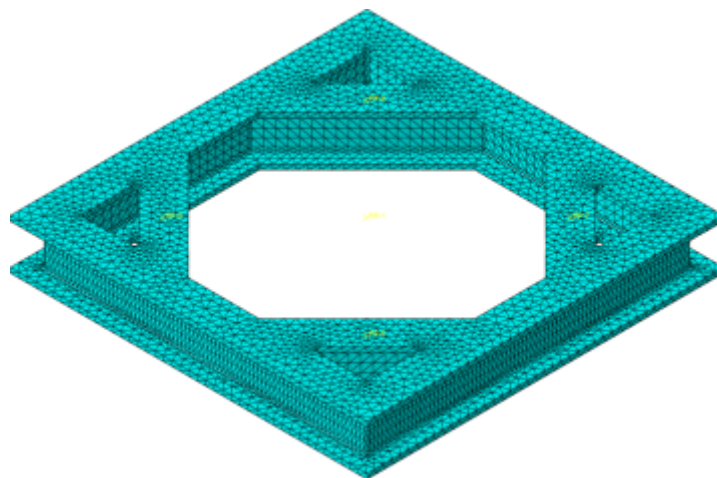
Slika 20. Partitioniranje tereta: a) po visini i b) na kontaktnoj površini



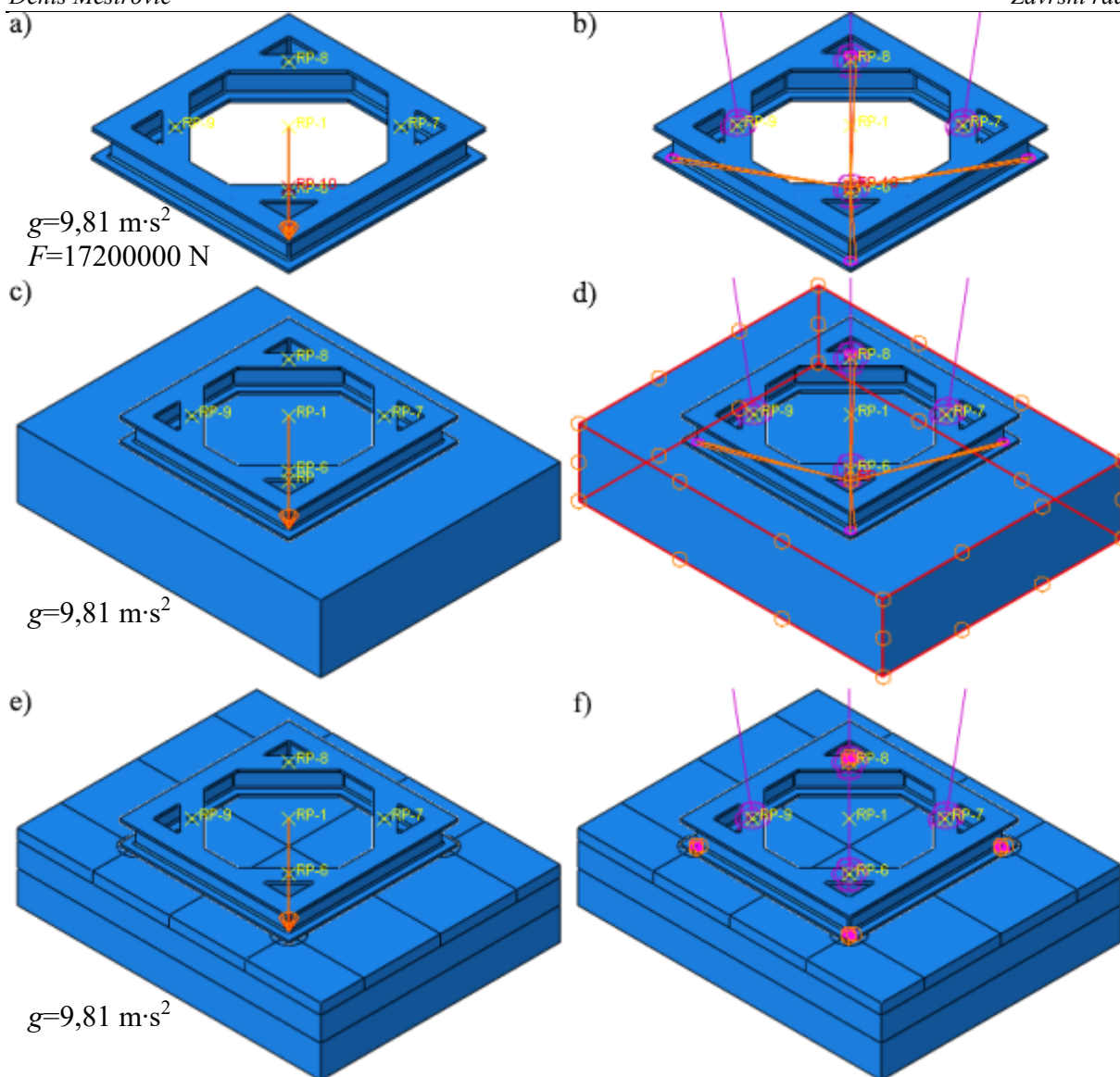
Slika 21. Teret diskretiziran sa: a) 6139, b) 12870, c) 22165 C3D20 elemenata

3.2. Simetrično opterećenje

Za slučaj simetričnog opterećenja korišteni su isti parametri generiranja mreže na okviru kao i za zadnju mrežu generiranu za verifikaciju na četvrtinskom modelu, te se tako dobivena mreža sastoji od 39005 C3D10 elemenata (Slika 22.). Načini zadavanja opterećenja i modeliranja tereta prikazani su na Slici 23. Utjecaj gustoće mreže tereta na rezultate numeričke analize za teret modeliran kao čvrsto tijelo modula elastičnosti 27000 MPa prikazan je u Tablici 5.



Slika 22. Okvir diskretiziran s 39005 C3D10 elemenata



Slika 23. Načini zadavanja opterećenja i modeliranja tereta: a) i b) – koncentrirana sila na referentnu točku, c) i d) – teret kao kruto tijelo, e) i f) – teret kao čvrsto tijelo

Tablica 5. Prikaz konvergencije vrijednosti vertikalnih progiba i naprezanja s obzirom na gustoću mreže tereta za slučaj simetričnog opterećenja

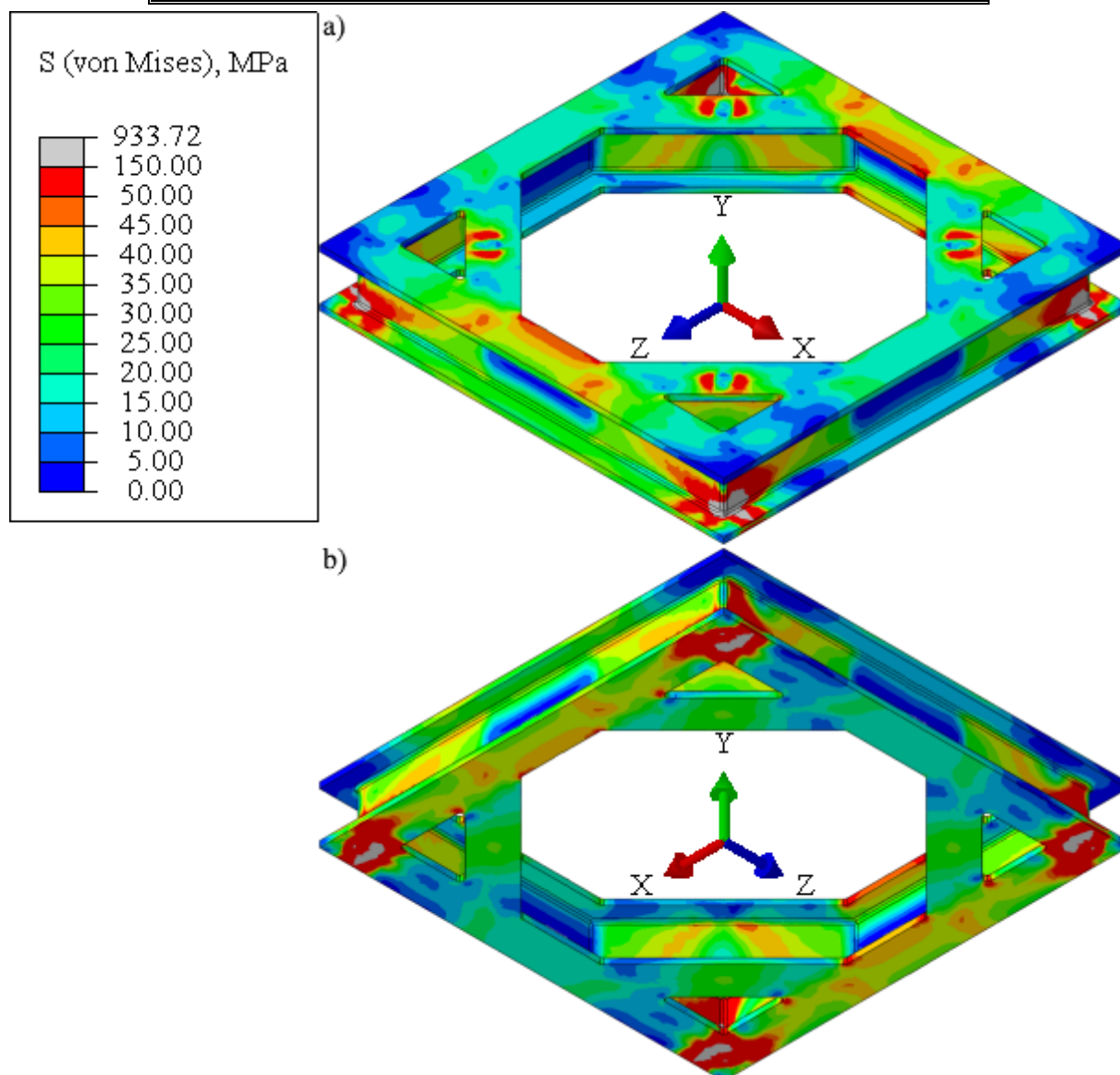
n_{tereta}	$ w_{max} $, mm	S_{max} , MPa
6139	1,16	173,45
12870	1,17	173,48
22165	1,17	173,50

Budući da je za parametre mreže okvira još pri verifikaciji utvrđeno da su dovoljno dobri za osiguravanje konvergencije pomaka i da znatnim progušćivanjem mreže tereta u zoni kontakta s 12870 na 22165 C3D20 elemenata nije došlo do mijenjanja rezultata pomaka i naprezanja, smatra se da je zadnja mreža tereta dovoljno dobra za opisivanje ovog problema. Rezultati

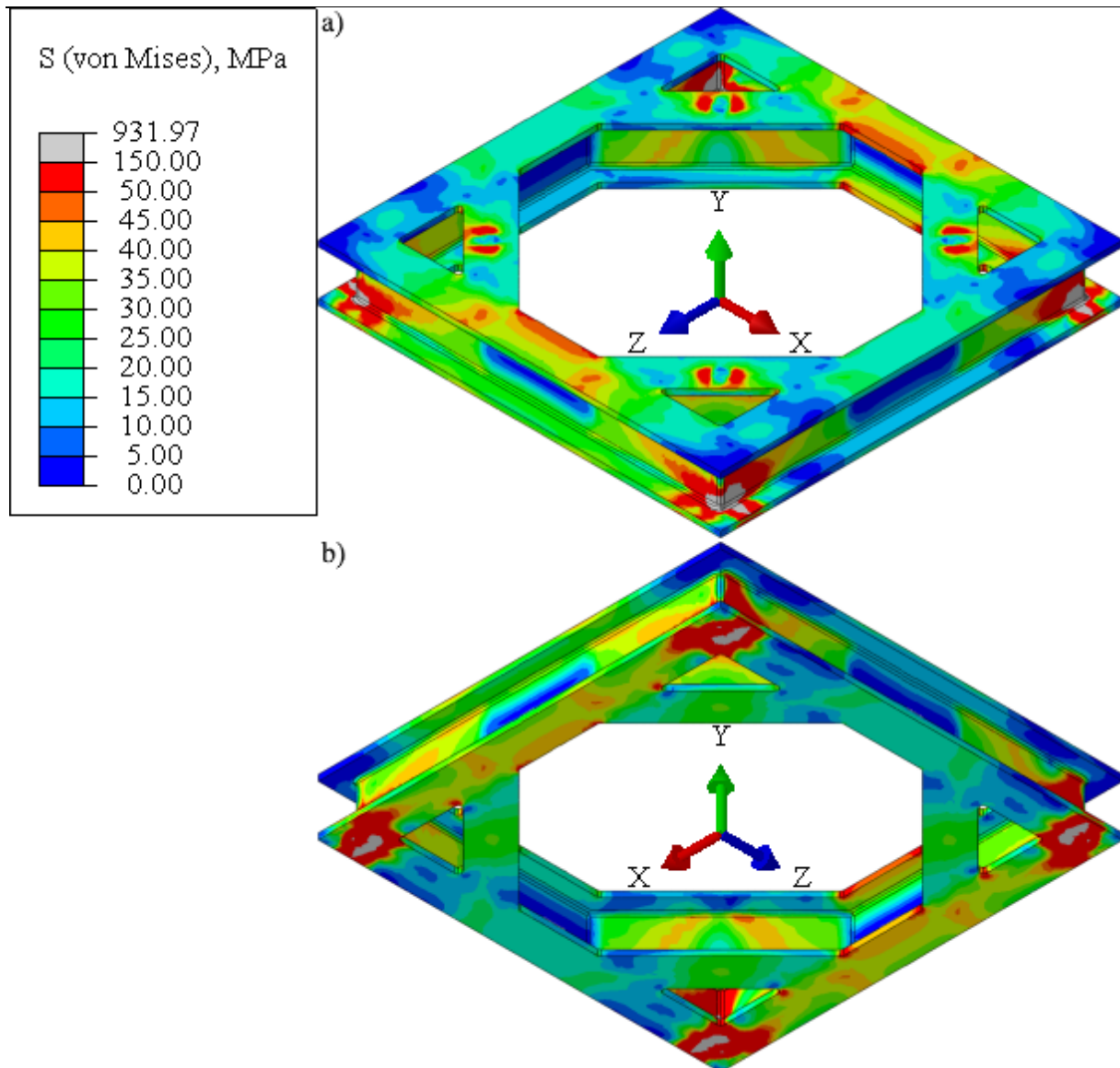
numeričkih analiza za promatrane varijante dani su u Tablici 6, a raspodjele napreznja na Slikama 24., 25., 26. i 27.

Tablica 6. Napreznja i progibi za simetrično opterećenje okvir

Varijanta		Simetrično opterećenje	
		S_{max} , MPa	$ w_{maxv} $, mm
Opterećenje zadano na referentnu točku		933,72	1,15
Teret kao kruto tijelo		931,97	1,15
Teret kao čvrsto tijelo	$E_2=27000$ MPa	173,50	1,17
	$E_2=2000000$ MPa	228,60	1,02

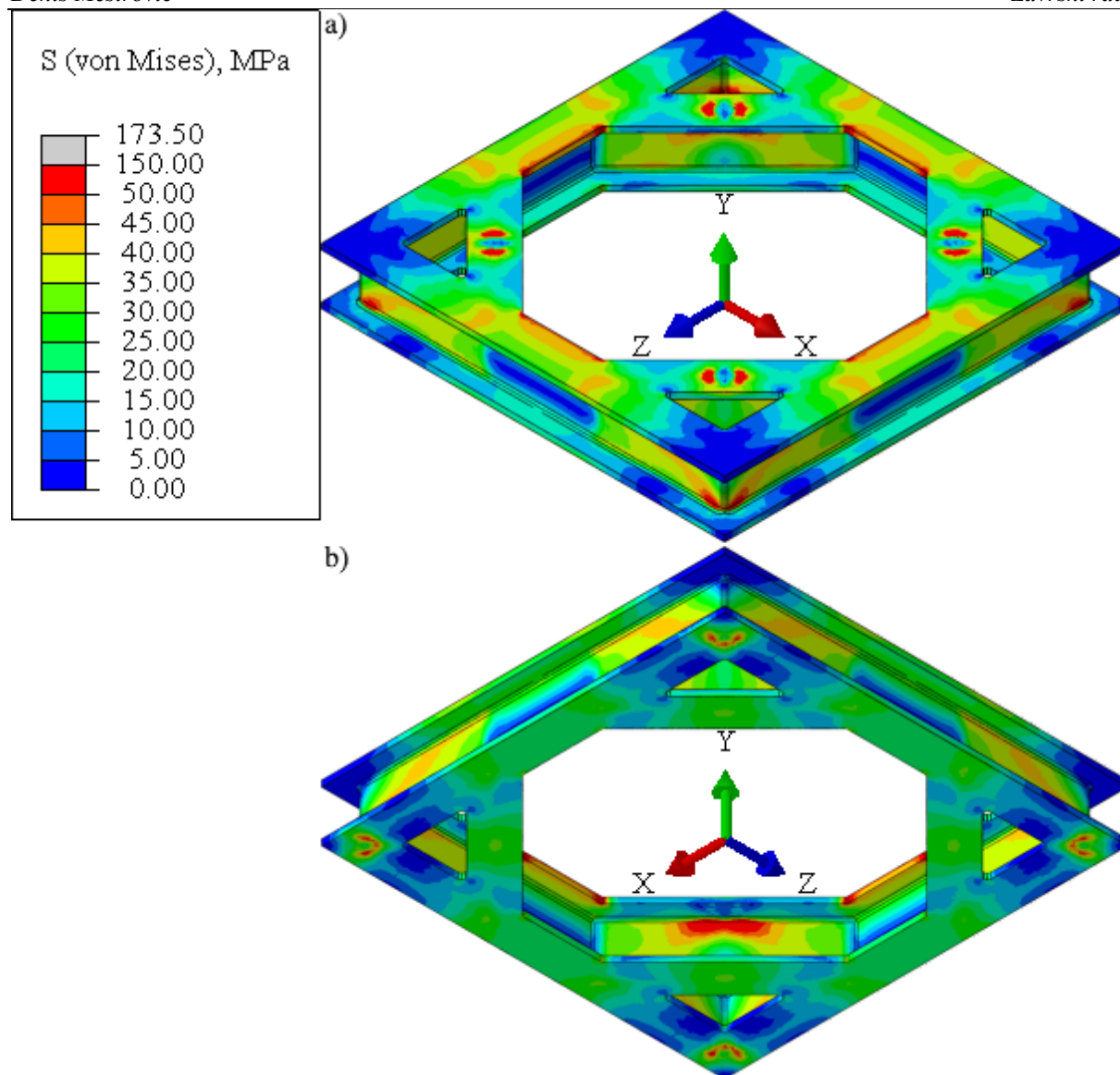


Slika 24. Raspodjela napreznja za simetrično opterećenje – opterećenje zadano na referentnu točku: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo

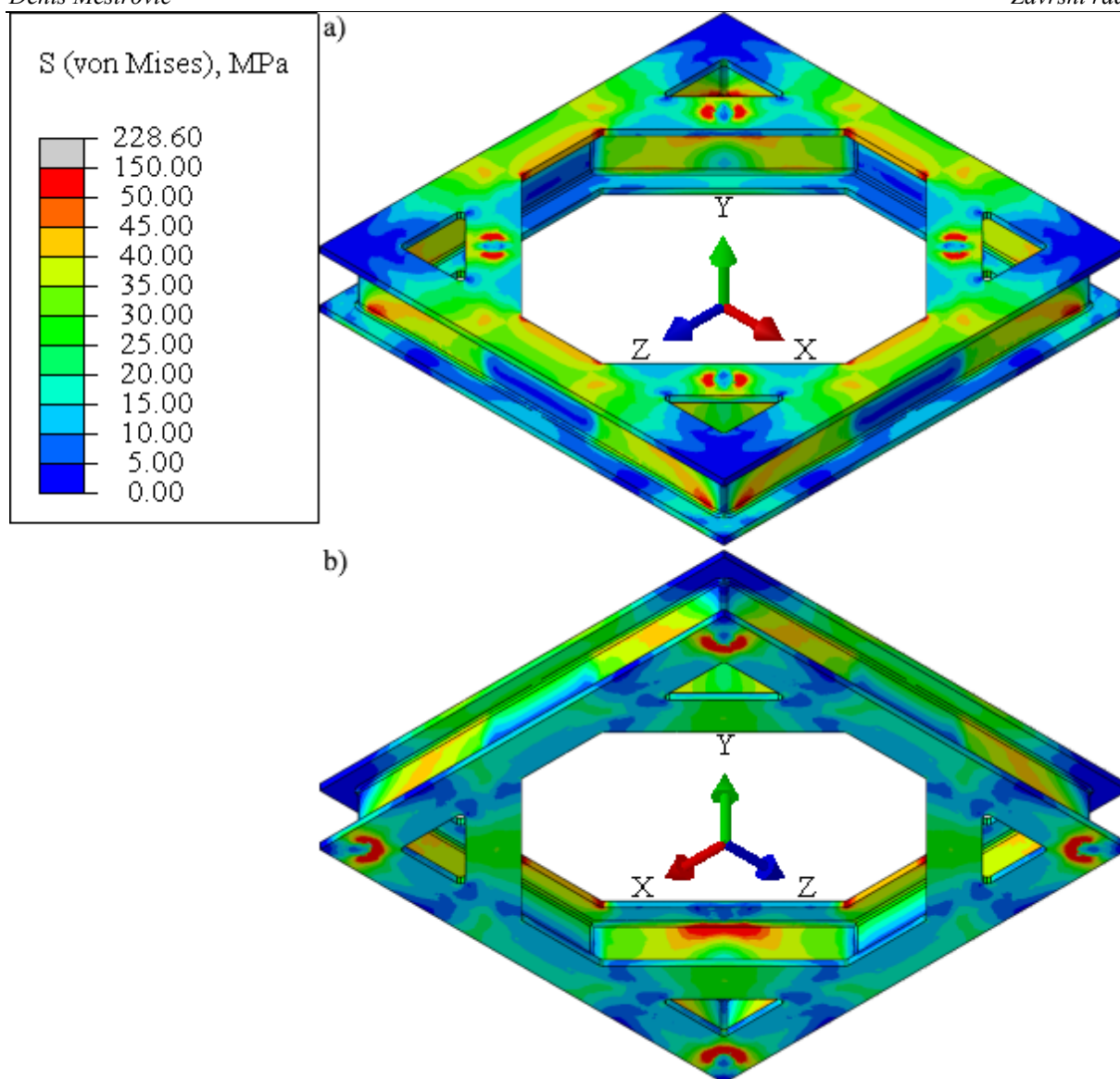


**Slika 25. Raspodjela naprezanja za simetrično opterećenje – teret modeliran kao kruto tijelo:
a) pogled odozgo, b) pogled odozdo**

Usporede li se tako dobiveni rezultati s rezultatima zadnje mreže za verifikaciju modela, može se zaključiti da zadavanjem opterećenja preko referentne točke ili modeliranjem tereta kao krutog tijela nastaju singularnosti na površinama okvira na koje se opterećenje prenosi putem *couplinga*. Raspodjele naprezanja i vršni vertikalni progibi za navedene dvije varijante su gotovo potpuno identični.

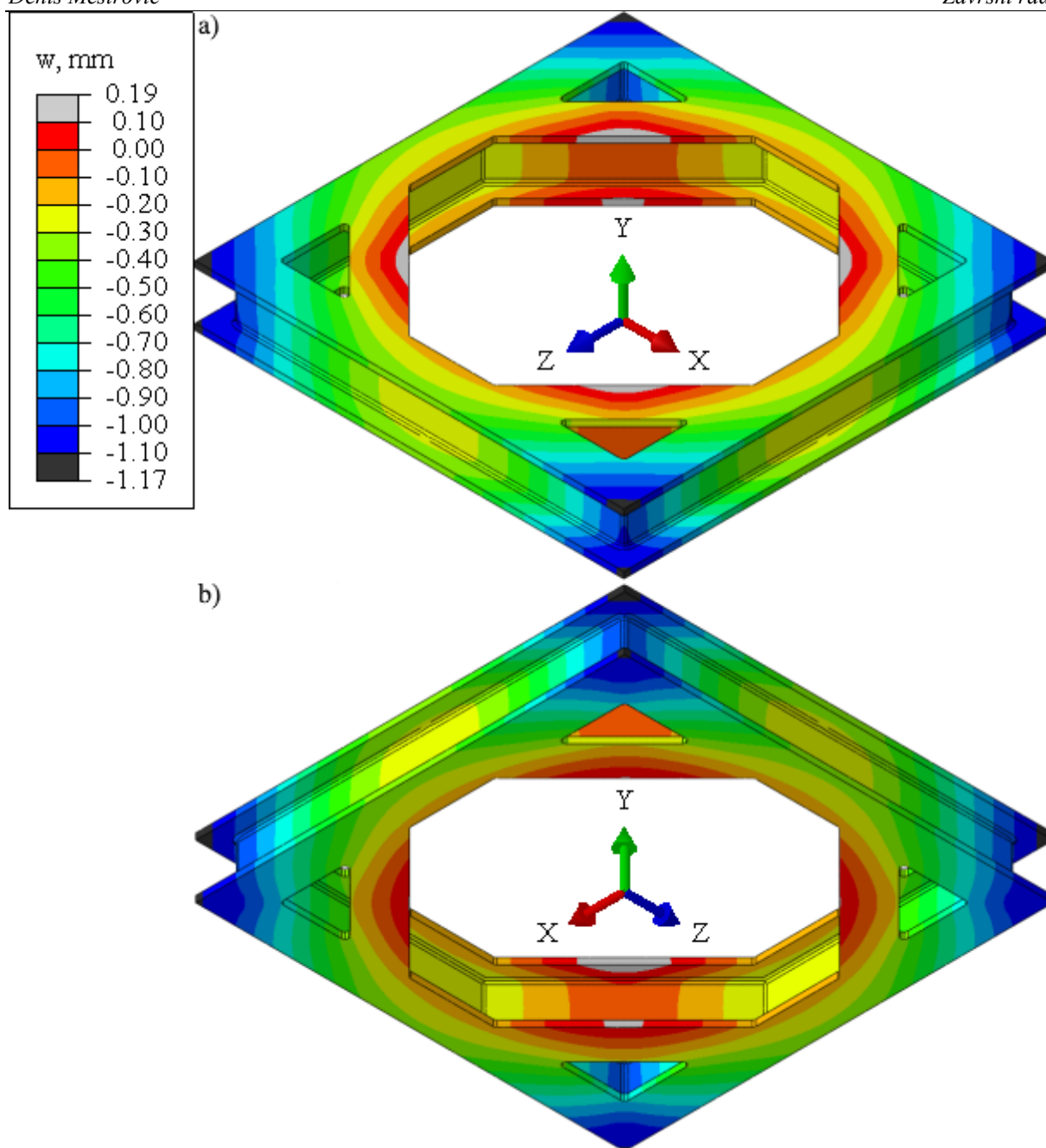


Slika 26. Raspodjela naprezanja za simetrično opterećenje – teret modeliran kao čvrsto tijelo modula elastičnosti 27 GPa: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo



Slika 27. Raspodjela napreznja za simetrično opterećenje – teret modeliran kao čvrsto tijelo modula elastičnosti 2000 GPa: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo

Nešto vjernije modelirano opterećenje uklanja te singularnosti, iako je na kontaktnim površinama napreznje i dalje povišeno ako se teret modelira kao gotovo kruto tijelo. Modeliranje tereta kao čvrstog tijela malog modula elastičnosti je najnepovoljniji slučaj za konstrukciju po pitanju krutosti, a ujedno i najvjerniji s obzirom na način modeliranja tereta. Stoga se tako dobiveni vršni progibi prihvaćaju kao mjerodavna veličina za provjeru zadovoljena uvjeta krutosti za slučaj simetričnog opterećenja okvira. Raspodjela vertikalnih progiba dobivenih oduzimanjem pomaka krutog tijela od pomaka dobivenih numeričkom analizom prikazana je na Slici 28. za usvojenu mrežu i način modeliranja sklopa.

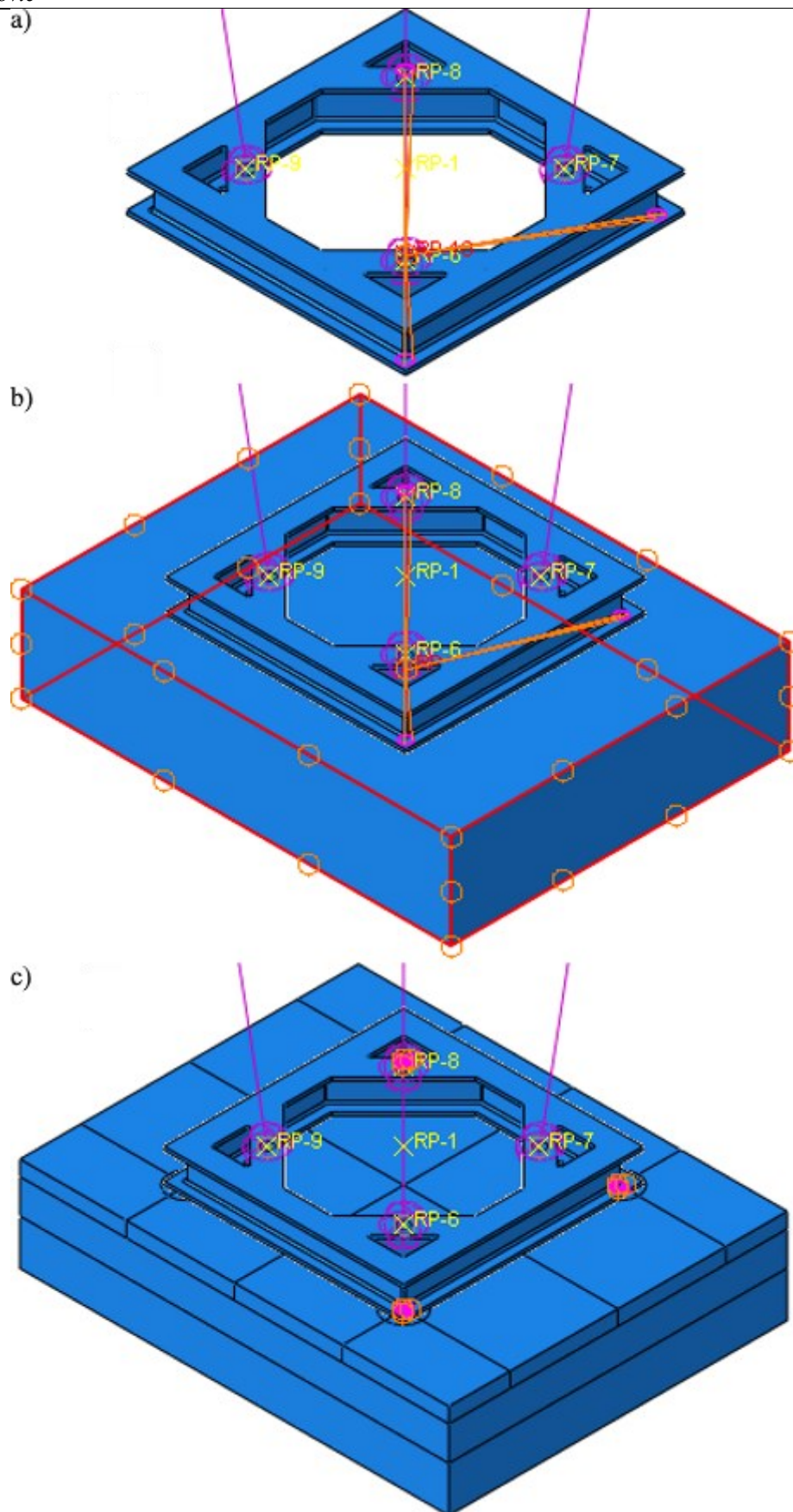


Slika 28. Raspodjela vertikalnih progiba za simetrično opterećenje na usvojenom modelu: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo

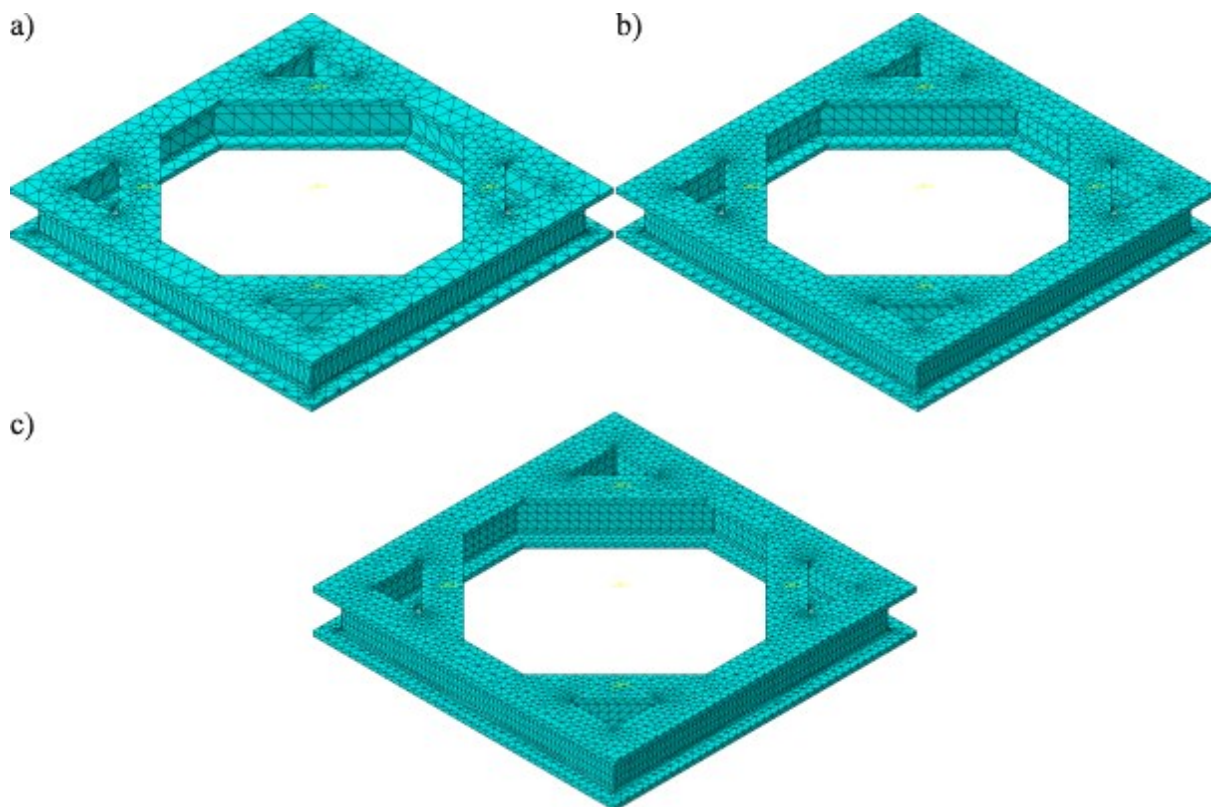
Može se primijetiti da su raspodjele pomaka i naprezanja kvalitativno gotovo jednake onima dobivenim za verifikaciju modela. Pozitivni progibi u blizini površina na kojima se okvir povezuje s oprugama su većeg iznosa, što je posljedica inklinacije opružnih elemenata i realističnijeg načina opterećivanja okvira od koncentriranih sila koje djeluju na *twistlockove*. Također se može zamijetiti da je vjernije modelirano opterećenje ujedno i manje kritično za konstrukciju od pojednostavljenog po pitanju vršnih naprezanja i progiba.

3.3. Otkazivanje *twistlocka*

Za analizu otkazivanja jednog od *twistlockova*, modeli korišteni za analizu simetričnog opterećenja modificirani su uklanjanjem jednog od *tieova*, odnosno *couplinga* između okvira i tereta (Slika 29.). Budući da se opterećenje konstrukcije okvira za slučaj otkazivanja *twistlocka* značajno razlikuje od simetričnog opterećenja, numeričke analize za teret modeliran kao čvrsto tijelo su najprije izvedene s trima uzastopno gušćim mrežama okvira od 19342, 28671 i 39005 C3D10 elementima generiranim s parametrima korištenim za verifikaciju modela (Slika 30.) u kombinaciji s najgušćom mrežom tereta od 22165 C3D20 elemenata korištenom za slučaj simetričnog opterećenja (Slika 21. c)). Kako bi se mogao ocijeniti utjecaj mreže tereta na konvergenciju, naknadno su provedene analize s najgušćom mrežom okvira s 39005 C3D10 elemenata i rjeđim mrežama tereta s 6139 i 12870 C3D20 elemenata (Slika 21. a) i b)) korištenim za analizu simetričnog opterećenja. Konvergencija vršnih vertikalnih progiba i naprezanja prikazana je u Tablici 7.



Slika 29. Načini modeliranja spoja tereta i okvira za slučaj otkazivanja jednog *twistlocka*: a) koncentrirana sila na referentnu točku, b) teret kao kruto tijelo i c) teret kao čvrsto tijelo



Slika 30. Okvir diskretiziran s: a) 19342, b) 28671 i c) 39005 C3D10 elemenata

Tablica 7. Prikaz konvergencije vrijednosti vertikalnih progiba i naprezanja s obzirom na gustoće mreža okvira i tereta za slučaj otkazivanja jednog *twistlocka*

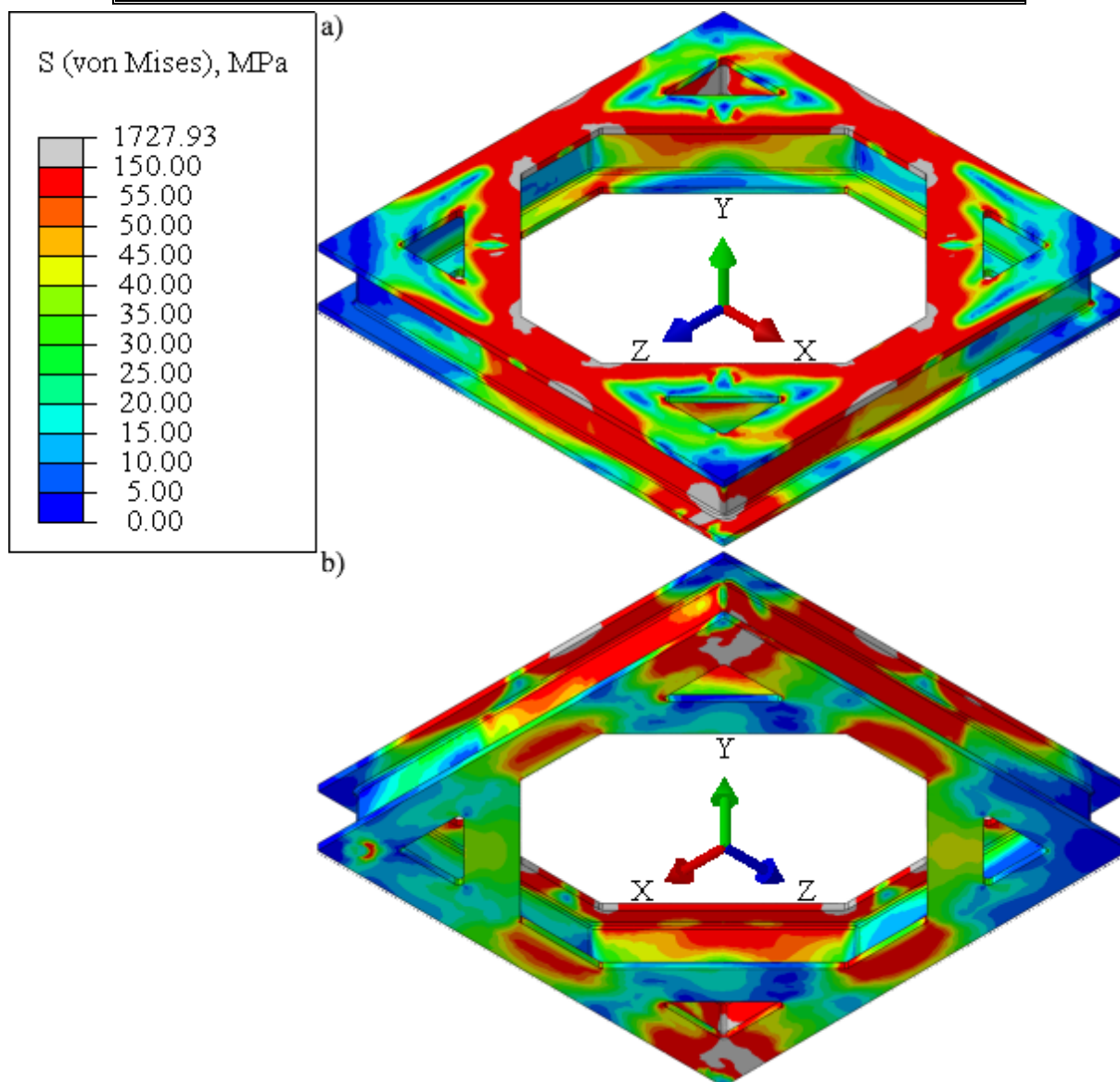
n_{tereta}	n_{okvira}	$ w_{\text{max}} $, mm	S_{max} , MPa
22165	19342	9,29	753,72
22165	28671	9,39	671,68
6139	39005	9,08	775,53
12870	39005	9,37	740,48
22165	39005	9,43	725,69

Može se zaključiti da je mreža za potrebe određivanja zadovoljenja uvjeta krutosti dovoljno dobra, jer su relativne promjene u dobivenom maksimalnom progibu uslijed progušćivanja mreže vrlo male (<1%). Treba istaknuti da se vršno naprezanje pojavilo na složenoj krivulji koja spaja zaobljenja profila na rubovima okvira i samo na tom relativno malom području postiže tako visoke vrijednosti. Budući da je za potrebe ovog rada važno dobivanje točnih raspodjela pomaka, što ujedno znači i globalno relativno točne raspodjele naprezanja, takve lokalne singularnosti nisu od interesa te se mogu zanemariti. Rezultati različitih pristupa

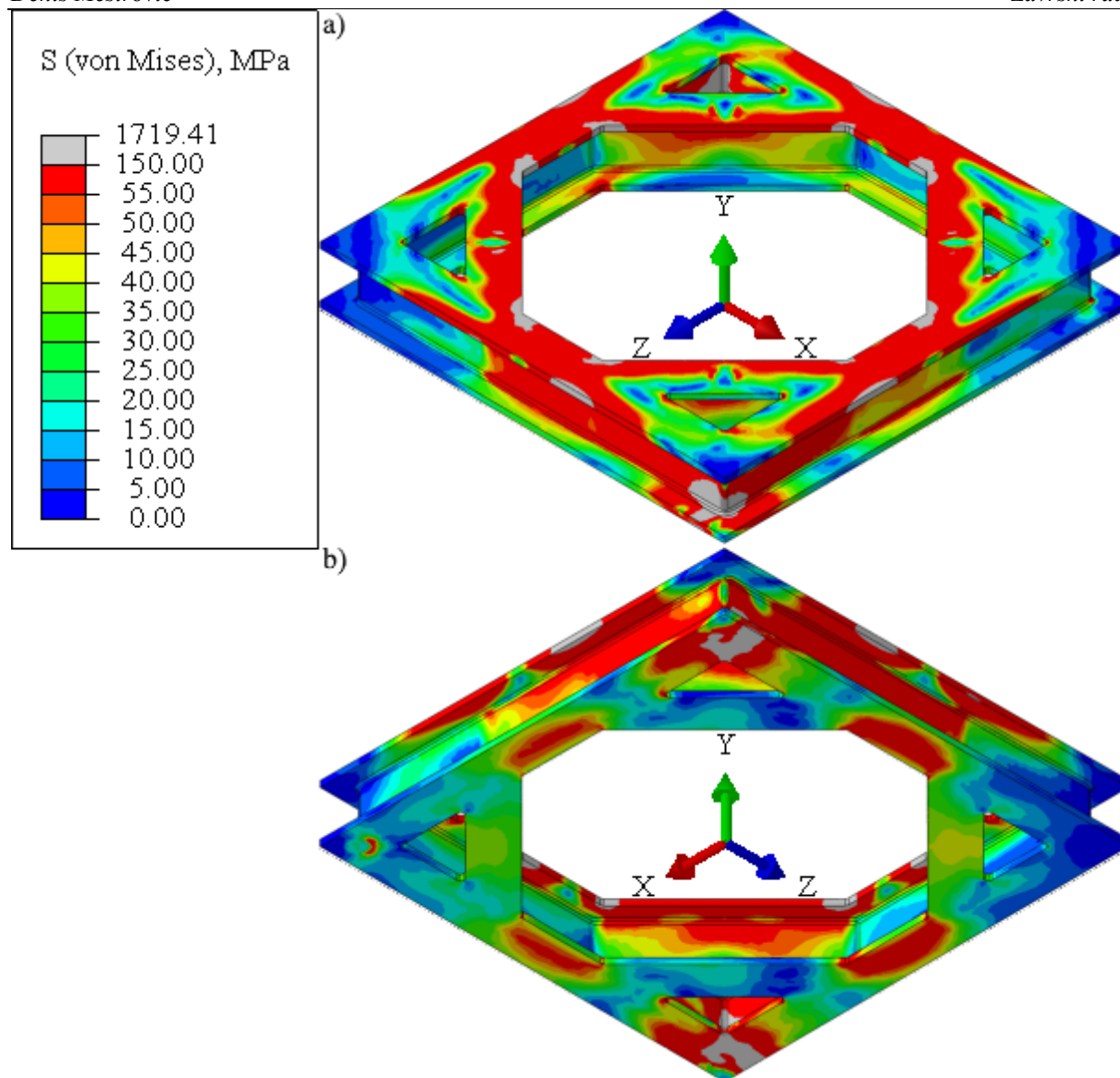
modeliranju tereta i opterećenja prikazani su u Tablici 8, a raspodjele naprezanja na Slikama 31., 32., 33. i 34.

Tablica 8. Naprezanja i progibi za slučaj otkazivanja *twistlocka*

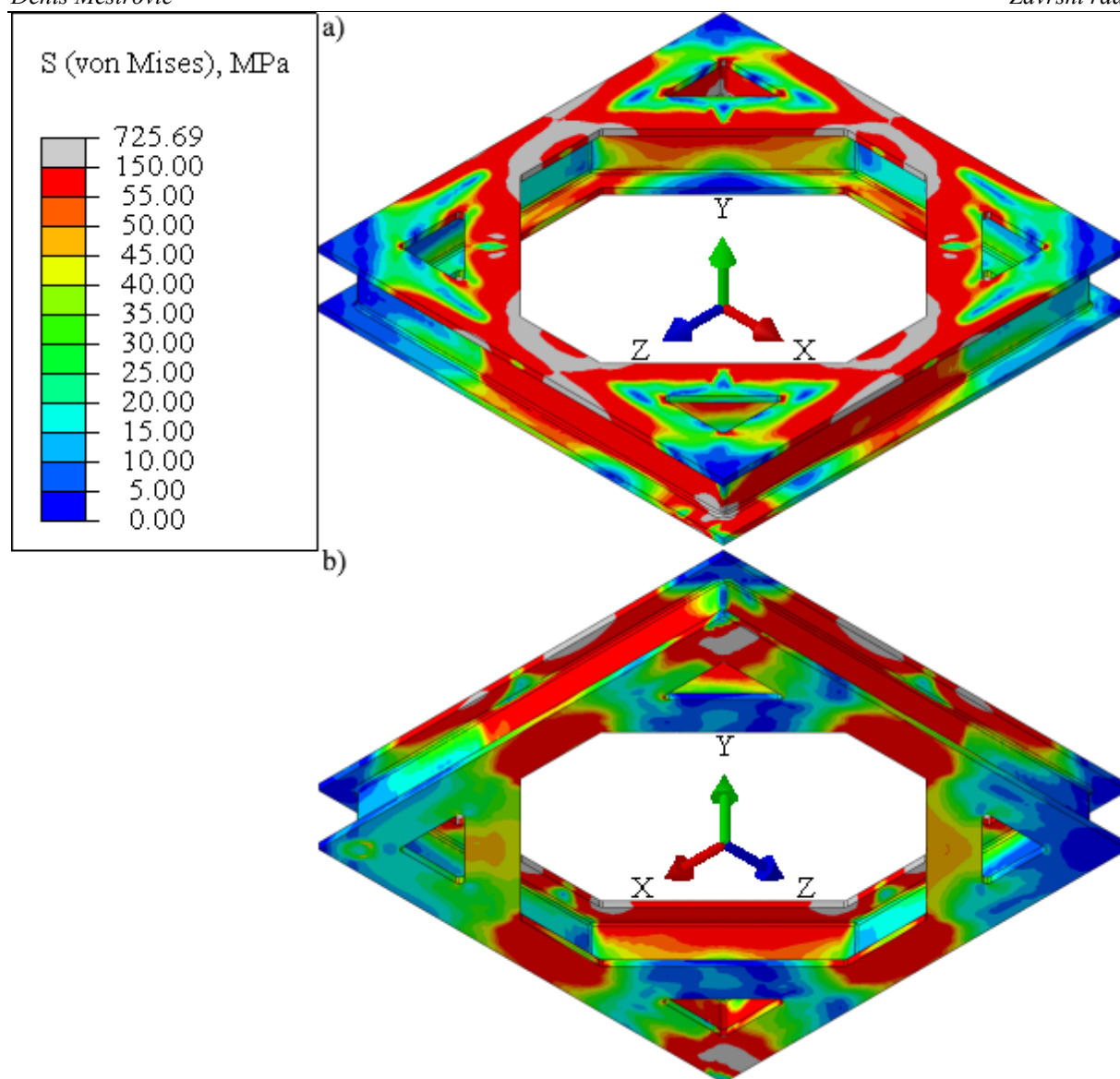
Varijanta		Otkazivanje <i>twistlocka</i>	
		S_{max} , MPa	$ w_{max} $, mm
Opterećenje zadano na referentnu točku		1727,93	7,38
Teret kao kruto tijelo		1719,41	7,29
Teret kao čvrsto tijelo	$E_2=27000$ MPa	725,69	9,43
	$E_2=2000000$ MPa	1557,67	7,41



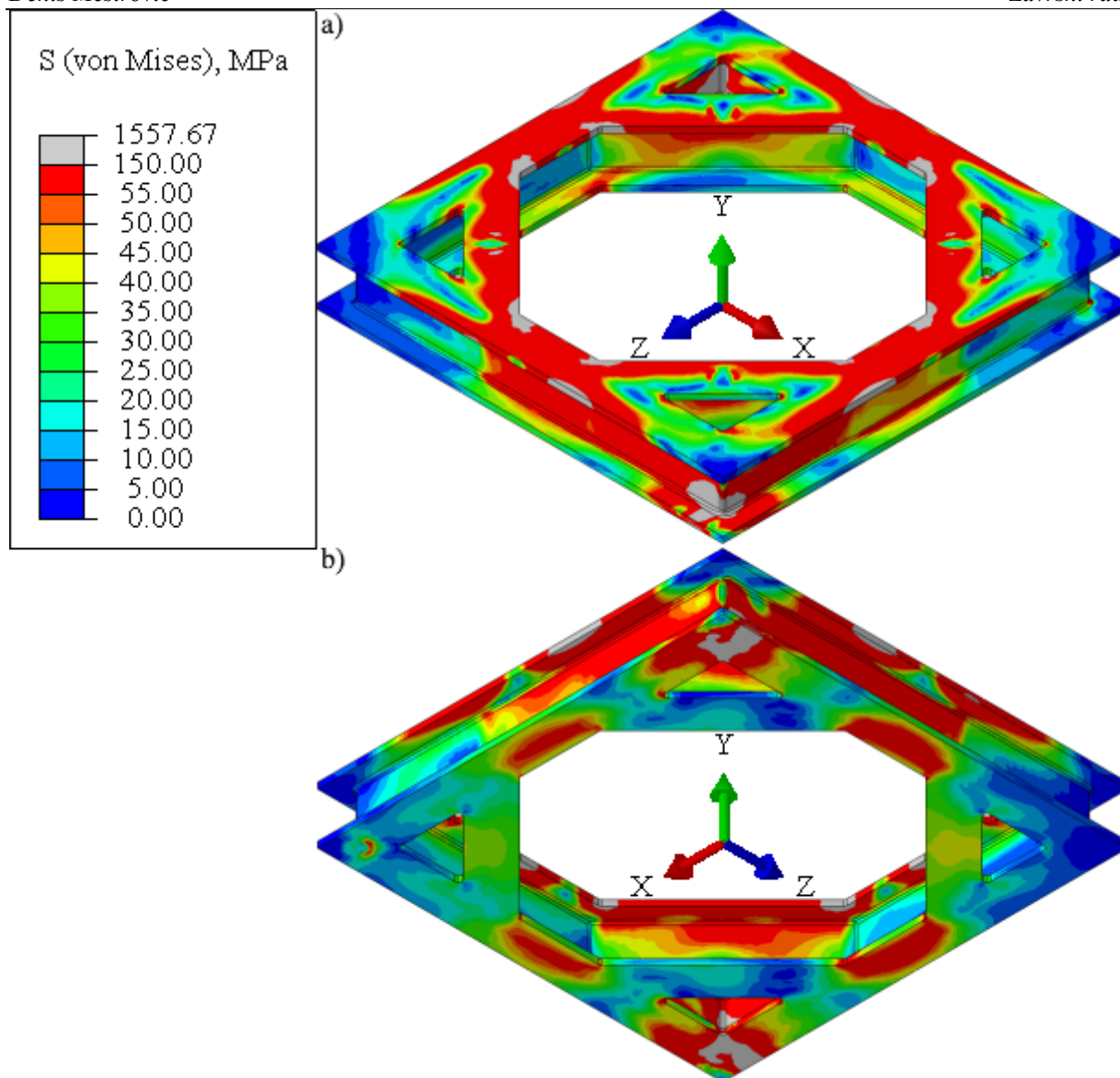
Slika 31. Raspodjela naprezanja za slučaj otkazivanja jednog *twistlocka* – opterećenje zadano na referentnu točku: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo



Slika 32. Raspodjela napreznja za slučaj otkazivanja jednog *twistlocka* – teret modeliran kao kruto tijelo: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo



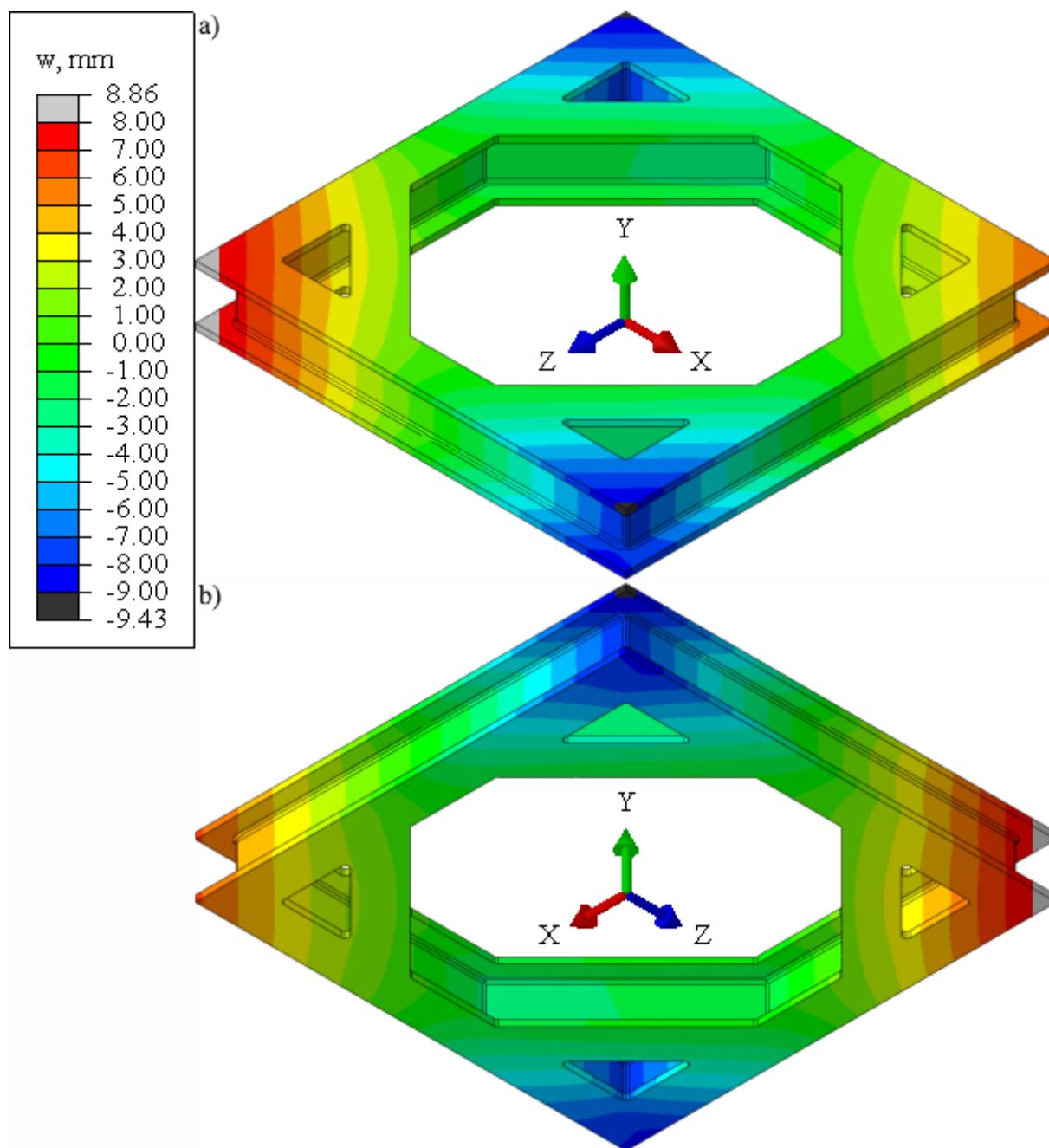
Slika 33. Raspodjela naprezanja za slučaj otkazivanja jednog twistlocka – teret modeliran kao čvrsto tijelo modula elastičnosti 27 GPa: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo



Slika 34. Raspodjela naprezanja za slučaj otkazivanja jednog *twistlocka* – teret modeliran kao čvrsto tijelo modula elastičnosti 2000 GPa: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo

U slučaju otkazivanja *twistlocka* se također javljaju singularnosti s vrlo visokim lokalnim vrijednostima naprezanja za modeliranje tereta putem opterećenja na referentnoj točki, krutim tijelom ili gotovo krutim tijelom. Iz rezultata prikazanih u Tablici 8., uočeno je da su za te tri varijante i vršni progibi gotovo jednaki. Za slučaj otkazivanja *twistlocka* modeliranje tereta kao čvrstog tijela niskog modula elastičnosti najnepovoljniji je slučaj po pitanju zahtjeva krutosti postavljenih na okvir, pa se rezultati te varijante usvajaju kao mjerodavni, te će se i u narednim numeričkim analizama koristiti takav način modeliranja tereta. Teret će u stvarnosti vrlo vjerojatno biti izveden armiranim betonom višeg modula elastičnosti, no zbog ortotropnih svojstava tog materijala i nedostatka informacija o točnom sastavu TCCP-a će se ostati na strani

sigurnosti ovakvim modeliranjem tereta. Raspodjela vertikalnih progiba na okviru za usvojeni model prikazana je na Slici 35.



Slika 35. Raspodjela vertikalnih progiba za slučaj otkazivanja jednog *twistlocka*: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo

Iz rezultata numeričkih analiza može se zaključiti da dolazi do lokalne plastifikacije okvira u slučaju otkazivanja jednog od *twistlockova* i da uvjet krutosti nije zadovoljen, budući da je:

$$|w_{max}|=9,43 \text{ mm} > w_{dop}. \quad (6)$$

Inklinacija tereta provjerena je određivanjem četiriju ravnina, kojima su pokrivene sve kombinacije vrhova donje plohe tereta, te mjerenjem kuta između tako dobivenih ravnina i ravnine $y = 0$. Najviši dobiven kut usvojen je kao maksimalna inklinacija tereta te iznosi:

$$\alpha_{max}=0,3801^{\circ}\ll\alpha_{dop}. \quad (7)$$

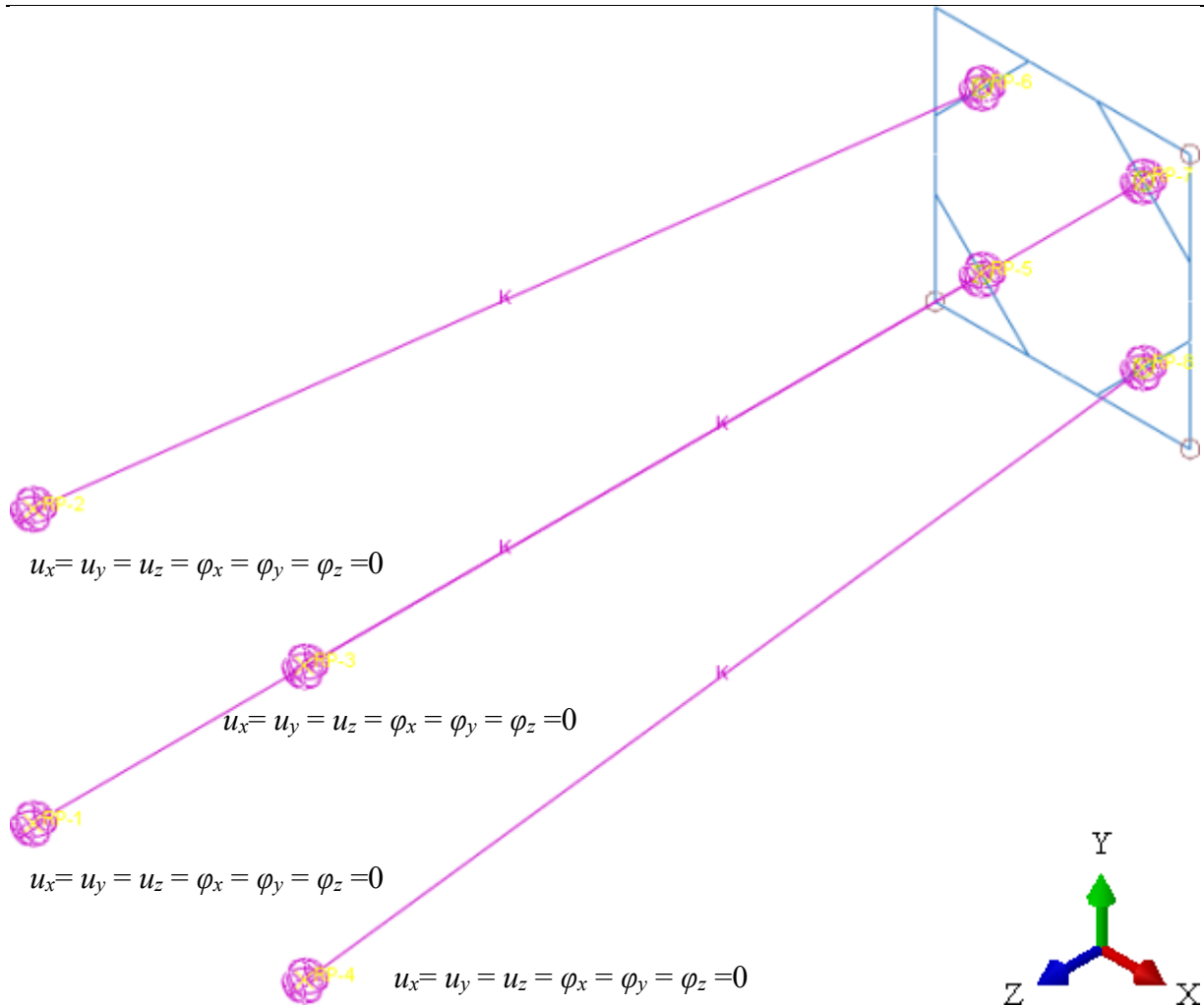
Zahtjev na maksimalnu dopuštenu inklinaciju tereta je zadovoljen, ali je zbog nezadovoljavajuće krutosti potrebno modificirati okvir kako bi bio *single failure proof*. Inklinacija tereta se u nastavku rada više neće promatrati zbog vrlo visoke efektivne sigurnosti dobivene provjerom u ovom poglavlju. Zahvati koji će se izvesti nad geometrijom okvira nisu dostatni da povećaju maksimalnu inklinaciju tereta za više od 25 puta.

4. Odabir idealnog oblika i profila *suspended platea*

U ovom poglavlju bit će prikazane konstrukcijske izmjene na *suspended plateau*, tj. izmjene profila nosača i konfiguracije *twistlockova*. Time će se osigurati da je *suspended plate single failure proof*.

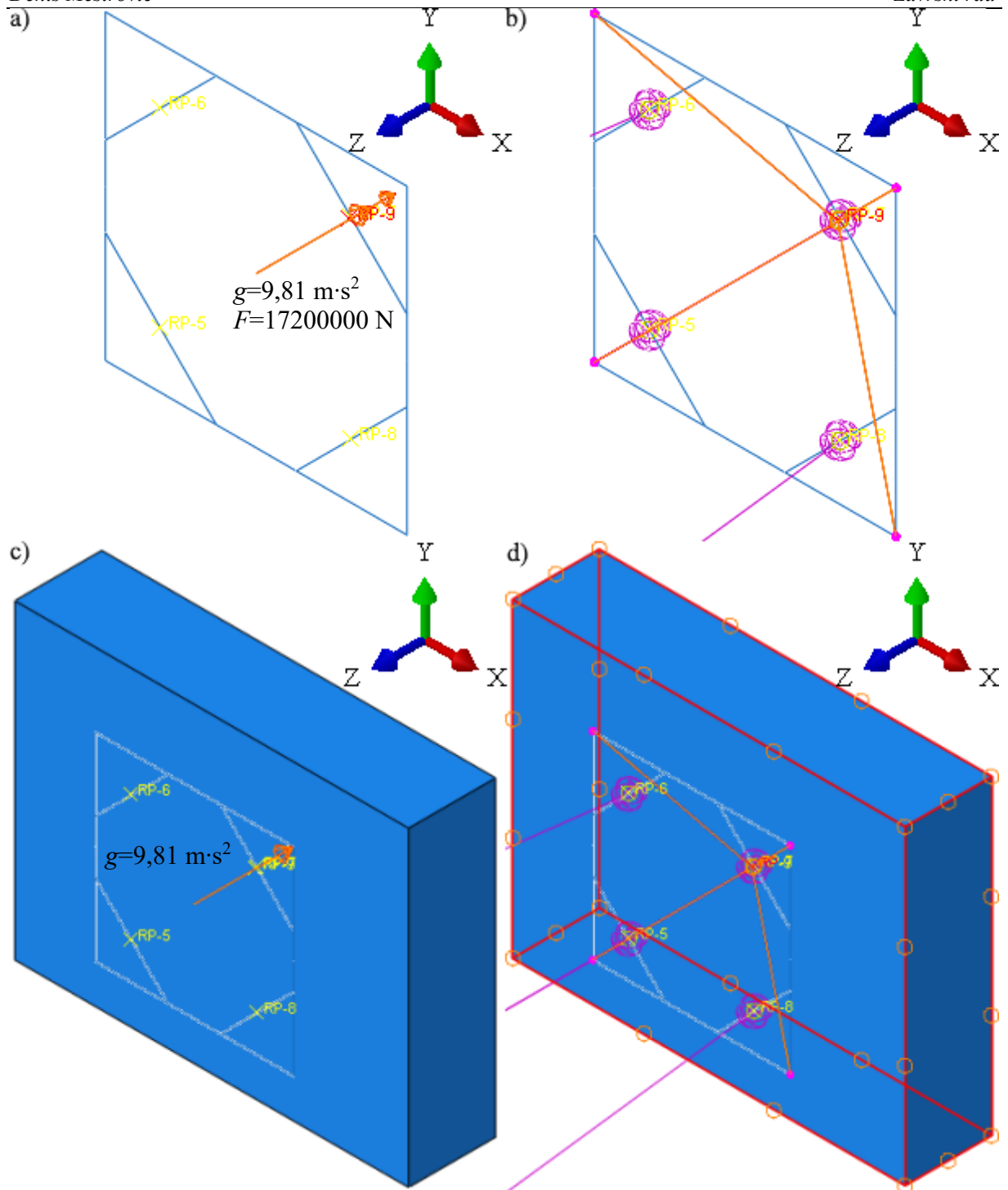
4.1. Prilagodba modela

U prethodnom poglavlju je dokazano da progib okvira u slučaju otkazivanja jednog od *twistlockova* višestruko nadmašuje dopušteni iznos. Imajući na umu da se zamjenom H-profila za kutijasti profil slobodni volumen unutar greda može koristiti za ugradnju mehanizma aktucije *twistlockova*, poželjno je provjeriti pod kojim uvjetima bi se takva modifikacija geometrije mogla izvesti. Standardizirani profili kutijastih nosača nemaju moment tromosti bitno veći od do sada promatranog I-profila, pa nije izgledno da će ijedan od standardiziranih kutijastih profila s do sada promatranom konfiguracijom *twistlockova* zadovoljiti uvjet krutosti. Iz toga proizlazi potreba za promatranjem i uspoređivanjem više različitih profila i slučajeva opterećenja okvira, zbog čega bi bilo poželjno odrediti postupak preliminarnog izbora profila koji bi računski i vremenski bio minimalno zahtjevan. Unatoč niskoj vitkosti okvira, analiza jednodimenzijskim grednim elementima bi zbog brzine izračuna i jednostavnosti izmjene profila mogla biti pogodna za preliminarno određivanje profila, pod pretpostavkom da tako dobiveni rezultati ne odudaraju značajno od rezultata trodimenzijske analize. Budući da je naglasak na brzom iteriranju profila, promatrat će se slučajevi opterećenja silom u referentnoj točki i teretom modeliranim kao kruto tijelo. Generiran je model s istim parametrima mreže kao što su korišteni u poglavlju 2.1. na četvrtinskom modelu. Tako dobiven model okvira je povezan s oprugama, postavljenim kao u poglavlju 3., *tieom* čvora okvira i referentne točke opruge, kao što to prikazuje Slika 36.



Slika 36. Povezivanje opruga i okvira – spoj i rubni uvjeti

Način povezivanja referentne točke na koju djeluje koncentrirana sila, odnosno krutog tijela s teretom je jednak onom opisanom u poglavlju 3., s razlikom da su na okviru odabrani čvorovi umjesto particioniranih kružnih površina. Za slučaj simetričnog opterećenja, načini zadavanja opterećenja i modeliranja tereta prikazani su na Slici 37. Za slučaj otkazivanja *twistlocka*, uklonjen je spoj s jednim od čvorova na okviru. Rezultati tako provedenih numeričkih analiza dani su u Tablici 9.



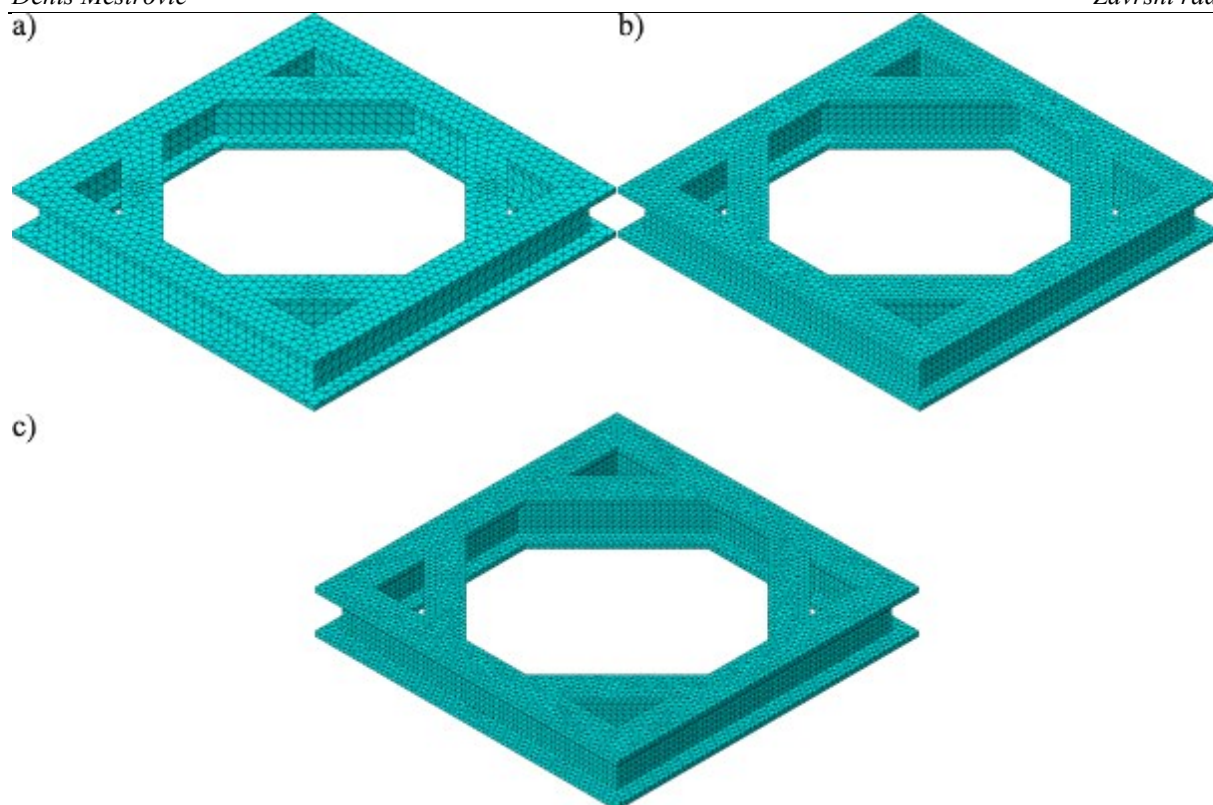
Slika 37. Načini zadavanja opterećenja i modeliranja tereta za okvir diskretiziran jednodimenzijским konačnim elementima: a) i b) – koncentrirana sila na RP, c) i d) – teret kao kruto tijelo

Tablica 9. Naprezanja i vertikalni progibi za jednodimenzijски model opterećen simetrično i na 3 twistlocka u usporedbi s usvojenim trodimenzijским modelom

Varijanta	Simetrično opterećenje		Otkazivanje <i>twistlocka</i>	
	S_{max} , MPa	$ w_{max} $, mm	S_{max} , MPa	$ w_{max} $, mm
Opterećenje zadano na referentnu točku (jednodimenzijски model)	37,33	0,88	99,13	1,46
Teret kao kruto tijelo (jednodimenzijски model)	37,30	0,87	99,13	1,46
Teret kao čvrsto tijelo niskog modula elastičnosti (trodimenzijски model)	173,50	1,17	725,69	9,43

Može se uočiti da su progibi i naprezanja, slično kao što je to opaženo u poglavlju 2., niži od onih vrijednosti dobivenih analizom s trodimenzijским elementima. To je do određene mjere očekivano, jer jednodimenzijски elementi ne mogu ni u idealnom slučaju posve vjerno opisati trodimenzijску konstrukciju, a za nosače niske vitkosti te razlike se dodatno potenciraju. Odstupanja za slučaj otkazivanja *twistlocka* su tako velika da se ovakav model za iteriranje ne može koristiti.

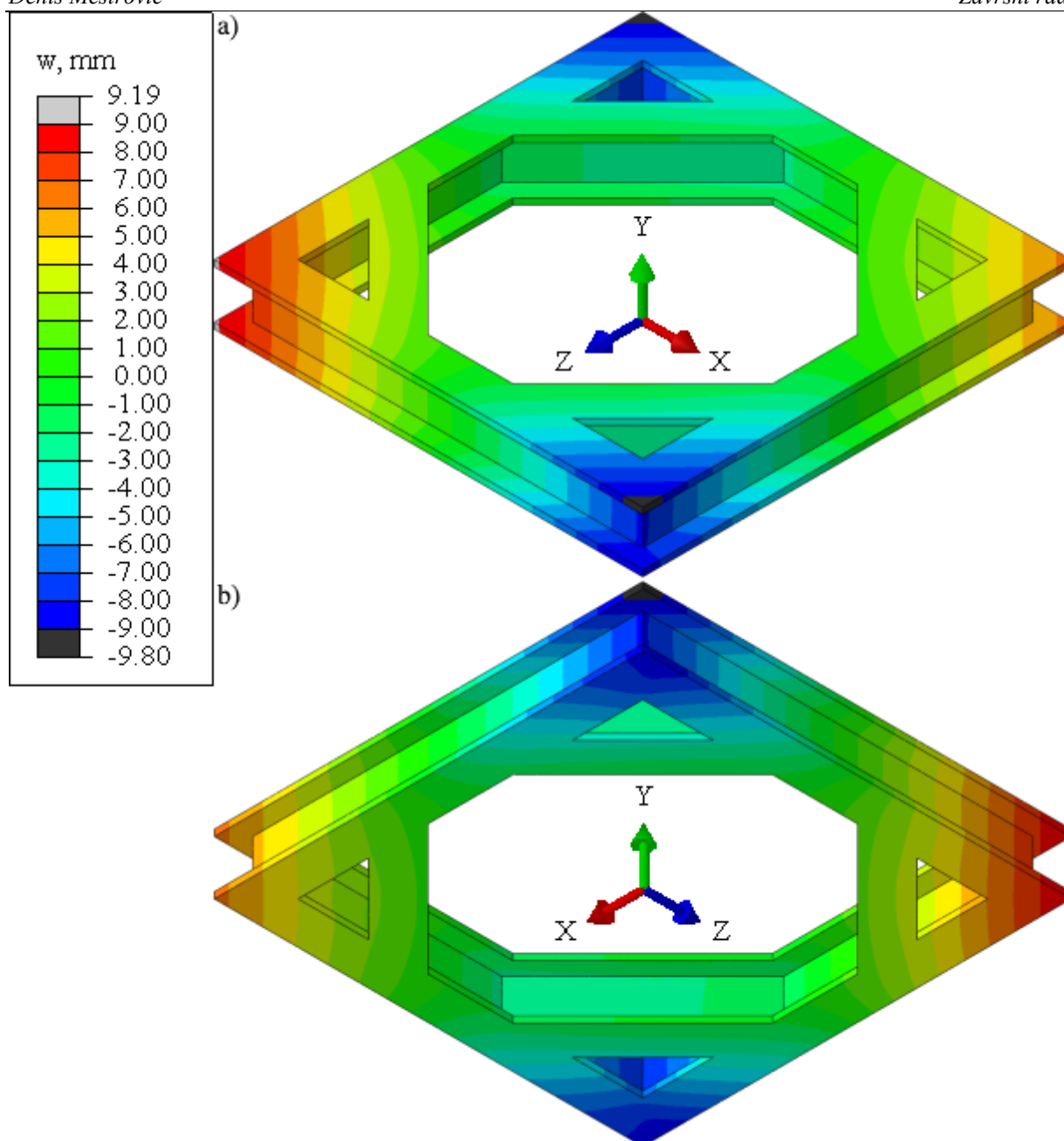
Idući korak predstavlja pojednostavljenje geometrije okvira. Uklanjanjem zaobljenja bi se dobila mreža bez lokalno vrlo malenih ili distorziranih elemenata, što bi omogućilo brže provođenje analize. Međutim, preduvjet za to je da navedena zaobljenja nemaju značajan utjecaj na promatrani maksimalni progib okvira. Kako bi se utvrdila prihvatljivost tih pojednostavljenja u *Solidworksu* je izrađen novi model okvira s originalnim H-profilom bez zaobljenja. Potom je model uvezen u *Abaqus* i njime je zamijenjena instanca okvira korištenog u poglavlju 3.3., čime je osigurana identičnost rubnih uvjeta i mreže tereta za kvalitetniju usporedbu rezultata numeričkih analiza. Provedene su tri numeričke analize s uzastopno gušćim mrežama okvira od 14555, 30164 i 41593 C3D10 elemenata (Slika 38.) i mrežom tereta od 22165 C3D20 elemenata, a rezultati su dani u Tablici 10. i na Slici 39. za mrežu okvira sa 41593 C3D10 elemenata.



Slika 38. Okvir bez zaobljenja diskretiziran sa: a) 14555, b) 30164 i c) 41593 C3D10 elemenata

Tablica 10. Progibi okvira sa i bez zaobljenja za slučaj otkazivanja *twistlocka*

n_{tereta}	Okvir bez zaobljenja		Okvir sa zaobljenjima	
	n_{okvira}	$ w_{max} $, mm	n_{okvira}	$ w_{max} $, mm
22165	14555	9,70	39005	9,43
	30164	9,78		
	41593	9,80		



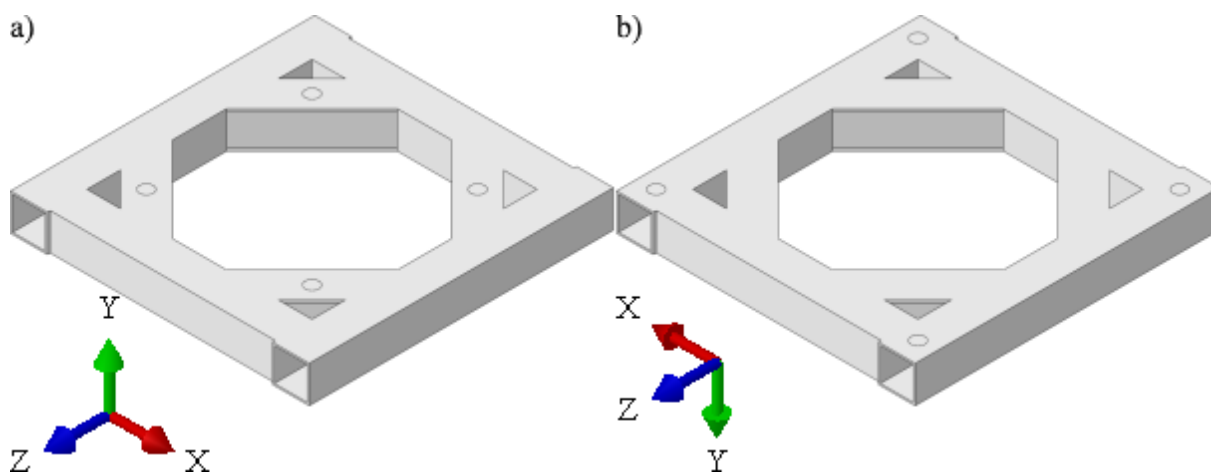
Slika 39. Raspodjela vertikalnih progiba za slučaj otkazivanja jednog *twistlocka* na modelu bez zaobljenja: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo

Usporedi li se raspodjela vertikalnih progiba sa Slike 39. s raspodjelom sa Slike 35., može se uočiti vrlo dobro poklapanje rezultata analiza. Iz rezultata numeričke analize se zaključuje da je modeliranje okvira bez zaobljenja prihvatljivo pojednostavljenje, jer je na strani sigurnosti i istovremeno pojednostavljuje generiranje mreže.

4.2. Konfiguracija *twistlockova* i odabir profila

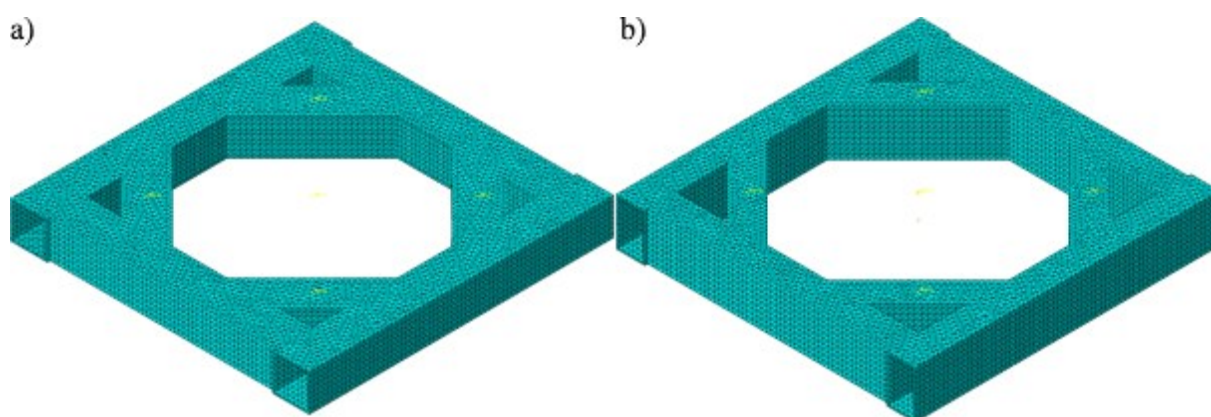
Kako bi se iskoristila prednost bolje pristupačnosti *twistlockova* uporabom kutijastih profila nameće se postavljanje *twistlockova* u unutrašnjost nosača i povezivanje nosača *suspended*

platea sučeonim zavarima. Tako dobiven model prikazan je na Slici 40. na primjeru profila SHS400×20.



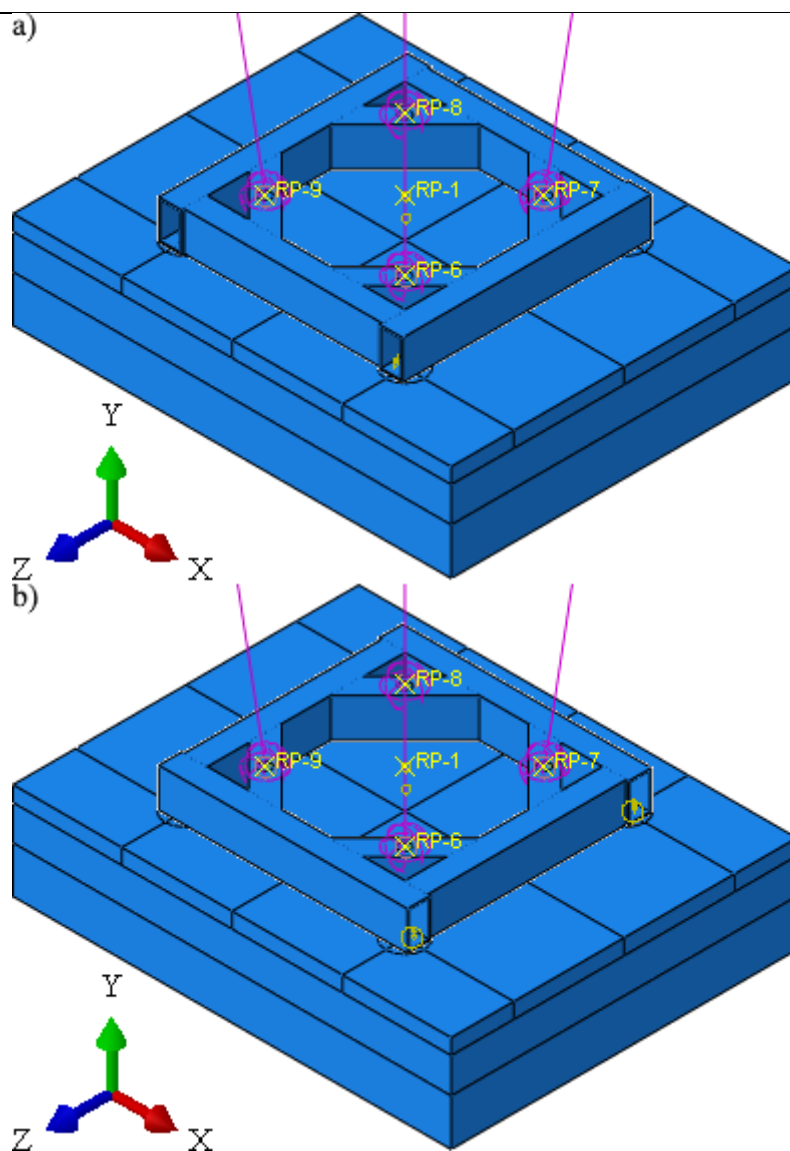
Slika 40. Inicijalna konfiguracija *twistlockova* na *suspended plateu* izvedenom kutijastim profilima: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo

Potrebno je potvrditi da ni sa standardiziranim kutijastim profilima najveće duljinske mase nije moguće zadovoljiti zahtjeve na krutost konstrukcije s četiri *twistlocka* i potvrditi da je i za grede niske vitkosti za promatrani problem povoljan što veći omjer visine i širine profila. Stoga su provedene numeričke analize na profilima SHS400×20 i RHS500×300×20 s identičnim načinom povezivanja okvira i tereta, zadavanja rubnih uvjeta i parametara mreža kao za numeričku analizu okvira s H-profilom bez zaobljenja. Mreže za promatrane profile dane su na Slici 41.

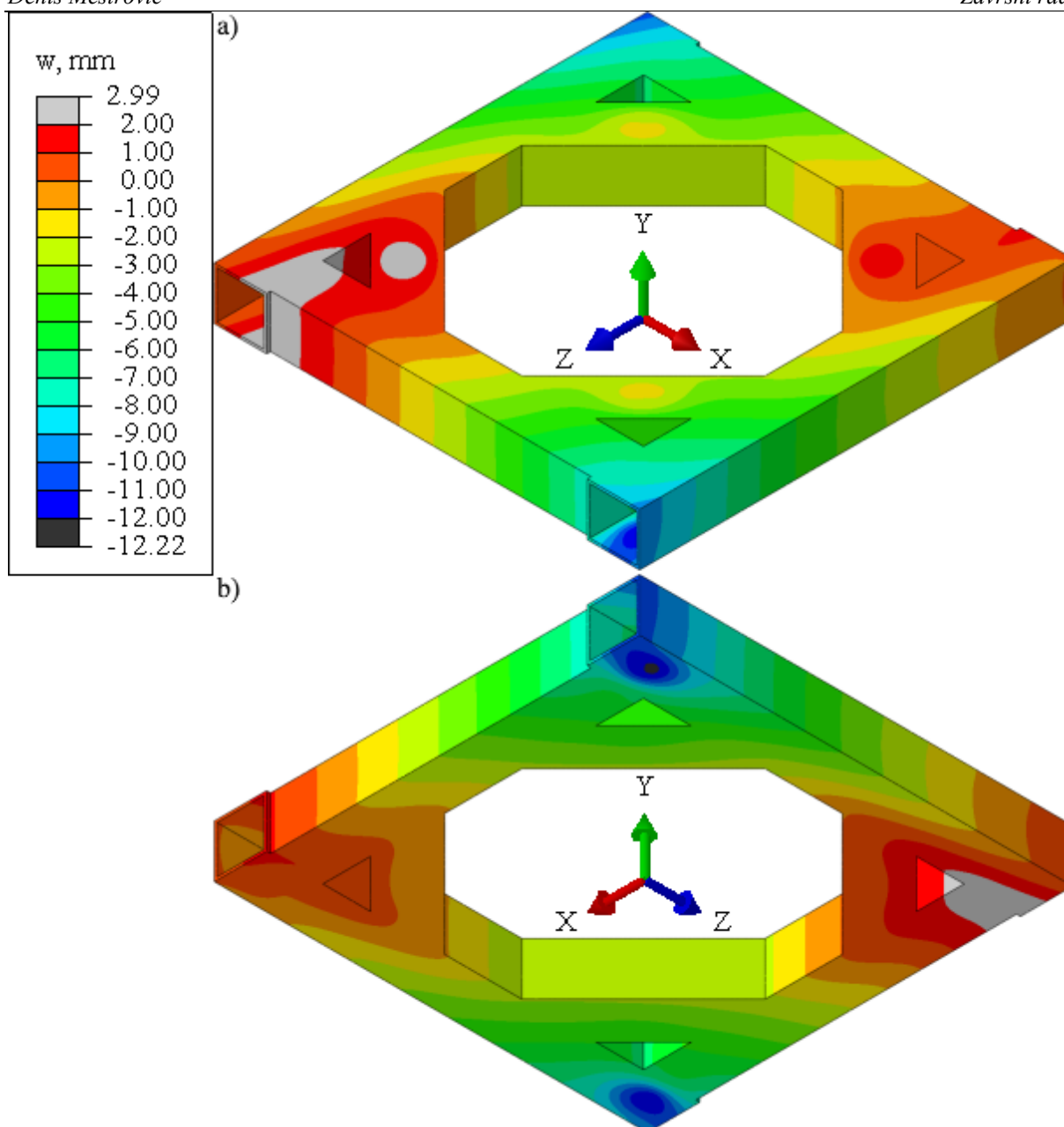


Slika 41. Mreže profila: a) SHS400×20, b) RHS500×300×20

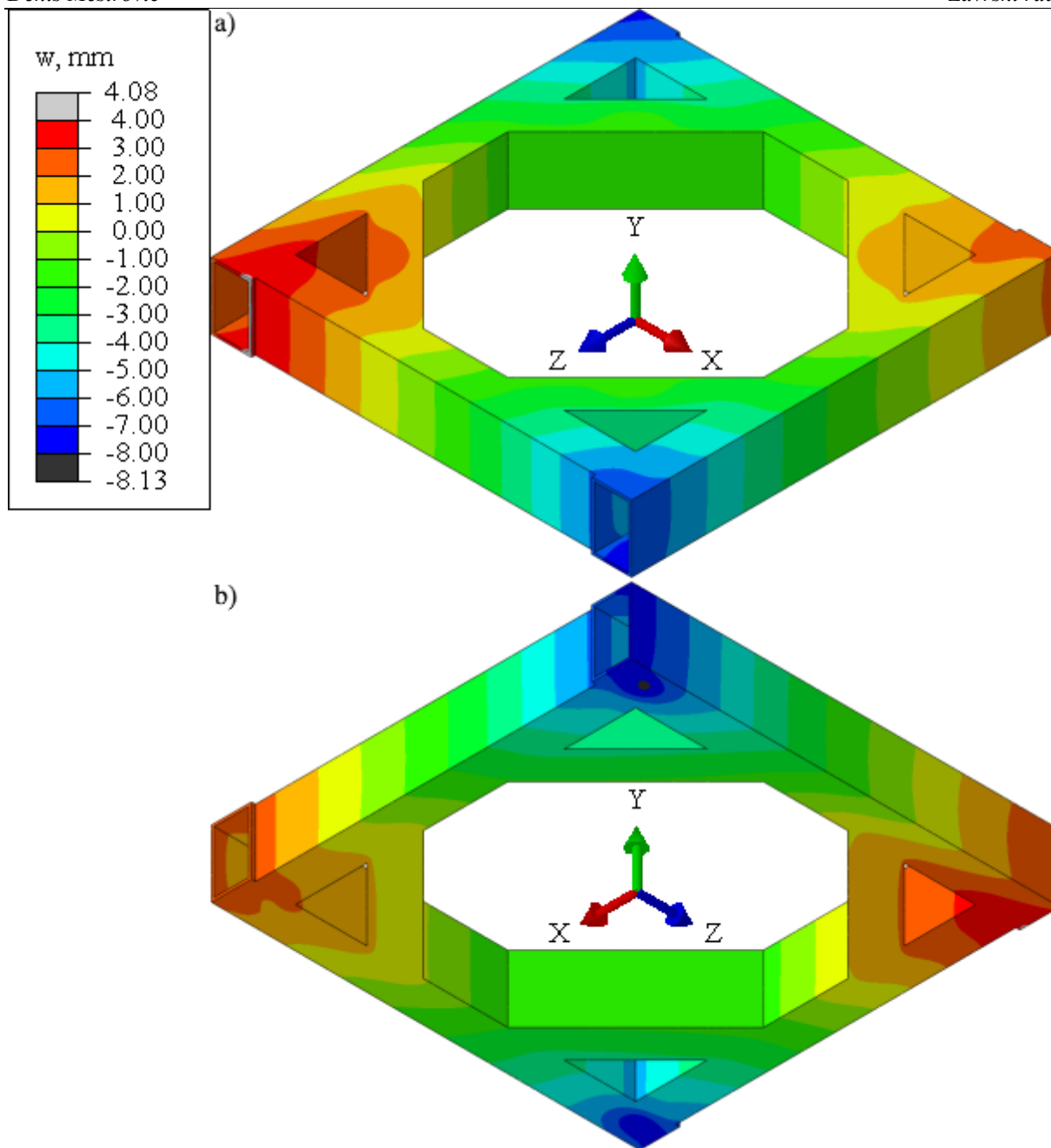
Budući da konfiguracija okvira prikazana na Slici 40. više nije dijagonalno simetrična, na profilu RHS500×300×20 provedena je analiza u kojoj je okvir zakrenut za 90° s obzirom na teret (Slika 42.). Time je provjeren utjecaj orijentacije okvira na rezultate analize. Rezultati navedenih numeričkih analiza uspoređeni su s rezultatima analize okvira s H-profilom bez zaobljenja u Tablici 11. i prikazani na Slikama 43., 44. i 45.



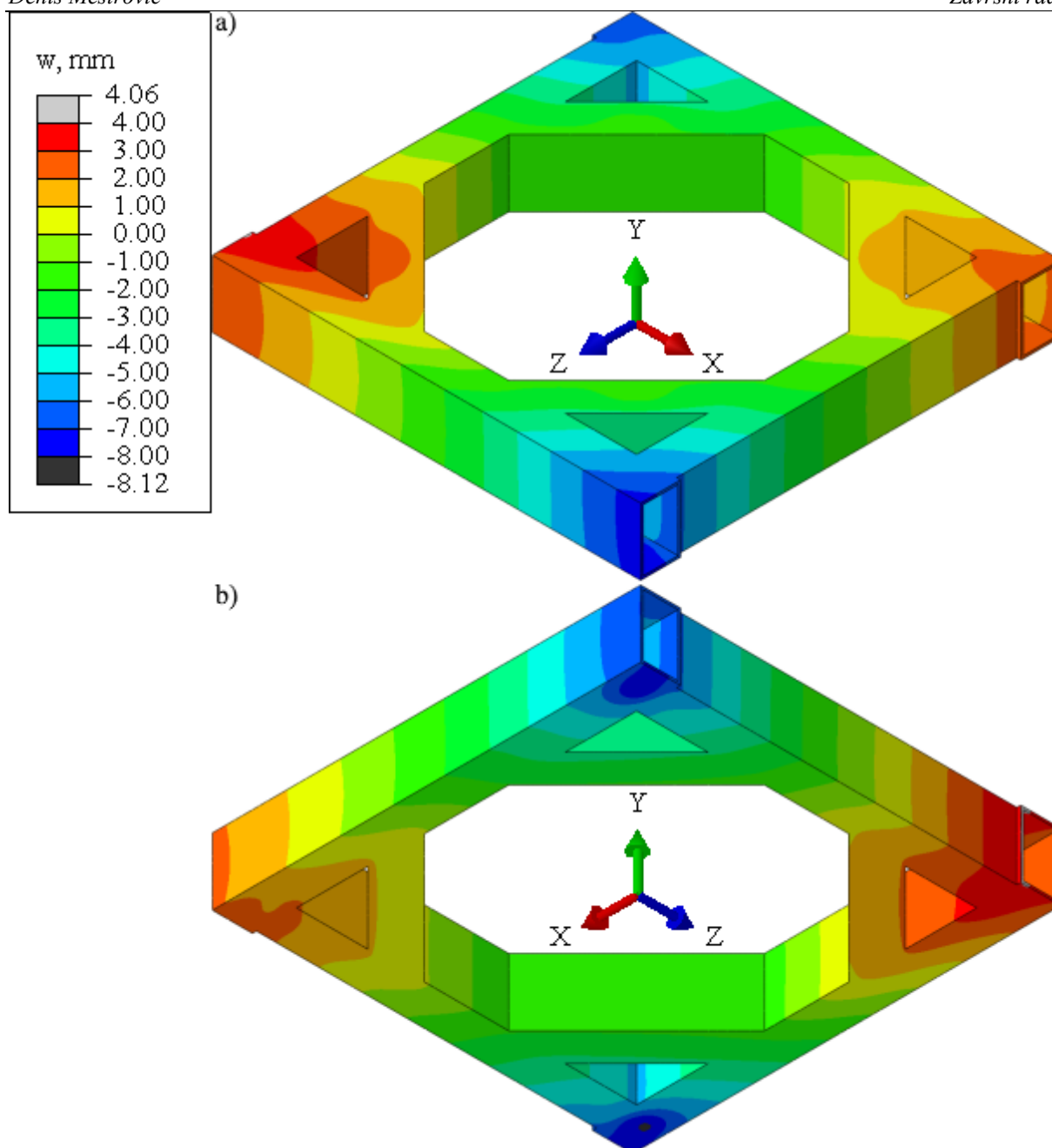
Slika 42. Okvir izveden RHS500×300×20 profilom: a) usvojena orijentacija, b) okvir zakrenut za 90°



Slika 43. Raspodjela vertikalnih progiba za slučaj otkazivanja jednog twistlocka, profil SHS400×20: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo



Slika 44. Raspodjela vertikalnih progiba za slučaj otkazivanja jednog twistlocka, profil RHS500×300×20: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo



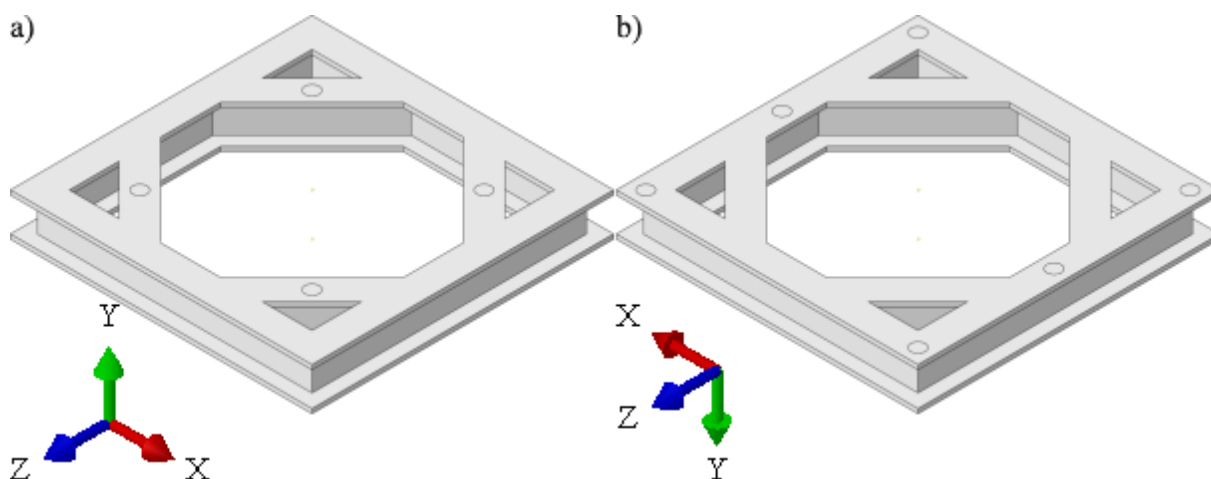
Slika 45. Raspodjela vertikalnih progiba za slučaj otkazivanja jednog twistlocka, profil RHS500×300×20 zakrenut za 90°: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo

Tablica 11. Progibi okvira u ovisnosti o izboru profila i orijentaciji tereta – konfiguracija s četiri *twistlocka*

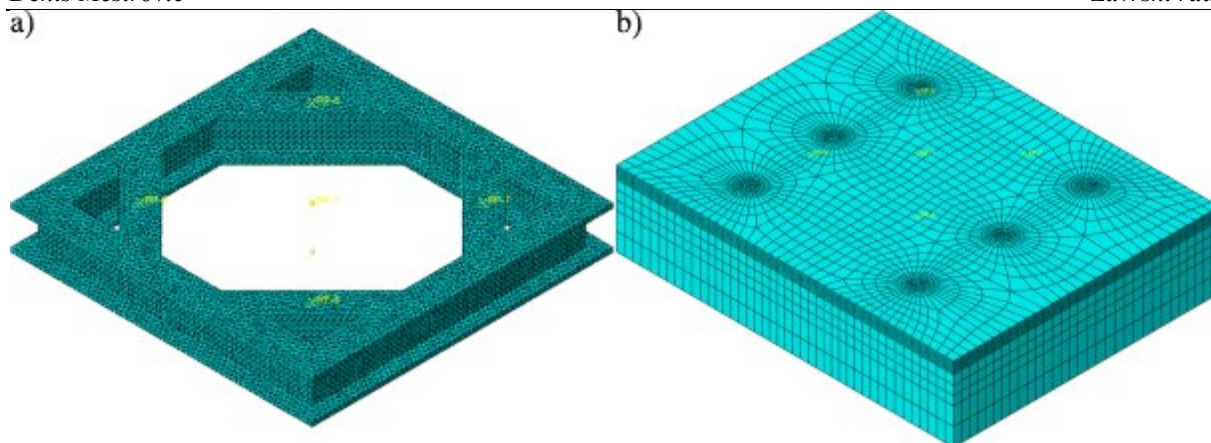
Profil	n_{tereta}	n_{okvira}	$ W_{max} $, mm	$ W_{max90^\circ} $, mm
HE400×299	22165	41593	9,80	/
SHS400×20		59085	12,22	/
RHS500×300×20		60330	8,13	8,12

Rezultati numeričkih analiza potvrđuju da se uz jednak opseg profila ispravno orijentiranim pravokutnim profilom postiže veća krutost u odnosu na kvadratni profil, zahvaljujući čemu se SHS-profilu ne moraju uzimati u obzir u narednim analizama. Utjecaj zakreta okvira na maksimalni progib konstrukcije je gotovo potpuno zanemariv, ali će se zadržati orijentacija za koju je utvrđeno da je maksimalni progib viši. Također je potvrđeno da se ni uporabom profila najveće duljinske mase ne može zadovoljiti zahtjev krutosti konstrukcije okvira u konfiguraciji s četiri *twistlocka*.

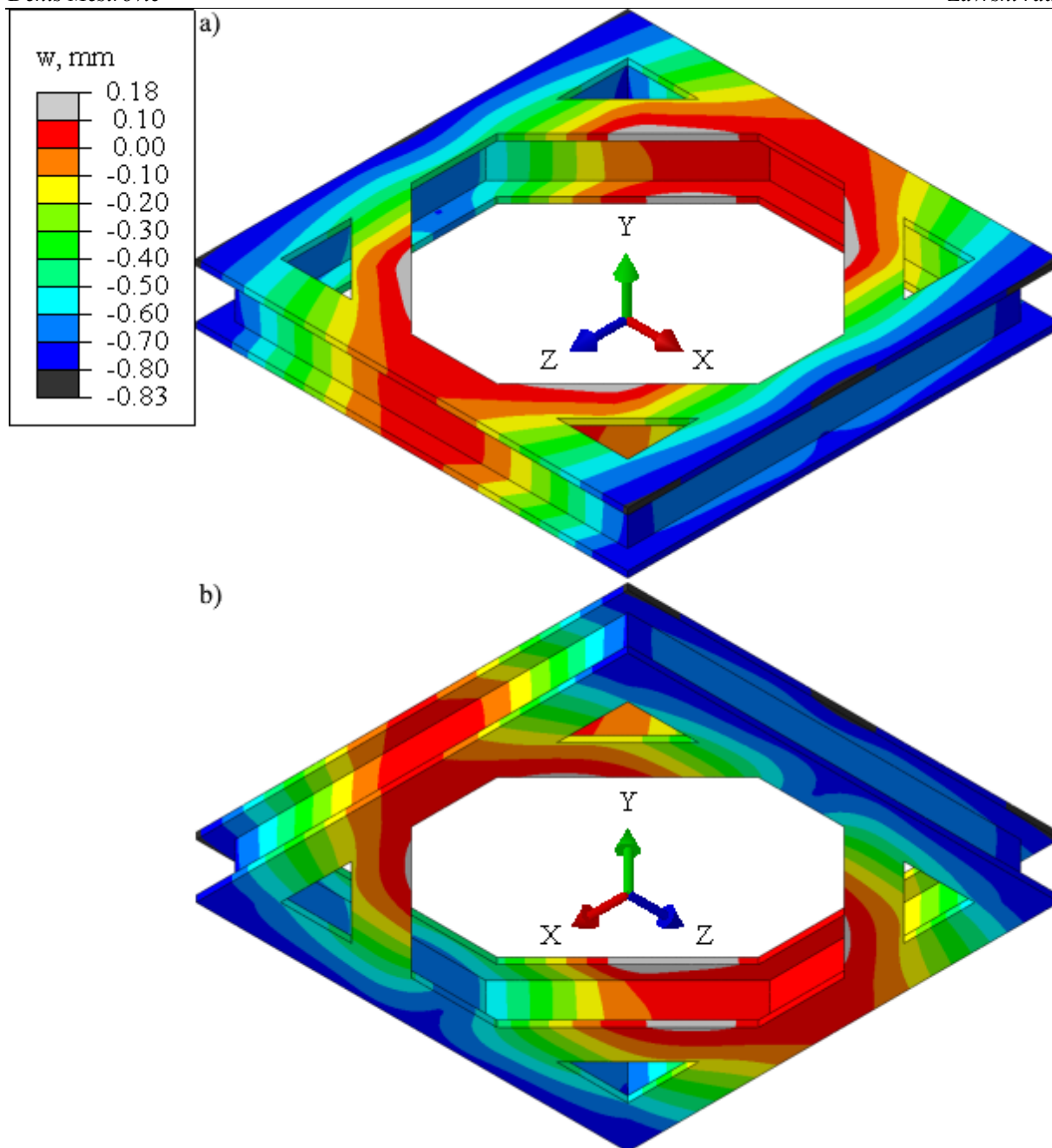
Uz zadržavanje načelno istog oblika okvira, dodatni *twistlockovi* se moraju ugraditi u parovima. Najsvrsishodnije takvo rješenje, koje bi zadržalo relativno dobru pristupačnost mehanizmu za aktuciju *twistlockova*, jest pozicioniranje po jednog *twistlocka* na sredinu grede na čijim su rubovima već ugrađeni *twistlockovi*. Potrebno je utvrditi koji bi slučaj otkazivanja *twistlocka* za tako dobivenu konfiguraciju danu na Slici 46. bio kritičniji. Ta analiza će se provesti s profilom HE400×299, kako bi se dobiveni rezultati mogli usporediti s konfiguracijom sa četiri *twistlocka*. Za analizu će se koristiti identični parametri mreže okvira i tereta kao i u poglavlju 4.1., uz dodatne particionirane površine, odnosno regije za dodatna dva *twistlocka* (Slika 47.). Time je broj elemenata mreže okvira neznatno narastao na 42554 CRD10 elemenata, dok je broj elemenata mreže tereta narastao na 37141 C3D20 elemenata. Rezultati analize prikazani su u Tablici 12 i na Slikama 48., 49. i 50.



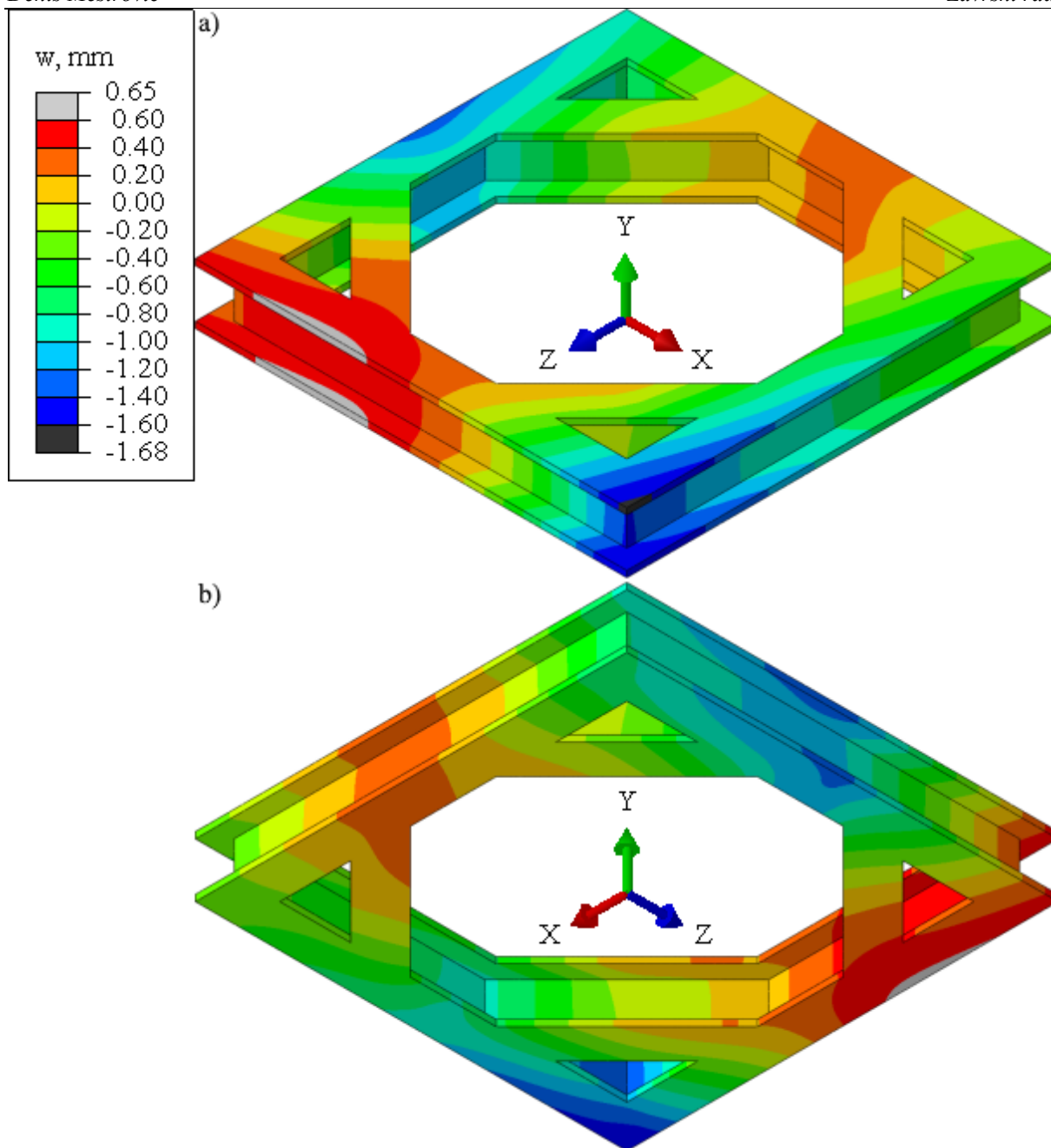
Slika 46. Konfiguracija *suspended platea* sa šest *twistlockova*

Slika 47. Mreže za konfiguraciju sa šest *twistlockova*: a) okvir, b) teretTablica 12. Progibi okvira u ovisnosti o konfiguraciji opterećenja – konfiguracija sa šest *twistlockova*

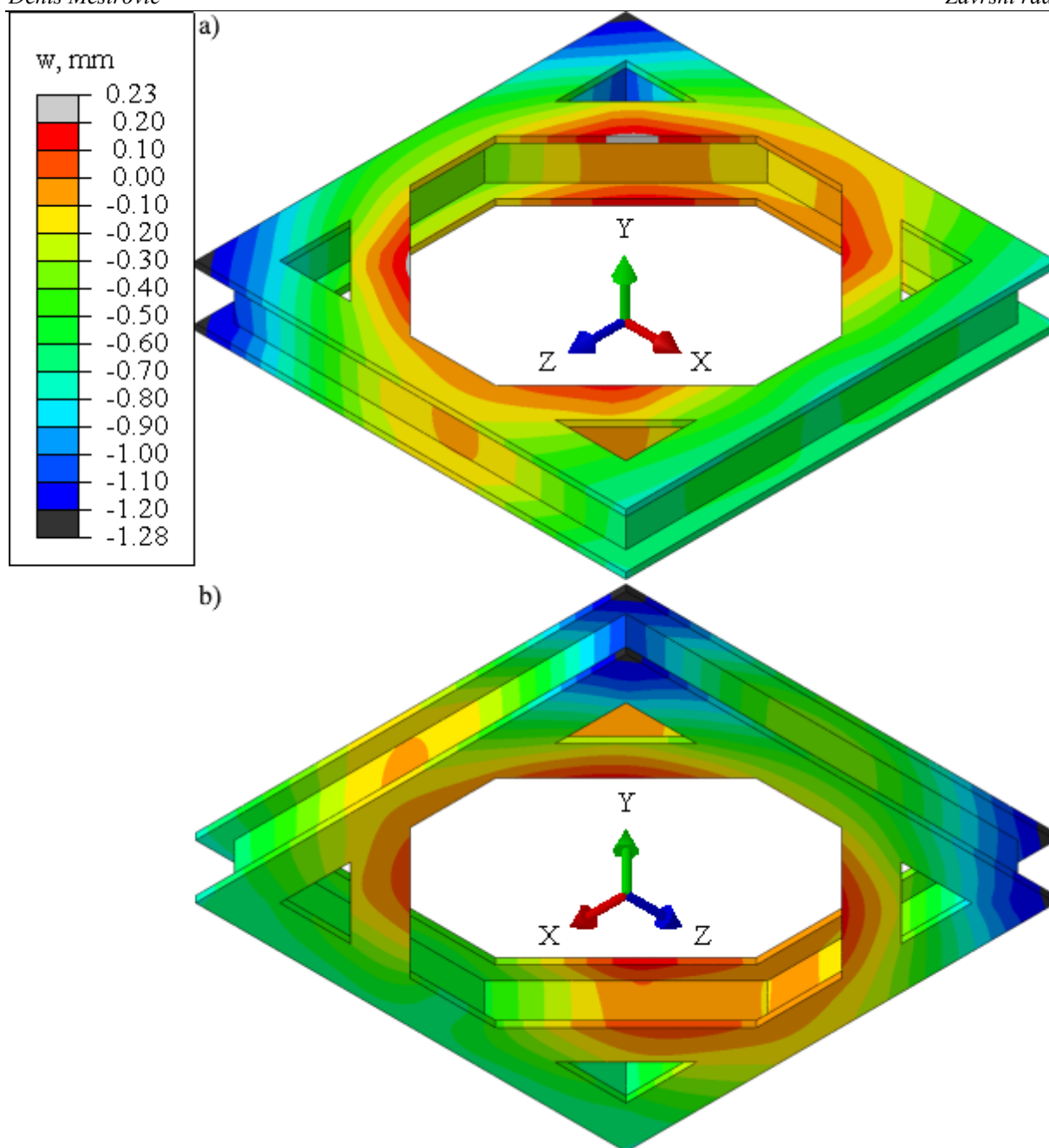
Konfiguracija opterećenja		Simetrično na šest <i>twistlockova</i>	Otkazivanje rubnog <i>twistlocka</i>	Otkazivanje srednjeg <i>twistlocka</i>
n_{tereta}	n_{okvira}	$ w_{max} $, mm	$ w_{max} $, mm	$ w_{max} $, mm
37141	42554	0,83	1,68	1,28



Slika 48. Raspodjela vertikalnih progiba za profil HE400×299 opterećen simetrično na šest *twistlockova*: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo



Slika 49. Raspodjela vertikalnih progiba za profil HE400×299 u konfiguraciji sa šest *twistlockova* za slučaj otkazivanja rubnog *twistlocka*: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo



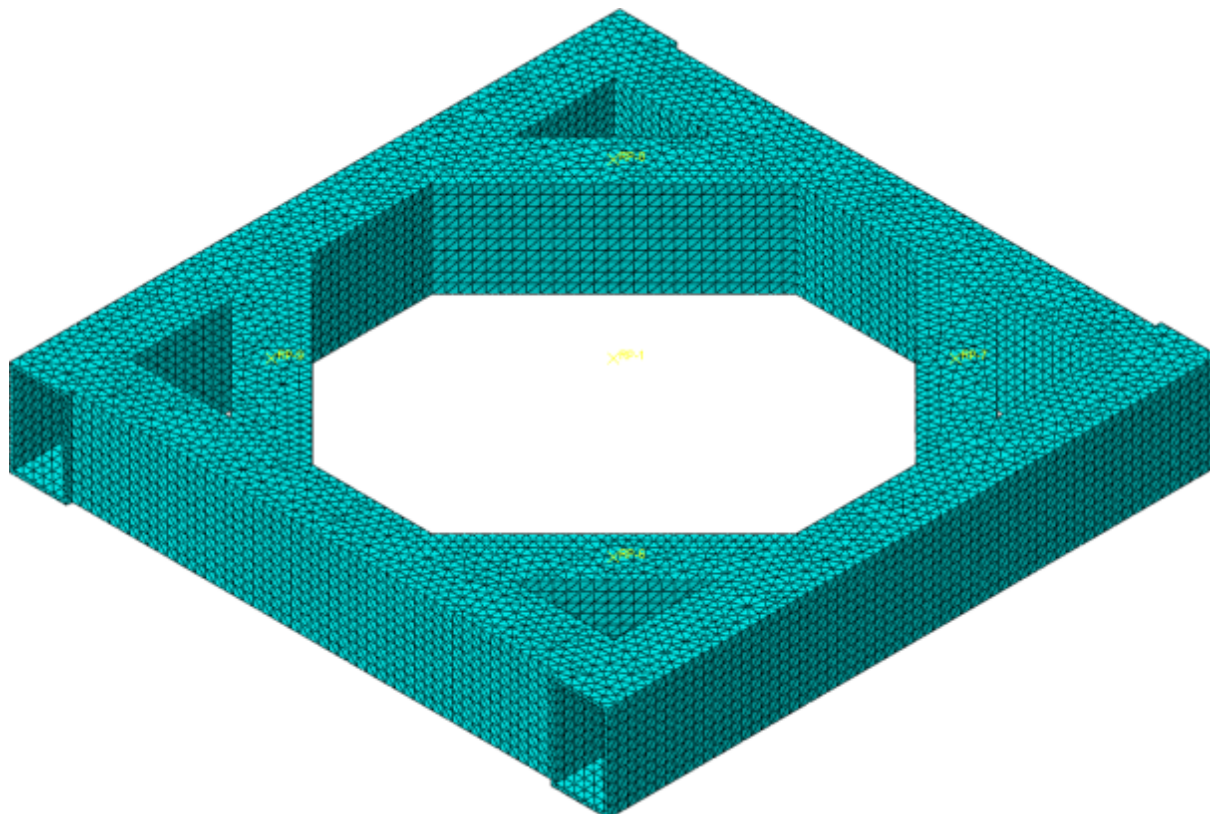
Slika 50. Raspodjela vertikalnih progiba za profil HE400×299 u konfiguraciji sa šest *twistlockova* za slučaj otkazivanja središnjeg *twistlocka*: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo

Može se zaključiti da uporabom dvaju dodatnih *twistlockova* konstrukcija *suspended platea* postiže bitno veću krutost za slučajeve otkazivanja jednog od *twistlockova*, a maksimalni progibi za simetrično opterećenje su također niži. Kritična konfiguracija opterećenja *suspended platea* sa šest *twistlockova* je slučaj otkazivanja rubnog *twistlocka*.

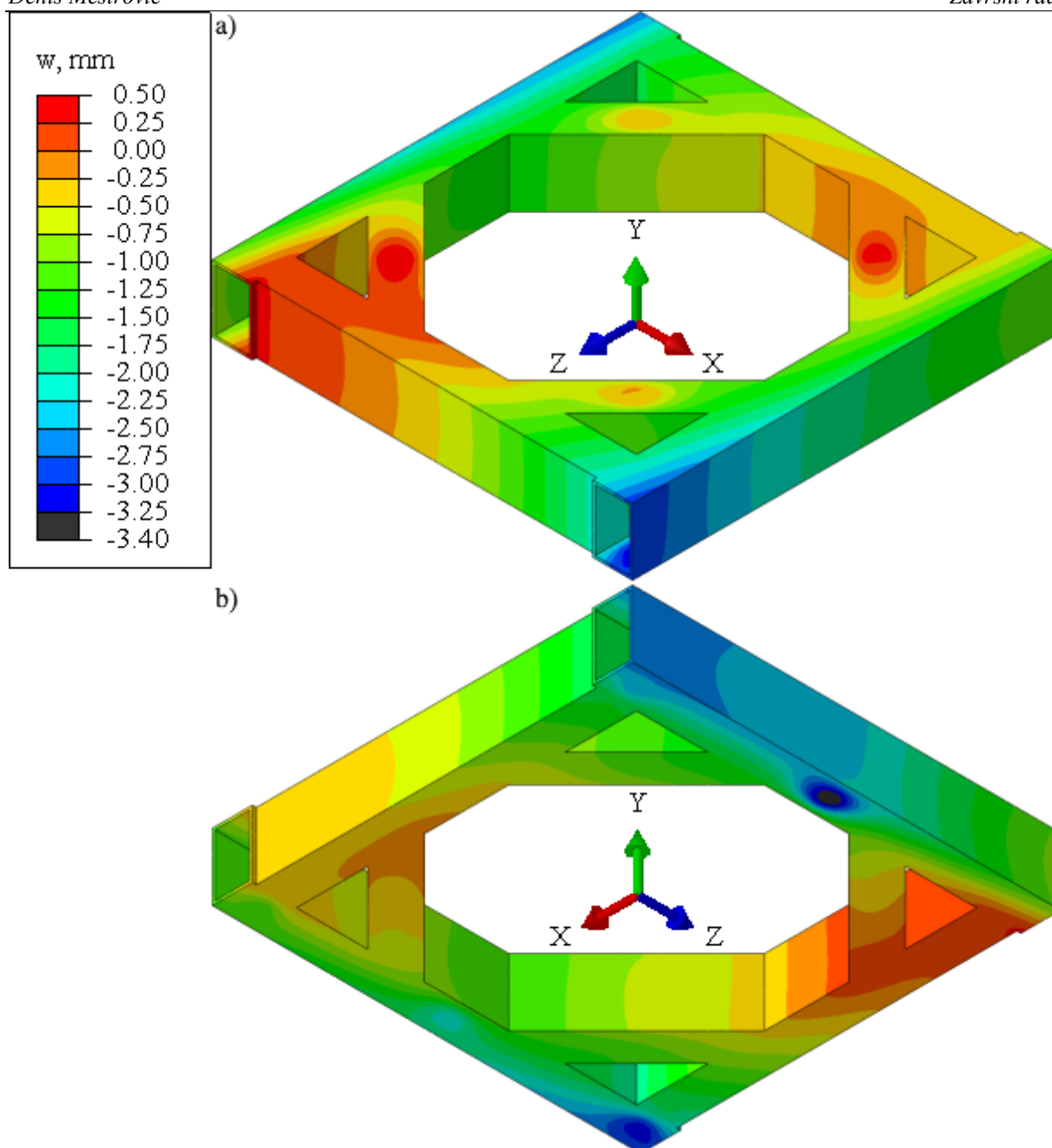
Iz rezultata numeričke analize može se zaključiti da je *suspended plate* izveden s I-profilima u konfiguraciji sa šest *twistlockova* *single failure proof*, jer je:

$$|w_{max}| = 1,68 \text{ mm} < w_{dop}. \quad (8)$$

Potrebno je još utvrditi može li se koristiti kutijasti profil kako bi se u njegovoj unutrašnjosti mogao ugraditi mehanizam za aktivaciju *twistlockova*. Iz do sada provedenih analiza poznata je kritična orijentacija i kritični slučaj otkazivanja *twistlocka*, pa je samo za taj slučaj potrebna provedba numeričke simulacije. Model *suspended platea* s RHS500×300×20 profilom (Slika 42. a)) u konfiguraciji sa šest *twistlockova* diskretiziran je s 60285 C3D10 elemenata (Slika 51.). Zadržana je mreža tereta s 37141 C3D20 elemenata (Slika 47. b)). Raspodjela vertikalnih progiba prikazana je na Slici 52.



Slika 51. Mreža za konfiguraciju sa šest *twistlockova* i profil RHS500×300×20



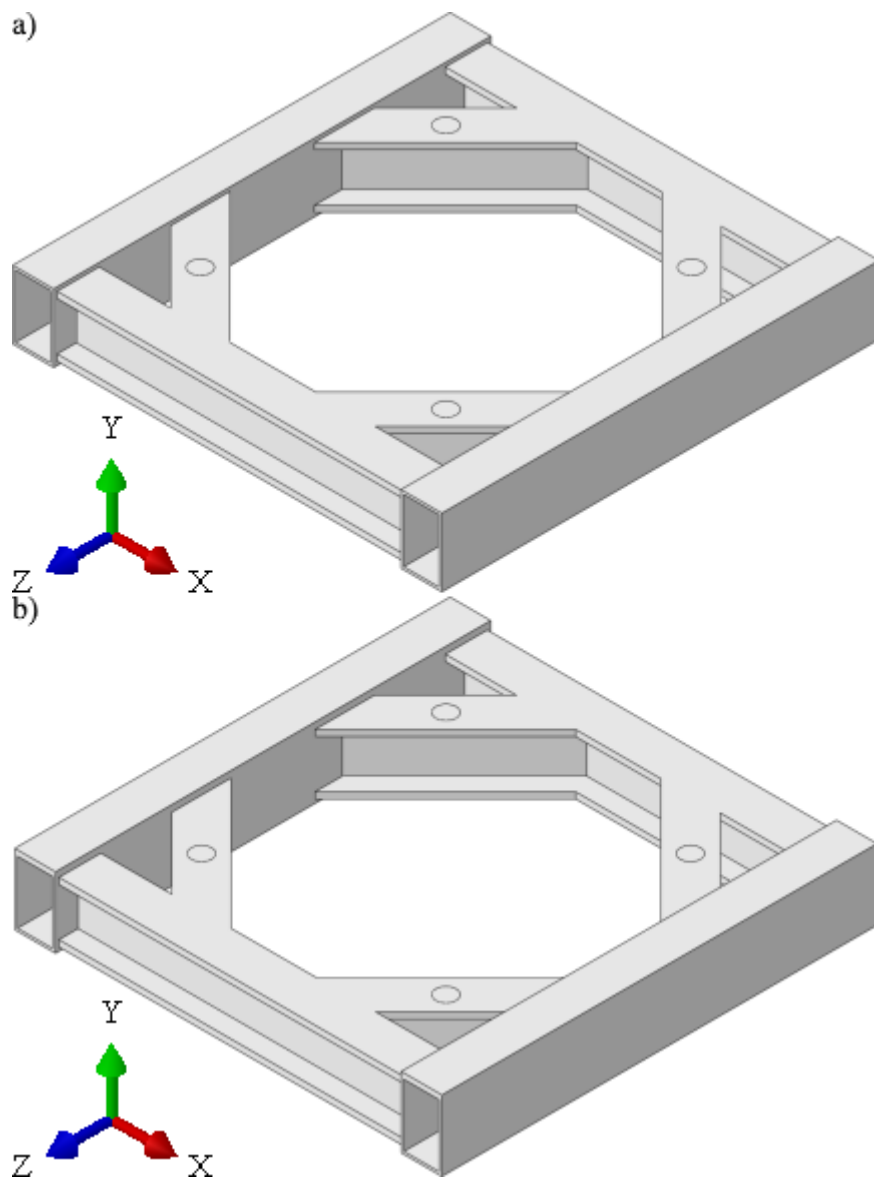
Slika 52. Raspodjela vertikalnih progiba za profil HE400×299 u konfiguraciji sa šest *twistlockova* za slučaj otkazivanja središnjeg *twistlocka*: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo

Može se zaključiti da bez dodatnih modifikacija ova izvedba *suspended platea* ne zadovoljava uvjet krutosti za slučaj otkazivanja *twistlocka*, jer je:

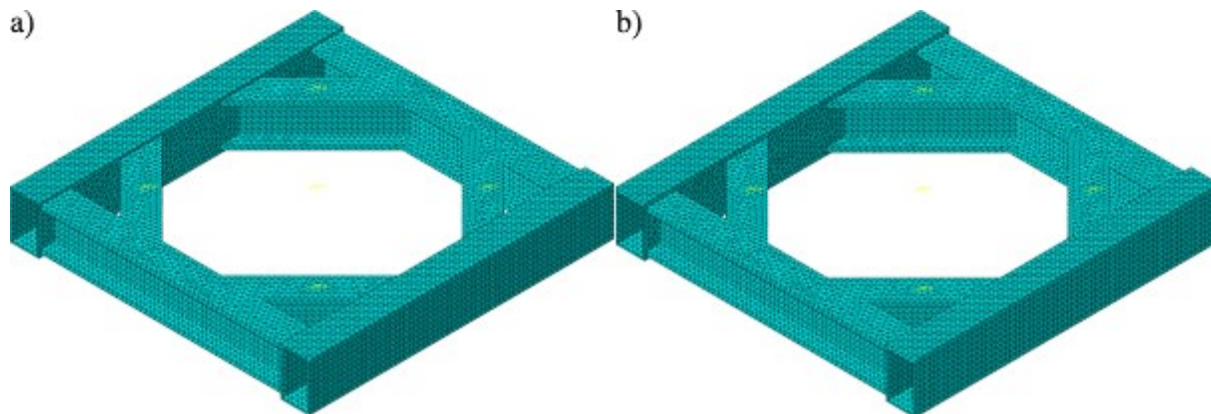
$$|w_{max}|=3,40 \text{ mm} > w_{dop}. \quad (9)$$

Analizirane su još dvije modificirane varijante. U prvoj je RHS-profil zamijenjen originalnim I-profilom na poprečnim gredama i ukrutama (Slika 53. a)), dok su u drugoj dodane i dvije ploče debljine 20 mm na gornju površinu preostalih kutijastih nosača (Slika 53. b)). Model prve varijante diskretiziran je sa 48879 C3D10 elemenata, dok je model druge varijante diskretiziran

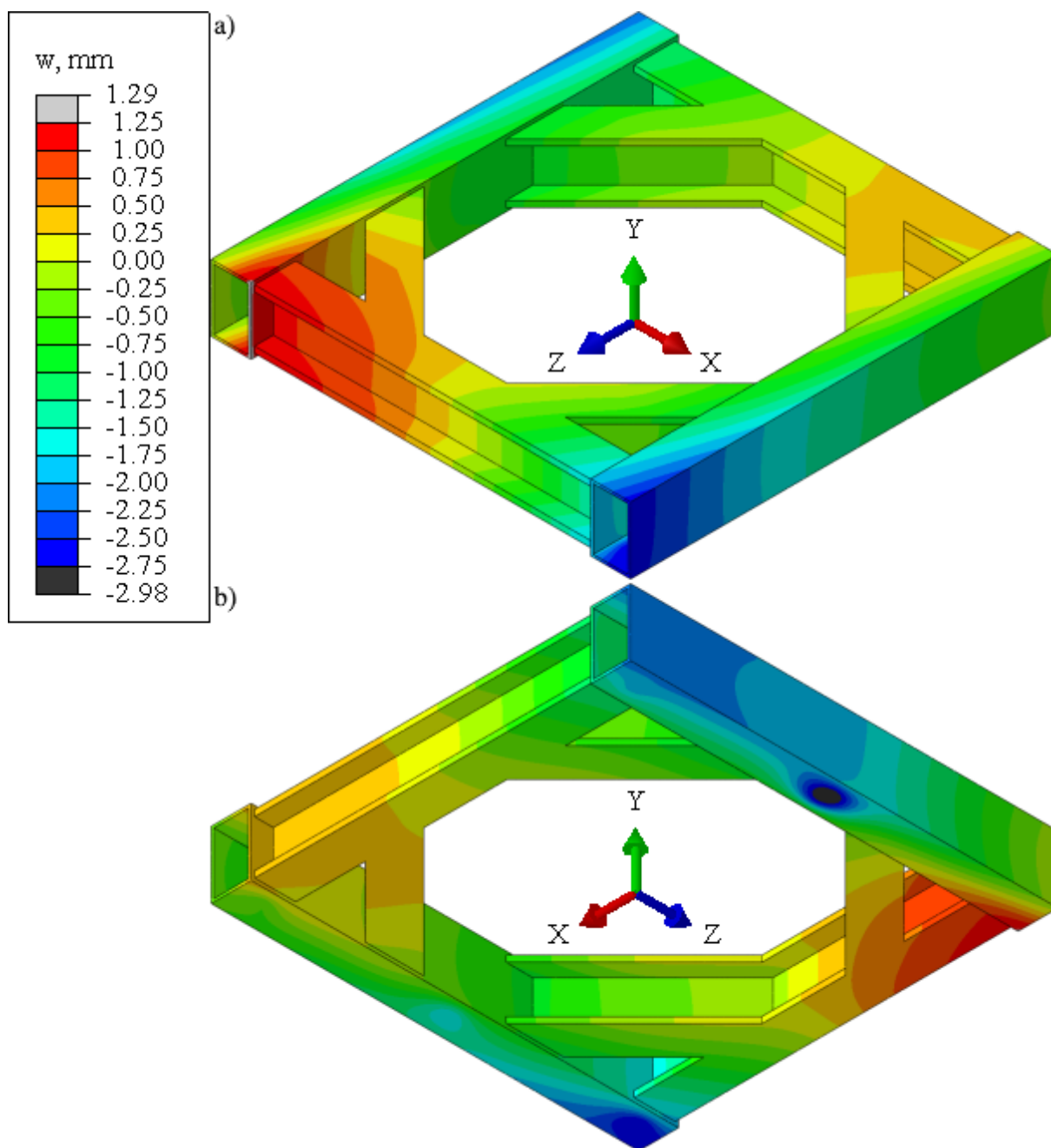
sa 48540 C3D10 elemenata (Slika 54.). Rezultati numeričkih analiza za te dvije varijante prikazani su na Slikama 55. i 56.



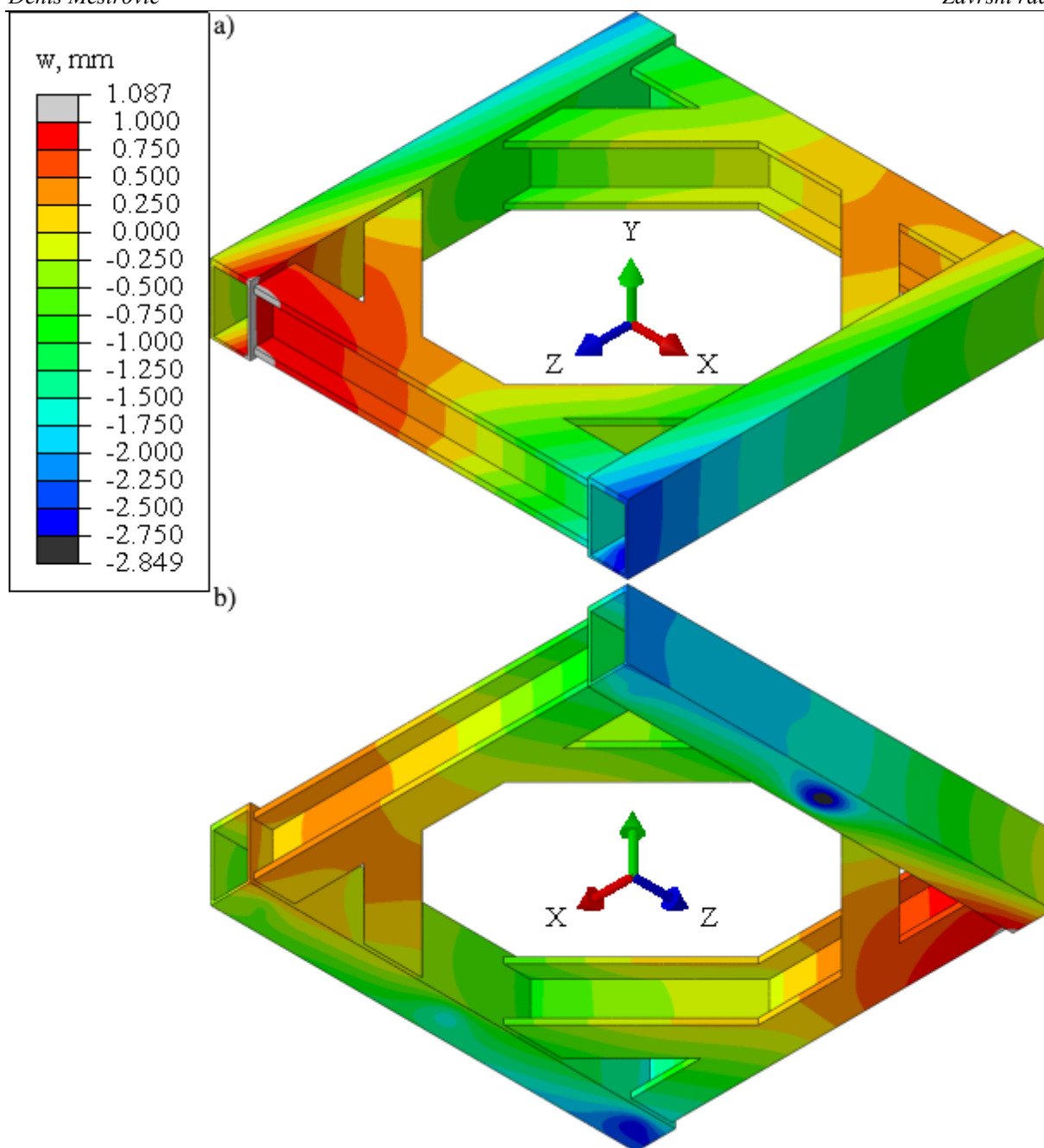
Slika 53. Modificirani *suspended plate*: a) prva varijanta, b) druga varijanta



Slika 54. Mreža modificiranog *suspended platea*: a) prva varijanta, b) druga varijanta



Slika 55. Raspodjela vertikalnih progiba za prvu varijantu modificiranog *suspended platea*:
a) pogled odozgo, b) pogled odozdo



Slika 56. Raspodjela vertikalnih progiba za drugu varijantu modificiranog *suspended platea*: a) pogled odozgo, b) pogled odozdo

Iz rezultata numeričkih analiza može se zaključiti da druga varijanta zadovoljava uvjet krutosti u kontekstu *single failure proof* konstruiranja, jer je:

$$|w_{max}| = 2,849 < w_{dop} \quad (10)$$

Vršni vertikalni progib je gotovo jednak dopuštenoj vrijednosti, pa nema potrebe za dodatnim iteriranjem debljine ploče. Izvedba *suspended platea* u konfiguraciji sa šest *twistlockova* s kutijastim nosačima za *twistlockove*, I-profilima korištenim za poprečne nosače i ukrute i pločama debljine 20 mm usvaja se kao alternativno rješenje promatranog problema.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljena je numerička analiza krutosti metodom konačnih elemenata i optimiranje ploče za precizni prihvat alata mosnog granika HROC predviđenog za ugradnju u nuklearno postrojenje DONES.

U programskom paketu *Abaqus* provedene su numeričke analize kojima je najprije verificiran proračunski model usporedbom s preliminarnim proračunom *suspended platea*. Potom je model prilagođen analiziranju otkazivanja jednog *twistlocka*. Pri tome je posebna pažnja obraćena na interakciju tereta i okvira, a u konačnici je usvojeno modeliranje tereta kao čvrsto tijelo niskog modula elastičnosti.

Utvrđeno je da u originalnoj konfiguraciji *suspended plate* nije *single failure proof*, jer za slučaj otkazivanja jednog *twistlocka* vertikalni progibi nadmašuju dopuštenu vrijednost. *Suspended plate* je potom modificiran dodavanjem po jednog *twistlocka* između već postojećih parova.

Utvrđeno je da tako modificiran *suspended plate* u konfiguraciji sa šest *twistlockova* zadovoljava uvjet krutosti i u slučaju otkazivanja jednog od *twistlockova*. Tako dobiven model *suspended platea* predložen je kao jedno od rješenja kojim bi se osiguralo da je *suspended plate single failure proof*.

S ciljem eliminacije vanjskog kućišta za mehanizam aktucije *twistlockova* model *suspended platea* je dodatno modificiran zamjenom dvaju nosača s I-profilom nosačima s kutijastim profilom na čijoj gornjoj strani su zavarene ploče debljine 20 mm. Tako je dobiveno alternativno rješenje za osiguranje ispunjenja *single failure proof* kriterija *suspended platea*.

LITERATURA

- [1] <https://ifmifdone.org/>, zadnji put pristupljeno 17. XII. 2020.
- [2] <https://www.iter.org/>, zadnji put pristupljeno 17. XII. 2020.
- [3] The IFMIF-DONES project: preliminary engineering design, A. Ibarra *et al*, 2018., Nucl. Fusion 58
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/DEMONstration_Power_Station, zadnji put pristupljeno 18. XII. 2020.
- [5] Report on Subtask ENS-3.5.5.3-T32-01, Updating of the Final Engineering design of the HROC, Z. Tomičević, D. Čakmak, M. Kurtoić, A. Bakić, T. Tadić, 1. XI. 2020.
- [6] 10 CFR 50.69 Risk-informed categorization and treatment of structures, systems and components for nuclear power reactors, Nuclear Regulatory Commission
- [7] Report on Subtask ENS-3.5.2.2.-T13-01, Engineering design of tools for plugs replacement, M. Ascott, J. Horne, G. Mitchell, 11. I. 2018.
- [8] Transportni uređaji (prenosila i dizala) – podloge uz predavanja, D. Šćap, 2004.
- [9] <http://www.staticstools.eu/de>, zadnji put pristupljeno 8. XI. 2020.
- [10] ABAQUS Analysis User's Manual
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Poisson%27s_ratio, zadnji put pristupljeno 26. XII. 2020.
- [12] <https://www.beton.wiki/index.php?title=Elastizit%C3%A4tsmodul>, zadnji put pristupljeno 26. XII. 2020.

PRILOZI

I. CD-R disc