

# Analiza naprežanja u karabineru za sportsko penjanje

---

**Maradin, Lucija**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*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:235:145726>

*Rights / Prava:* [Attribution 3.0 Unported](#)/[Imenovanje 3.0](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-21**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Lucija Maradin**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ANALIZA NAPREZANJA U KARABINERU ZA SPORTSKO PENJANJE**

Mentori:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić, dipl. ing.

Student:

Lucija Maradin

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof. Lulić na usmjeravanju i prof. Ivančeviću na pomoći s Abaqusom.

Zahvaljujem se svojim roditeljima na potpori i strpljenju. Posebno hvala Ivani i Veni na neizmornoj podršci u svim trenucima studija.

Lucija Maradin



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispите  
Povjerenstvo za završne i diplomске ispите 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 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Lucija Maradin** JMBAG: **0035210900**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza naprežanja u karabineru za sportsko penjanje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Stress analysis in a sport climbing carabiner**

Opis zadatka:

Kod sportskog penjanja, penjač treba dobro poznavati tehniku penjanja, koristiti snagu i izdržljivost svoga tijela, odnosno imati dobru fizičku i psihičku spremnost. Za osiguranje od pada, koriste se tehnička sredstva. Pri tome se prvenstveno misli na karabinere. Karabineri su metalne karike s vratašcima (engl. *gate*) koje služe za povezivanje razne penjačke opreme: užadi, zamki, gurti, klinova, zaglavaka, sprava za osiguranje i dr. Karabineri se razlikuju prema obliku, materijalu od kojeg su izrađeni te izvedbi i obliku vratašca.

U radu je potrebno:

- opisati različite vrste karabinera,
- objasniti dijelove i osi karabinera,
- prema dostupnoj literaturi, odrediti maksimalna opterećenja,
- napraviti 3D model odabranog karabinera,
- provesti analizu naprežanja metodom konačnih elemenata za otvoren i zatvoren karabiner za slučaj maksimalnog opterećenja.

Potrebne parametre modela dogovoriti s mentorom. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.  
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.  
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.  
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.  
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. PENJANJE .....	2
2.1. Biomehanika penjanja.....	4
2.2. Penjačka oprema .....	6
2.2.1. Karabineri .....	8
2.3. Padanje .....	12
3. MODEL KARABINERA I OPTEREĆENJA .....	13
3.1. Materijali karabinera .....	13
3.3. Opterećenja karabinera .....	15
4. ANALIZA NAPREZANJA U KARABINERU.....	17
4.1. Metoda konačnih elemenata.....	17
4.2. Stvaranje mreže konačnih elemenata.....	18
4.3. Rezultati analize .....	19
5. ZAKLJUČAK.....	25
LITERATURA.....	26

---

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Prvi uspon na Matterhorn 1865. uključivao je ekspediciju od 7 penjača [2] .....	1
Slika 2.	a) Penjanje u dvorani b) Penjanje u prirodi .....	2
Slika 3.	a) Komplet postavljen u <i>spit</i> [4] b) Penjač kopča uže u komplet [5] .....	3
Slika 4.	Penjač si petom desne noge olakšava podizanje rukama i primicanje sljedećem hvatu, tzv. <i>heel hook</i> (slika iz privatne arhive).....	4
Slika 5.	Penjač prstima desne noge stvara silu u suprotnom smjeru od sile u lijevom stopalu te povećava pritisak u njemu, tzv. <i>toe hook</i> (slika iz privatne arhive) .....	5
Slika 6.	Penjačice [8].....	6
Slika 7.	<i>Reverso</i> – vrsta spravice za osiguravanje .....	7
Slika 8.	a) Klin se zabija kladivom i koristi kao međuosiguranje (neopremljeni smjerovi) [11][12] b) Spit/fix je ubušen i čini smjer opremljenim [13].....	7
Slika 9.	Stoper ili čok – vrsta zaglavka bez pomičnih dijelova [14] .....	8
Slika 10.	Dijelovi karabinera [11] .....	8
Slika 11.	Osi karabinera i oznake proizvođača [15].....	9
Slika 12.	Proizvodnja karabinera (slijeva na desno: šipka koja se savija, kovani komad, odvojeni srh, vibracijsko poliranje keramičkim stošcima) [16].....	11
Slika 13.	Graf prikazuje nekoliko primjera različitih vrijednosti faktora pada (FF) u slučaju da je uže dugo 2m i fiksirano na drugom kraju [17] .....	12
Slika 14.	Black Diamond Neutrino karabiner sa žičanim vratašcima [11] .....	13
Slika 15.	CAD Model karabinera .....	14
Slika 16.	Izmjerene sile pri padu .....	15
Slika 17.	Opterećeni komplet [24].....	16
Slika 18.	Tetraedarski konačni elementi 1. i 2. reda.....	17
Slika 19.	Zadana opterećenja i rubni uvijeti.....	18
Slika 20.	Mreža konačnih elemenata i tetraedarski element 1. reda.....	19
Slika 21.	a) Naprezanja u zatvorenom karabineru b) Rezultati nakon zadanog maksimalnog naprezanja od $\sigma = 350$ MPa.....	20

---

Slika 22.	a) Naprezanja u otvorenom karabineru b) Rezultati nakon zadanog maksimalnog naprezanja od $\sigma = 350$ MPa .....	20
Slika 23.	Usporedba prikaza naprezanja u otvorenom i zatvorenom karabineru .....	21
Slika 24.	Otvoreni karabiner sa zadanim najvećim naprezanjima jednakim vlačnoj čvrstoći ( $\sigma = R_m$ ) .....	22
Slika 25.	Povećana naprezanja na sredini kralježnice karabinera .....	22
Slika 26.	Mjesta najčešćeg loma karabinera [18] .....	23



---

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela karabinera prema obliku [11] .....	9
Tablica 2. Podjela karabinera prema izvedbi vratašca [11].....	10
Tablica 3. Podjela karabinera prema obliku vratašca i nosa [11].....	10
Tablica 4. Podjela karabinera prema materijalu [11] .....	11
Tablica 5. Svojstva materijala [19][20].....	13
Tablica 6. Deformacije tijekom procesa opterećivanja .....	24

---

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$E$	GPa	Youngov modul elastičnosti
$F$	N	Sila koja djeluje na karabiner
FF	-	Faktor pada ( <i>fall factor</i> )
$F_{max}$	N	Maksimalna sila koja djeluje na karabiner
$R_m$	MPa	Vlačna čvrstoća
$u$	mm	Pomak
$\nu$	-	Poissonov faktor
$\sigma$	MPa	Ekvivalentno naprezanje

**SAŽETAK**

U ovom radu su analizirana naprezanja karabinera koji se koristi u sportskom penjanju – sve popularnijem sportu koji se u potpunosti oslanja na sigurnost opreme.

Dana je teorijska podloga o vrstama i biomehanici penjanja, opremi koja se koristi, penjačkoj tehnici i padovima. Opisani su dijelovi i osi karabinera, vrste karabinera i njihova proizvodnja. Zatim je odabran u praksi često korišteni model karabinera: D-asimetrični karabiner sa žičanim vratašcima izrađen od aluminijske legure i čeličnih vratašaca. Prema eksperimentalnim testovima padanja u literaturi, određena su maksimalna opterećenja karabinera. CAD model karabinera je napravljen u SolidWorksu, a analiza naprezanja i pomaka provedena je metodom konačnih elemenata u programu Abaqus. Tijekom odabira načina opterećenja i vrste rubnih uvjeta vodilo se računa da što bolje odgovaraju stvarnim uvjetima pada na stijeni.

Ključne riječi: penjanje, karabiner, padovi, MKE analiza

**SUMMARY**

This paper contains stress analysis of a carabiner used in sport climbing - an increasingly popular sport that relies entirely on the safety of the equipment.

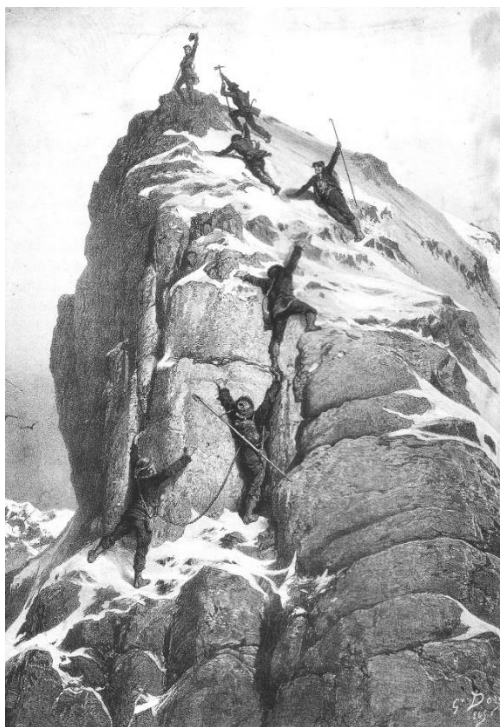
A theoretical background was given on the types and biomechanics of climbing, equipment used, climbing techniques and falls. Parts and axis of a carabiner have been defined, as well as different types of carabiners and their production process. Next, the paper focuses on a commonly used carabiner model: a D-asymmetric carabiner made of aluminum alloy with a steel wire gate. The highest achieved force according to experimental fall tests was selected from the literature. The CAD model was created in SolidWorks and the stress and displacement analysis using the finite element method was performed in Abaqus. When choosing the loading method and type of boundary conditions, the actual conditions that occur during a fall on a rock were mimicked as closely as possible.

Key words: climbing, carabiner, falls, FEM analysis

## 1. UVOD

Penjanje je nastalo iz duge tradicije planinarenja kada su planinari bili primorani koristiti posebnu opremu da prođu zahtjevne dijelove do vrha. Prvi uspon na Mont Blanc 1786. smatra se početkom alpinizma. Zatim su uslijedili usponi po Alpama (Triglav, Matterhorn (Slika 1), Grandes Jorasses, Eiger, ...), u 20. st. i Himalaju [1]. Nakon 1960. dolazi do ubrzanog razvoja i nastanka brojnih tehnika i stilova. Oprema postaje sve sofisticiranija, penjanje po stijeni sve popularniji sport, a 2020. u Tokyu postaje i olimpijski sport. Karabiner od samih početaka penjanja postaje neizostavan dio opreme kojem generacije penjača povjeravaju život.

Cilj ovog rada je analizirati naprezanja u karabineru za slučaj maksimalnog opterećenja koje se može postići u uvjetima na stijeni. U tu svrhu će se opisati karabiner: njegovi dijelovi, osi te oblici korišteni u penjanju. Zatim će se napraviti 3D model karabinera. Pregledavanjem dostupnih izvora s eksperimentalnim testiranjima padova i postignutim vrijednostima sila odabrat će se najveće opterećenje na karabineru i s tom vrijednosti napraviti MKE analizu otvorenog i zatvorenog karabinera.



**Slika 1.** Prvi uspon na Matterhorn 1865. uključivao je ekspediciju od 7 penjača [2]

## 2. PENJANJE

Alpinizam je sveukupno kulturno, estetsko, etičko i sportsko djelovanje u planinama. Može se definirati i kao kultura penjanja na vrhove i stijene u visokim planinama, u svim godišnjim dobima, po stjenovitom i zamrznutom terenu, ili kao sportska grana planinarstva koja obuhvaća sve vještine kretanja u planinama u svim uvjetima (ljetnim, zimskim)[3].

Iz alpinizma su se razvile razne penjačke aktivnosti [1]:

- penjanje na umjetnoj stijeni (u dvoranama) (Slika 2.a),
- sportsko penjanje (penjanje isključivo opremljenih smjerova),
- *trad* ili tradicionalno penjanje (penjanje korištenjem vlastite opreme) (Slika 2.b),
- *bouldering* (penjanje kratkih smjerova s jednim ili više zahtjevnih pokreta),
- *deep water solo* (penjanje po stijeni iznad vode bez osiguranja)
- *dry tooling* (penjanje suhe stijene s opremom za led, npr. cepini, dereze..)

Također postoje i *ferate* – penjački putevi koji duž staze/smjera imaju željeznu sajlu za koju se osoba osigurava *ferata setom* i može primati za pomoć pri usponu. Kako uglavnom ne zahtijevaju veliku snagu niti penjačku tehniku, svrstavaju se između planinarenja i penjanja.



**Slika 2. a) Penjanje u dvorani - prednost su sigurniji uvjeti (debela strunjača uvelike ublažava pad) i penjanje u društvu (slika iz privatne arhive)**

**b) Penjanje po pravoj stijeni - prednost je boravak u prirodi i veći osjećaj zadovoljstva nakon ispenjanog smjera (slika iz privatne arhive)**

Kada se govori o penjanju u prirodi, postoje opremljeni smjerovi u koje penjač ide samo s kompletima i užetom jer su međuosiguranja već ubušena u stijenu (sigurnije i orijentacijski lakše), dok u klasičnom ili tradicionalnom (*trad*) penjanju, penjač nosi sa sobom svu opremu kojom se osigurava u stijeni i pažljivo ju postavlja tijekom uspona na prikladnim mjestima učestalo koliko želi (ovisi o težini smjera, iskustvu penjača, uvjetima na stijeni) što čini takvu vrstu penjanja zahtjevnijom po trajanju, potrebnom znanju i iskustvu te opasnijom.

„Penjanje smjera“ funkcionira po principu da penjač koji kreće prvi (*lead*) ima za pojas zavezan kraj užeta, a njegov partner mu dodaje užu kroz spravicu za osiguravanje kako ovaj napreduje kroz smjer. Svakih nekoliko metara penjač stavi komplet u *spit* - čeličnu ušicu ubušenu u stijeni (Slika 3.a), i užu u komplet (Slika 3.b). Tako se osigurava da ako dođe do pada, ne padne do svog partnera koji ga osigurava (ili još niže), nego od zadnjeg međuosiguranja za onoliko koliko je otpenjao iznad njega (više u poglavlju o padanju). Kada dođe do kraja, partner mu konstantno dodaje užu i spušta penjača dolje (kod kratkih sportskih smjerova) ili penjač gore radi sidrište (kod dugih smjerova) na kojem kroz svoju spravicu za osiguravanje osigurava sebe i partnera, kako bi se partner odozdo mogao sigurno popeti i opet osiguravati prvog penjača dok on nastavlja dalje (ili se zamijene). Smjerovi koji zahtijevaju penjanje u više dužina (*cugova*) zovu se *dužinci* i mogu trajati i po nekoliko dana uz spavanje na stijeni (*bivakiranje*).



Slika 3. a) Komplet postavljen u *spit* [5]

b) Penjač kopča užu u komplet [5]

## 2.1. Biomehanika penjanja

Penjač pronalazi rješenja 'nemogućih' situacija kombiniranjem snage i penjačke tehnike, brigom o sigurnosti u potencijalno opasnim uvjetima i balansiranjem između straha i ustrajnosti. Faktori koji utječu na izvedbu se mogu svrstati u šest kategorija: fizička sprema, vanjski uvjeti, koordinacija i tehnika, psihološki aspekti, iskustvo, znanje i ostali uvjeti (talent, zdravlje, pristup stijenama, raspoloživo vrijeme, ...) [6]. Sve ovo penjanje čini izuzetno složenim sportom.

Biomehanički idealno kretanje penjača karakterizira što bolje postavljanje težišta tijela u odnosu na oslonac te održavanje konstantne srednje brzine kretanja sa što manje oscilacija u ritmu tijekom uspona [7].

Kada govorimo o tehnici, rijetko koji drugi sport zahtjeva raznolikost i preciznost pokreta kao što je to slučaj s penjanjem. Najbolji penjač neće nužno biti najjači, nego onaj koji radi najmanje 'pogrešaka' u kretanjama. Izbor tih kretnji i pozicija te brzina kojom se one odabiru, čine razliku među penjačima.

Termin *penjačka tehnika* podrazumijeva najefikasnije načine korištenja tijela s ciljem minimalnog utroška snage. Penjači koriste biomehanička rješenja (ponekad i nesvjesno) u vidu kontrole težišta i distribucije težine, smjera sila i održavanja napetosti u tijelu (*body tension*) (Slika 4).



**Slika 4. Penjač si petom desne noge olakšava podizanje rukama i primicanje sljedećem hvatu, tzv. *heel hook* (slika iz privatne arhive)**



Karakteristični načini držanja hvatova/oprimaka (*hold*) u penjanju (*full crimp*, *pinch*, *open hand*) ovise o veličini, obliku i položaju hvata i omogućuju veći pritisak na njega ili veću površinu pritiska, bolju mogućnost pozicioniranja tijela te više ili manje potrebne snage u rukama.

Održavanje ravnoteže je često otežano nepostojanjem dviju ili tri stabilnih točaka na koje se može osloniti, pa se ona održava stvaranjem napetosti u tijelu korištenjem sila suprotne orijentacije u rukama i/ili nogama. Ovakvi položaji zahtijevaju veliku snagu i izdržljivost u cijelom tijelu, a posebno u mišićima trupa (*core*) (Slika 5).



**Slika 5.** Penjač prstima desne noge stvara silu u suprotnom smjeru od sile u lijevom stopalu te povećava pritisak u njemu, tzv. *toe hook* (slika iz privatne arhive)

Stopala se mogu oslanjati vrlo malim rubnim dijelom (*edging*) kada nemamo dostupna veća uporišta/stopinke ili što većim (*smearing*) kada je cilj povećati područje pritiska i omogućiti stajanje na vrlo kosim površinama (na kojima bi u slučaju male dodirne površine i koncentriranog pritiska trenje bilo premalo i došlo bi do proklizavanja).

Ponekad je efikasnije stajati samo na jednoj nozi, a drugom se stabilizirati dok se rukom kreće dalje. Time se suprotstavlja težnji tijela da se rotira kada je točka težišta bočno od zamišljene linije koja povezuje stabilnu ruku i nogu. Takav položaj tijela zove se *flagging* i obično uključuje križanje noge na kojoj se ne stoji ispred ili iza one druge [6].

S obzirom na brzinu kretanja postoje *statički* i *dinamički* stil penjanja. Statički karakterizira statična jedna ruka u jednom položaju i pod jednim kutem za vrijeme promjene položaja druge, dok su u dinamičkom obje ruke u isto vrijeme u pokretu.

## 2.2. Penjačka oprema

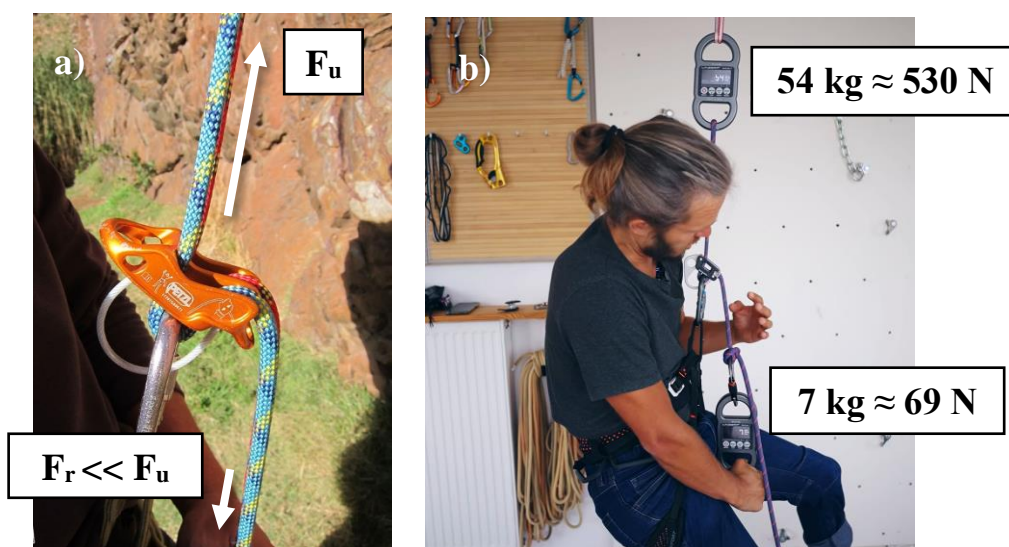
Alpinizam je po svojoj prirodi opasna aktivnost, ali se rizik pri usponu može smanjiti iskustvom, znalackim korištenjem opreme i dobrim vladanjem alpinističkim tehnikama (*absajl* – tehnika spuštanja po užetu, Sv. Bernard – spašavanje ozlijeđenog partnera, prusiciranje – prelazak prezahtjevnog dijela smjera penjanjem po užetu, ...) [1].

Osnovni dijelovi penjačke opreme koji se koriste u opremljenim i u neopremljenim smjerovima su:

- Kaciga i penjački pojas
- Penjačice – specijalna obuća oblikovana za najbolje prijanjanje i najveće trenje na stijeni (Slika 6)
- Dinamičko uže – elastično (elongacija oko 30%), postoji i statičko koje nije rastezljivo i koristi se npr. u speleologiji, postoje različite debljine (najčešće 8,7 - 10,5 mm)
- Spravica za osiguravanje – kočnica koja nam omogućuje kontrolu protoka užeta prilikom osiguravanja partnera ili spuštanja (Slika 7)
- Karabineri (u sljedećem poglavlju)
- Kompleti – dva karabinera spojena kratkom gurnom, služe za povezivanje međuosiguranja i užeta i omogućuju užetu da se kreće kroz sustav s minimalnim trenjem.



Slika 6. Penjačice [8]



Slika 7. *Reverso* – vrsta sprave za osiguravanje

- a) zbog savijanja užeta u spravi se stvara veliko trenje koje umanjuje silu u užetu (u svrhu povećanja tog trenja, u spravi čak postoji ozubljenje preko kojeg užeta ide) [9]
- b) dinamometar na testu pokazuje gotovo osam puta manju silu u donjem kraju užeta [10]

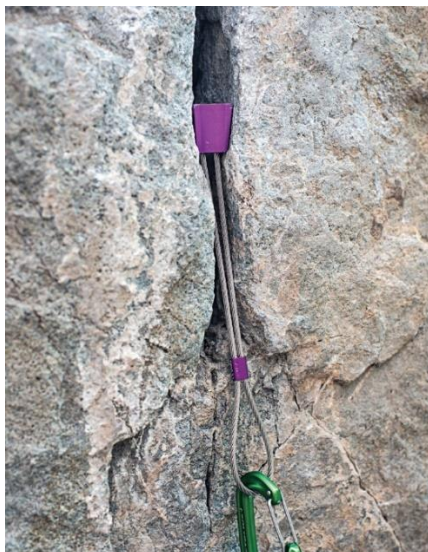
Zatim u neopremljene smjerove još treba nositi:

- Zaglavci: npr. čokovi (Slika 9) i frendovi - oprema koju postavljamo u pukotine u stijeni, a služi kao međuosiguranje kada nema postavljenih spitova (ili su rijetki)
- Gurtne, zamke, kevlarice – od najlona, kevlara ili *Dyneeme* (polimerni kompozit)
- Klinovi i kladiva – metalni dijelovi s ušicom u koju se kopča komplet, za zabijanje u pukotine u stijeni (pravilno postavljeni su vrlo sigurni) (Slika 8)



Slika 8. a) Klin se zabija kladivom i koristi kao međuosiguranje (neopremljeni smjerovi) [11][12]

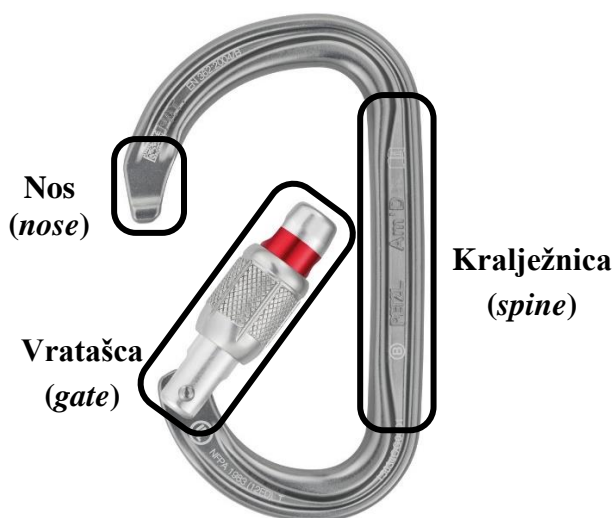
b) *Spit/fix* je ubušen i čini smjer opremljenim [13]



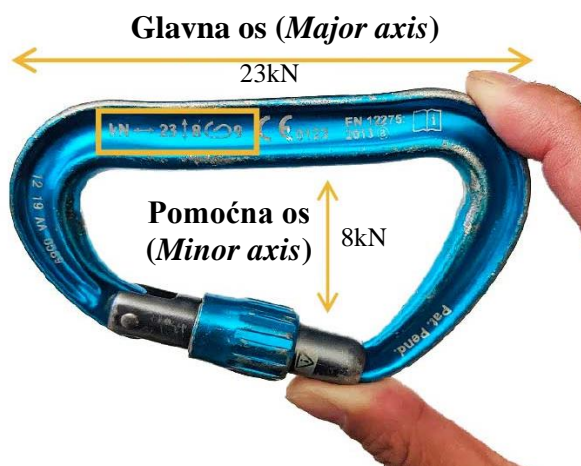
Slika 9. Stoper ili čok – vrsta zaglavka bez pomičnih dijelova [14]

### 2.2.1. Karabineri

Karabineri su metalne karike s vratašcima koja se mogu otvoriti i zatvoriti, a služe za brzo međusobno povezivanje razne penjačke opreme poput užeta, zamki, klinova, spravica za osiguravanje [1]. Dijelovi koji čine karabiner (Slika 10) su nos, vratašca i kralježnica koja je noseći dio karabinera. Karabiner ima dvije osi: glavnu ili veću i pomoćnu ili manju. Obično proizvođač na karabiner stavlja garantirano opterećenje za glavnu os u slučaju otvorenih i zatvorenih vratašca, te za manju os (*cross-loading*) koje je uglavnom za trećinu manje (Slika 11).







Slika 10. Dijelovi karabinera [11]



Slika 11. Osi karabinera i oznake proizvođača [15]

Postoji više podjela karabinera: prema obliku, prema izvedbi vratašca, prema obliku vratašca i nosa, te prema materijalu. Prikazi i osnovne karakteristike karabinera u svakoj od tih podjela prikazani su u Tablicama 1. - 4.

Tablica 1. Podjela karabinera prema obliku [11]

			
<p><b>Ovalni</b></p> <p>Sila se raspoređuje jednako na obje strane, koriste se kod tehničkog penjanja</p>	<p><b>D-simetrični</b></p> <p>Najveći dio sile nosi kralježnica karabinera, koriste se za nošenje opreme i u kompletima (rjeđe)</p>	<p><b>D-asimetrični</b></p> <p>Sila se raspoređuje slično kao i kod D-simetričnih, asimetrija dozvoljava da se vratašca više otvore, ali u karabineru ima manje mjesta, koriste se u kompletima</p>	<p><b>Kruškoliki (HMS)</b></p> <p>Sila se raspoređuje kao kod D-karabinera, najveći karabineri, prošireni su za lakše vezanje čvorova, koriste se za izradu sidrišta i osiguravanje penjača</p>

Tablica 2. Podjela karabinera prema izvedbi vratašca [11]

		
<p><b>Puna vratašca</b></p> <p>Najčešći u kompletima i za nošenje opreme</p>	<p><b>Žičana vratašca</b></p> <p>Najlakši, otporni na smrzavanje, udarac teže otvara vratašca, koriste se u kompletima</p>	<p><b>Vratašca s maticom (karabiner matičar)</b></p> <p>Najteži, ali i najsigurniji – matica sprječava nekontrolirano otvaranje vratašca, koriste se za izradu sidrišta i osiguravanje penjača, postoje i karabineri kod kojih se matica automatski zatvara (auto-matičari)</p>

Tablica 3. Podjela karabinera prema obliku vratašca i nosa [11]

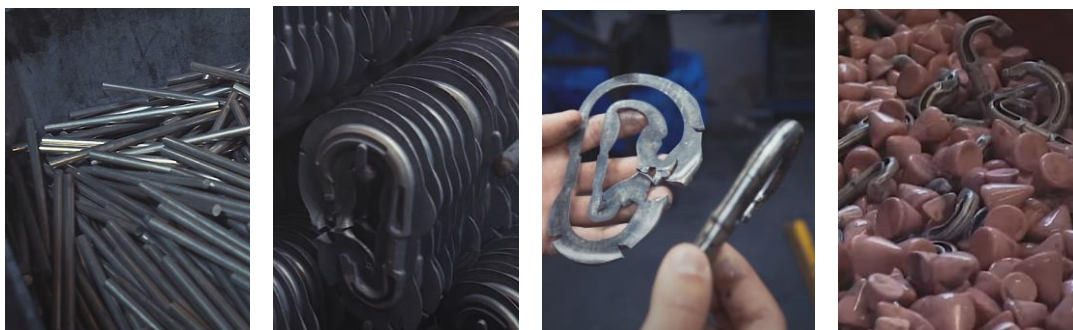
			
<p><b>Ravna vratašca</b></p> <p>Najčešći oblik, koriste se kao dio kompleta</p>	<p><b>Zakrivljena vratašca</b></p> <p>Omogućuju lakše ukapčanje užeta, koriste se kao dio kompleta</p>	<p><b>Nos sa zarezom</b></p> <p>Stariji dizajn, mogućnost zapinjanja kod otkopčavanju</p>	<p><b>Nos bez zareza</b></p> <p>Noviji dizajn, ne zapinje kod otkopčavanja</p>

Tablica 4. Podjela karabinera prema materijalu [11]

		
<p><b>Čelični</b></p> <p>Velika čvrstoća, ali i masa, susreću se na stalnim sidrištima sportskih smjerova</p>	<p><b>Aluminijski</b></p> <p>Velika čvrstoća, mala masa, svi penjački karabineri rađeni su od aluminijskog</p>	<p><b>Plastični</b></p> <p>Koriste se za nošenje opreme</p>

Ovaj rad će se baviti aluminijskim karabinerom bez matice sa žičanim vratašcima D-asimetričnog oblika.

Karabineri se izrađuju rezanjem i savijanjem male šipke u oblik karabinera, zatim se kovanjem u ukovnju dobiva željeni dizajn (s utisnutim logoom, garantiranim opterećenjima i sl.). Sljedeći korak je odvajanje srha i toplinska obrada radi povećanja čvrstoće, te se na kraju miješaju u vibracijskim bubnjevima skupa sa zaobljenim keramičkim piramidama koje ih sudaranjem poliraju (Slika 12).



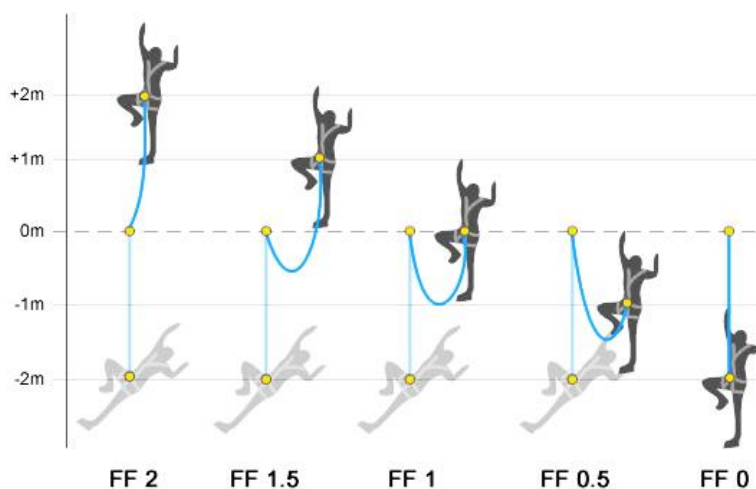
Slika 12. Proizvodnja karabinera (slijeva na desno: šipka koja se savija, kovani komad, odvojeni srh, vibracijsko poliranje keramičkim stošcima) [16]

### 2.3. Padanje

Padovi su u penjanju neizbježni, a njihova „težina“ ovisi o položaju penjača u odnosu na njegovog partnera, o udaljenosti zadnjeg međuosiguranja, o liniji užeta i količini trenja u sustavu. Za procjenu težine pada korisno je računati faktor pada (*fall factor*). On pokazuje kolika će biti udarna sila koju će trpjeti tijelo penjača, njegov pojas i međuosiguranja. Računa se kao omjer visine pada i ukupne izvučene duljine užeta (duljina užeta od palog penjača do spravice kojom ga njegov partner osigurava) [1]:

$$\text{faktor pada (FF)} = \frac{\text{visina pada}}{\text{duljina užeta}}$$

Što je faktor pada veći, to će udarna sila biti veća, a što je manji to će pad biti mekši (Slika 13). Uže apsorbira energiju pa što ga je više dostupno i što se više može slobodno istegnuti, pad je ugodniji za penjača. Iako nelogično, to znači da je manji faktor pada i bolje za penjača ako padne s velike visine, visoko na stijeni (FF = 5/20 = 0.25) nego s manje visine odmah na početku (FF = 2/4 = 0.5).



**Slika 13.** Graf prikazuje nekoliko primjera različitih vrijednosti faktora pada (FF) u slučaju da je užo dugo 2m i fiksirano na drugom kraju [17]

Faktor pada se može znatno povećati ako postoji puno trenja u sustavu (od užeta koje struže po stijeni, smjera koji krivuda ili međuosiguranja su nepravilno postavljena, pa jako lome užo i sl.) Pri padu dolazi do zatezanja užeta, a veliko trenje naglo usporava njegovo povlačenje i skraćuje dostupnu duljinu koja se može elongirati i ublažiti pad.



### 3. MODEL KARABINERA I OPTEREĆENJA

#### 3.1. Materijali karabinera

Za ovaj rad odabran je *Black Diamond Neutrino Wiregate* karabiner (Slika 14). Black Diamond je jedan od vodećih svjetskih proizvođača penjačke opreme i njihova oprema može se naći na svakom penjalištu. Karabiner je izrađen od aluminijske legure s čeličnim vratašcima i teži 36,85 g [18]. Svojstva materijali dana su u Tablica 5.



Slika 14. Black Diamond Neutrino karabiner sa žičanim vratašcima [11]

Tablica 5. Svojstva materijala [18][20]

Dio karabinera	Materijal	$E$ , GPa	$\nu$
Tijelo	Al-Zn6MgCu (7075 T6) aluminijska legura	71,77	0,33
Vratašca	DIN EN X5CrNiMo17-12-2 (1.4401, AISI 316) austenitni nehrđajući čelik	193	0,3

Aluminij 7075 T6 je iz serije 7xxx (legure aluminija nastale dodavanjem cinka i magnezija i posjeduju najbolja mehanička svojstva), a T6 označava temperiranje aluminija: rastvorno žaren i umjetno dozrijevan. Točan sastav je: 90,0% Al, 5,6% Zn, 2,5% Mg, 0,23% Cr i 1,6% Cu. Njegova relativno mala gustoća od  $2,81 \text{ g/cm}^3$ , što je relativno lagano za metal, jedan je od glavnih razloga korištenja aluminija u izradi penjačke opreme. 7075 aluminijska legure jedna

je od najčvršćih dostupnih aluminijskih legura vlačne čvrstoće od  $R_m = 572 \text{ N/mm}^2$ . Zbog navedenih svojstava se često koristi u zrakoplovnoj industriji [19].

316 je austenitni nehrđajući čelik kojem su dodani krom (16,5 – 18,5%), nikal (10 – 13%) za održavanje austenitnog sastava na nižim temperaturama i molibden (2 – 2,5%) koji daje visoku otpornost na koroziju. Njegova gustoća je  $7,9 \text{ g/cm}^3$ , a vlačna čvrstoća  $R_m \geq 580 \text{ N/mm}^2$ . Nakon 304 (sličnog sastava, ali bez molibdena) je drugi najčešće korišteni nehrđajući čelik. Zbog molibdena u sastavu se primjenjuje s kemikalijama za obradu i u okruženjima s visokim slanim otopinama (npr. obalne regije). Zbog svojih nereaktivnih svojstava, koristi se i u proizvodnji medicinskih kirurških instrumenata [20].

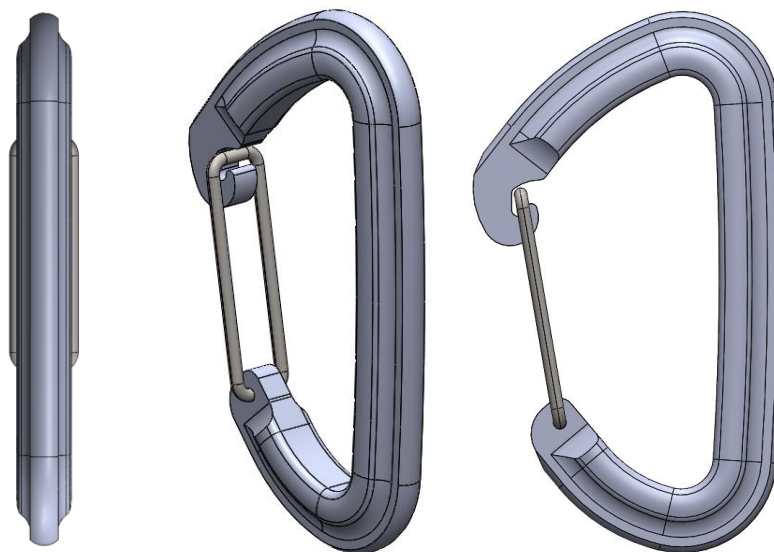
Standard koji propisuje UIAA (Međunarodna planinarska i penjačka federacija) zahtijeva da karabineri za penjanje moraju izdržati barem 20 kN [21]. Proizvođač garantira da će po glavnoj (dužoj) osi odabrani *Black Diamond* karabiner sa zatvorenim vratašcima držati 24 kN [18].

### 3.2. Model karabinera

Za modeliranje karabinera korišten je SolidWorks. Sklop se sastoji od dva dijela [Slika 15].

Na modelu su napravljena sljedeća pojednostavljenja: nisu na svim potrebnim mjestima zaobljeni rubovi radi uspješne izrade mreže u kasnijim koracima, izostavljena je opruga koja drži vratašca pritisnutima na nos karabinera.

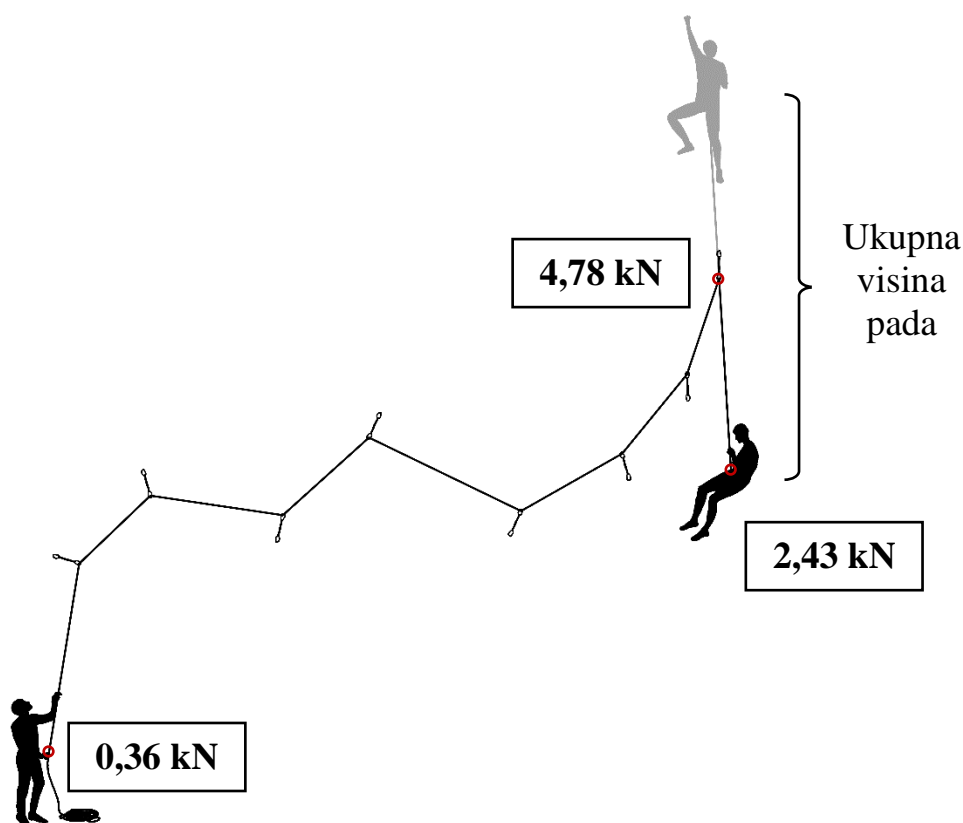
Kao referenca je tijekom modeliranja korišten model karabinera sa GrabCAD stranice [22].



Slika 15. CAD Model karabinera

### 3.3. Opterećenja karabinera

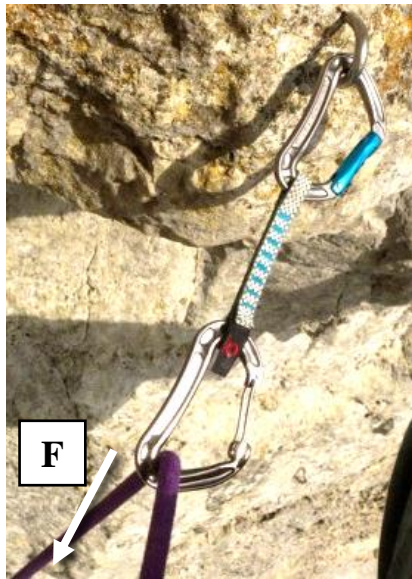
Eksperimentalnim testiranjima padova koji su izvođeni u sigurnim uvjetima dvorane za penjanje utvrđene su maksimalne vrijednosti sile  $F = 4,78$  kN na posljednjem međuosiguranju, tj. kompletu, dok su se općenito vrijednosti sile kretale između 3 i 5 kN [23]. Najveća izmjerena vrijednost će se uzeti kao opterećenje na karabineru. U testiranju je penjač od 72 kg padao ukupno 7 m, a u sustavu je bilo ukupno 15 m užeta (Slika 16).



Slika 16. Izmjerene sile pri padu

Iako je faktor pada u prikazanom primjeru relativno mali ( $FF = 7/15 = 0,47$ ), penjač je radio puno skretanja i što je rezultiralo velikim trenjem u sustavu i tvrđim padom. Dinamometri (kao Slici 7.b su bili pričvršćeni za penjača, za osobu koja osigurava i na zadnji komplet. Očitane vrijednosti sila na njima dokazuju veliko trenje u sustavu [23].

Komplet je opterećen vlačno. Primjer opterećenog kompleta prikazuje Slika 17. Opterećenje će se računati na donjem karabineru koji je u kontaktu s užetom.



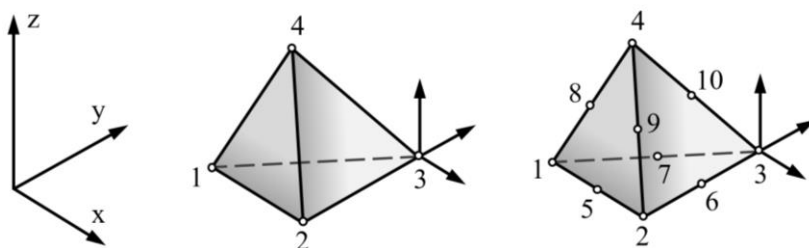
Slika 17. Opterećeni komplet [24]

## 4. ANALIZA NAPREZANJA U KARABINERU

### 4.1. Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata numerička je metoda koja je nezaobilazna u inženjerskim proračunima. Danas postoji velik broj računalnih programa temeljenih na toj metodi, koji omogućuju analizu konstrukcija bez razmatranja složene teorije koja opisuje fizikalno ponašanje konstrukcije [25].

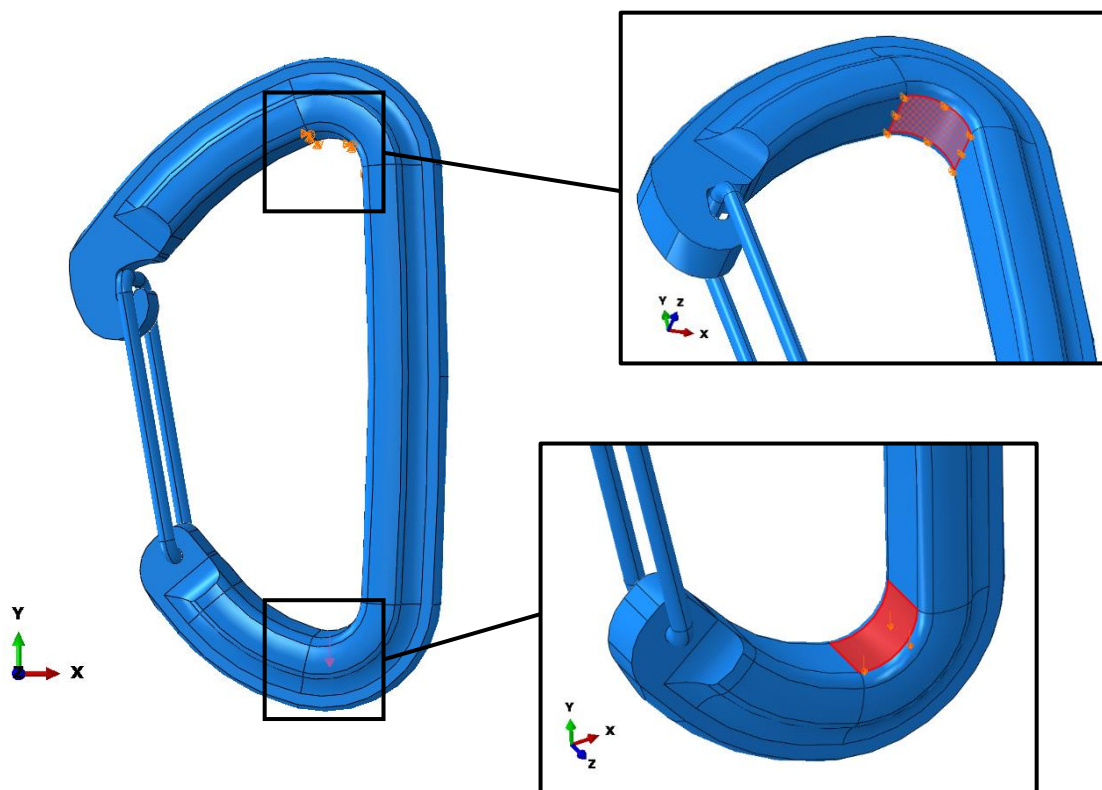
MKE približna je numerička metoda koja se temelji na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Razmatrani kontinuum s beskonačno stupnjeva slobode gibanja zamjenjuje se diskretnim modelom međusobno povezanih elemenata s ograničenim brojem stupnjeva slobode. Konačni elementi međusobno su povezani u točkama na konturi koje se nazivaju čvorovi. Ovisno o obliku i nepoznatim parametrima u čvorovima izvedeni su različiti tipovi konačnih elemenata. Postoje jednodimenzijski, dvodimenzijski i trodimenzijski konačni elementi, te pločasti i ljuskasti konačni elementi. Najjednostavniji konačni element je jednodimenzijski element, tj. štap s dva čvora i s linearnom interpolacijom. Veliku primjenu za trodimenzijsku analizu imaju tetraedarski elementi [25]. Osnovni tetraedarski element ima četiri čvora od kojih svaki ima 3 stupnja slobode što čini ukupno 12 stupnjeva slobode gibanja. Dodavanjem čvorova osnovnom tetraedarskom elementu kao na Slici 18. dobivamo tetraedarski konačni element 2. reda koji sadrži 10 čvorova i 30 stupnjeva slobode (Slika 18).



Slika 18. Tetraedarski konačni elementi 1. i 2. reda

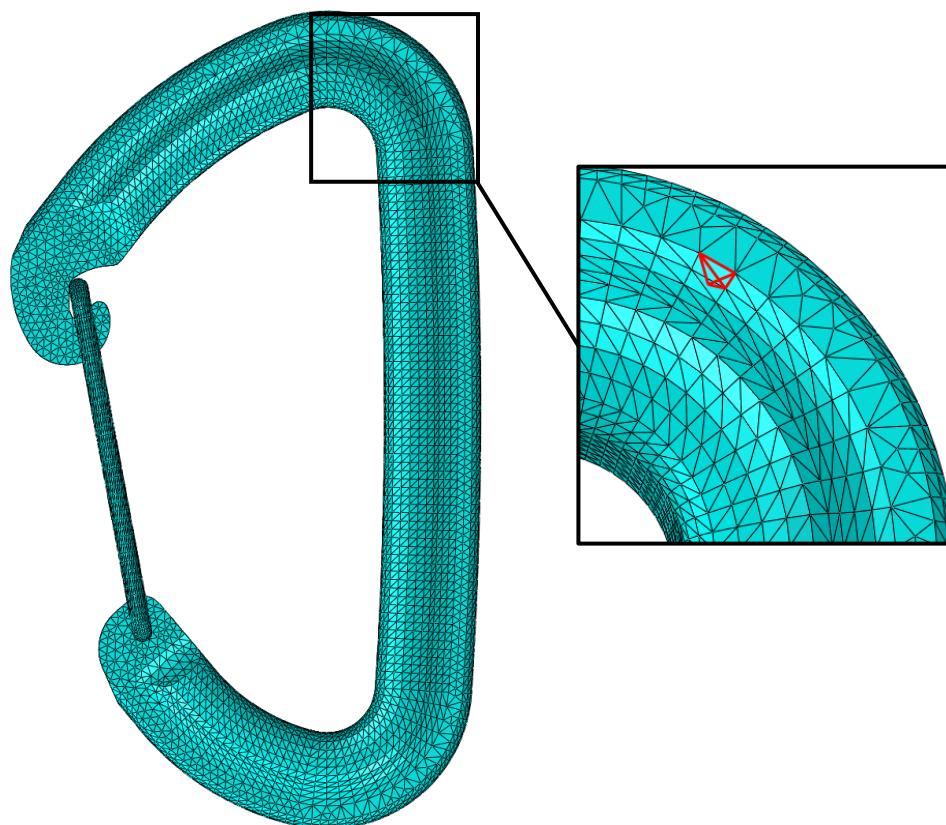
## 4.2. Stvaranje mreže konačnih elemenata

Step model je uvezen u programski paket Abaqus. Dijelovima su dodijeljeni materijali s ranije opisanim karakteristikama. Opterećenje od  $F = 4780$  N je zadano preko površine na kojoj bi u stvarnosti bilo uže (vezano na palog penjača), a na drugoj strani karabinera je pomak onemogućen rubnim uvjetima:  $U_1 = U_2 = U_3 = 0$ , dok je rotacija omogućena (Slika 19).



Slika 19. Zadana opterećenja i rubni uvjeti

Generirana je mreža konačnih elemenata (Slika 20). Korišteni su tetraedarskih konačni elementi 1. reda koji u Abaqusu imaju naziv C3D4. Stvoreno je 91 580 elemenata i 18 839 čvorova na karabineru te 16 001 elementat i 4 920 čvorova na vratašcima.

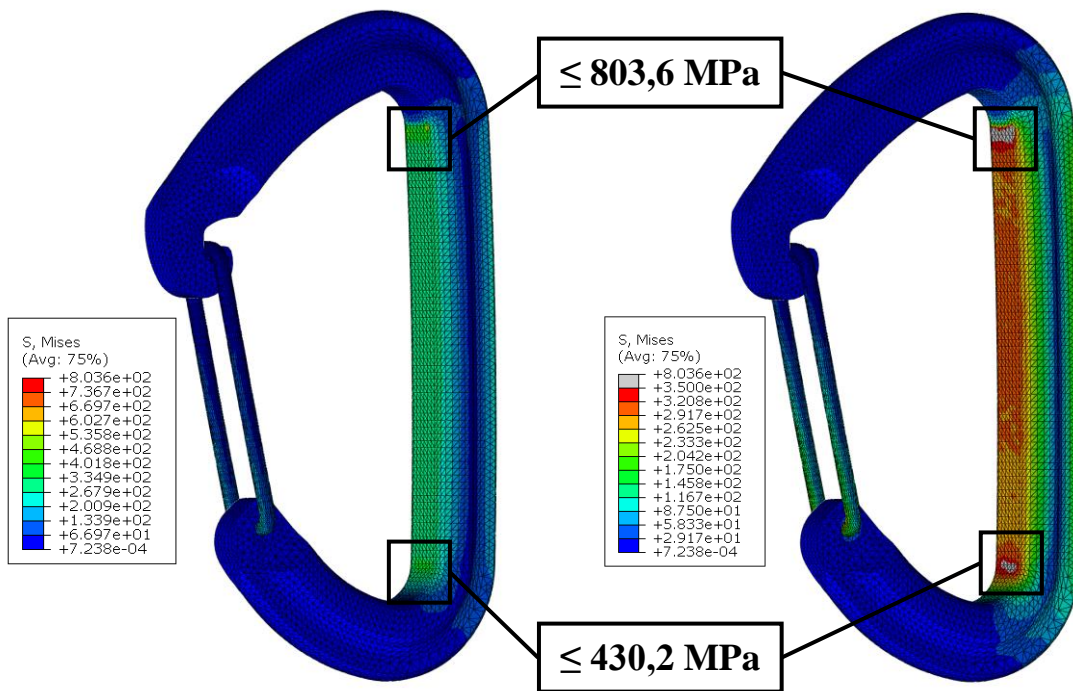


Slika 20. Mreža konačnih elemenata i tetraedarski element 1. reda

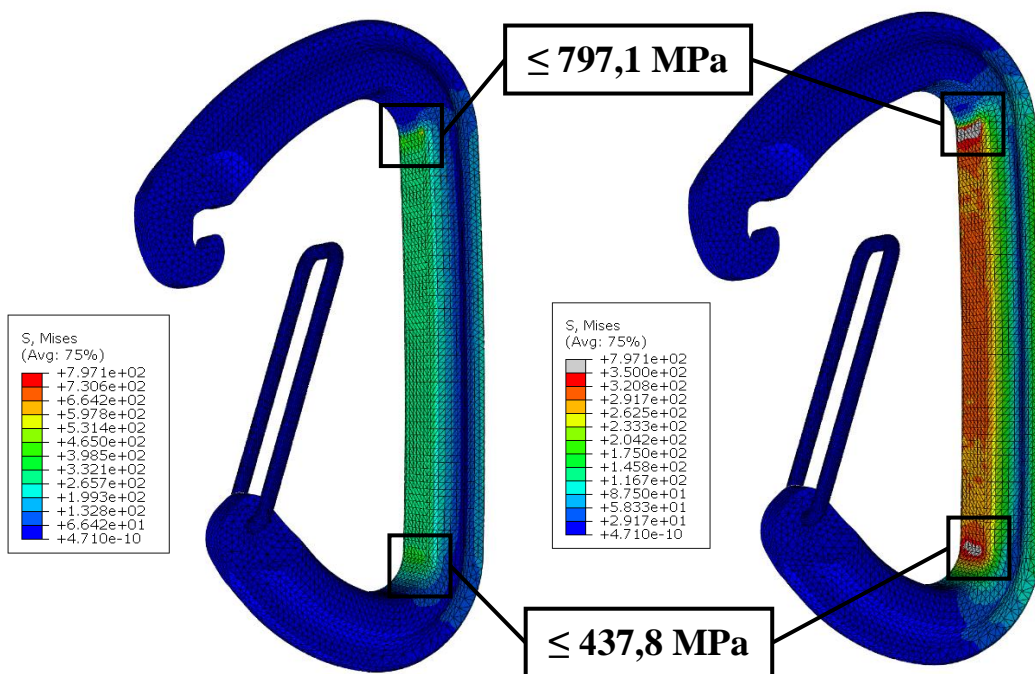
### 4.3. Rezultati analize

Rezultate provedene analize karabinera sa zatvorenim vratašcima prikazuje Slika 21. Radi bolje raspodjele spektra boja, u postavkama prikaza rezultata zadano je maksimalno naprezanje od  $\sigma = 350$  MPa (Slika 21.b). U neposrednoj blizini zadanog opterećenja i rubnih uvjeta na unutarnjoj strani kralježnice karabinera vidljiva je pojava koncentracije naprezanja gdje maksimalno ekvivalentno naprezanje iznosi  $\sigma_{max} = 803,64$  MPa po Missesu (HMH teorija).

Iako postoji značajna deformacija kralježnice karabinera (maksimalni pomak  $u = 2,63$  mm) (Tablica 6), pri zadanoj sili još uvijek ne dolazi do naližeganja vratašca na nos karabinera. Naprezanja vidljiva na vratašcima karabinera javljaju se zbog pojednostavljenog načina povezivanja s karabinerom u modelu, te u stvarnosti ne postoje, ali utječu na rezultat. To onda znači da analiza naprezanja u karabineru s otvorenim vratašcima (Slika 22) daje točnije rezultate i njih će se dalje uzimati kao relevantne.



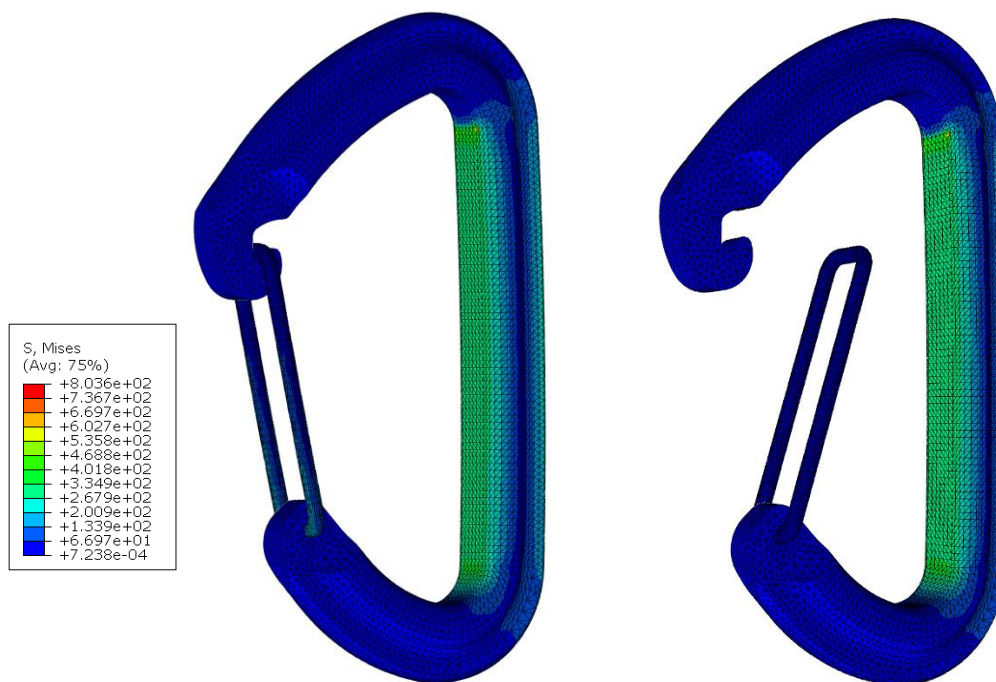
Slika 21. a) Naprezanja u zatvorenom karabineru  
 b) Rezultati nakon zadanog maksimalnog naprezanja od  $\sigma = 350 \text{ MPa}$



Slika 22. a) Naprezanja u otvorenom karabineru  
 b) Rezultati nakon zadanog maksimalnog naprezanja od  $\sigma = 350 \text{ MPa}$

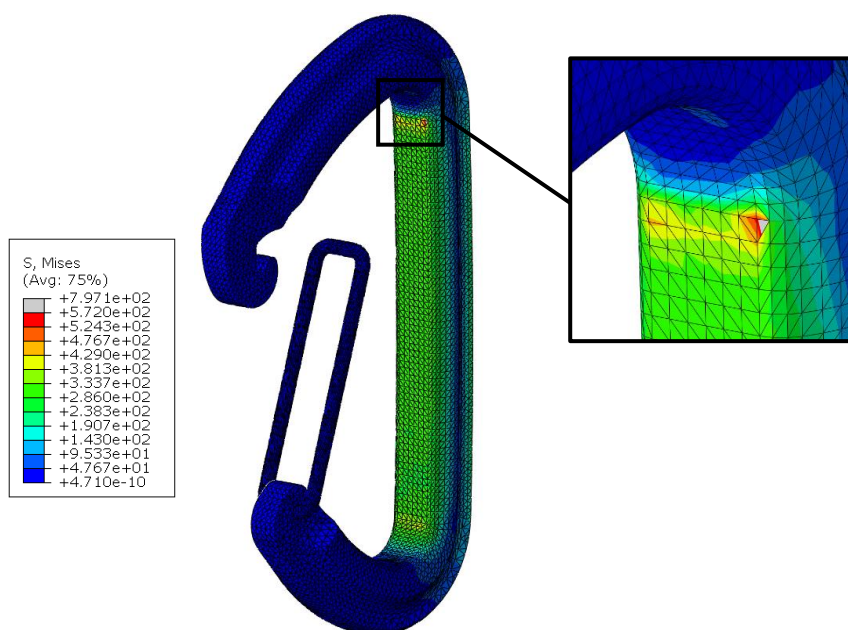


Kada se promotri poboljšani prikaz modela, jasno je da su najveća naprezanja upravo na krajevima kralježnice s unutarnje strane karabiner (Slika 22.b), gdje ona na jednom elementu dosežu  $\sigma_{max} = 797,1$  MPa. Usporedbu naprezanja kod otvorenog i zatvorenog karabinera s usklađenim skalama (zadano najveće naprezanje jednako maksimalnom ekvivalentnom naprezanju za zatvoreni karabiner  $\sigma_{max} = 803,64$  MPa) prikazuje Slika 23.



**Slika 23.** Usporedba prikaza naprezanja u otvorenom i zatvorenom karabineru

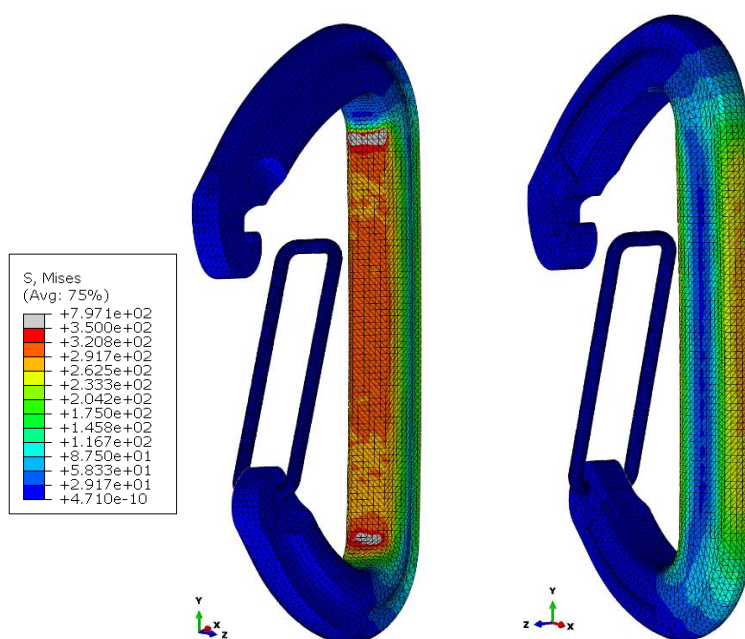
Tako visoka vrijednost naprezanja na otvorenom karabineru koja prelazi vlačnu čvrstoću materijala ( $R_m = 572$  N/mm<sup>2</sup>) se javlja na dva elementa sa svake strane uz rubove gdje površina postaje zakrivljena (Slika 24). Kao što je vidljivo na slici, na svim okolnim elementima je naprezanje znatno manje, pa bi se točke u kojima je toliko povišeno mogle objasniti koncentracijom naprezanja zbog načina zadavanja opterećenja i pojednostavljenjima na modelu.



**Slika 24. Otvoreni karabiner sa zadanim najvećim naprezanjima jednakim vlačnoj čvrstoći ( $\sigma = R_m$ )**

Na sredini kralježnice karabinera je također vidljivo blago povećanje naprezanja i s unutarnje (300 - 320 MPa) i vanjske strane (280 – 300 MPa) (Slika 25).

Mjesto najmanjih naprezanja je nos karabinera gdje se ona neće pojaviti sve do nalijeganja vratašca.



**Slika 25. Povećana naprezanja na sredini kralježnice karabinera**

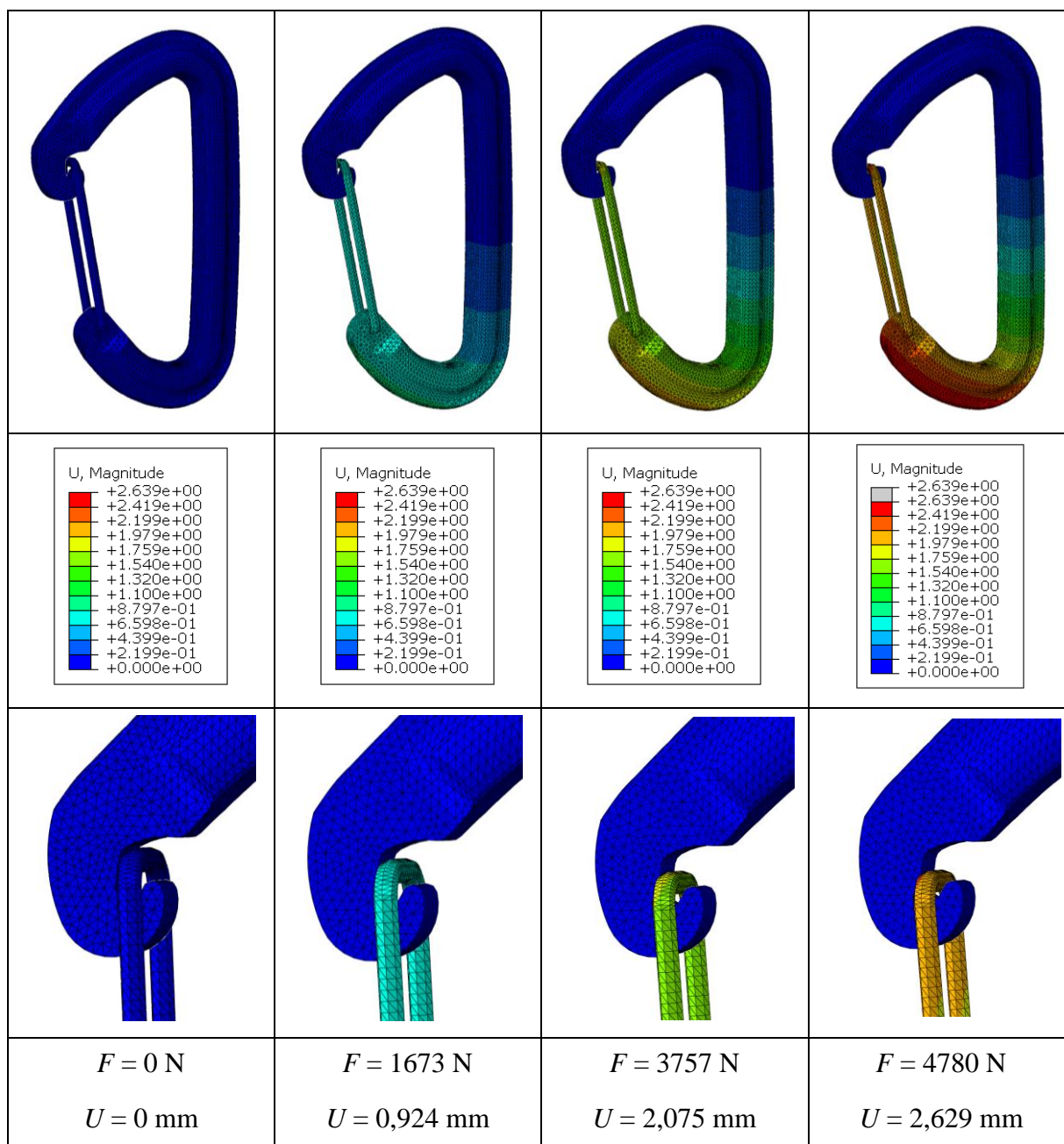
Ako se pogledaju rezultati eksperimentalnih testova loma karabinera na kidalicama, upravo su mjesta najvećih napreznja vidljiva u ovoj analizi kritična mjesta na kojima karabiner najčešće puca (Slika 26).



**Slika 26. Mjesta najčešćeg loma karabinera [18]**

Tablica 6. prikazuje deformaciju karabinera kod opterećenja silom 1673 N, 3757 N i 4780 N, a maksimalni pomaci za navedena opterećenja iznose 0,924 mm, 2,075 mm i 2,629 mm.

Tablica 6. Deformacije tijekom procesa opterećivanja



---

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu napravljen je model D-asimetričnog karabinera sa žičanim vratašcima koji se koristi u sportskom penjanju kao dio kompleta za međuosiguranje u usponu. Provedena je analiza naprezanja i pomaka metodom konačnih elemenata za opterećenje koje bi u stvarnim uvjetima uzrokovao ozbiljan pad penjača na stijeni.

Suprotno očekivanjima, deformacija karabinera nije bila dovoljno velika da dođe do nalijeganja vratašca na nos karabinera. Najveća naprezanja su bila na unutarnjim krajevima kralježnice karabinera i čak su na dva mjesta premašila vlačnu čvrstoću materijala što bi značilo da pri svakom većem padu dolazi do loma karabinera, ali u praksi to nije tako. Uzrok ove pojave su vjerojatno pojednostavljenja, a za točnije rezultate trebalo bi napraviti precizniju geometriju i provesti dinamičku analizu jer se padovi u stvarnosti ne događaju statički kao što je ovdje zadano.

Ako se izuzmu dva mjesta najvećih naprezanja, rezultati analize pokazuju da su naprezanja koja nastaju na ostatku karabinera daleko ispod granice vlačne čvrstoće i da se i u slučaju najgorih padova penjači mogu osloniti na karabiner kao siguran dio opreme, ako ga pravilno koriste. Treba ipak imati na umu da se materijal troši i nakon nekoliko godina česte uporabe može doći do smanjenja površine poprečnog presjeka karabinera ili do zareza na površini od npr. udaraca u stijenu što će rezultirati lomom karabinera pri mnogo manjim opterećenjima, a oštri zarezi mogu oštetiti i užu. Zato je za život važno redovito pregledavati opremu i zamijeniti dotrajale dijelove.

---

## LITERATURA

- [1] Alpinistička škola, <http://goo.gl/FwbPy>, pristupljeno 10.11.2022.
- [2] The First Ascent of the Matterhorn, <https://www.onverticality.com/blog/first-ascent-of-the-matterhorn>, pristupljeno 1.12.22.
- [3] O alpinizmu, <https://www.hps.hr/alpinizam/>, pristupljeno 10.11.2022.
- [4] Spit, <https://www.shutterstock.com/image-photo/close-dof-athletic-female-rock-climber-1811975866>, pristupljeno 23.2.2023.
- [5] Lead Climbing: Clipping Strategies, Techniques, and Safety Tips, <https://mojagear.com/sport-climbing-tips-clipping/>, pristupljeno 15.11.2022.
- [6] Goddard & Neumann: Performance Rock Climbing, Stackpole books, 1993.
- [7] Kauer, B., W. Gebert, I. Werner. (1999). Three-dimensional analysis of rock climbing techniques. First International Conference on Science and Technology in Climbing and Mountaineering, Leeds, UK, April 1999.
- [8] Climbing shoes for bouldering, <https://inews.co.uk/ibuys/travel-and-outdoor/best-climbing-shoes-bouldering-beginners-intermediate-indoor-outdoor-men-women-uk-263712>, pristupljeno 26.11.2022.
- [9] Reverso 4 Review, <https://www.climbing.co.za/2012/07/reverso-4-review/>, pristupljeno 26.11.2022.
- [10] Complete Guide into Belay Devices - Differences and Efficient Usage, <https://www.youtube.com/watch?v=qx3x5MMqGUG>, pristupljeno 26.11.2022.
- [11] Klin, Karabineri, <https://www.iglusport.hr/penjanje>, pristupljeno 6.12.2022.
- [12] Hammering in rock pitons, [https://www.youtube.com/watch?v=JOe2TnWtNRI&ab\\_channel=MountaineeringMethodology](https://www.youtube.com/watch?v=JOe2TnWtNRI&ab_channel=MountaineeringMethodology), pristupljeno 6.12.2022.
- [13] Spit, <https://zagrebclimbing.com/2013/05/malo-o-spitovima/>, pristupljeno 6.12.2022.
- [14] Ask the masters: building anchors with passive pro, [https://www.rockandice.com/master-class-climbing-tips/ask-the-master-building-anchors-with-passive-pro/#\\_reg-wall](https://www.rockandice.com/master-class-climbing-tips/ask-the-master-building-anchors-with-passive-pro/#_reg-wall), pristupljeno 24.11.2022.
- [15] Everything about carabiners, <https://www.climbinganchors.com.au/buying/how-to-guides/carabiners-buying-guide/>, pristupljeno 7.2.2023.

- 
- [16] How Carabiners Are Made, [https://www.youtube.com/watch?v=DbygmUNMoiQ&ab\\_channel=EllisBrighamMountainSports](https://www.youtube.com/watch?v=DbygmUNMoiQ&ab_channel=EllisBrighamMountainSports), pristupljeno 15.11.2022.
- [17] Fall Factors, <https://www.ropebook.com/information/fall-factors/>, pristupljeno 10.12.2022.
- [18] Alex Strait, Rock Climbing Clip Analysis Report, A Comparison of Tensile Testing and FEA Modeling for the Black Diamond Neutrino Carabiner, 2015
- [19] 7075 Aluminij - Svojstva, čvrstoća i namjene, <http://hr.yzpipes.com/info/7075-aluminum-properties-strength-and-uses-58080844.html>, pristupljeno 18.1.2023.
- [20] 316 Nehrđajući čelik, <http://hr.sxthsspipe.com/info/304-stainless-steel-versus-316-stainless-steel-28992989.html>, pristupljeno 24.1.2023.
- [21] UIAA standard, <https://theuiaa.org/safety/safety-standards/>, pristupljeno 24.1.2023.
- [22] Carabiner model - 24 kN, [https://grabcad.com/library/carabiner-24-kn-1/details?folder\\_id=475127](https://grabcad.com/library/carabiner-24-kn-1/details?folder_id=475127), pristupljeno 27.1.2023.
- [23] Lead falls in climbing gyms - how much forces does it generate? [https://www.youtube.com/watch?v=m8z6adEqaOs&t=33s&ab\\_channel=HowNOT2](https://www.youtube.com/watch?v=m8z6adEqaOs&t=33s&ab_channel=HowNOT2), pristupljeno 28.1.2023.
- [24] All-round Quickdraws Comparison Review, [https://www.ukclimbing.com/gear/climbing/quickdraws/all-round\\_quickdraws-3999](https://www.ukclimbing.com/gear/climbing/quickdraws/all-round_quickdraws-3999), pristupljeno 28.1.2023.
- [25] Sorić, J.: Metoda konačnih elemenata, Golden Marketing, Tehnička knjiga, Zagreb, 2004.