

Optimiranje konstrukcije kablskih ljestava

Cmuk, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:878547>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-19**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN



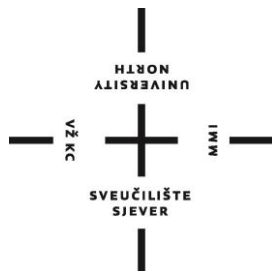
DIPLOMSKI RAD br. 122/STR/224

OPTIMIRANJE KONSTRUKCIJE KABELSKIH
LJESTAVA

Marko Cmuk

Varaždin, srpanj 2024. godine

SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN
Diplomski sveučilišni studij Strojstvo



DIPLOMSKI RAD br. 122/STR/224

**OPTIMIRANJE KONSTRUKCIJE KABELSKIH
LJESTAVA**

Student:

Marko Cmuk, 0248076596

Mentor:

Prof. dr. sc. Mirko Karakašić

Varaždin, srpanj 2024. godine

Sveučilište Sjever



IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski/specijalistički rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Marko Cmuk pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog rada pod naslovom Optimiranje konstrukcije kablskih ljestava te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:

Marko Cmuk

Sukladno članku 58., 59. i 61. Zakona o visokom obrazovanju i znanstvenoj djelatnosti završne/diplomske/specijalističke radove sveučilišta su dužna objaviti u roku od 30 dana od dana obrane na nacionalnom repozitoriju odnosno repozitoriju visokog učilišta.

Sukladno članku 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Strojarstvo

PRISTUPNIK Marko Cmuk

JMBAG 0248076596

DATUM 13.9.2024.

KOLEGIJ Optimiranje konstrukcija

NASLOV RADA Optimiranje konstrukcije kabelskih ljestava

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Optimization of the cable ladders design

MENTOR Mirko Karakašić

ZVANJE Prof. dr. sc.

ČLANOVI POVJERENSTVA

- Izv. prof. dr. sc. Sanja Šolić - Predsjednica povjerenstva
- Doc. dr. sc. Matija Bušić - Član
- Prof. dr. sc. Mirko Karakašić - Član (mentor)
- doc.dr.sc. Boris Jalušić - rezervni član
-

Zadatak diplomskog rada

BROJ 122/STR/2024

OPIS

Diplomski rad fokusira se na optimiranje konstrukcijske izvedbe kabelskih ljestava s ciljem smanjenja mase i poboljšanja nosivosti. S obzirom na rastuće potrebe za električnom energijom, ključno je imati učinkovite sustave vođenja kabela. Kabelske police, koje omogućuju organizaciju i zaštitu kabela, moraju biti prilagođene različitim uvjetima i materijalima. Tehnološki napredak omogućava razvoj lakših i izdržljivijih rješenja. Rad započinje općom analizom postojećih konstrukcijskih rješenja na tržištu, uključujući različite vrste kabelskih ljestava i njihove materijale. Kroz eksperimentalna ispitivanja i simulacije, primjenom metode konačnih elemenata (MKE), istraženi su utjecaji varijacija u geometrijskim parametrima poput visine, širine i debljine stjenke na nosivost ljestava. Optimizacija je uključivala smanjenje mase dvaju reprezentantnih konstrukcijskih elemenata ljestava, odnosno prečke i šine. Funkcijom cilja obuhvaćeno je smanjenje mase, ali isto tako uz zadovoljavanje funkcije ograničenja u vidu grance tečenja materijala i pomaka. Poboljšanja predstavljena u ovom radu povećavaju učinkovitost, sigurnost i dugoročnu održivost kabelskih ljestava. Rad otvara mogućnosti za nova istraživanja i razvoj novih tehnologija u konstrukciji kabelskih ljestava, naglašavajući ekonomske i ekološke prednosti optimizacije.

ZADATAK URUČEN

16.09.2024.

POTPIS MENTORA

Prof. dr. sc. Mirko Karakašić

Mirko Karakašić



Sažetak

Ovaj diplomski rad fokusira se na optimizaciju kabelaških ljestava s ciljem smanjenja mase i poboljšanja nosivosti. S obzirom na rastuće potrebe za električnom energijom, ključno je imati učinkovite sustave vođenja kabela. Kabelaške police, koje omogućuju organizaciju i zaštitu kabela, moraju biti prilagođene različitim uvjetima i materijalima. Tehnološki napredak omogućava razvoj lakših i izdržljivijih rješenja. Rad započinje sveobuhvatnom analizom postojećih rješenja na tržištu, uključujući različite vrste kabelaških ljestava i njihove materijale. Kroz eksperimentalna ispitivanja i simulacije, uključujući metodu konačnih elemenata (MKA), istraženi su utjecaji varijacija u parametrima poput visine, širine i debljine stjenke na nosivost ljestava. Optimizacija je uključivala smanjenje mase prečke i smanjenje von Misesovog napreznja šine, što je rezultiralo povećanjem nosivosti i smanjenjem mase. Poboljšanja predstavljena u ovom radu povećavaju učinkovitost, sigurnost i dugoročnu održivost kabelaških ljestava. Rad pruža temelje za buduća istraživanja i razvoj novih tehnologija u konstrukciji kabelaških ljestava, naglašavajući ekonomske i ekološke prednosti optimizacije.

Ključne riječi: sustavi vođenja kabela, smanjenje mase, poboljšanje nosivosti, Metoda konačnih elemenata (MKE), učinkovitost

Summary

This thesis focuses on the optimization of cable ladders with the aim of reducing weight and improving load capacity. Given the growing demand for electrical power, it is essential to have efficient cable management systems. Cable trays, which facilitate the organization and protection of cables, must be adapted to various conditions and materials. Technological advancements allow for the development of lighter and more durable solutions. The paper begins with a comprehensive analysis of existing solutions on the market, including different types of cable ladders and their materials. Through experimental testing and simulations, including the Finite Element Method (FEM), the effects of variations in parameters such as height, width, and wall thickness on the load capacity of the ladders were investigated. The optimization involved reducing the weight of the rung and decreasing the von Mises stress on the rail, resulting in increased load capacity and reduced weight. The improvements presented in this thesis enhance the efficiency, safety, and long-term sustainability of cable ladders. The paper provides a foundation for future research and development of new technologies in the construction of cable ladders, emphasizing the economic and ecological benefits of optimization.

Keywords: cable management systems, weight reduction, load capacity improvement, Finite Element Method (FEM), efficiency

Popis korištenih kratica

MKE/FEM metoda konačnih elemenata (eng. finite element method)

FRP polimer ojačan vlaknima (eng. fibre – Reinforced plastic)

ABS akrilonitril butadien stiren (acrylonitrile butadiene styrene)

PVC polivinil klorid

CPU središnja procesorska jedinica, procesor (eng. central processing unit)

GPU grafička procesorska jedinica, grafički čip (eng. Graphics processing unit)

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Pregled kabljskih polica	5
2.1.	Materijali kabljskih polica	5
2.2.	Tipovi kabljskih polica	8
2.2.1.	Žičane kabljske police	8
2.2.2.	Kabljske police s punim dnom	9
2.2.3.	Kanalne kabljske police	10
2.2.4.	Kabljske ljestve.....	12
2.3.	Tipovi oslanjanja kabljskih polica	13
3.	Uzorak ispitivanja i optimiranja.....	16
3.1.	Materijali	17
3.2.	Utjecaji dimenzija na nosivost	19
3.2.1.	Utjecaj širine kabljskih ljestava na nosivost	21
3.2.2.	Utjecaj visine kabljskih ljestava na nosivost	26
3.2.3.	Utjecaj debljine stjenike kabljskih ljestava na nosivost	27
3.3.	Simulacija optimizacijskog modela	29
4.	Optimiranje konstrukcije primjenom metode konačnih elemenata	35
4.1.	Optimiranje konstrukcije prečke	35
4.2.	Optimiranje konstrukcije šine	43
4.3.	Analiza rezultata.....	51
5.	Zaključak.....	54
6.	Literatura.....	56
	Popis slika	58
	Popis tablica	60
	Popis grafova	61

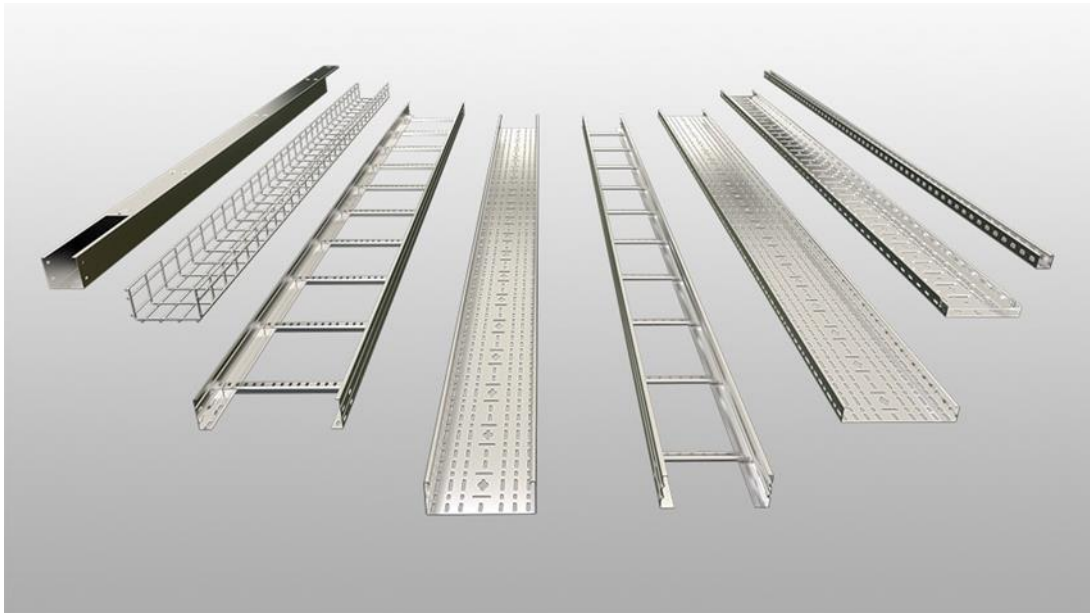
1. Uvod

Potrebe za električnom energijom sve više rastu, kako u privatnim kućanstvima, a daleko više, u industrijskim okruženjima. Danas je uobičajeno da gotovo svaka industrija koristi robote, pokretne trake i slične strojeve koji zahtijevaju električnu energiju. Zbog toga postaje sve veća potreba za poboljšanjima sustava za vođenje kablova, kabliranja i ožičenja kako bi se zadovoljili zahtjevi za većim udaljenostima i kapacitetima opterećenja. Kvalitetan sustav vođenja kabela, smanjuje rizik od oštećenja i olakšava održavanje. Ovo je posebno važno u okruženjima gdje se kabeli protežu na duge udaljenosti i nose značajna opterećenja. Jedni od ključnih elemenata za sustave vođenja kabela su kableske police.

Kableske police vidljive na slici 1.1 postali su jedan od ključnih infrastrukturnih elemenata, takve konstrukcije imaju važnu funkciju u podupiranju, organiziranju i zaštiti kabela, koji su nužni za učinkovito i sigurno upravljanje električnim i komunikacijskim mrežama. U industrijskim postrojenjima, upravljanje kabelima pomaže organizirati veliki broj kabela koji se koriste za napajanje raznih strojeva i opreme. Police omogućuju pravilnu instalaciju kabela i zaštitu od mehaničkih oštećenja, čime se smanjuje opasnost od kvarova i povećava sigurnost radnog okruženja. U komercijalnim zgradama kableske police koriste se za organiziranje kabela u sustavima rasvjete, klimatizacije i komunikacijskih mreža. Njihova uloga u tim sredinama nije samo zaštita kabela, već i očuvanje estetskog izgleda prostora. Pravilno postavljanje kableskih policija pomaže u održavanju elegantnog i profesionalnog izgleda interijera, dok istovremeno pruža jednostavan pristup za održavanje i nadogradnju sustava. U podatkovnim centrima gdje su kabeli najbitniji elementi za rad poslužitelja i mrežne opreme, kableske police igraju ključnu ulogu u upravljanju složenim kableskim mrežama. Ovdje organizacija kabela ne samo da pridonosi estetsici prostorije, već omogućuje optimalno hlađenje i učinkovitost opreme. U tom kontekstu kableska policija često dolazi s dodatnim značajkama kao što su integrirani sustavi ventilacije ili zaštita od elektromagnetskih smetnji.

Danas su kableske police postale nužan dio industrijske i komercijalne gradnje nudeći brza, ekonomična i fleksibilna rješenja. Kableske police mogu podržati sve vrste ožičenja:

- visokonaponski dalekovodi,
- kabeli za distribuciju električne energije,
- osjetljivo kontrolno ožičenje,
- telekomunikacijsko ožičenje,
- optički kabeli

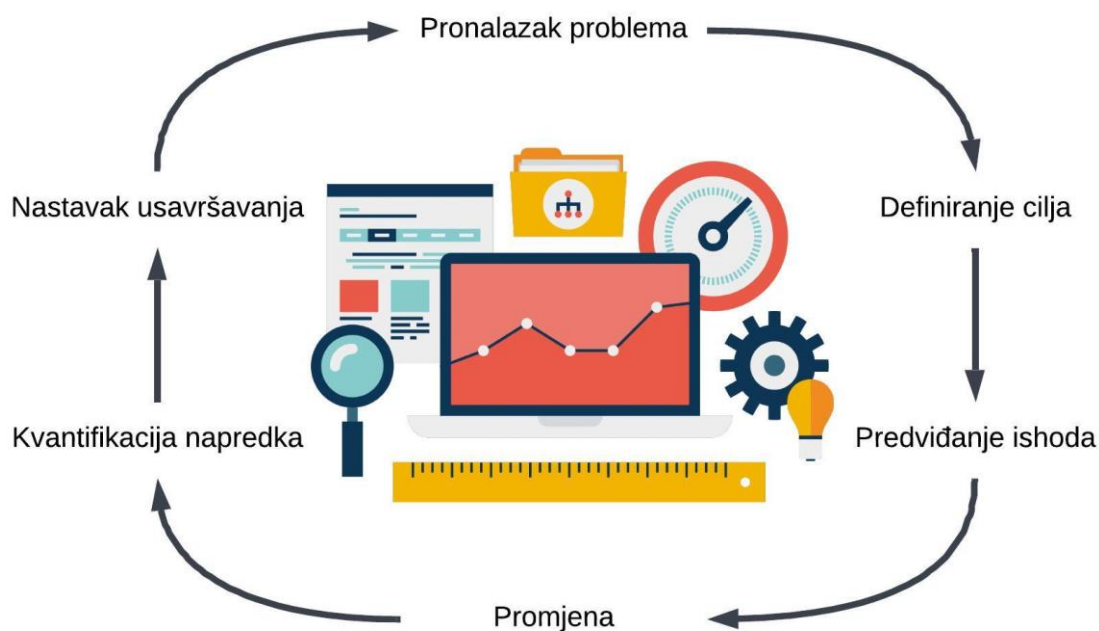


Slika 1.1 Kabelske police [1]

U današnje vrijeme, kada sve napreduje velikom brzinom, gotovo svaka konstrukcija prolazi kroz značajne promjene, bilo da je riječ o dizajnu, načinu izrade ili izboru materijala. Kabelske police nisu izuzetak – njihov dizajn i efikasnost se neprestano unaprjeđuju. Ipak, uvijek postoji prostor za dalji napredak. Današnja tehnologija omogućava inovacije koje su nekada bile nezamislive. Materijali postaju lakši, izdržljiviji i ekološki prihvatljiviji, što doprinosi dugovječnosti i pouzdanosti konstrukcija. Dizajn se također usklađuje s potrebama i preferencijama modernog vremena, omogućavajući jednostavniju instalaciju, bolju organizaciju i veću fleksibilnost.

Optimiranje je proces pronalaženja najboljeg mogućeg rješenja za određeni problem unutar određenih uvjeta i ograničenja. To znači maksimizaciju ili minimizaciju vrijednosti određenih veličina. Prvi korak u tom postupku je precizno postavljanje problema, uključujući identifikaciju varijabli koje treba optimizirati, postavljanje ciljeva i definiranje ograničavajućih faktora. Optimiranje ima velik broj metoda, izbor tih metoda zavisi o konkretnom problemu kao i specifičnim zahtjevima. Evaluacija podrazumijeva simulacije ili testiranja koja su nužna kako bi se osigurala efikasnost rješenja u stvarnom svijetu. Optimiranje nije jednokratni proces; gotovo uvijek mora se obaviti više iteracija da bi se pronašlo najbolji rezultat koji je moguće ostvariti. U nekim slučajevima biti će potrebno promijeniti ciljeve ili ograničenja na temelju novih činjenica.

Slika 1.2 prikazuje opću, sveobuhvatnu strukturu procesa optimiranja. Prvi korak je pronalaženje specifičnog problema koji treba riješiti. Zatim slijedi postavljanje dostižnih, mjerljivih ciljeva koji dokazuju napredak te predviđanje rezultata na temelju promjena u procesu. Nakon toga slijedi najvažniji dio, a to je uvođenje inkrementalnih promjena koje vode od problema do rješenja. Na kraju ostaje kvantifikacija napretka uz nastavak usavršavanja te automatizacija, ako je moguće.



Slika 1.2 Proces optimiranja [2]

U prvom dijelu rada analiziraju se postojeća rješenja, s posebnim naglaskom na kabelske ljestve. Obrađuju se različiti materijali i konstrukcijska rješenja koji se trenutno koriste te se identificiraju ključni parametri koji utječu na masu i nosivost. Kroz ovu analizu, nastoji se odrediti maksimalna nosivost raznih konstrukcija (do plastične deformacije), uzimajući u obzir sigurnosne faktore i standarde u industriji. U drugom dijelu rada cilj je primjena metode konačnih elemenata (MKE) u optimizaciji konstrukcija. Takva metoda omogućava detaljnu analizu deformacija i naprezanja unutar konstrukcije pod djelovanjem različitim opterećenjima. Korištenjem MKE-a, precizno se simulira ponašanje konstrukcija pod utjecajem stvarnih uvjeta, čime je moguće identificirati moguća poboljšanja u dizajnu. Glavni cilj rada je optimirati osnovna dva konstrukcijska elementa kabelskih ljestava. Cilj je postići optimalnu ravnotežu između mase i

nosivosti, što će na kraju rezultirati smanjenjem ukupnih troškova proizvodnje i instalacije. Proces optimiranja temelji se na analizi različitih konstrukcijskih rješenja i materijala, te njihovo testiranje kroz simulacije. Nakon optimiranja, rezultati se temeljito ocjenjuju kako bi se utvrdila njihova učinkovitost i praktičnost (mogućnost izrade). Obuhvaća usporedbu optimirane konstrukcije s postojećim rješenjem, kao i analizu postignutih poboljšanja u masi i nosivosti.

2. Pregled kablskih polica

Kabelske police općenito se dijele na četiri tipa: žičane ili mrežaste kabelske police, police za kabele s punim dnom, kanalne kabelske police i kabelske ljestve. Sastoje se od raznih vrsta dodataka, univerzalnih dijelova, dijelova za pojačanje i dijelova za ugradnju. Svaki tip nosača kabela ima svoje jedinstvene prednosti primjene i svrhu dizajna. Prilikom odabira potrebno je uzeti u obzir stvarnu vrstu kabela, uvjete okoline i zahtjeve za instalaciju. Na primjer, nosači kabela unutar zgrada mogu se samostalno postaviti ili pričvrstiti na različite dijelove, strukture i nosače cijevnih nosača. Odlikuje ih jednostavna struktura, estetski izgled, fleksibilna konfiguracija i jednostavno održavanje. S druge strane, kabelske police postavljene na otvorenom, posebice u blizini mora ili u korozivnim područjima, moraju biti izrađene od materijala koji su otporni na koroziju, vlagu, imaju dobru prionjivost i visoku otpornost na udarce.

Većina sustava kablskih polica izrađena je od metala otpornog na koroziju (nisko ugljični čelik, nehrđajući čelik ili aluminijska legura) ili od metala s završnom obradom otpornom na koroziju (cink ili epoksid). Izbor materijala za bilo koju pojedinu instalaciju ovisi o okruženju instalacije (razmatranja o koroziji i elektricitetu) i cijeni.

2.1. Materijali kablskih polica

1. Aluminiij

Kabelske police izrađene od ekstrudiranog aluminiija često se koriste zbog visokog omjera čvrstoće i gustoće, izvrsne otpornosti na određena korozivna okruženja te jednostavnosti ugradnje. Aluminijske police nude prednosti male mase (oko 50% lakše od čeličnih polica) i ne zahtijevaju održavanje. Budući da aluminijske police nisu magnetske, električni gubici su minimizirani.

Također aluminijske police mogu se specijalno dizajnirati za pomorske primjene. Takve legure sadrže silicij i magnezij u odgovarajućim omjerima, što omogućuje toplinsku obradu i stvara magnezijev silikat. Aluminijske legure na bazi magnezija i silicija imaju dobru sposobnost oblikovanja, izvrsna strukturalna svojstva i izuzetnu otpornost na koroziju. Otpornost aluminiija na koroziju, uključujući otpornost na atmosferske utjecaje, rezultat je filma od aluminijevog oksida koji štiti površinu. Prije ugradnje, važno je ispitati otpornost aluminiija na kemikalije u specifičnom okruženju primjene [3].

2. Čelik

Za kableske police najčešće se koriste konstrukcijski čelici koji se dobivaju metodama toplog i hladnog valjanja. Glavne prednosti čeličnih kableskih polica uključuju visoku čvrstoću i nisku cijenu. Međutim, njihovi nedostaci su velika masa, niska električna vodljivost i relativno slaba otpornost na koroziju. Brzina korozije može varirati ovisno o mnogim čimbenicima, uključujući okoliš, primijenjeni premaz ili zaštitu te sastav čelika. Otpornost na koroziju može se poboljšati primjenom završnih slojeva i premaza, kao što su cinčanje, vruće cinčanje, epoksidni i polimerni premazi.

Pocinčane prevlake najčešće se koriste za kableske police, isplative su i štite od širokog spektra tvari iz okoliša. Čelik se oblaže cinkom elektrolizom, uranjanjem u kupku cinkovih soli. Kombinacija karbonata, hidroksida i cinkovih oksida stvara zaštitni film koji štiti sam cink. Otpornost na koroziju izravno je povezana s debljinom prevlake. Također je moguće prethodno cinčanje, pri čemu se materijal tijekom valjanja propušta kroz rastaljeni cink, čime se dobiva gotov pocinčan kolut.

Vruće cinčanje koristi se isključivo za police koje su izložene vanjskim utjecajima ili vrlo zahtjevnim industrijskim okruženjima zbog debljeg premaza i bolje zaštite od korozije. Proces se provodi uranjanjem cijele police u kupku rastaljenog cinka.

3. Nehrđajući čelik

Nehrđajući čelik nudi visoku granicu razvlačenja te otpornost na organske i anorganske tvari. Više razine kroma i nikla te smanjena razina ugljika povećavaju otpornost na koroziju i olakšavaju zavarivanje, također neki uključuju molibden za povećanje čvrstoće na visokim temperaturama i poboljšanje otpornosti na koroziju, posebno na klorid i sumpornu kiselinu.

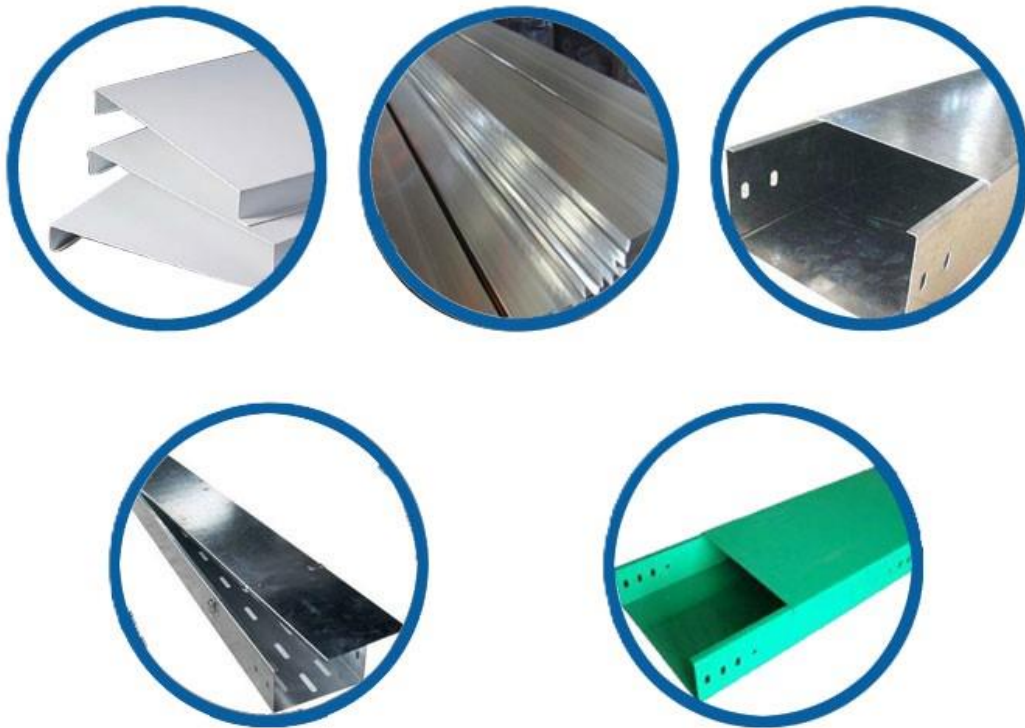
4. Ostali materijali

Kableske police od polimera ojačanih vlaknima idealno su rješenje za podupiranje i upravljanje kabelima u područjima koja su stalno vlažna ili gdje su prisutni elementi poput slane vode. Imaju vrlo visoku otpornost na koroziju i malu masu uz relativno visoku nosivost, također nisu vodljive niti magnetične.

Za specifične primjene, najčešće vođenje optičkih kabela, koristi se i ABS. Njegova primjena se sve više povećava zbog nekoliko prednosti nad metalnim policama. Ima visok omjer čvrstoće i mase, što ih čini laganim i lakim za rukovanje tijekom instalacije. Za razliku od metalnih polica,

ABS police ne zahtijevaju posebne alate ili opremu za rezanje i savijanje, što ih čini isplativim rješenjem za upravljanje kabelima.

PVC police se koriste iz sličnih razloga. One su dobri izolatori električne energije, nekorozivne su, lagane, izdržljive i idealne za vanjske instalacije. Izbor između ABS i PVC kanala često ovisi o specifičnim zahtjevima projekta i okruženju u kojem će se sustav za upravljanje kabelima postaviti [3].



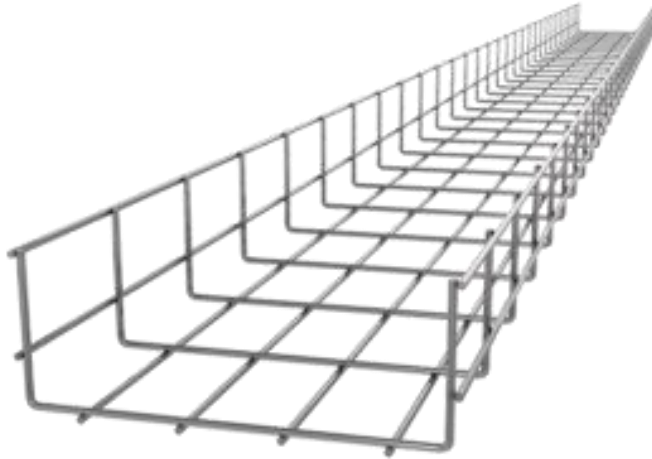
Slika 2.1 Materijali kabelskih polica (lijevo gore aluminij, sredina nehrđajući čelik, desno pocinčani čelik, dolje polimer ojačana vlaknima) [4]

2.2. Tipovi kablskih polica

Kao što je već spomenuto, kablške police dijele se na četiri osnovna tipa: žičane ili mrežaste kablške police, police za kabele s punim dnom, kanalne kablške police i kablške ljestve. Odabir ovisi o više čimbenika, i ponekad više od jednog tipa zadovoljava specifičnu primjenu, stoga se često uzima i najisplativija opcija. U nastavku će biti objašnjen svaki tip s najvećim fokusom na kablškim ljestvama zbog optimizacije istih. Svaki tip ima određene prednosti i mane, i različite primjene. Važno je napomenuti da se odabirom odgovarajućeg materijala neke od mana mogu poboljšati ili u potpunosti ukloniti. Prilikom odabira kablške police, nekoliko je ključnih čimbenika koje treba uzeti u obzir. Za početak, potrebno je odabrati odgovarajući tip za vrstu i veličinu kabela, razmotriti utjecaje okoline, što uključuje temperaturu, vlagu, prašinu itd. Također, vrlo je važno odabrati policu koja ima dovoljnu nosivost, odnosno koja može podnijeti masu kabela i žica. Zahtjeve za ugradnju ne smije se zanemariti, a oni uključuju vrste i tipove potrebnih nosača ili oslonaca [5].

2.2.1. Žičane kablške police

Žičane kablške police slika 2.2 u zadnje vrijeme sve više dobivaju na popularnosti zbog brojnih prednosti koje pružaju. Ove konstrukcije sastavljene su od mreža međusobno povezanih žica, što ih čini izuzetno laganima i omogućava najmanji utrošak materijala u usporedbi s ostalim tipovima kablških polica. Izuzetno su jednostavne za ugradnju, jer se mogu brzo i lako postaviti, što smanjuje troškove instalacije i vrijeme potrebno za montažu. Jedna od ključnih prednosti žičanih kablških polica je najbolja ventilacija. Otvorena struktura mreže omogućava izvrsno strujanje zraka, što učinkovito sprječava pregrijavanje kabela. Ovo je posebno važno u okruženjima gdje je potrebna pouzdana termalna regulacija kako bi se spriječili kvarovi i zastoji u mreži. Najčešći materijali korišteni za izradu žičanih kablških polica uključuju pocinčani čelik, a manje aluminij i nehrđajući čelik. Žičane kablške police koriste se za niski i srednji napon, a posebno su pogodne za primjene u telekomunikaciji, za optičke kabele i u podatkovnim centrima. Zbog svoje strukture, najčešće se koriste u kraćim rasponima do 3 metra. Njihova fleksibilnost i prilagodljivost čine ih izvrsnim izborom za instalacije gdje je potrebna česta reorganizacija ili nadogradnja kabela. Pored svih ovih prednosti, žičane kablške police omogućavaju lakši vizualni pregled i održavanje kabela. Otvorena mrežasta struktura omogućava brzo i jednostavno identificiranje probleme ili potrebe za nadogradnjom, što dodatno smanjuje vrijeme zastoja i povećava učinkovitost održavanja [6].



Slika 2.2 Žičana kabela polica [7]

2.2.2. Kabela police s punim dnom

Kao što naziv sugerira, police za kabele s punim dnom slika 2.3 imaju kontinuiranu, čvrstu površinu bez ikakvih provrta ili perforacija. Zbog svog oblika, mogu primiti široku paletu kabela, uključujući one s osjetljivim komponentama poput kabela od optičkih vlakana, a upotrebljavaju se i za podršku velikog broja kontrolnih i višežilnih instrumentacijskih kabela malog promjera. Obično se koriste u aplikacijama gdje kabele i žice treba zaštititi od padajućih krhotina ili tekućina. Kabela police s punim dnom dostupne su u različitim veličinama i materijalima, uključujući pocinčani čelik, aluminij, nehrđajući čelik, PVC, ABS i FRP. Za razliku od ostalih tipova polica, kabela police s punim dnom mogu skupljati i zadržavati vlagu. U takvim slučajevima preporučuje se bušenje provrta sa strane i na sredini kako bi se ograničilo nakupljanje vode.

Neke od prednosti kabela police s punim dnom su:

- Čvrsta baza police štiti kabele od fizičkih oštećenja poput gnječenja ili abrazije, što je čini prikladnom za okruženja s teškim strojevima ili mogućim mehaničkim udarcima.
- Police s punim dnom poželjne su u postavkama gdje je zaštita od elektromagnetskih ili radio frekventnih smetnji ključna, jer pomaže u održavanju integriteta osjetljivih signalnih kabela.
- Police s punim dnom često pridonose čistijem i organiziranijem izgledu u vidljivim područjima postavljanja.

Primjena im je vrlo široka. Kao što je već spomenuto, koriste se u proizvodnim pogonima, elektranama i drugim područjima gdje su kabeli izloženi potencijalnim fizičkim oštećenjima ili teškim uvjetima. U bolnicama i klinikama, ove police pomažu u upravljanju i zaštiti kritičnih energetskih i podatkovnih vodova bitnih za medicinsku opremu i sustave. Također su prikladne za zgrade i maloprodajne prostore gdje je estetika važna, jer police s punim dnom nude estetski privlačno i uredno rješenje za upravljanje kabelima [8].



Slika 2.3 Kabela polica s punim dnom [9]

2.2.3. Kanalne kabela police

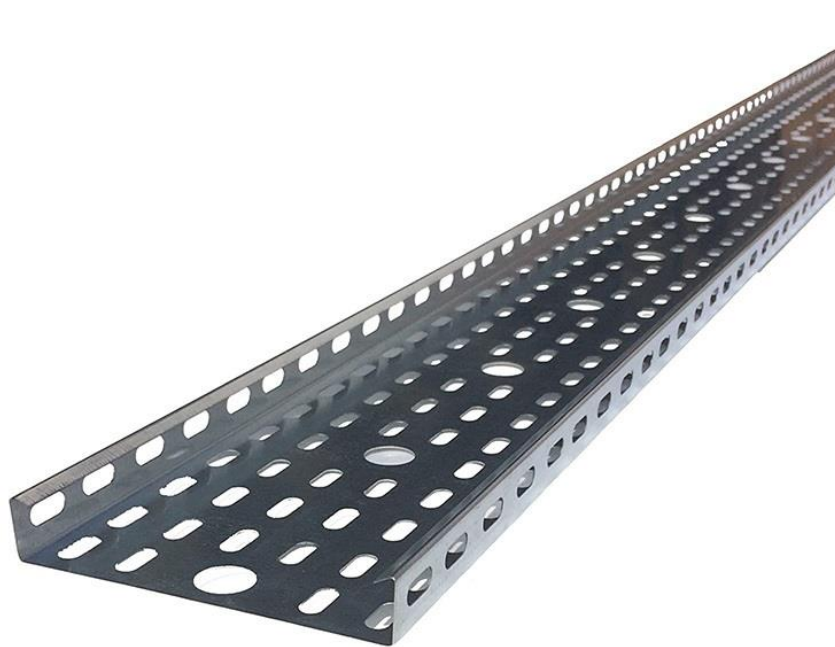
Kanalne kabela police, poznate i kao kabela kanal (perforirane kabela police) slika 2.4, najčešći su tip kabela polica. Imaju provrte na donjem limu i bočnim šinama, što ih čini popularnim izborom za upravljanje instrumentalnim i energetskim kabelima. Perforirani dizajn s ventiliranim dnom omogućuje odličan protok zraka, sprječavajući pregrijavanje. Ovaj tip kabela police pruža potpunu izolaciju kabela, čime se poboljšava sigurnost. Materijali izrade su isti kao i kod prethodnih vrsta polica: pocinčani čelik, nehrđajući čelik, aluminij i FRP, s duljinama u rasponu od 1 do 6 metara.

Neke od istaknutijih prednosti su:

- Perforirani dizajn omogućuje brzu instalaciju, lak pristup za preglede te jednostavno održavanje ili promjene konfiguracije kabela.
- Police štite kabele od fizičkih oštećenja te ih istovremeno štite od prašine, vlage i drugih zagađivača iz okoliša.

- Ove police su općenito pristupačnije u usporedbi s drugim sustavima za upravljanje kabelima, nudeći izdržljivost i jednostavnost održavanja, što znači niže dugoročne troškove.

Također jedna od istaknutijih prednosti je raznovrsnost primjene. Idealne su za rukovanje teškim energetske kabelima gdje su potrebni robusni oslonac i dobra cirkulacija zraka. Podržavaju složene kabelske mreže, poboljšavajući performanse sustava kroz bolju organizaciju kabela i upravljanje toplinom. Osiguravaju urednu i organiziranu instalaciju energetskih i komunikacijskih kabela, poboljšavajući estetske i funkcionalne aspekte uredskih prostora. U telekomunikacijama pružaju strukturirani pristup rukovanju brojnim signalnim kabelima, ključnim za održavanje integriteta i performansi sustava [10].



Slika 2.4 Kanalna kabelska polica [11]

2.2.4. Kabelske ljestve

Kabelske ljestve slika 2.5 su najsnažnija i najrobusnija opcija za vođenje kabela. Dizajn uključuje dvije bočne šine koje su međusobno povezane prečkama te nalikuju na ljestve. Materijali izrade najčešće su pocinčani čelik, nehrđajući čelik, aluminij i FRP. Pružaju mogućnost dugog raspona do 6 metara te nude raznolike širine i visine. Važno je napomenuti da veće širine i veći razmaci prečki smanjuju ukupnu čvrstoću ljestava. Koriste se kada je potrebno rješenje za najteže uvjete u pogledu nosivosti, a uz to pružaju maksimalni protok zraka.

Prednosti su značajne:

- Kabeli mogu ulaziti i izlaziti bilo gdje duž raspona.
- Ljestve omogućuju slobodan protok zraka, što je bitno za izbjegavanje pregrijavanja kabela.
- Minimalno nakupljanje vode, vlage ili prašine.
- Kabeli su izloženi i lako dostupni, što pregled i buduće izmjene čini jednostavnima.
- Mogu se dodati poklopci za zaštitu kabela od UV zraka, snijega/leda i vandalizma.
- Kompatibilnost za unutarnje i vanjske prostore.

Ljestve za kabele dizajnirane su da izdrže masu kabela i pruže stabilnu platformu za kabliranje na velike udaljenosti. U industrijskim uvjetima, kabelske ljestve često se postavljaju u područjima gdje kabele moraju biti podignuti kako bi se izbjegao kontakt s tlom ili drugom opremom. U telekomunikacijskoj industriji kabelske ljestve igraju vitalnu ulogu u podržavanju širokih kabelskih mreža potrebnih za prijenos glasa, podataka i video signala. Jedna od glavnih prednosti korištenja ljestava za kabele je njihova svestranost. Mogu se prilagoditi kako bi zadovoljile specifične zahtjeve, kao što su različita opterećenja kabela, uvjeti okoline i konfiguracije instalacije. Ova fleksibilnost čini kabelske ljestve prikladnima za širok raspon primjena, od unutarnjeg upravljanja kabelima u uredskim zgradama do vanjskih instalacija u teškim industrijskim okruženjima [12].



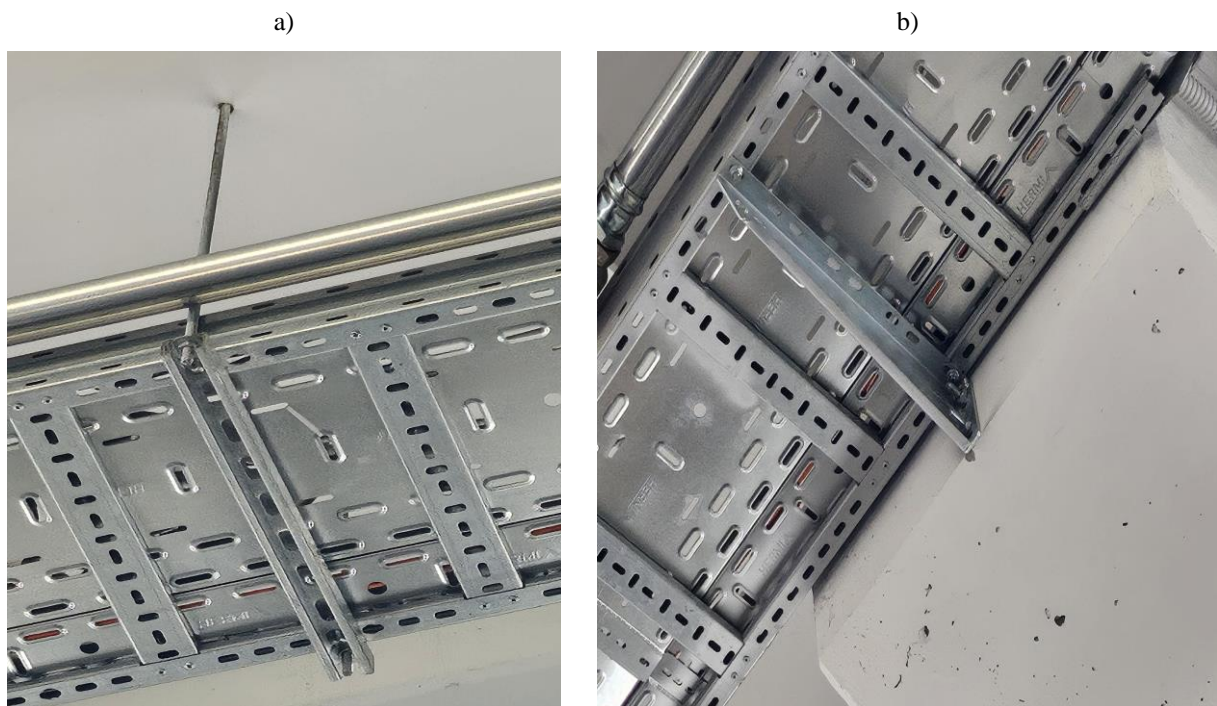
Slika 2.5 Kabelske ljestve [13]

2.3. Tipovi oslanjanja kabelskih polica

Sustavi nosača kabelskih polica dizajnirani su za podupiranje i stabilizaciju kabelskih polica. Ovi nosači ključni su za sigurno montiranje polica na razne strukture, osiguravajući stabilnost i pravilno poravnanje, što omogućuje učinkovito upravljanje kabelima. Oni igraju vitalnu ulogu u ravnomjernoj raspodjeli mase kabela i polica, osiguravajući sigurno usmjeravanje i zaštitu električnih i podatkovnih kabela u industrijskim i komercijalnim prostorima. Nosači su nužni za stvaranje pouzdanog i učinkovitog sustava upravljanja kabelima, s mogućnošću montaže na zid ili strop. Odabirom odgovarajućeg sustava nosača, industrije mogu postići pojednostavljenu i dobro organiziranu kabelsku infrastrukturu za različite primjene [14].

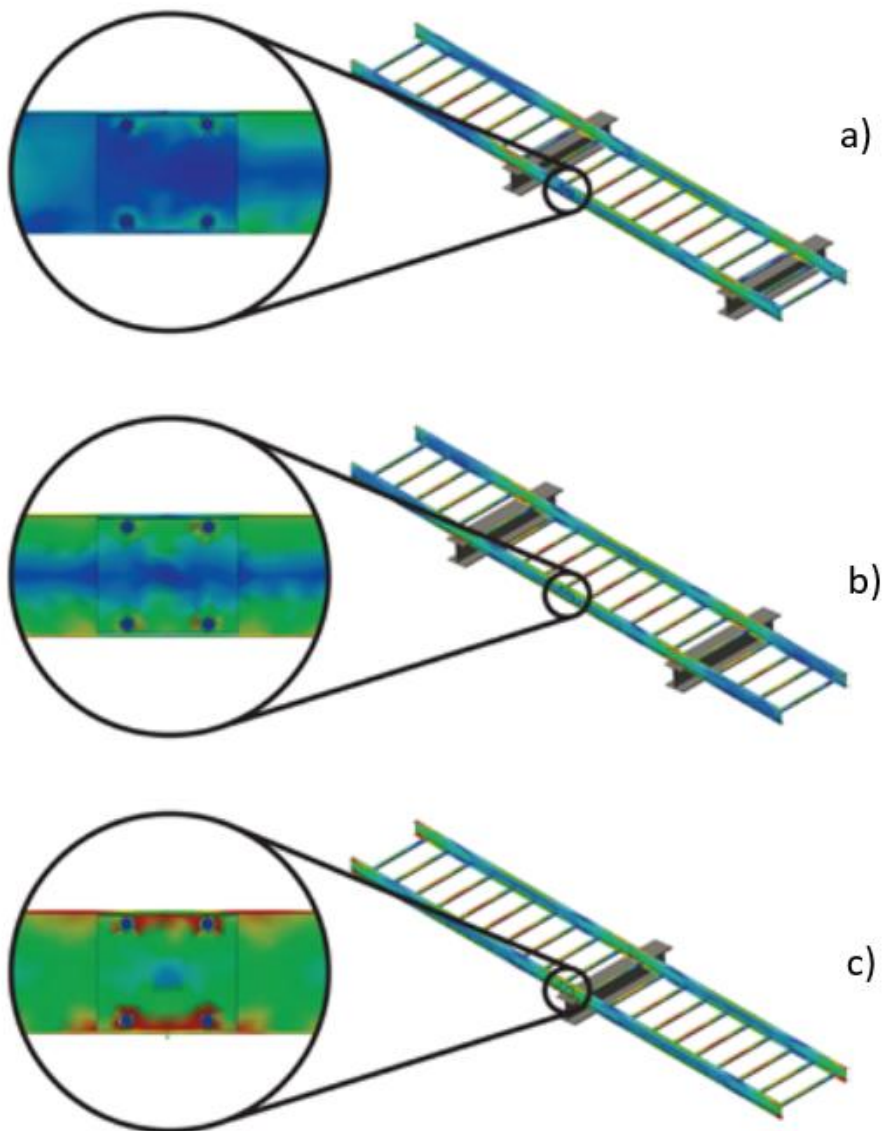
Ukoliko se police ne postavljaju na strop, postoje dva osnovna tipa oslanjanja: zidni nosači (slika 2.6 b) i stropni nosači (slika 2.6 a). Zidni nosači, kao što samo ime govori, postavljaju se na zid. Za izradu se koriste isti materijali kao i za police, npr. ako je polica od nehrđajućeg čelika, i nosači su od nehrđajućeg čelika. Ovi nosači su namijenjeni za veće nosivosti, što ih čini preferiranim rješenjem ukoliko je moguća njihova ugradnja. Zidni nosači osiguravaju čvrstu podršku za police i omogućuju sigurno i stabilno postavljanje kabela. Obavezno se učvršćuju u zid s jedne strane i u policu s druge strane, čime se osigurava stabilnost cijelog sustava.

Postoje razne izvedbe zidnih nosača, koje se mogu prilagoditi specifičnim potrebama instalacije, uključujući različite duljine, kutove i kapacitete nosivosti. Drugi tip nosača je stropni, koji se koristi kada se police ne nalazi blizu zida. Stropni nosači su idealni za situacije gdje zidni nosači nisu praktični ili izvedivi. Ovi nosači se pričvršćuju na stropnu strukturu i pružaju podršku za police koje vise s gornje strane. Stropni nosači nisu namijenjeni za velike nosivosti, što znači da se ne preporučuje postavljanje nekoliko komada zaredom za podršku teškim policama. Ovi nosači su prikladni za lakše kabelske police i manje zahtjevne instalacije. Također, omogućuju fleksibilnost u postavljanju kabela na različitim visinama i mjestima gdje zidna montaža nije moguća. Stropni nosači su često jednostavniji za instalaciju i mogu biti prilagođeni različitim tipovima stropnih struktura.



Slika 2.6 Tipovi nosača a) stropni nosač b) zidni nosač

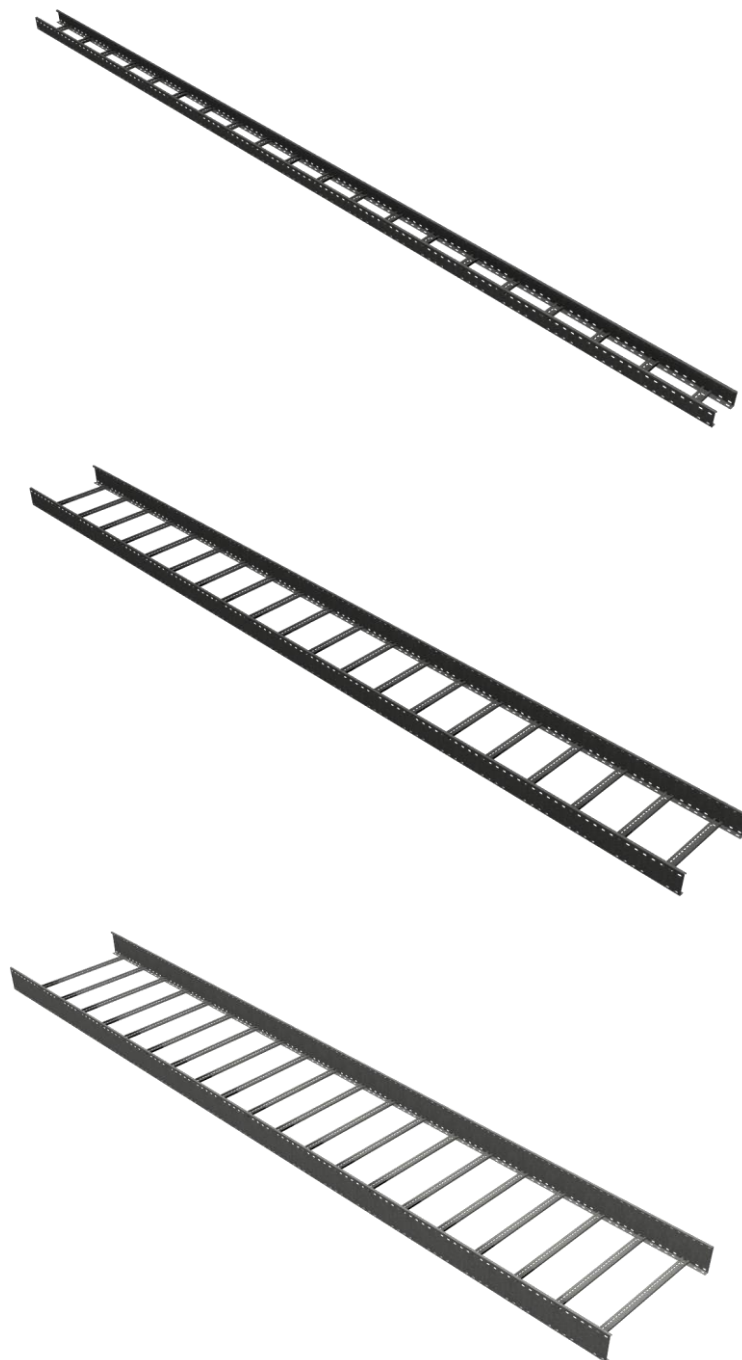
Lokacije nosača kabelskih polica trebaju biti pažljivo odabrane, jer nosač ne smije biti postavljen na spoju dviju polica što je propisano standardom HRN EN 61537:2007 ili IEC 61537 [15]. Slika 2.7 prikazuje optimalno pozicioniranje nosača kabelskih polica. Prva slika a) prikazuje naprezanja kada je nosač postavljen na $\frac{1}{4}$ raspona, slika 2.7 b) pokazuje postavljanje na polovici raspona, dok slika 2.7 c) prikazuje oslanjanje nosača na spoju dviju polica. Vidljivo je da je pozicioniranje na $\frac{1}{4}$ raspona idealno, dok je postavljanje na spoju najnepovoljnija opcija. Raspon postavljanja nosača ovisi o mnogim faktorima, uključujući dužinu police, potrebnu nosivost i tip police.



Slika 2.7 Optimalno pozicioniranje nosača kabelskih ljestava [16]

3. Uzorak ispitivanja i optimiranja

Kabelske ljestve jedan su od najprimjenjivijih tipova kabelskih polica zbog brojnih prednosti, kao što je već napomenuto. Zbog svojih izuzetnih karakteristika, kabelske ljestve dolaze u mnogobrojnim izvedbama slika 3.1. Debljina stjenke najčešće dolazi u izvedbama od 1,5 do 3 mm, dok su visine bočnih šina najčešće od 100 do 300 mm. Širina se obično povećava za svakih 100 mm, dok su duljine raspona dostupne za svaki metar do maksimalno 6 ili 9 metara.



Slika 3.1 Različiti tipovi kabelskih ljestava

3.1. Materijali

Kao što je već napomenuto, za izradu kablskih ljestava najčešće se upotrebljavaju pocinčani čelik, nehrđajući čelik, aluminij i polimeri ojačani vlaknima. U nastavku se nalaze tablice za tri odabrana materijala s kratkim opisima.

Prvi materijal je DIN EN 10130 DC01 čelik, tablica 3.1 To je hladno valjani čelik s vrlo niskim sadržajem ugljika, koji se često koristi u automobilskoj industriji i za izradu elektroničkih komponenti. Niski sadržaj ugljika omogućava hladno oblikovanje te se vrlo lako se zavaruje. Nije pogodan za veće nosivosti i visoka naprezanja. Za kablške police koristi se antikorozivna prevlaka koja se postiže elektrolitičkim prevlakama od cinka.

Tablica 3.1 Svojstva DC01 čelika [17]

DC01	
Gustoća	700 kg/dm ³
Modul elastičnosti (E)	200 GPa
Granica razvlačenja (R_e)	140 – 280 MPa
Vlačna čvrstoća (R_m)	270 – 410 MPa
Tvrdoća	105 HV

Za potrebe ispitivanja odabrano je $R_e = 210$ MPa i $R_m = 340$ MPa.

Sljedeći materijal je nehrđajući čelik DIN EN 10088-3/1.4301-AISI 304 (tablica 3.2). To je najsvestraniji i najrašireniji nehrđajući čelik, dostupan u širem rasponu proizvoda, oblika i završnih obrada od bilo kojeg drugog. Ima izvrsna svojstva oblikovanja i zavarivanja. Odlikuje ga visoka duktilnost te izvrsna svojstva izvlačenja i oblikovanja. U osnovi nemagnetičan, postaje blago magnetičan kad se hladno obrađuje. Otporan je na većinu oksidirajućih kiselina. Primjene su raznovrsne, od kemijske opreme i opreme za kuhinje do kablskih ljestava.

Tablica 3.2 Svojstva AISI 304 [18]

AISI 304	
Gustoća	800 kg/dm ³
Modul elastičnosti (E)	193 GPa
Granica razvlačenja (R_e)	200 – 300 MPa
Vlačna čvrstoća (R_m)	500 – 700 MPa
Tvrdoća	129 HV

Odabrana granica razvlačenja je $R_e = 250$ MPa i vlačna čvrstoća $R_m = 600$ MPa.

Posljednji materijal je čelik 1.0917-DX51D Z200 (tablica 3.3). To je hladno valjani vruće cinčani čelik za duboko vučenje koji nudi izvrsna svojstva oblikovanja. Ovisno o namjeni, primjenjuju se različite završne obrade površina, poput Z – vruće cinčane prevlake , AS – aluminizirane prevlake , AZ – aluzinc prevlake (55% Al – 45% Zn), ZA – hladno cinčane prevlake, koje prvenstveno spajaju otpornost na oksidaciju na bazi cinka. Oznaka Z200 označava da je prevlaka sastavljena od 99% cinka, dok broj 200 označava količinu prevlake od 200 grama po m² (ili 100 g/m² s obje strane), pri čemu je debljina prevlake za ovaj tip 14 μm. Ima vrlo široku primjenu u građevinarstvu, prometu i izradi kablaskih ljestava zbog svoje čvrstoće i otpornosti na koroziju.

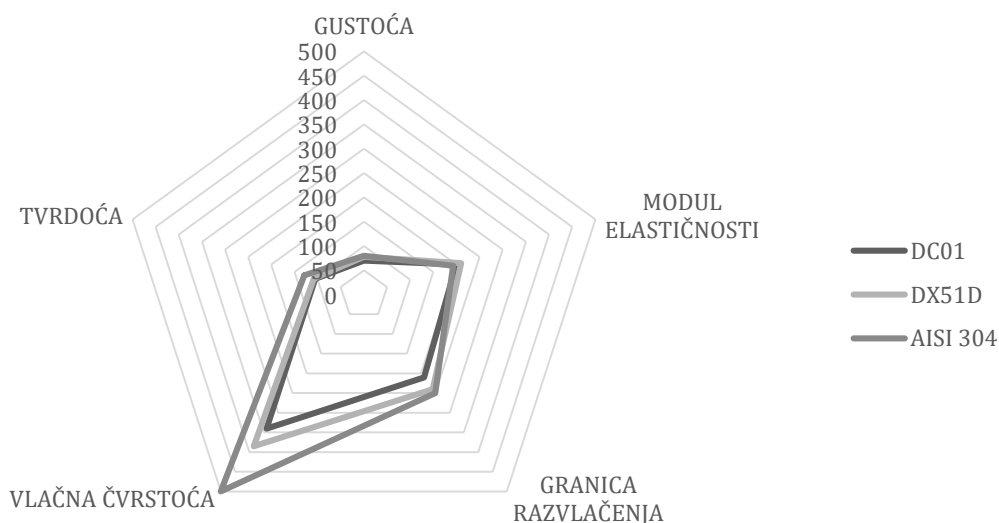
Tablica 3.3 DX51D Z200 [19]

DX51D Z200	
Gustoća	786 kg/dm ³
Modul elastičnosti (<i>E</i>)	210 GPa
Granica razvlačenja (<i>R_e</i>)	160 – 340 MPa
Vlačna čvrstoća (<i>R_m</i>)	270 – 500 MPa
Tvrdoća	108 HV

Odabrana granica razvlačenja je $R_e = 240$ MPa i vlačna čvrstoća $R_m = 385$ Mpa.

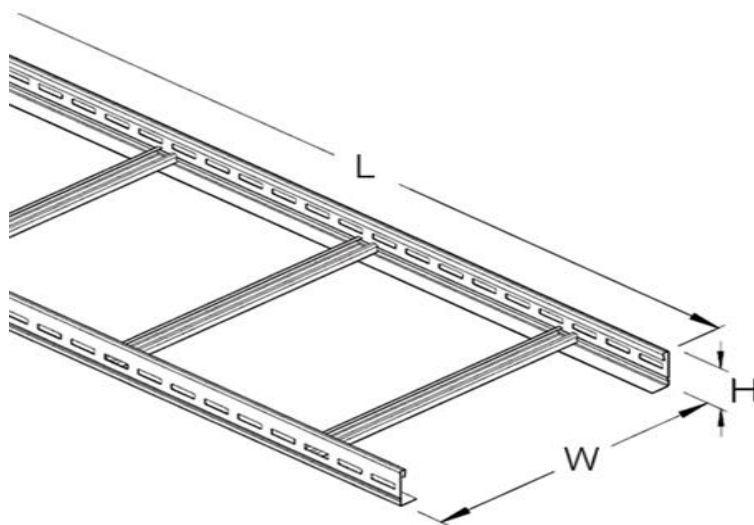
Graf 3.1 prikazuje usporedbu materija na temelju 5 čimbenika čije su vrijednosti za sva tri spomenuta materijala navedene u tablicama 3.1, 3.2 i 3.3 .

Graf 3.1 Usporedba materijala



3.2. Utjecaji dimenzija na nosivost

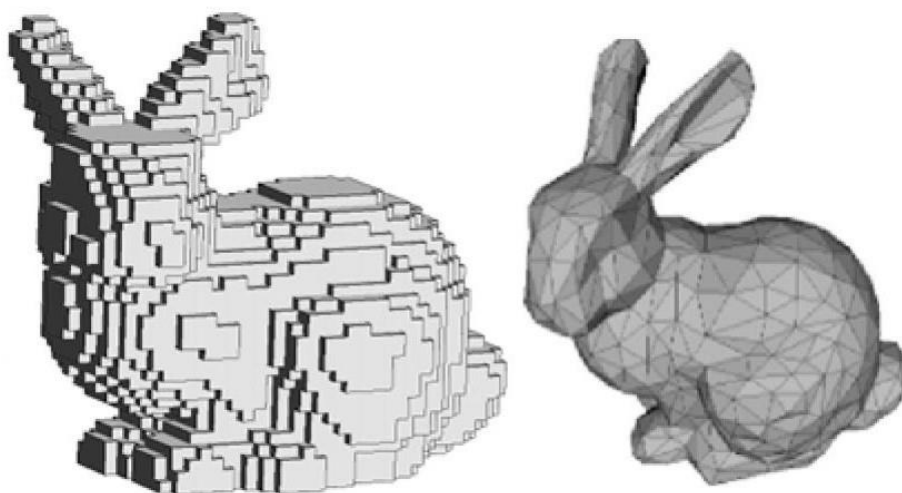
Pošto podaci o nosivosti nisu dostupni u nastavku će najprije biti prikazani podaci maksimalne nosivosti modela s poprečnim presjekom od 1,5 mm, visine 100 mm i duljine 6000 mm s različitim širinama od 200, 400, 600, 800 i 1000 mm, kako bi se ispitaio značaj širine vidljivo na slici 3.2. Sljedeće ispitivanje će imati za cilj ispitati utjecaj visine na ukupnu nosivost. U tu svrhu korišten je model s debljinom od 1,5 mm i visinama šina od 100, 150 i 200 mm za širinu od 400 mm i duljinu od 6000 mm te ispitivanje utjecaja debljine stjenke na nosivost. Zadnje ispitivanje odnosi se na svaki pojedinačni element optimizacijskog modela dimenzija $100 \times 400 \times 1,5 \times 6000$ mm.



Slika 3.2 Dimenzije kabljskih ljestava [20]

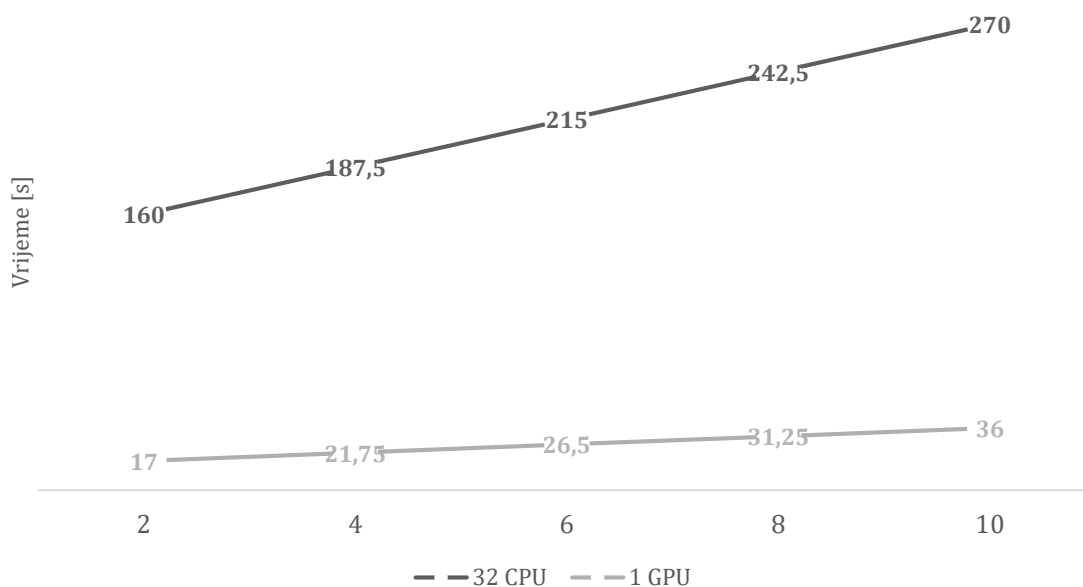
Analize nosivosti i simulacije provode se u softveru ANSYS korišten je Workbench – Static structural verzije 2024 R2. Ovaj softver koristi analize na temelju metode konačnih elemenata. Također se koristi i ANSYS Discovery, koji ne pruža toliko mogućnosti, ali u slučaju jednostavnih modela (pravokutni oblik), jedne sile i nekoliko fiksnih oslonaca, daje slične rezultate. Njegova prednost je što, uz klasičnu mogućnost korištenja mreže, za diskretizaciju može koristiti i voksele (trodimenzionalne piksele). Metoda izračuna ostaje ista – svaki voksel se tretira kao konačni element, a izračuni se odvijaju na sličan način, sastavljanjem sustava jednadžbi na temelju svojstava svakog voksel.

Za simulacije s vokselima ne koristi se CPU (središnja procesorska jedinica ili skraćeno procesor), već GPU (grafička procesorska jedinica ili skraćeno grafička kartica). To omogućava daleko brže simulacije, što prikazuje i graf 3.2 na apscisi se nalazi broj elemenata a ordinati proteklo vrijeme. U grafu je prikazana procesorska jedinica s 32 niti (threada); ukoliko je taj broj manji, razlike su još drastičnije. Međutim, budući da su vokseli manje geometrijski fleksibilni, mreža može biti manje učinkovita u obradi finih detalja složenih oblika, što prikazuje i slika 3.3 [21].



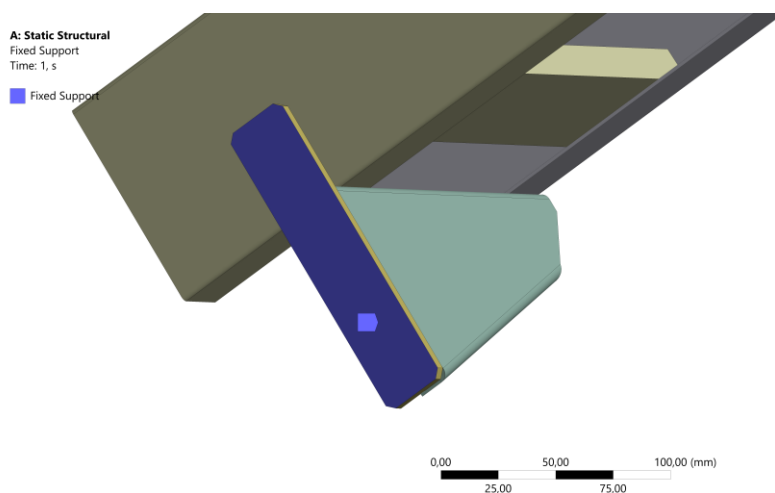
Slika 3.3 Usporedba vokseli i mreže [22]

Graf 3.2 Usporedba vremena trajanja simulacije [21]



3.2.1. Utjecaj širine kabelskih ljestava na nosivost

Simulacija utjecaja širine na nosivost prvo je provedena na cijelim modelima dimenzija $100 \times (200, 400, 600, 800, 1000) \times 1,5 \times 6000$ mm. U nastavku su opisani rubni uvjeti s pripadajućim slikama za model $100 \times 400 \times 1,5 \times 6000$ mm. Fiksni oslonci postavljeni su na zidne nosače u dodir zida i nosača slika 3.4.



Slika 3.4 Fiksni oslonac

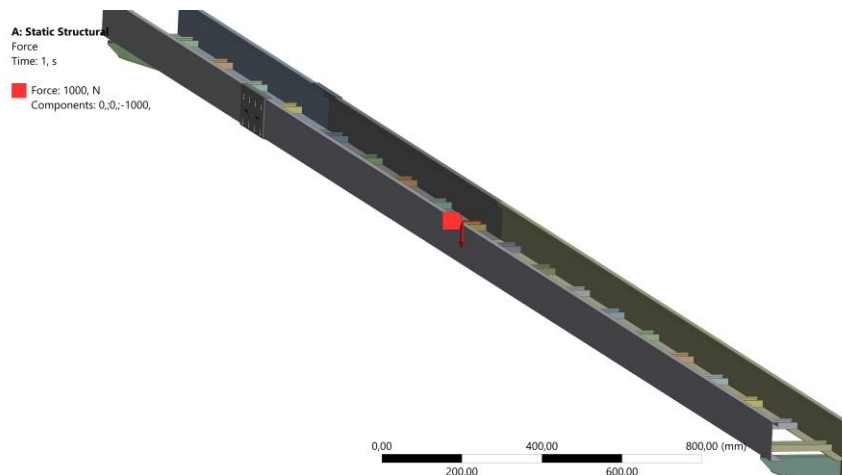
Sila je primijenjena na sredinu raspona od 300 mm slika 3.5 i postupno povećavana dok ekvivalentno naprezanje prema Von Misesovom kriteriju nije dostiglo odabranu granicu razvlačenja za određeni materijal. Ta sila postala je maksimalna za tu konstrukciju, jer bi daljnje povećanje dovelo do plastične deformacije. Većina kabelskih ljestava funkcionira kao kontinuirana greda koja je podložna raspodijeljenim i koncentriranim opterećenjima. Najčešće su izložene statičkim opterećenjima, poput mase kabela. Koncentrirano statičko opterećenje odnosi se na masu koja djeluje na jednu točku između bočnih šina. Kada se to opterećenje primijeni na sredinu raspona, ono postaje jedan od najzahtjevnijih uvjeta za ljestve. U takvim slučajevima, kako bi se lakše analiziralo opterećenje na cijelu полицu, koncentrirano opterećenje može se pretvoriti u uniformno raspodijeljeno opterećenje. Ova konverzija olakšava proračune, jer se raspodijeljeno opterećenje smatra ravnomjerno raspoređenim duž cijelog raspona police.

Formula koja se koristi za ovu konverziju je:

Uniformno opterećenje (kg/m) = $2 \times$ (koncentrirano statičko opterećenje) / dužina raspona.

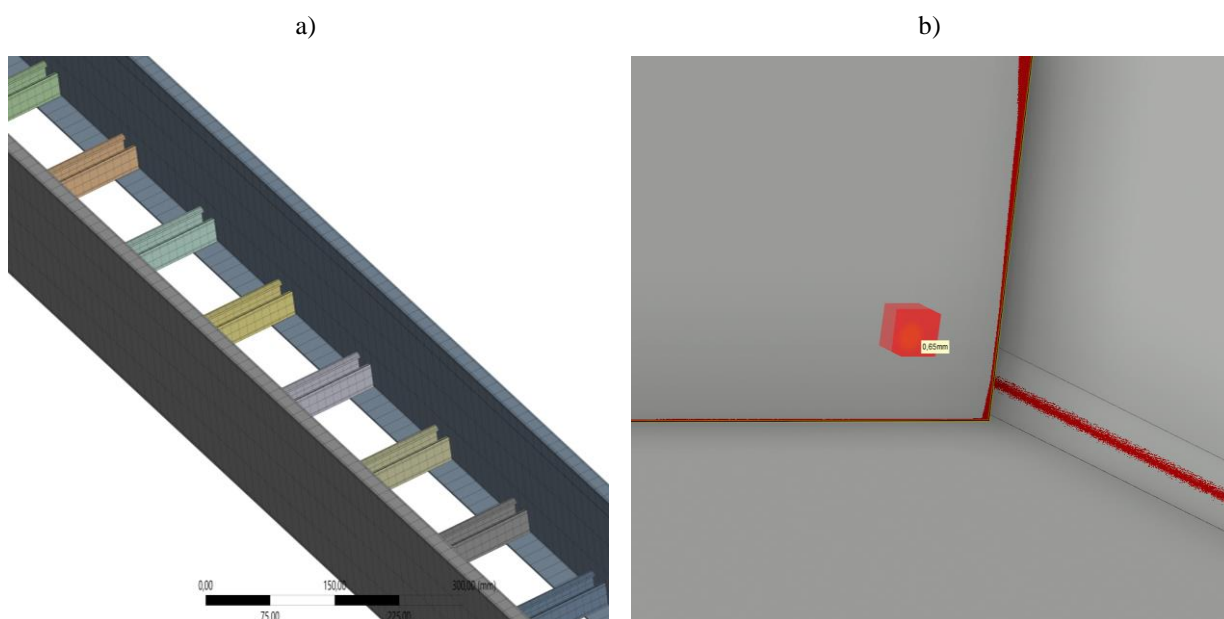
Uniformno opterećenje (kg/m) predstavlja ravnomjerno raspoređenu masu po dužnom metru police. Koncentrirano statičko opterećenje odnosi se na masu koja djeluje na jednu točku (npr. u sredini raspona). Dužina raspona je ukupna duljina dijela police na kojem opterećenje djeluje.

Množenje koncentriranog opterećenja s brojem 2 omogućava da se koncentrirana sila, koja djeluje u jednoj točki, raspodijeli kao ekvivalentno raspodijeljeno opterećenje po cijelom rasponu. Dok za računanje vkselima pruža opciju korištenja utjecaja mase po cijeloj dužini no nužno je zadati ispravan smjer gravitacije.



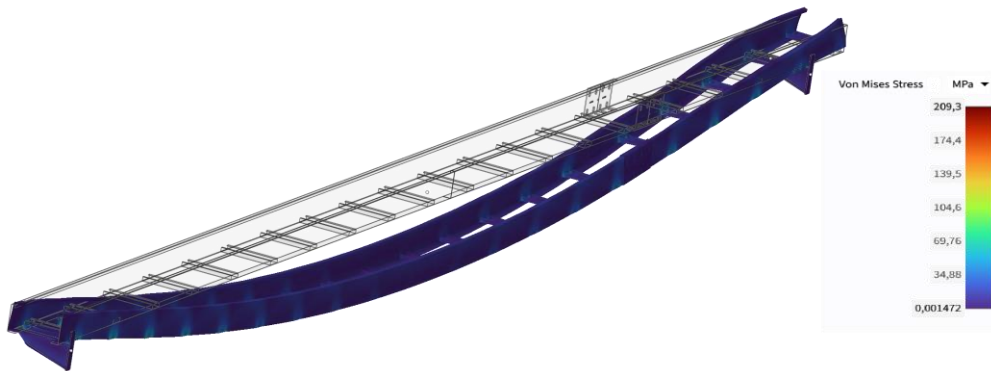
Slika 3.5 Koncentrirana sila

Zbog specifičnosti konstrukcije korišteni su heksaedri s različitim veličinama za prečke i šine s brojem elemenata od 15664 i 290900 čvorova kao što prikazuje slika 3.6 a). Heksaedarski konačni elementi su trodimenzionalni elementi u obliku paralelopipeda, koji imaju osam čvorova. Svaki čvor ima tri stupnja slobode, što znači da je ukupno 24 stupnja slobode po elementu. Heksaedarski elementi su popularni zbog svoje jednostavne geometrije i efikasnosti u modeliranju pravokutnih ili kvadratnih struktura. Veličina vksela je 0,65 mm također prikazuje slika 3.6 b) crvenom bojom označeni su bridovi koje vkseli nisu u potpunosti definirali.

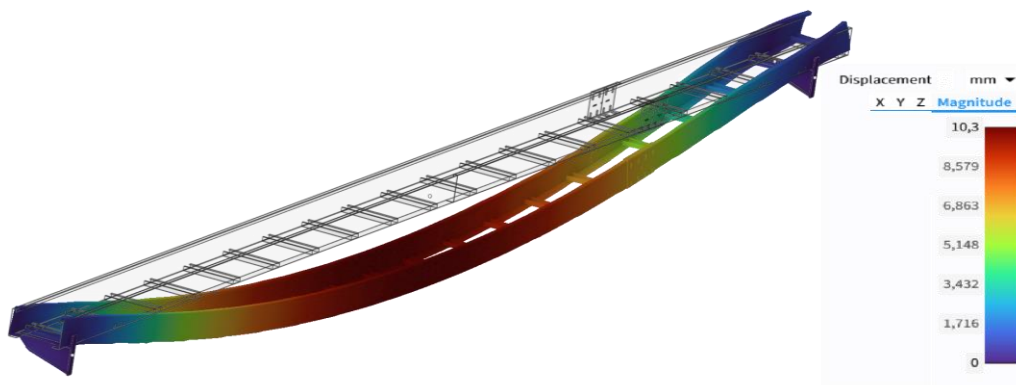


Slika 3.6 Veličina mreža i vksela

Nakon svih provedenih koraka, sljedeće slike prikazuju simulaciju i rezultate, odnosno ekvivalentna Von Misesova naprezanja i progibe za model dimenzija $100 \times 400 \times 1,5 \times 6000$ mm. Naprezanja su na razini maksimalnih zbog potrebe za određivanjem maksimalne nosivosti (slika 3.7). Također, progib za model dužine 6000 mm iznosi 10,3 mm, što nije prevelik (slika 3.8), jer prema standardu ne smije prelaziti 30 mm, odnosno ukupna duljina $\times 1/200$.

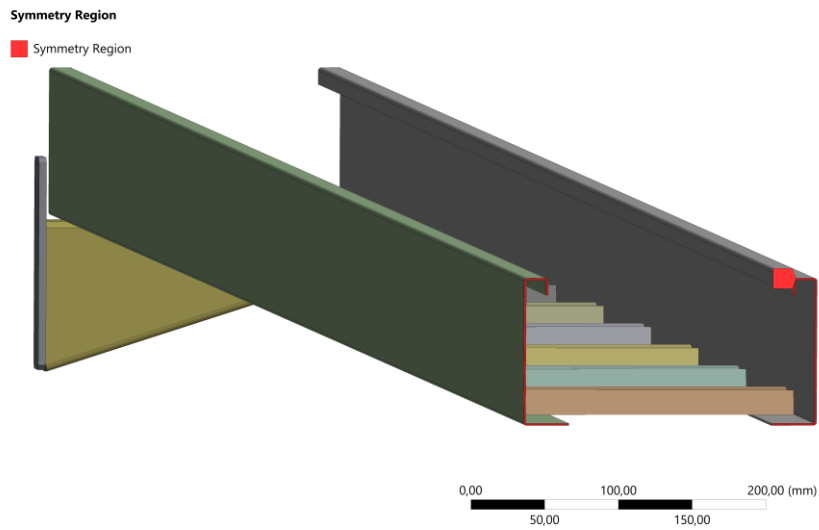


Slika 3.7 Simulacija ljestava prikaz ekvivalentnog Von Misesovog naprezanja u MPa

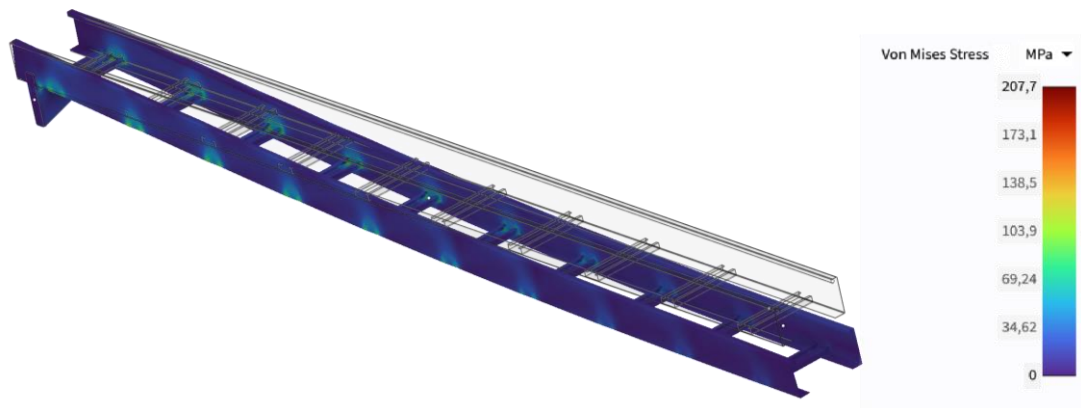


Slika 3.8 Simulacija ljestava prikaz progiba u mm

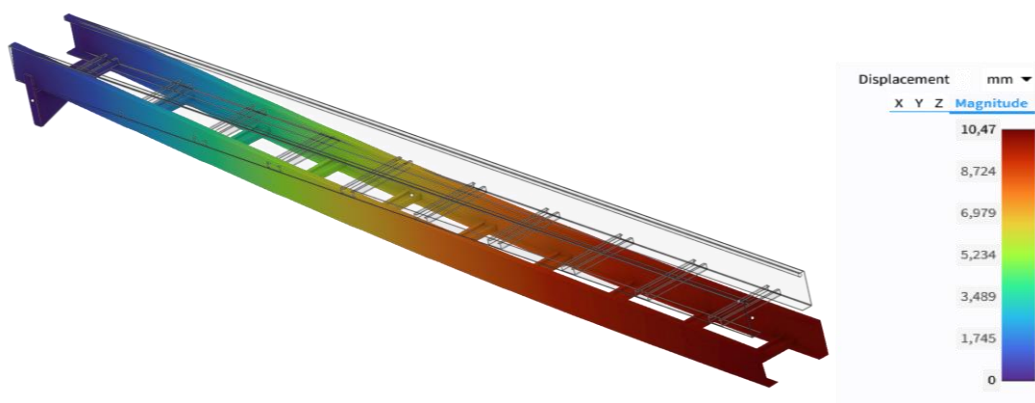
Budući da se radi o vrlo dugom modelu (6000 mm) koji je osno simetričan i opterećen jednom silom, korištenjem simetrije može se značajno smanjiti vrijeme računanja softvera uz minimalne gubitke u preciznosti. Slika 3.9 prikazuje rubnog uvjeta simetrije, dok slike 3.10 i 3.11 prikazuju ekvivalentno von Misesovo naprezanje i pomake za konfigurirani model. Rubni uvjeti su postavljeni identično, ali je sila umanjena za polovinu kako bi odgovarala modelu s pola geometrije.



Slika 3.9 Dodavanje simetrije



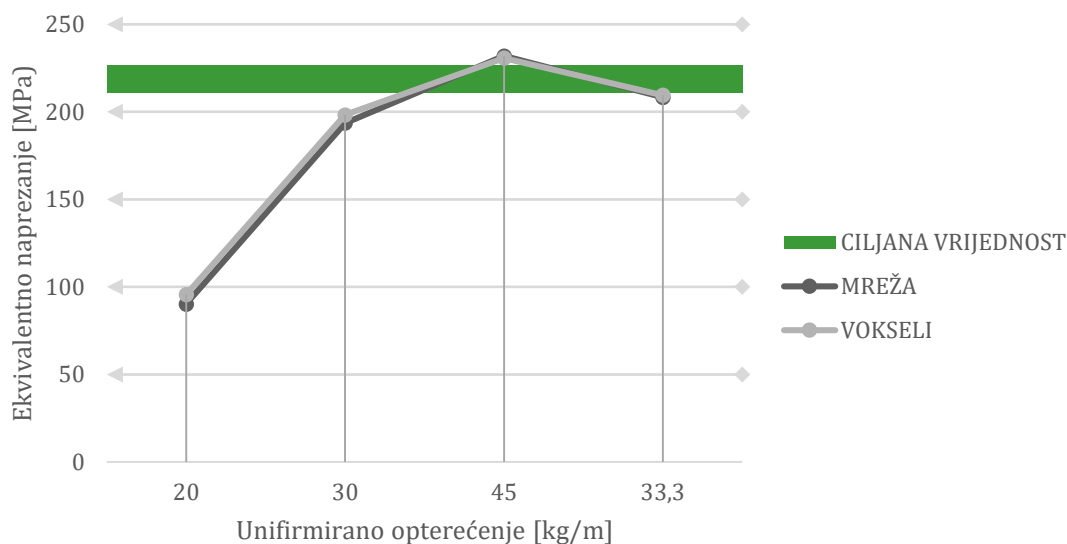
Slika 3.10 Simulacija polovice ljestava prikaz ekvivalentnog Von Misesovog naprezanja u MPa



Slika 3.11 Simulacija polovice ljestava prikaz progiba u mm

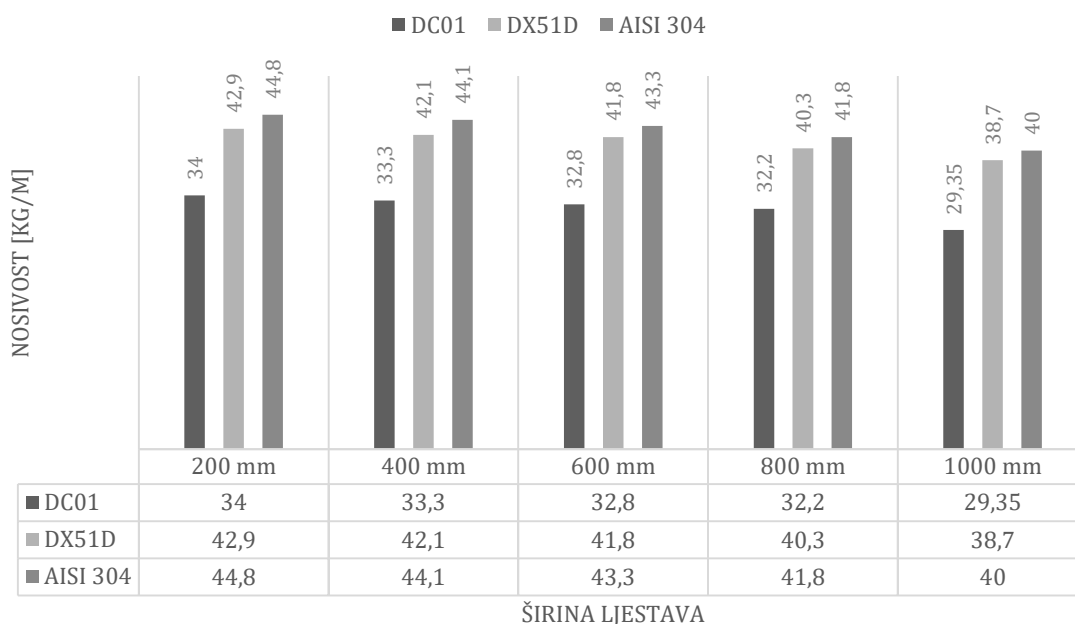
Graf 3.3 prikazuje konvergenciju rješenja i traženje maksimalne nosivosti za dva tipa vokseli i mreže. Model se odnosi na materijal DC01 dimenzija $100 \times 400 \times 1,5 \times 6000$ mm.

Graf 3.3 Traženje maksimalne nosivosti



Naposljetku su prikazana sva rješenja nosivosti (kg/m) podijeljena po veličinama (200, 400, 600, 800 i 1000 mm) i materijalima (graf 3.4). Jasno je vidljivo kako s povećanjem širine opada i nosivost, što je i očekivano, jer se radi o istoj konstrukciji s povećanim parametrima i većom masom. Također je vidljivo da čelik DC01 ima najmanju nosivost, dok su nehrđajući čelik i DX51D slični u pogledu nosivosti.

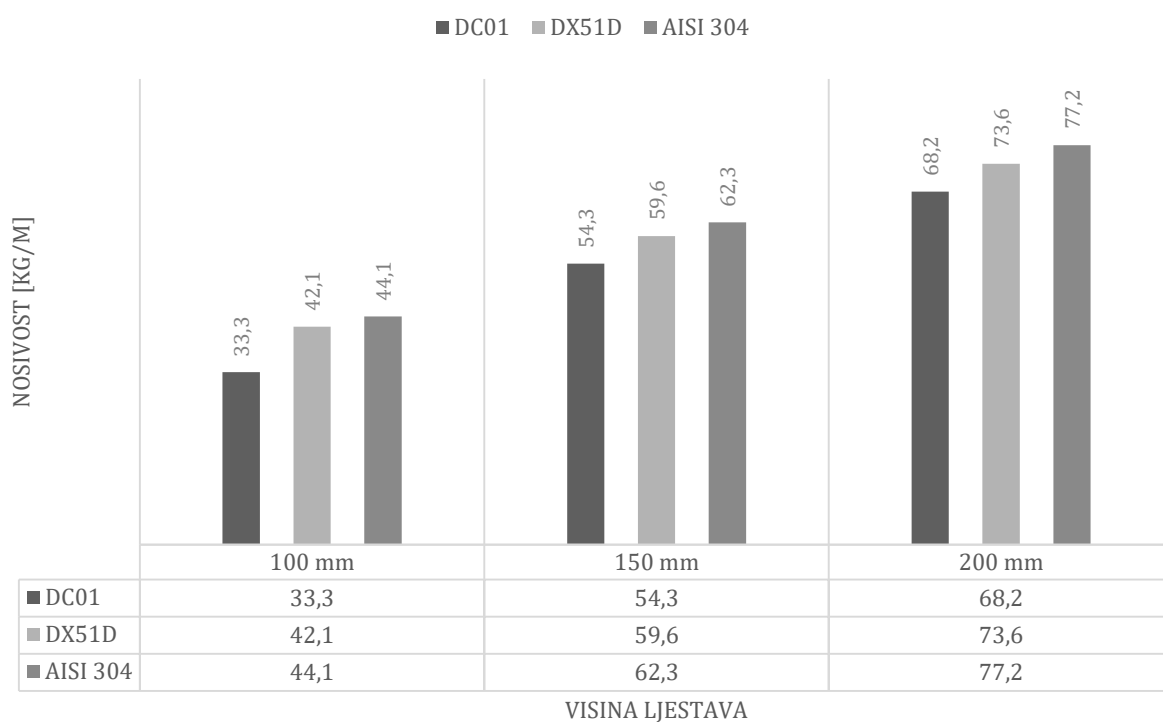
Graf 3.4 Utjecaj širine kabelskih ljestava na nosivost



3.2.2. Utjecaj visine kabelskih ljestava na nosivost

Sljedeće ispitivanje ima za cilj odrediti koliki utjecaj visina šine ima na ukupnu nosivost. Ispitivane su tri visine – 100, 150 i 200 mm, za svaki od tri poznata materijala. Postupak je proveden na isti način kao i kod prethodnog ispitivanja korištenjem simetrije, uz identične rubne uvjete. Veličina mreže se razlikovala zbog različitih dimenzija modela, dok su vokseli zadržali veličinu od 0,65 mm. Ispitivanje je provedeno na ljestvama širine 400 mm. U nastavku se nalazi graf 3.5 koji prikazuje međusobne odnose.

Graf 3.5 Utjecaj visine kabelskih ljestava na nosivost

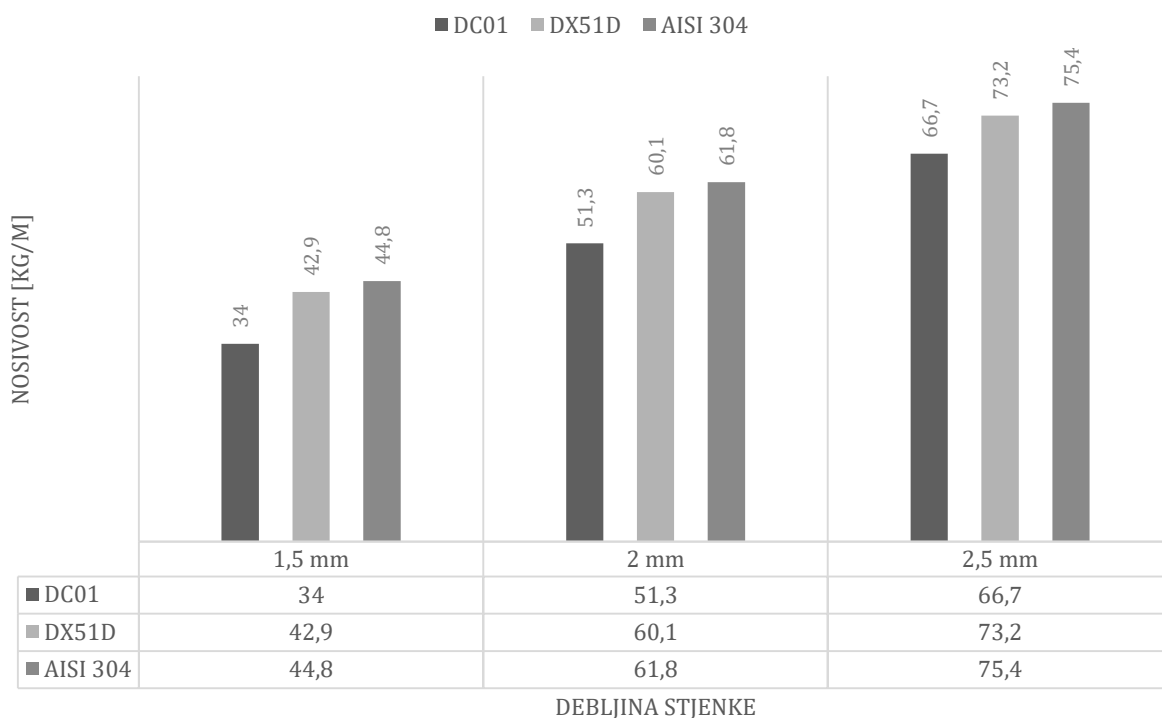


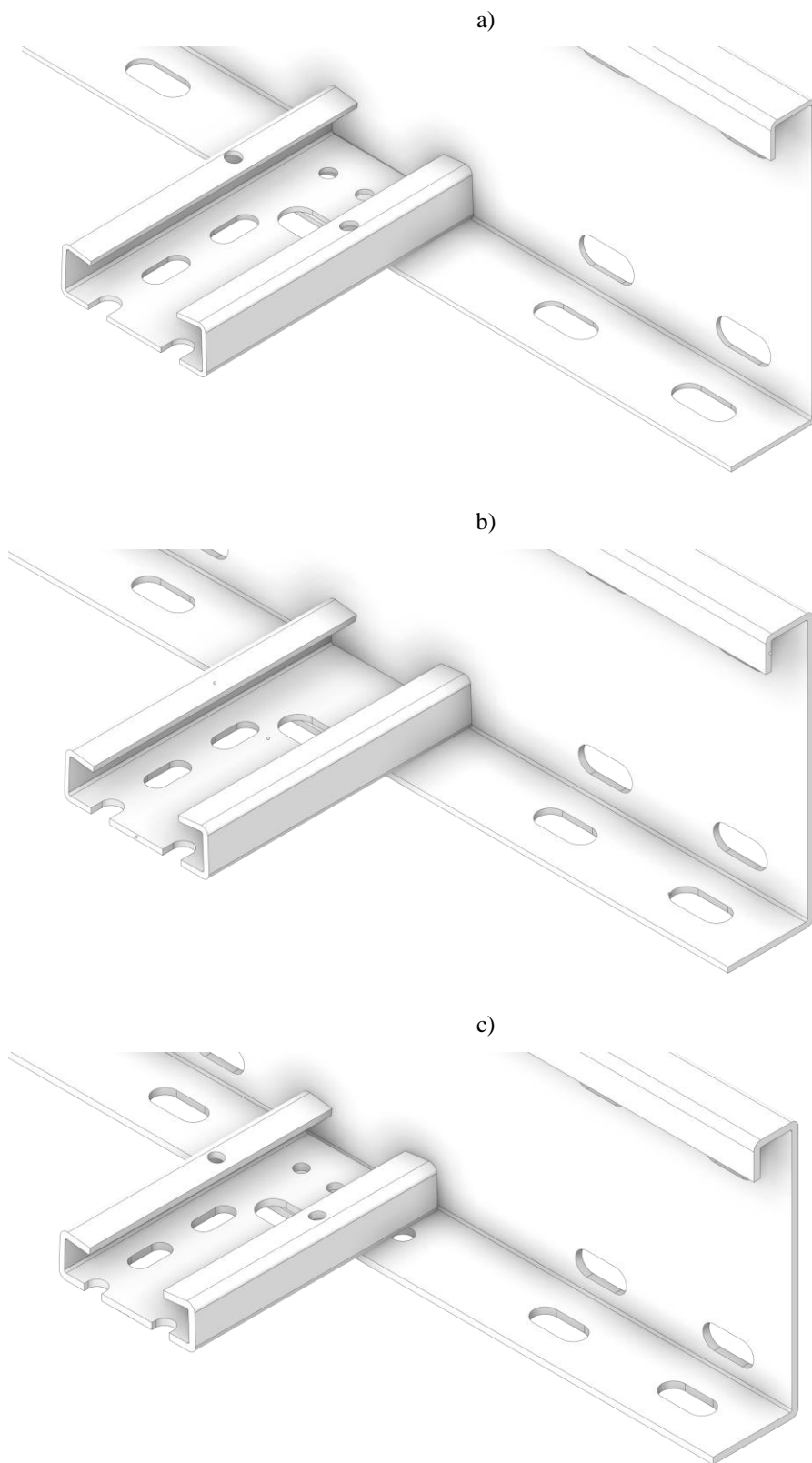
Prema rješenjima prikazanim u grafu 3.5, jasno je vidljivo da s povećanjem visine šina raste i njihova nosivost. To se događa iz nekoliko razloga. Više bočne stranice povećavaju ukupnu krutost ljestava, što ih čini manje podložnima savijanju i uvijanju. Također, povećava se poprečni presjek, što doprinosi povećanju momenta inercije. Nadalje, opterećenje se bolje raspoređuje duž ljestava, a zone najvećih naprezanja se nalaze na različitim mjestima, zavisno o visini šina. Zbog toga, kada je potrebna veća nosivost, a promjena debljine stjenke nije opcija, često se pribjegava povećanju visine šina.

3.2.3. Utjecaj debljine stjenke kabelskih ljestava na nosivost

Ispitivanje debljine stjenke provedeno je istom metodom kao i prethodna dva ispitivanja, za debljine od 1,5 mm, 2 mm i 2,5 mm slika 3.12, s širinom od 200 mm i visinom od 100 mm. Najjednostavniji način povećanja nosivosti jest povećanje debljine stjenke, no važno je napomenuti da s povećanjem debljine stjenke proporcionalno raste i masa konstrukcije. Primjerice, konstrukcija izrađena od materijala DC01 s debljinom stjenke od 1,5 mm, širinom od 200 mm i visinom od 100 mm i duljine 6000 mm, ima masu od 22 kg. Ljestve istih dimenzija, ali s debljinom stjenke od 2,5 mm, imaju masu od 34 kg, što predstavlja povećanje od 12 kg. Unatoč tome, povećanje debljine stjenke često se koristi kada je potrebna visoka nosivost. Također, ako se koristi deblja stjenka za ljestve, najveće naprezanje javlja se na nosačima, a ne na samim ljestvama. Stoga se savjetuje povećanje debljine stjenke nosača, kao i povećanje nosive površine nosača ili postavljanje nosača na kraći raspon. Graf 3.6 prikazuje razlike u nosivosti s obzirom na debljinu stjenke, te se jasno može zaključiti da s povećanjem debljine stjenke raste i nosivost.

Graf 3.6 Utjecaj debljine stjenke kabelskih ljestava na nosivost

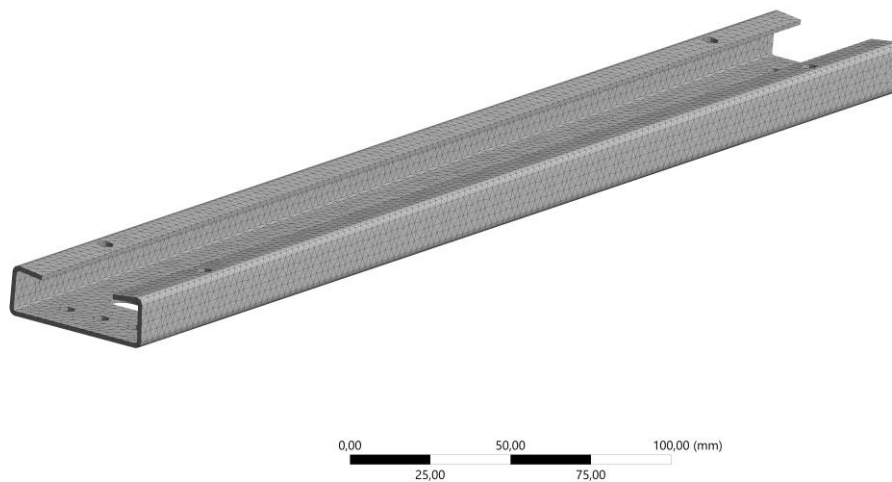




Slika 3.12 Debljine stjenki kabelskih ljestava a) 1,5 mm b) 2 mm c) 2,5 mm

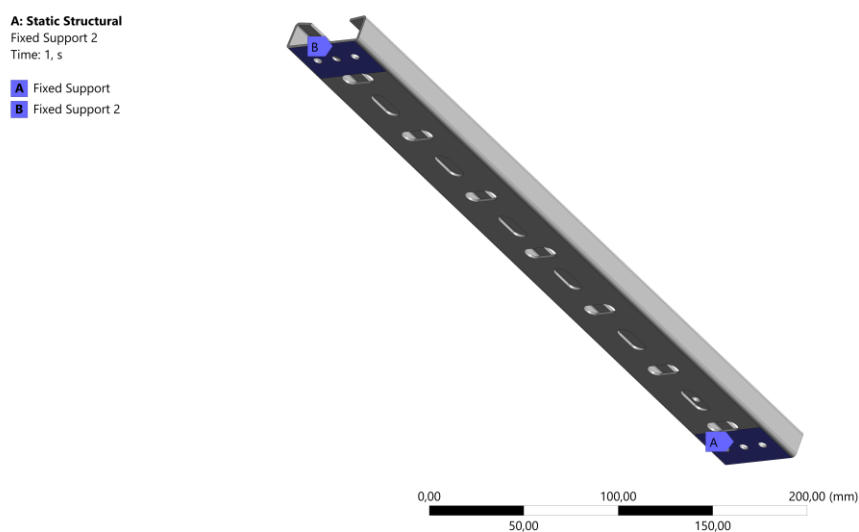
3.3. Simulacija optimizacijskog modela

Optimizacijski model ima dimenzije $100 \times 400 \times 1,5 \times 6000$ mm, a izrađen je od materijala DC01. Iako su već dostupni podaci o nosivosti za ovu vrstu ljestava iz prethodnih ispitivanja, nisu navedeni podaci za svaki element zasebno, što je nužno za optimizaciju. Ljestve se sastoje od dva glavna dijela: poprečnih prečki i uzdužnih šina, uz dodatak zakovica. Prva simulacija provedena je na preči dok slika 3.13 prikazuje mrežu koja je sastoji od tetraedarskih konačnih elemenata s 28628 elemenata i 58987 čvorova.



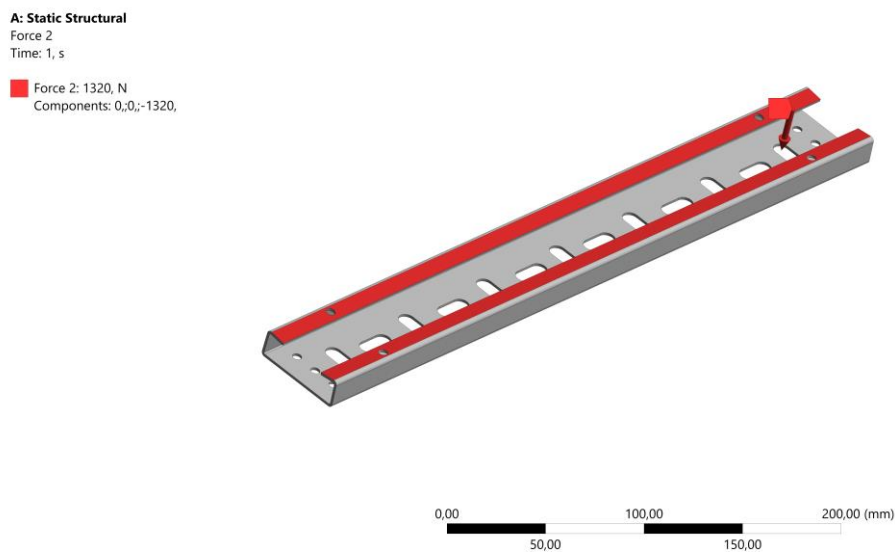
Slika 3.13 Prikaz mreže prečke

Nepomični oslonci postavljeni su sa donje strane i imaju dimenzije koje odgovaraju širini donjeg dijela šine slika 3.14.



Slika 3.14 Fiksni oslonci prečke

Cijela gornja strana prečke izložena je sili od 1320 N slika 3.15, što rezultira ekvivalentnim von Misesovim naprežanjem od 210 MPa za ovaj model.

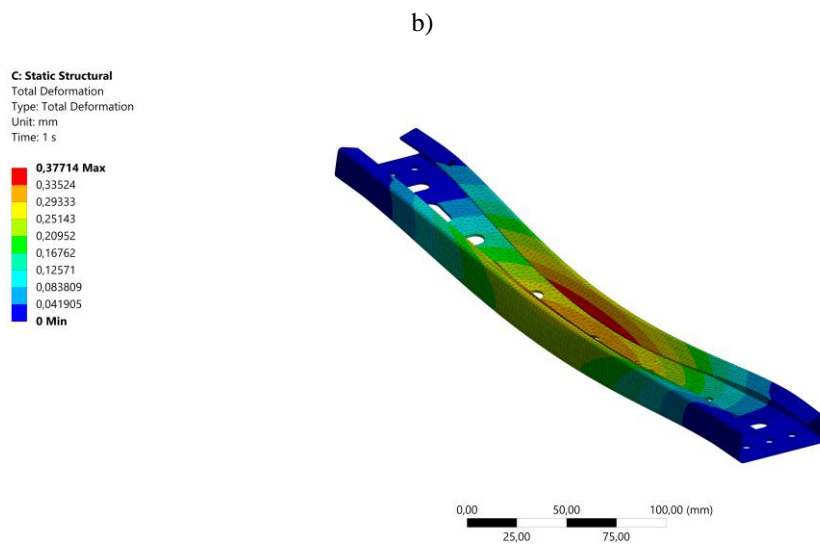
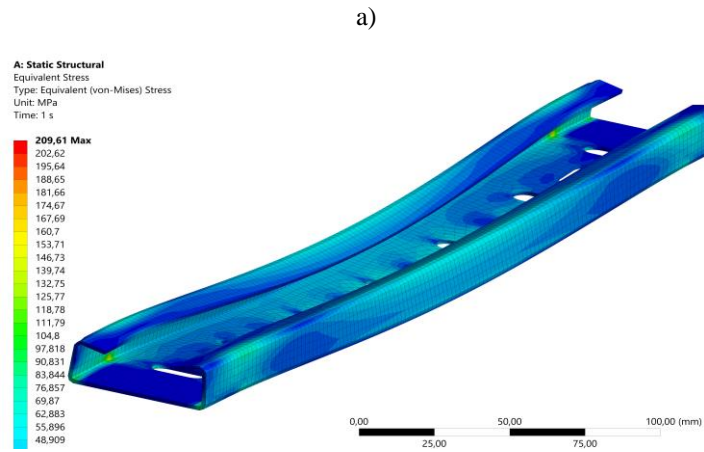


Slika 3.15 Sila na prečki

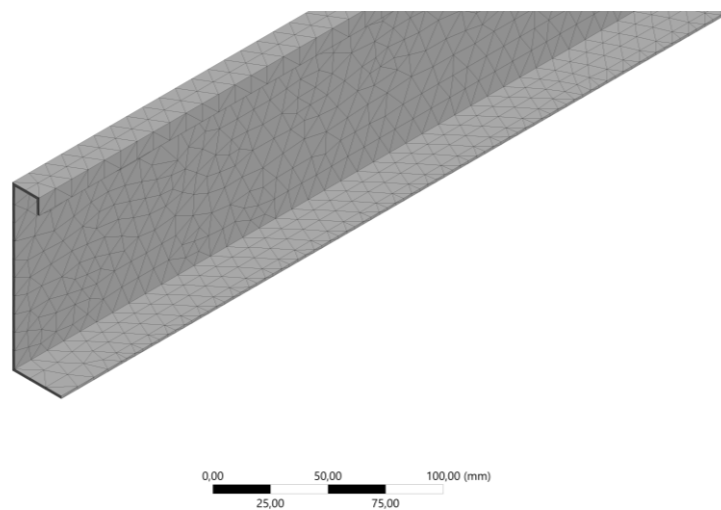
Na slici 3.16 (a jasno su vidljive zone deformacije uslijed djelovanja maksimalne sile, koja za ovaj model iznosi 1320 N. Progib je 0,37714 mm slika 3.16 (b, a masa iznosi 382,2 g (tablica 3.4).

Tablica 3.4 Parametri prečke

Parametri	Vrijednosti
Masa, kg	382,2
Sila, N	1320
Progib, mm	0,37714

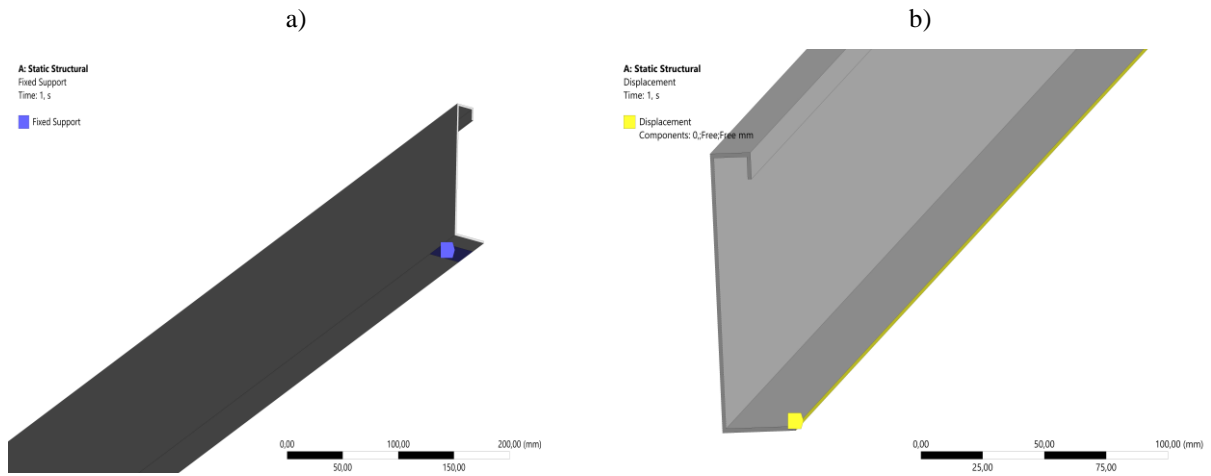


Slike 3.16 Simulacija prečke a) ekvivalentna von Misesova naprežan b) progib
 Uzdužna šina takođe je podvrgnuta samostalnom testiranju. Mreža se sastoji od 30529 tetraedarskih konačnih elemenata i 63595 čvorova (slika 3.17).



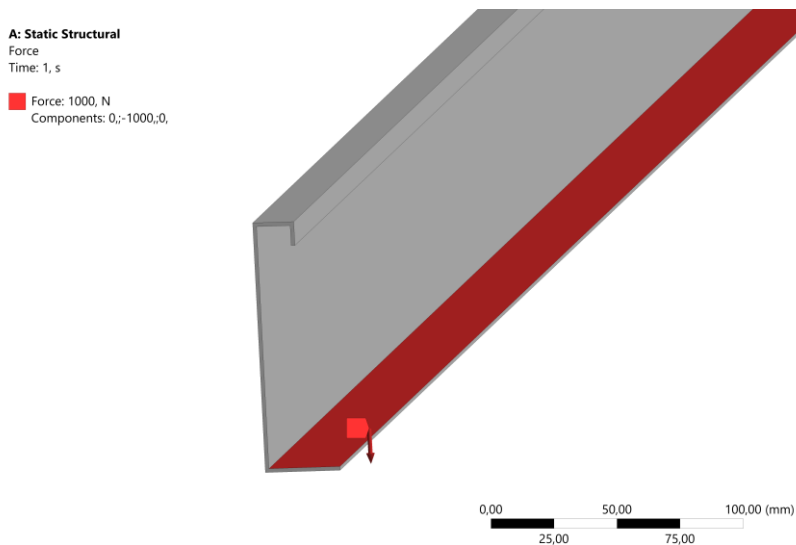
Slika 3.17 Mreža šine

Nepomični oslonac postavljen je s jedne strane, pri čemu je njegova širina jednaka širini zidnih nosača, dok je s druge strane korišćena simetrija slika 3.17 a). Na donju bočnu stranu postavljen je pomični oslonac koji onemogućava pomak po X osi, simulirajući ostatak konstrukcije slika 3.17 b).



Slika 3.17 a) Fiksni oslonac na šini b) pomični oslonac na šini

Sila od 1000 N takođe je primenjena na donju nosivu površinu, ali s gornje strane (slika 3.18). U skladu s tim, ekvivalentno von Misesovo naprezanje iznosi 198 MPa vidljivo na slici 3.19 (a).



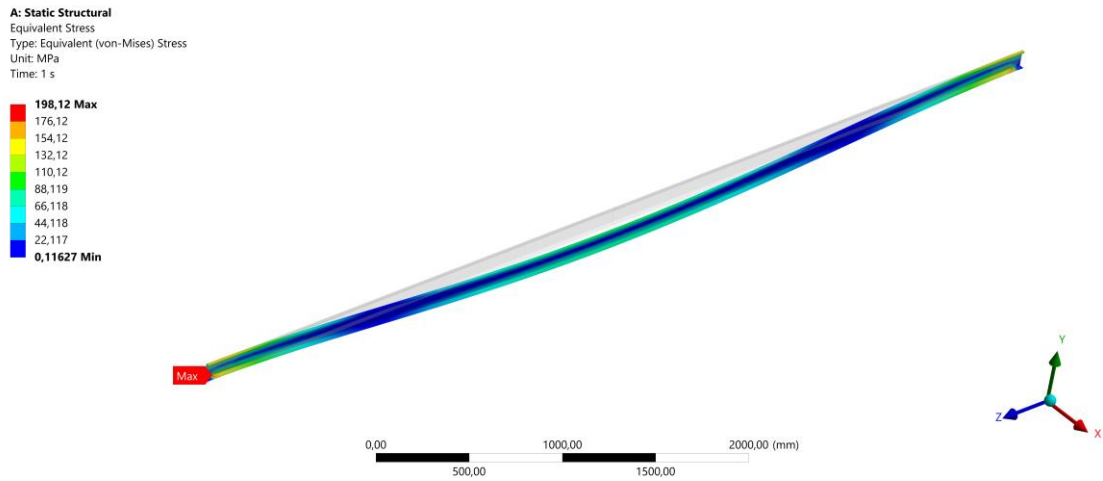
Slika 3.18 Sila na šini

Dobiveni podaci za šinu prikazani su u tablici 3.5.

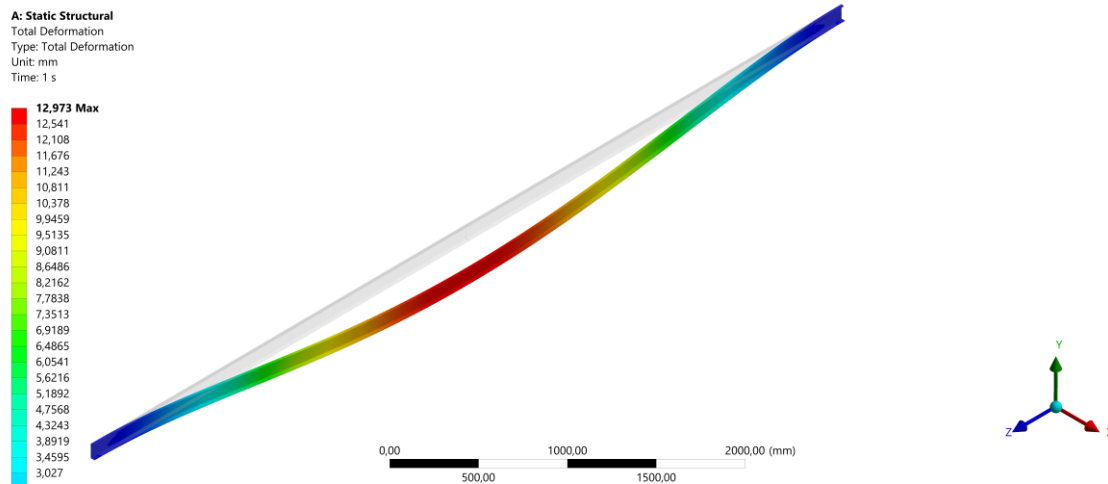
Tablica 3.5 Parametri šine

Parametri	Vrijednosti
Masa, kg	4,7723
Sila, N	1000
Progib, mm	12,973

(a)

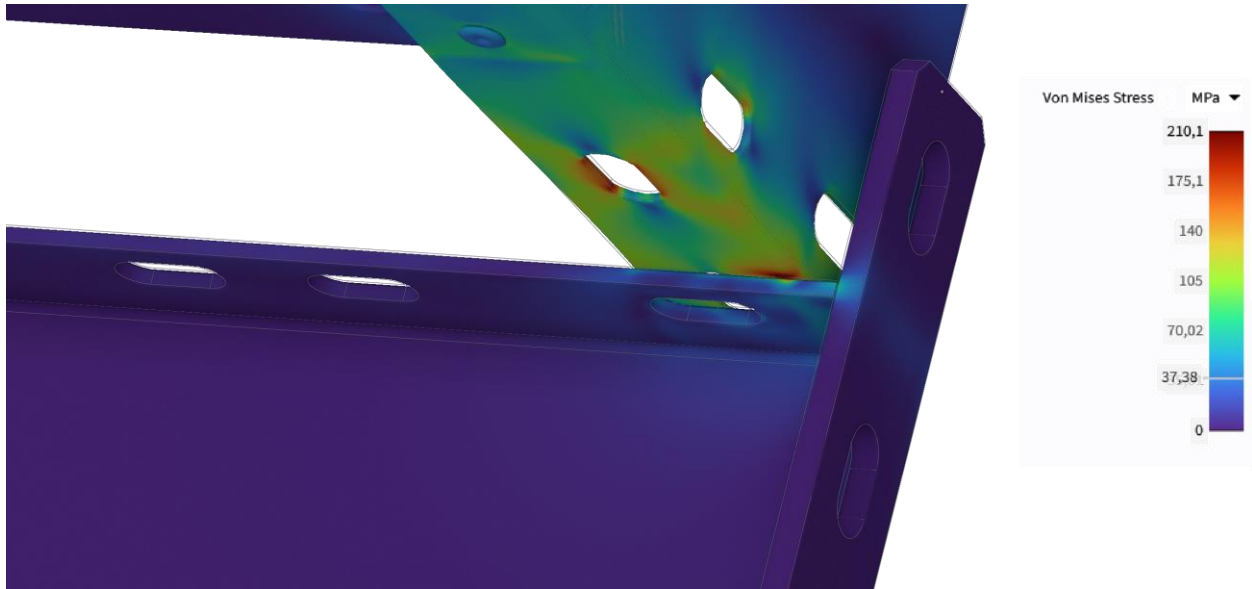


(b)

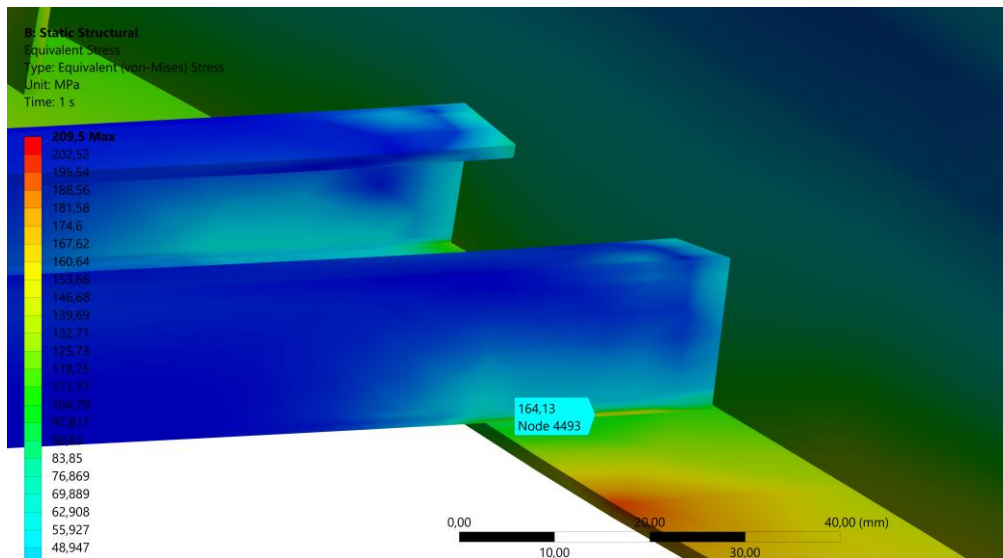


Slika 3.19 Simulacija šine (a ekvivalentan von Misesova naprezanja (b progib

Tijekom simulacije cijelih ljestava, na slici 3.20 vidljivo je da se zone najvećeg naprezanja kod tako dugog raspona nalaze na samom rubu nosača, u dodiru sa šinom, odnosno na samoj šini, slično kao i kod pojedinačne simulacije. Slika 3.21 prikazuje najveće naprezanje koje se javlja na jednoj prečki 164,13 MPa, dok su ostale prečke opterećene manjim naprezanjima, u prosjeku oko 70 MPa.



Slika 3.20 Zone naprezanja na šine



Slika 3.21 Područje najvećeg naprezanja kod prečke

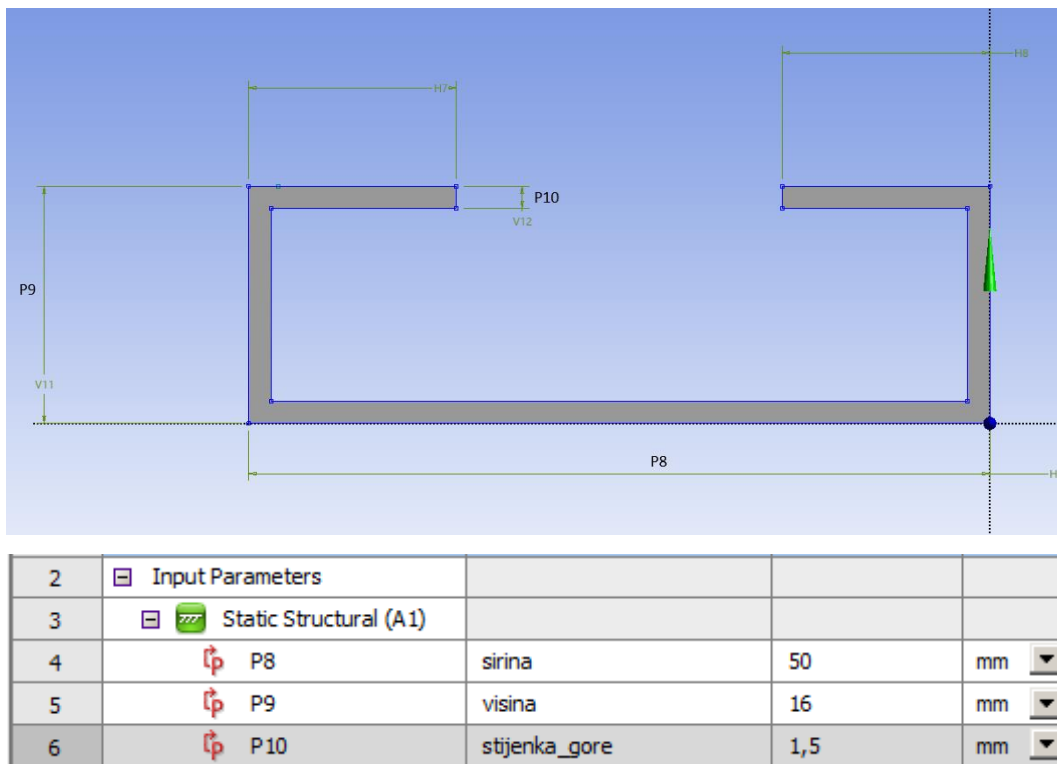
4. Optimiranje konstrukcije primjenom metode konačnih elemenata

Optimizacija konstrukcije kablskih ljestava ima dva ključna cilja: povećanje nosivosti i smanjenje mase. Ova dva zahtjeva su međusobno povezana i gotovo direktno utječu jedna na drugu. Ljestve se sastoje od dva elementa, a simulacijom je prikazano kako dolazi do otkaza, odnosno plastične deformacije, prvo kod šine (slika 3.19 i 3.20). U isto vrijeme, prečke mogu podnijeti znatno veći teret. Stoga se prečke optimiziraju s ciljem smanjenja mase, što neizbježno dovodi do smanjenja nosivosti. Međutim, u ovoj konstrukciji je smanjenje nosivosti opravdano (slika 3.21) jer je simulacijom dokazano da prečke mogu podnijeti više od šine, odnosno više nego što je potrebno. Također, u proteklim simulacijama nikada nije dolazilo do plastične deformacije prečke prije nego kod šine. Šina se optimizira za povećanje nosivosti, odnosno minimiziranje ekvivalentnog Von Misesovog naprezanja, uz uvjet da se masa ne poveća previše. Ako se masa dovoljno smanji, a nosivost poveća, dobivene ljestve imat će manju masu i veću nosivost u odnosu na početnu konstrukciju.

4.1. Optimiranje konstrukcije prečke

Kao što je spomenuto, cilj optimizacije prečke je smanjenje mase. Optimizacija konstrukcije izvršena je u Ansysu pomoću direktne optimizacije, pri čemu je traženo postizanje više ciljeva unutar zadanih uvjeta. Kao metoda optimizacije korišten je Screening, pri čemu je pretraženo 100 uzoraka, a odabrana su tri najbolja kandidata. U nastavku je prikazan proces optimizacije i krajnje rješenje.

Prvi korak u procesu optimizacije je odabir optimizacijskih parametara. Slika 4.1 prikazuje odabrane ulazne optimizacijske parametre za konstrukciju prečke, koji iznose: širina = 50 mm, visina = 16 mm i debljina stjenke = 1,5 mm.



Slika 4.1 Ulazni parametri prečke

Sljedeći korak je odabir izlaznih parametara. Budući da je model ranije simuliran, odabrani su izlazni parametri pod utjecajem sile od 1000 N (slika 3.16) kako tijekom simulacije model ne bi ulazio u plastičnu deformaciju. Izlazni parametri iznose: masa = 0,43462 g, ekvivalentno Von Misesovo naprezanje = 176,55 MPa i progib = 0,38402 mm, kao što je prikazano na slici 4.2.

8	Output Parameters			
9	Static Structural (A1)			
10	P3	Equivalent Stress Maximum	176,55	MPa
11	P4	Total Deformation Maximum	0,38402	mm
12	P5	Solid Mass	0,43462	kg

Slika 4.2 Izlazni parametri prečke

Nakon određivanja parametara, slijedi odabir metode optimizacije, broja uzoraka i broja najboljih kandidata. Odabrano je 100 uzoraka, a broj najboljih kandidata 3.

Sljedeći korak je zadavanje parametara za pretraživanje najboljeg rješenja, što se najčešće temelji na izlaznim parametrima (funkcija cilja i ograničenja). Na temelju tih parametara, program odabire najbolje kandidate. Postavljeno je da masa ne smije prijeći 0,5 kg, s preferencijom za vrijednosti blizu 0,39 kg. Ekvivalentno Von Misesovo naprezanje ne smije prijeći 210 MPa, s

preferencijom za vrijednosti blizu 180 MPa, što je slično početnom modelu. U ovom optimizacijskom procesu, progib nije ključan (slika 4.3). Također su definirani rasponi za ulazne varijable: visina = 15–18 mm, širina = 38–52 mm i debljina stjenke = 0,7–1,5 mm, pri čemu je omogućena promjena debljine stjenke svakih 0,1 mm (slika 4.4).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Name	Parameter	Objective			Constraint			
2			Type	Target	Tolerance	Type	Lower Bound	Upper Bound	Tolerance
3	Minimize P3; P3 <= 210 MPa	P3 - Equivalent Stress Maximum	Minimize	180		Values <= Upper Bound		210	0,001
4	Minimize P5; P5 <= 0,5 kg	P5 - Solid Mass	Minimize	0,39		Values <= Upper Bound		0,5	0,001
*									

Slika 4.3 Funkcije cilja i ograničenja prečke

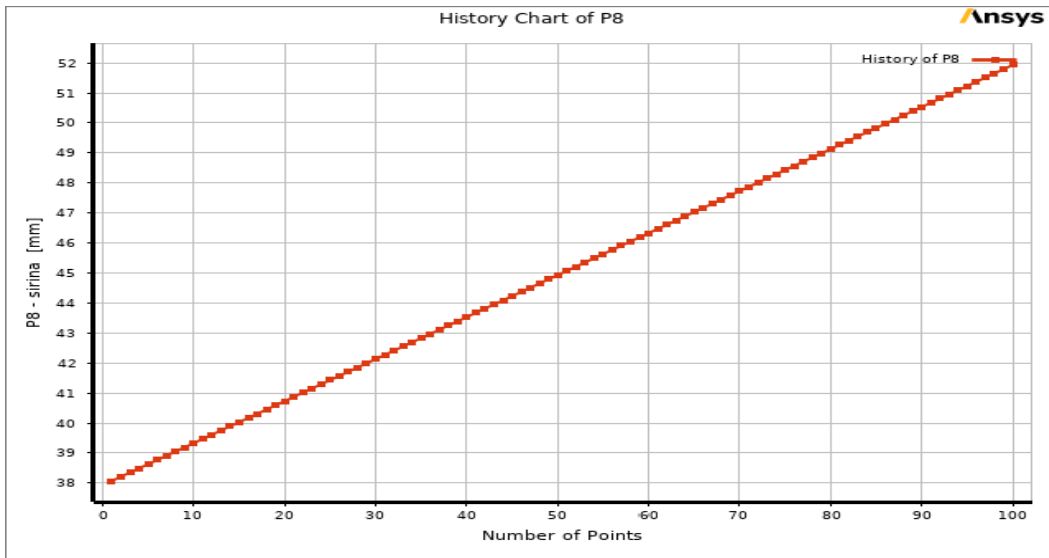
	A	B	C	D
1	Input Parameters			
2	Name	Lower Bound	Upper Bound	
3	P8 - sirina (mm)	38	52	
4	P9 - visina (mm)	15	18	
5	P10 - stijenka_gore (mm)	0,7	1,5	
6	Parameter Relationships			
7	Name	Left Expression	Operator	Right Expression
*	New Parameter Relationship	New Expression	<=	New Expression

Slika 4.4 Rasponi ulaznih parametara prečke

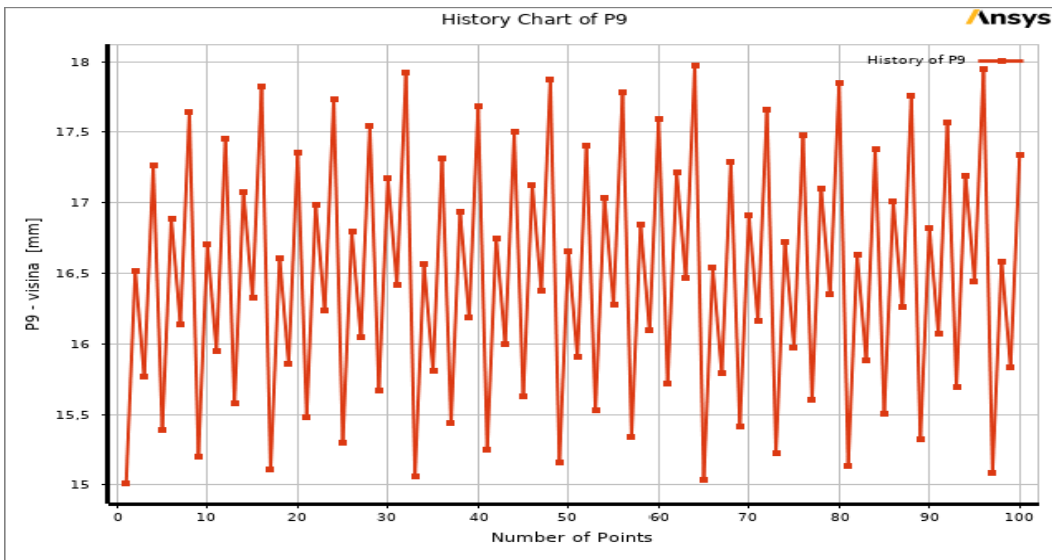
U nastavku se nalazi prikaz procesa optimizacije. Slika 4.5 prikazuje prvih 42 kandidata optimizacije od ukupno 100, dok slike 4.6, 4.7 i 4.8 prikazuju promjene vrijednosti ulaznih varijabli.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	P8 - sirina (mm)	P9 - visina (mm)	P10 - stijenka_gore (mm)	P3 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	P4 - Total Deformation Maximum (mm)	P5 - Solid Mass (kg)
2	1	38,07	15,015	0,7	410,48	1,8911	0,18195
3	2	38,21	15,515	1	246,86	0,81667	0,26534
4	3	38,35	15,765	1,3	211,36	0,49218	0,33567
5	4	38,49	17,265	0,8	330,31	1,3306	0,21802
6	5	38,63	15,39	1,1	245,39	0,69892	0,28504
7	6	38,77	16,89	1,4	185,15	0,40185	0,37034
8	7	38,91	16,14	0,9	252,46	1,0462	0,23968
9	8	39,05	17,64	1,2	192,53	0,53351	0,32606
10	9	39,19	15,203	1,5	196,22	0,39432	0,38228
11	10	39,33	16,703	0,7	439,49	1,8456	0,19099
12	11	39,47	15,953	1	235,01	0,84268	0,26571
13	12	39,61	17,453	1,3	190,93	0,45576	0,35246
14	13	39,75	15,578	0,8	330,48	1,4044	0,21331
15	14	39,89	17,078	1,1	221,18	0,65744	0,29924
16	15	40,03	16,328	1,4	190,85	0,4165	0,37087
17	16	40,17	17,828	0,9	261,82	1,0167	0,2513
18	17	40,31	15,109	1,2	231,43	0,60192	0,31335
19	18	40,45	16,609	1,5	178,11	0,36018	0,39979
20	19	40,59	15,859	0,7	412,7	1,8904	0,19016
21	20	40,73	17,359	1	218,36	0,80922	0,27706
22	21	40,87	15,484	1,3	210,48	0,50449	0,34276
23	22	41,01	16,984	0,8	337,4	1,3594	0,22238
24	23	41,15	16,234	1,1	229,76	0,68187	0,29793
25	24	41,29	17,734	1,4	175,45	0,39009	0,38675
26	25	41,43	15,296	0,9	283,05	1,0914	0,24177
27	26	41,57	16,796	1,2	208,19	0,55668	0,32885
28	27	41,71	16,046	1,5	182,66	0,37404	0,40036
29	28	41,85	17,546	0,7	443,36	1,8599	0,1992
30	29	41,99	15,671	1	255,02	0,85754	0,27117
31	30	42,13	17,171	1,3	191,55	0,46633	0,35955
32	31	42,27	16,421	0,8	332,85	1,4014	0,22268
33	32	42,41	17,921	1,1	196,79	0,65189	0,31214
34	33	42,55	15,062	1,4	204,19	0,45454	0,37883
35	34	42,69	16,562	0,9	260,88	1,067	0,25128
36	35	42,83	15,812	1,2	218,88	0,58589	0,32648
37	36	42,97	17,312	1,5	167,95	0,34949	0,4162
38	37	43,11	15,437	0,7	448,01	1,9402	0,19343
39	38	43,25	16,937	1	229,2	0,8348	0,28173
40	39	43,39	16,187	1,3	200,8	0,49044	0,35688
41	40	43,53	17,687	0,8	340,02	1,3713	0,23113
42	41	43,67	15,249	1,1	240,92	0,72104	0,29962
43	42	43,81	16,749	1,4	181,68	0,41227	0,3889

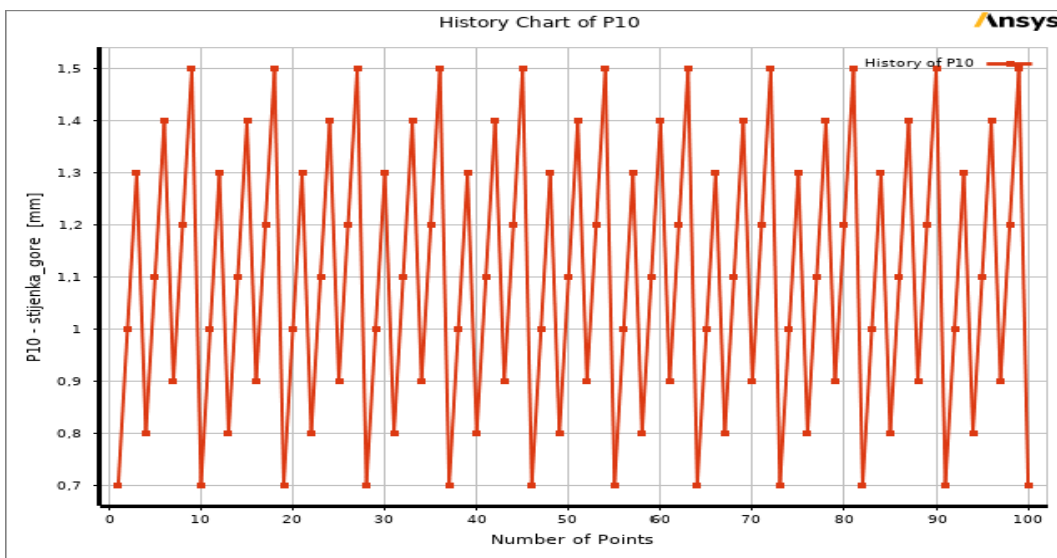
Slika 4.5 Varijacije optimiranja prečke



Slika 4.6 Optimizacija – promjena vrijednosti širine prečke

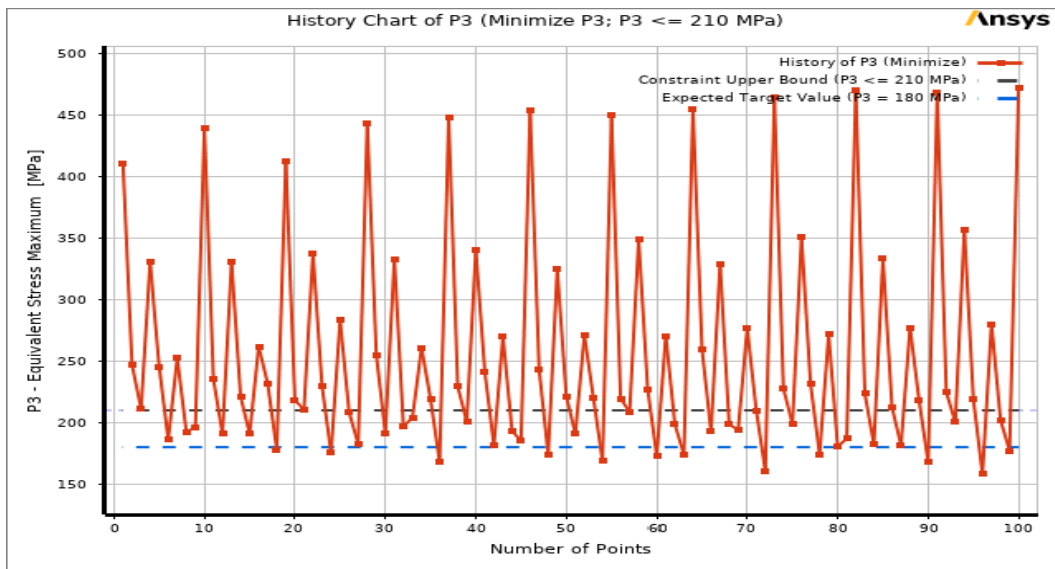


Slika 4.7 Optimizacija – promjena vrijednosti visine prečke

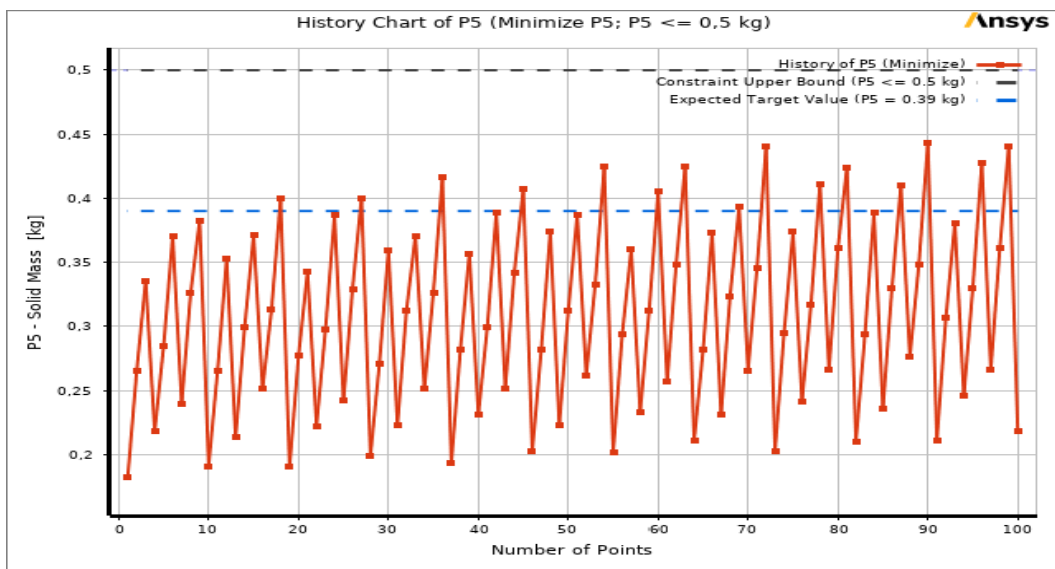


Slika 4.8 Optimizacija – promjena vrijednosti debljine stijenke prečke

Sljedeće slike, 4.9 i 4.10, prikazuju promjene funkcije cilja s obzirom na različite ulazne parametre. Slika 4.9 prikazuje kandidate koji se nalaze unutar zadanih granica ekvivalentnog Von Misesovog naprezanja, dok slika 4.10 prikazuje kandidate koji se nalaze unutar zadanih granica ili, idealno, ispod zadane granice zadane mase.

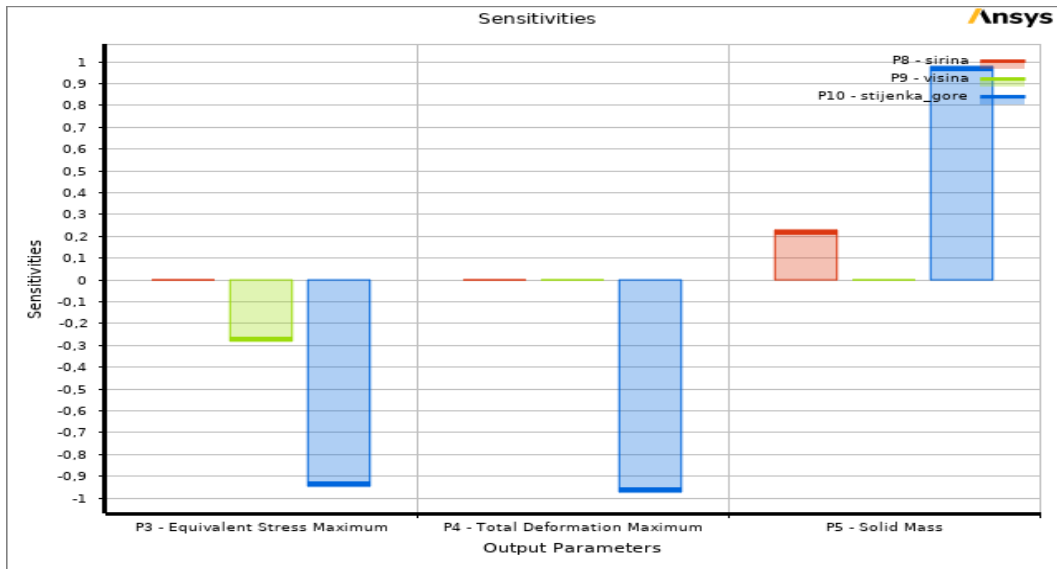


Slika 4.9 Optimizacija – promjena funkcije cilja (naprezanje unutar zadanih granica)



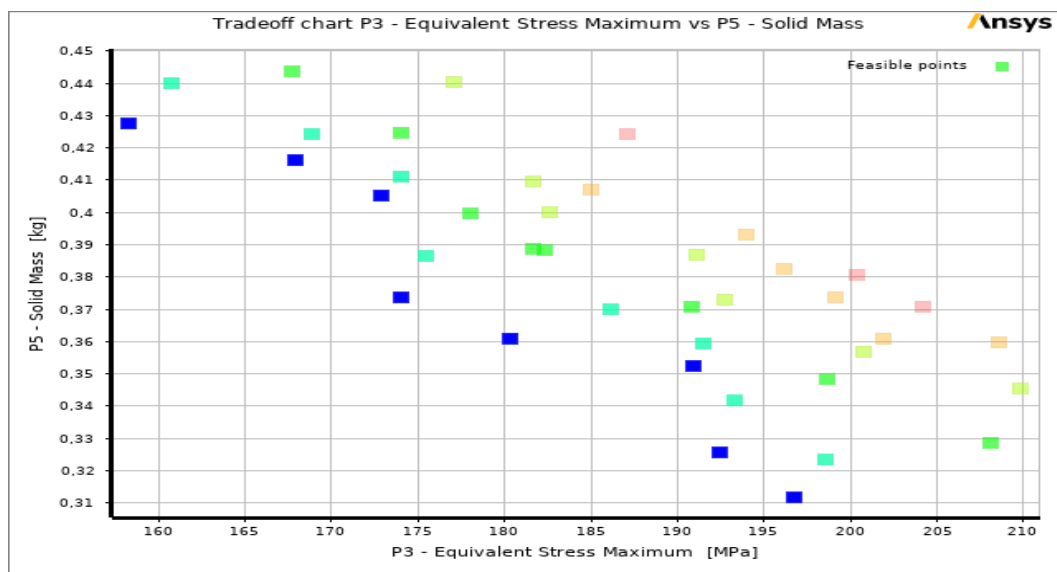
Slika 4.10 Optimizacija – promjena funkcije cilja (smanjenje mase)

Budući da su ranije prikazane promjene ulaznih parametara i funkcije cilja optimizacije, sljedeća slika 4.11 prikazuje međusobne utjecaje, odnosno koliko svaki ulazni parametar utječe na masu, ekvivalentno Von Misesovo naprezanje i progib. Iz grafa je vidljivo da debljina stjenke ima daleko najveći utjecaj na svaki izlazni parametar.



Slika 4.11 Utjecaji ulaznih parametra optimizacije prečke

Rješenja za svaki uzorak prikazana su na slici 4.12. Prikazan je 2D graf na kojem se na ordinati nalazi masa konstrukcije, dok se na apscisi nalazi ekvivalentno Von Misesovo naprezanje. Iz grafa se jasno može zaključiti kako sa smanjenjem mase raste ekvivalentno naprezanje. 3D graf pruža sličan uvid u izlazne parametre, uz dodatak progiba, no progib nema značajan utjecaja u ovoj optimizaciji.



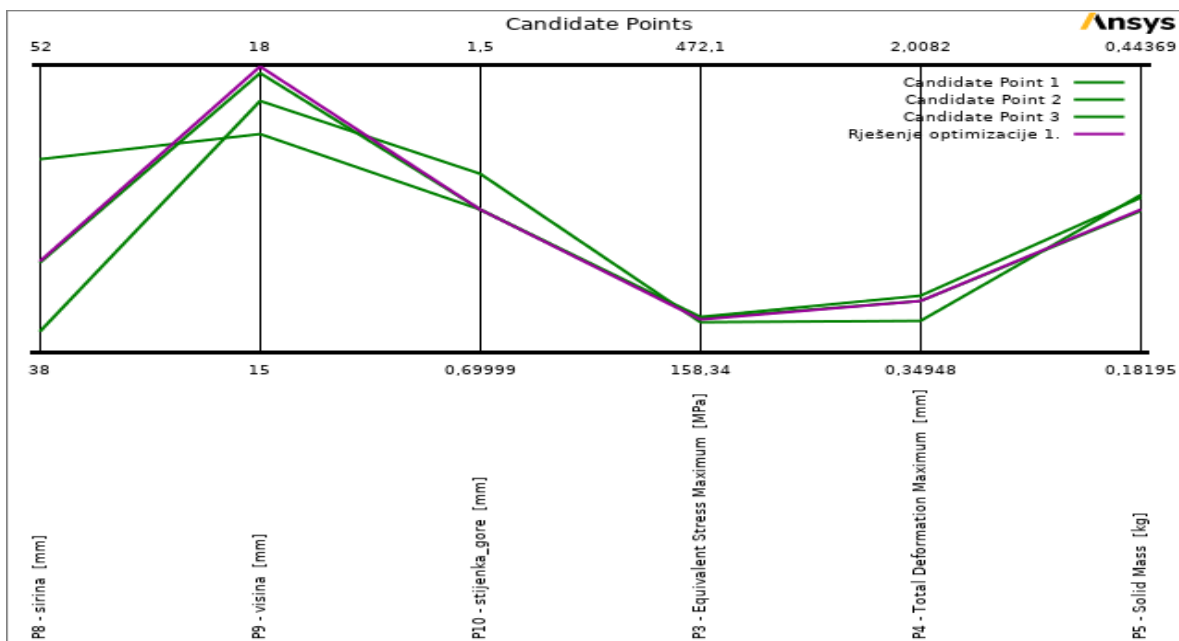
Slika 4.12 Rješenje optimizacije prečke

Slijedi prikaz rezultata optimizacije konstrukcije prečke. Rezultati su prikazani na slici 4.13. Optimizacija je dala tri najbolja kandidata za odabrane uvjete, ali idealni kandidat nije pronađen. Niti jedan kandidat ne nudi smanjenje mase uz održavanje ekvivalentnog naprezanja ispod 180 MPa, što je bilo očekivano s obzirom na sliku 4.12, koja pokazuje da smanjenjem mase raste i ekvivalentno naprezanje. Naposljetku je odabran kandidat pod brojem jedan (1), označen plavom bojom na slici 4.13, koji ima dimenzije: širina = 42,41 mm, visina = 17,921 mm i debljina stjenke = 1,1 mm. Crvenom bojom na slici 4.13 označeno je početno stanje modela prema kojem su uspoređivani kandidati. Zelenom bojom označeno je rješenje optimizacije, koje je upravo kandidat jedan (1) sa zaokruženim vrijednostima radi lakše proizvodnje, kontrole itd. Prema tome, dimenzije odabranog rješenja iznose: širina = 42,5 mm, visina = 18 mm i debljina stjenke = 1,1 mm. Ovo rješenje rezultiralo je smanjenjem mase za 28,01%, dok je ekvivalentno Von Misesovo naprezanje poraslo za 10,92%. U kontekstu optimizacije prečke, povećanje naprezanja od 10,92% je prihvatljivo jer je smanjenje mase gotovo trostruko veće, tj. 28,01%, a naprezanje ne prelazi granicu od 210 MPa. Funkcija cilja, koja je bila smanjenje mase, ispunjena je smanjenjem mase za 28,01%, uz istodobno zadovoljavanje uvjeta da ekvivalentno naprezanje pod utjecajem sile od 1000 N ne prelazi 210 MPa. Daljnje smanjenje mase uz povećanje nosivosti na ovoj konstrukciji nije moguće.

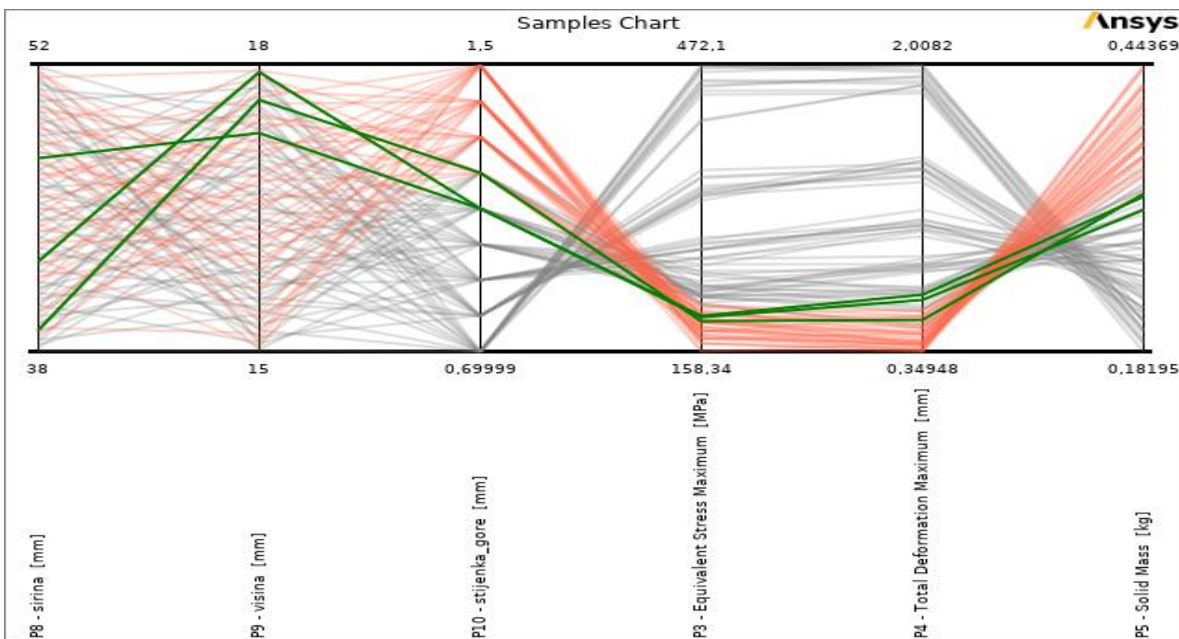
Table of Schematic E2: Optimization - Candidate Points										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Reference	Name	P8 - sirina (mm)	P9 - visina (mm)	P10 - stjenka_gore (mm)	P3 - Equivalent Stress Maximum (MPa)		P4 - Total Deformation Maximum (mm)	P5 - Solid Mass (g)	
2						Parameter Value	Variation from Reference		Parameter Value	Variation from Reference
3	<input type="radio"/>	Candidate Point 1	42,41	17,921	1,1	★ 196,79	11,46 %	0,65189	★★★ 0,31214	-28,18 %
4	<input type="radio"/>	Candidate Point 2	39,05	17,64	1,2	★★★ 192,53	9,05 %	0,53351	★★★ 0,32606	-24,98 %
5	<input type="radio"/>	Candidate Point 3	47,45	17,288	1,1	★ 198,57	12,47 %	0,68043	★★★ 0,3237	-25,52 %
6	<input checked="" type="radio"/>	Početno <input type="text" value="DP 2"/>	50	16	1,5	★★★ 176,55	0,00 %	0,38402	★★★ 0,43462	0,00 %
7	<input type="radio"/>	Rješenje optimizacije 1. <input type="text" value="DP 1"/>	42,5	18	1,1	★ 195,82	10,92 %	0,651	★★★ 0,3129	-28,01 %
*		New Custom Candidate Point	45	16,5	0,7					

Slika 4.13 Rezultati optimizacije prečke

Svaki od kandidata prikazan je zelenom bojom na slici 4.14, dok je rješenje prikazano ljubičastom bojom. Vidljivo je kako prati kandidata 1, koji je bio rješenje optimizacije prečke, te je rezultat upravo njegovih zaokruženih vrijednosti. Slika 4.15 prikazuje sva rješenja optimizacije, pri čemu su zelenom bojom označena tri najbolja kandidata, crnom bojom rezultati koji ne zadovoljavaju granicu od 210 MPa ekvivalentnog Von Misesovog naprezanja, dok su crvenom bojom prikazana rješenja koja premašuju postavljeno ograničenje mase do 0,5 kg.



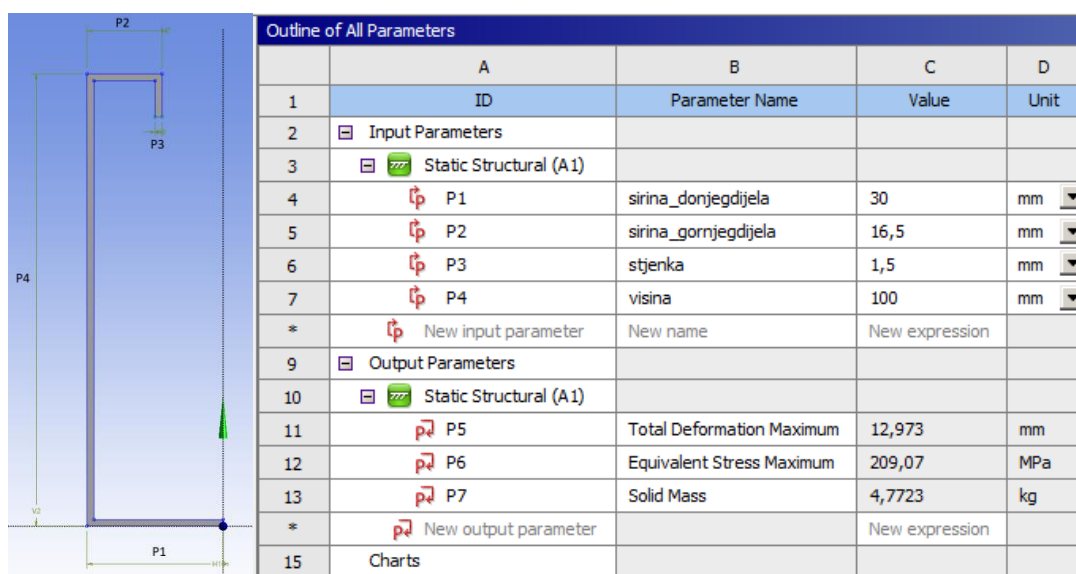
Slika 4.14 Najbolji kandidati optimizacije prečke



Slika 4.15 Kandidati optimizacije prečke

4.2. Optimizacija konstrukcije šine

Optimizacija konstrukcije šine provedena je na identičan način kao i optimizacija prečke. Budući da je na šini primijećen početak plastične deformacije cijele konstrukcije, funkcija cilja ove optimizacije je povećanje nosivosti, uz minimalno povećanje mase, ako je to moguće. Koraci optimizacije isti su kao kod optimizacije prečke, ali su kod šine uzeta četiri ulazna parametra: širina donjeg dijela = 30 mm, širina gornjeg dijela = 16,5 mm, debljina stjenke = 1,5 mm i visina = 100 mm, kao što je prikazano na slici 4.16. Također, ista slika prikazuje izlazne parametre pod utjecajem sile od 750 N, koji su preuzeti iz simulacije pojedinačne šine (slika 3.19 i tablica 3.5), a iznose: progib = 12,973 mm, ekvivalentno Von Misesovo naprezanje = 209,07 MPa i masa = 4,7723 kg.



Slika 4.16 Ulazni i izlazni parametri šine

Kao i kod prethodne optimizacije prečke, korištena je metoda "screening" s brojem uzoraka od 100 i odabranih 3 najbolja kandidata odnosno tri najbolja rješenja iz skupa rješenja koji je određen s 100 mogućih rješenja. Zbog potrebe za smanjenjem ekvivalentnog Von Misesovog naprezanja, funkcije cilja i ograničenja značajno se razlikuju te je dodano ograničenje na progib. Prema tome, prvo ograničenje postavljeno je tako da progib ne smije biti veći od 15 mm, ekvivalentno Von Misesovo naprezanje ne smije prelaziti 210 MPa, s ciljanom vrijednošću oko 150 MPa jer je i funkcija cilja smanjenje ekvivalentnog von Misesovog naprezanja a vrijednosti blizu 150 MPa uvelike bi zadovoljavale taj zahtjev, a masa ne smije biti veća od 6 kg, s ciljanom vrijednošću od 5 kg, jer se očekivalo da će se smanjenjem ekvivalentnog Von Misesovog naprezanja rezultirati povećanjem masa (Slika 4.17). Slika 4.18 prikazuje raspone ulaznih parametara za šinu, koji se kreću kako slijedi: širina donjeg dijela varira između 25 i 50 mm, širina gornjeg dijela je u rasponu

od 10 do 17 mm, debljina stjenke iznosi između 0,8 i 2 mm, a visina je u rasponu od 100 do 200 mm.

Table of Schematic B2: Optimization									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Name	Parameter	Objective			Constraint			
2			Type	Target	Tolerance	Type	Lower Bound	Upper Bound	Tolerance
3	P5 <= 15 mm	P5 - Total Deformation Maximum	No Objective			Values <= Upper Bound		15	0,001
4	Minimize P6; P6 <= 210 MPa	P6 - Equivalent Stress Maximum	Minimize	150		Values <= Upper Bound		210	0,001
5	Minimize P7; P7 <= 6 kg	P7 - Solid Mass	Minimize	5		Values <= Upper Bound		6	0,001
*		Select a Parameter							

Slika 4.17 Funkcije cilja i ograničenja šine

Table of Schematic B2: Optimization				
	A	B	C	D
1	Input Parameters			
2	Name	Lower Bound	Upper Bound	
3	P1 - sirina_donjegdjela (mm)	25	50	
4	P2 - sirina_gornjegdjela (mm)	10	17	
5	P3 - stjenka (mm)	0,8	2	
6	P4 - visina (mm)	100	200	
7	Parameter Relationships			
8	Name	Left Expression	Operator	Right Expression
*	New Parameter Relationship	New Expression	<=	New Expression

Slika 4.18 Rasponi ulaznih parametara šine

Rezultati optimizacije za prvih 42 uzorka prikazani su na slici 4.19. Iz slike je vidljivo da za 2 uzorka, odnosno ukupno 11 dimenzijskih kombinacija, nije moguće izračunati rješenje (red 20 i red 36 u tablici na slici 4.19).

Table of Schematic B2: Optimization								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Name	P1 - sirina_donjegdjela (mm)	P2 - sirina_gornjegdjela (mm)	P3 - stjenka (mm)	P4 - visina (mm)	P5 - Total Deformation Maximum (mm)	P6 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	P7 - Solid Mass (kg)
2	1	25,125	10,035	0,806	100,5	26,545	404,73	2,4245
3	2	25,375	13,535	1,206	120,5	10,011	266,17	4,7054
4	3	25,625	11,785	1,606	140,5	5,0716	174,27	7,524
5	4	25,875	15,285	0,93933	160,5	6,7612	176,14	5,3032
6	5	26,125	10,91	1,3393	180,5	3,2873	109,62	8,5367
7	6	26,375	14,41	1,7393	104,5	10,465	196,44	5,6275
8	7	26,625	12,66	1,0727	124,5	10,235	227,28	4,3828
9	8	26,875	16,16	1,4727	144,5	4,9772	139,44	7,3331
10	9	27,125	10,473	1,8727	164,5	2,8673	97,117	10,637
11	10	27,375	13,973	0,85044	184,5	6,3923	154,56	5,6667
12	11	27,625	12,223	1,2504	108,5	12,865	288,44	4,2697
13	12	27,875	15,723	1,6504	128,5	5,9382	182,45	7,1102
14	13	28,125	11,348	0,98378	148,5	7,2506	191,01	5,0207
15	14	28,375	14,848	1,3838	168,5	3,6927	118,24	8,2985
16	15	28,625	13,098	1,7838	188,5	2,114	84,64	12,095
17	16	28,875	16,598	1,1171	112,5	12,258	229,53	4,1434
18	17	29,125	10,254	1,5171	132,5	6,0958	188,22	6,669
19	18	29,375	13,754	1,9171	152,5	3,2874	127,59	10,14
20	19	DP 140	29,625	12,004	0,89489	172,5	✗	✗
21	20	29,875	15,504	1,2949	192,5	3,0913	99,162	9,1366
22	21	30,125	11,129	1,6949	116,5	7,6821	154,91	6,3593
23	22	30,375	14,629	1,0282	136,5	8,2212	196,69	4,8458
24	23	30,625	12,879	1,4282	156,5	4,142	130,99	7,8497
25	24	30,875	16,379	1,8282	176,5	2,3788	105,22	11,682
26	25	31,125	10,691	1,1616	196,5	3,2242	87,876	8,3138
27	26	31,375	14,191	1,5616	101,3	12,154	250,05	5,0167
28	27	31,625	12,441	1,9616	121,3	5,8067	142,38	7,8382
29	28	31,875	15,941	0,82081	141,3	10,221	217,49	4,093
30	29	32,125	11,566	1,2208	161,3	4,5591	140,45	6,9766
31	30	32,375	15,066	1,6208	181,3	2,5417	91,801	10,711
32	31	32,625	13,316	0,95415	105,3	17,237	285,24	3,2696
33	32	32,875	16,816	1,3541	125,3	7,3028	164,26	5,8503
34	33	33,125	10,144	1,7541	145,3	3,9977	115,91	8,7712
35	34	33,375	13,644	1,0875	165,3	5,1081	141,85	6,4825
36	35	DP 156	33,625	11,894	1,4875	185,3	✗	✗
37	36	33,875	15,394	1,8875	109,3	7,7212	188,27	6,806
38	37	34,125	11,019	0,86526	129,3	11,063	238	3,8276
39	38	34,375	14,519	1,2653	149,3	5,1348	141,21	6,7276
40	39	34,625	12,769	1,6653	169,3	2,8288	99,112	10,159
41	40	34,875	16,269	0,99859	189,3	4,9821	118,05	7,0513
42	41	35,125	10,582	1,3986	113,3	9,5902	229,12	5,2165
43	42	35,375	14,082	1,7986	133,3	4,6657	124,27	8,3156

Slika 4.19 Varijacije optimiranja šine

Na temelju rezultata završene optimizacije šine, utvrđeno je da je moguće postići rješenje s većom nosivošću uz mogućnost smanjenja mase, što potvrđuje kandidat 1. iz slike 4.20. Međutim, funkcija cilja optimizacije je smanjenje ekvivalentnog Von Misesovog naprezanja, a smanjenje od 3,70% gotovo je zanemarivo u usporedbi sa smanjenjem mase od 13,57%. Stoga je moguće pronaći rješenje s promijenjenim vrijednostima smanjenja koje bi zadovoljilo funkciju cilja.

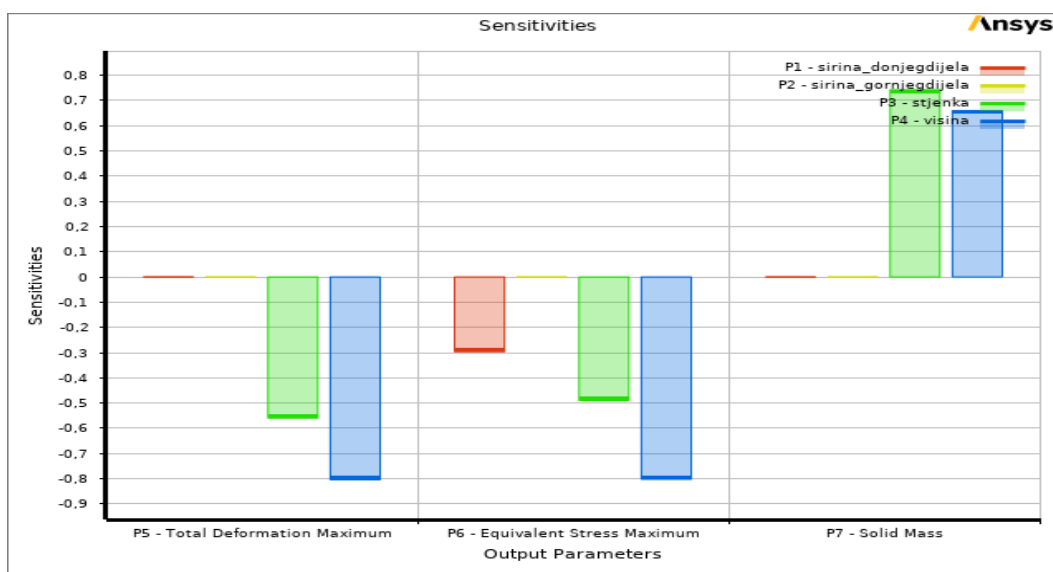
Na temelju tih saznanja i slika 4.20 i 4.21, provedena je ponovna optimizacija šine ovaj put na 50 uzoraka na bazi kandidata 1 s različitim rasponima prikazanim na slici 4.22.

Rasponi su sljedeći:

- širina donjeg dijela = 38 - 42 mm, koja nema značajan utjecaj na konstrukciju odabrana vrijednost za 2 mm veća i manja od kandidata 1;
- širina gornjeg dijela = 10 - 12 mm, također bez velikog utjecaja, odabrano 1 mm više i manje od kandidata 1;
- debljina stjenke = 0,7 – 1,6 mm, važan parametar, debljina iznad 1.6 mm nije prihvatljive zbog najvećeg utjecaja na masu, a promjene su stepenaste po 0,1 mm;
- visina = 100 do 150 mm, što je najznačajniji parametar optimizacije te utječe na sve izlazne parametre što znači da daje najviše prostora za optimizaciju.

Table of Schematic B2: Optimization , Candidate Points												
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	Reference	Name	P1 - sirina_donjegdjela (mm)	P2 - sirina_gornjegdjela (mm)	P3 - stjenka (mm)	P4 - visina (mm)	P5 - Total Deformation Maximum (mm)		P6 - Equivalent Stress Maximum (MPa)		P7 - Solid Mass (kg)	
2							Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference
3	●	Candidate Point 1	40,125	11,676	1,1023	110,1	★ 12,488	-3,74 %	→ 201,33	-3,70 %	★ 4,1249	-13,57 %
4	●	Candidate Point 2	43,125	10,527	0,92452	158,1	★ 6,8104	-47,50 %	★ 147,06	-29,66 %	★ 5,3697	12,52 %
5	●	Candidate Point 3	39,375	14,301	0,96896	146,1	★ 7,4001	-42,96 %	★ 165,98	-20,61 %	★ 5,1373	7,63 %
6	●	Početno	DP3 30	16,5	1,5	100	★ 12,973	0,00 %	→ 209,07	0,00 %	★ 4,7723	0,00 %
*		New Custom Candidate Point	37,5	13,5	1,4	150						

Slika 4.20 Rezultati prve optimizacije šine

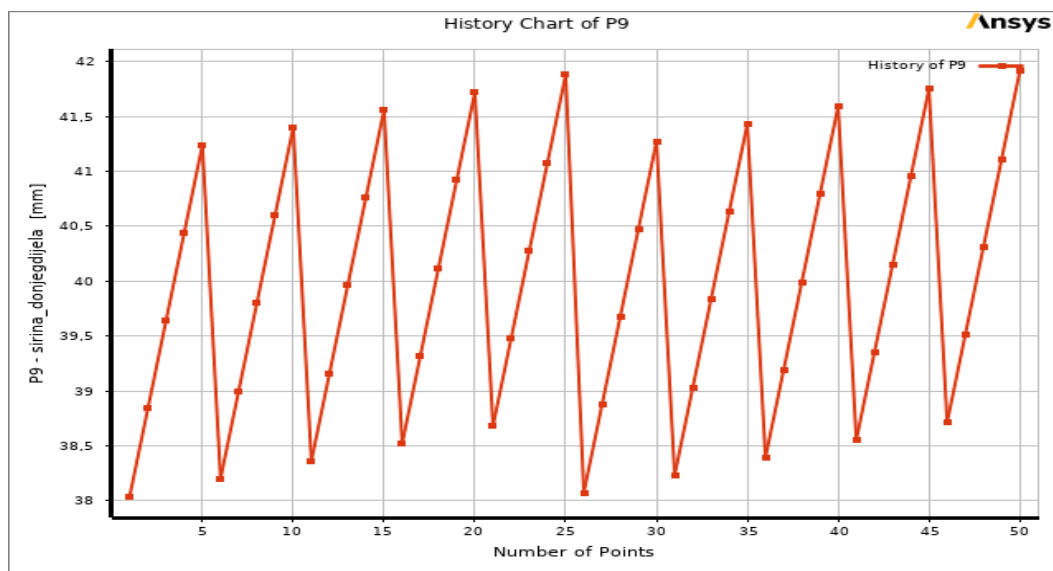


Slika 4.21 Utjecaji ulaznih parametra optimizacije šine

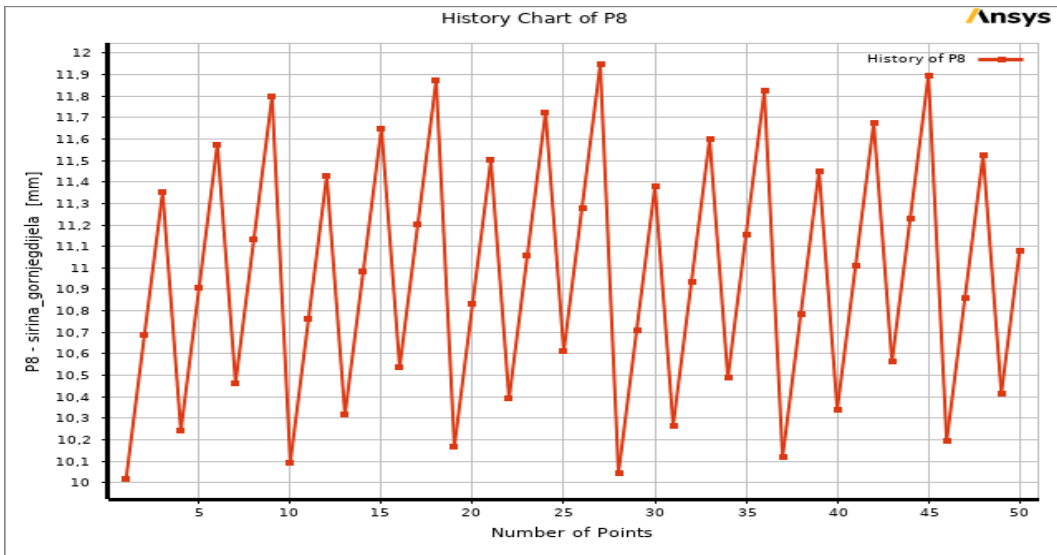
Table of Schematic C2: Optimization				
	A	B	C	D
1	[-] Input Parameters			
2	Name	Lower Bound	Upper Bound	
3	P3 - stjenka (mm)	0,7	1,6	
4	P4 - visina (mm)	100	150	
5	P8 - sirina_gornjegdjela (mm)	10	12	
6	P9 - sirina_donjegdjela (mm)	38	42	
7	[-] Parameter Relationships			
8	Name	Left Expression	Operator	Right Expression
*	New Parameter Relationship	New Expression	<=	New Expression

Slika 4.22 Novi rasponi ulaznih parametara šine

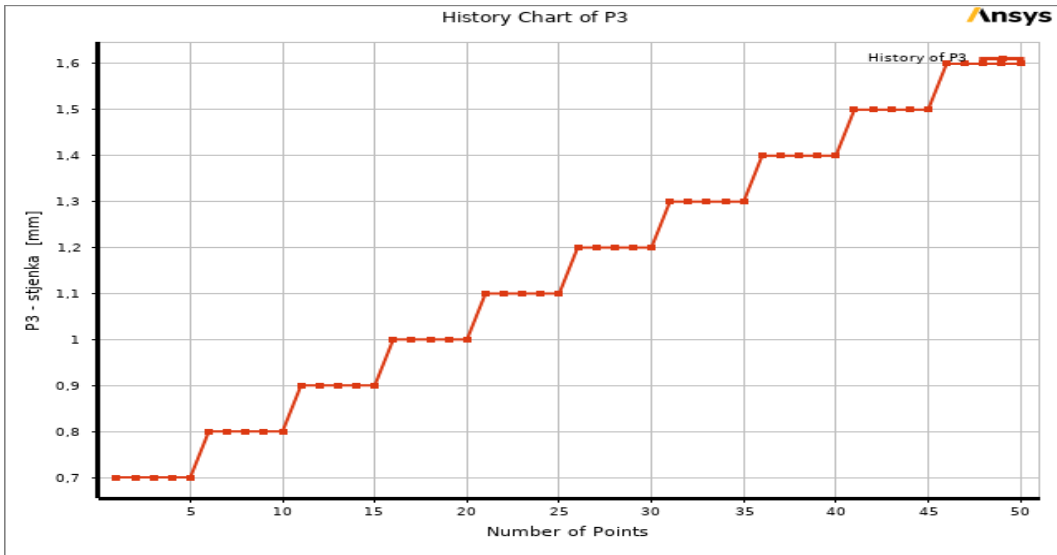
Pošto se radi o modificiranoj optimizaciji prikazane su promjene novih ulaznih parametra u procesu optimizacije. Tako slika 4.23 prikazuje promjenu vrijednosti širine donjeg dijela, slika 4.24 prikazuje promjenu vrijednosti širine gornjeg dijela, slika 4.25 prikazuje promjenu vrijednosti debljine stjenke i slika 4.26 prikazuje promjenu visine šine.



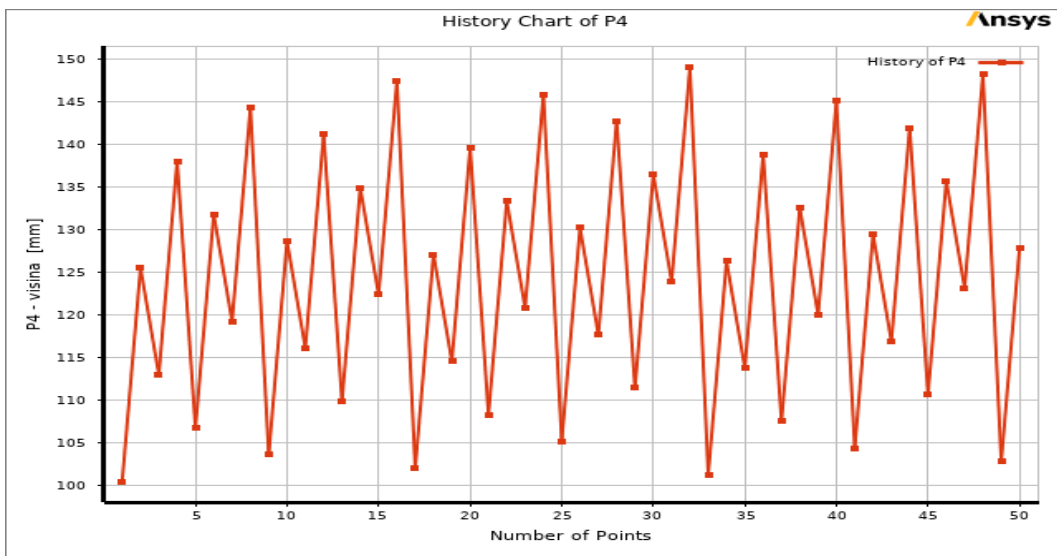
Slika 4.23 Optimizacija – promjena vrijednosti širine donjeg dijela šine



Slika 4.24 Optimizacija – promjena vrijednosti širine gornjeg dijela šine

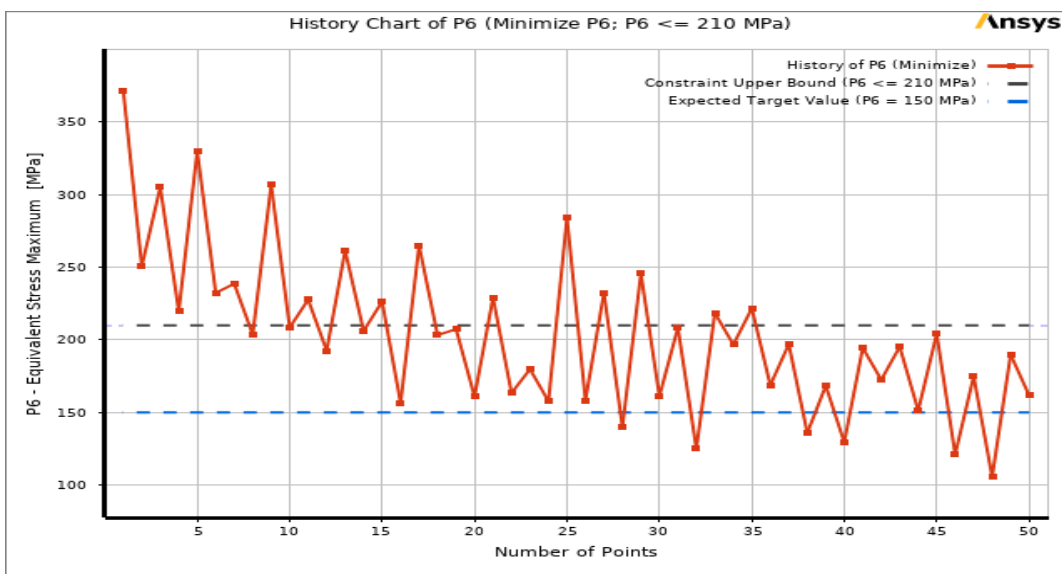


Slika 4.25 Optimizacija – promjena vrijednosti debljine stjenke šine

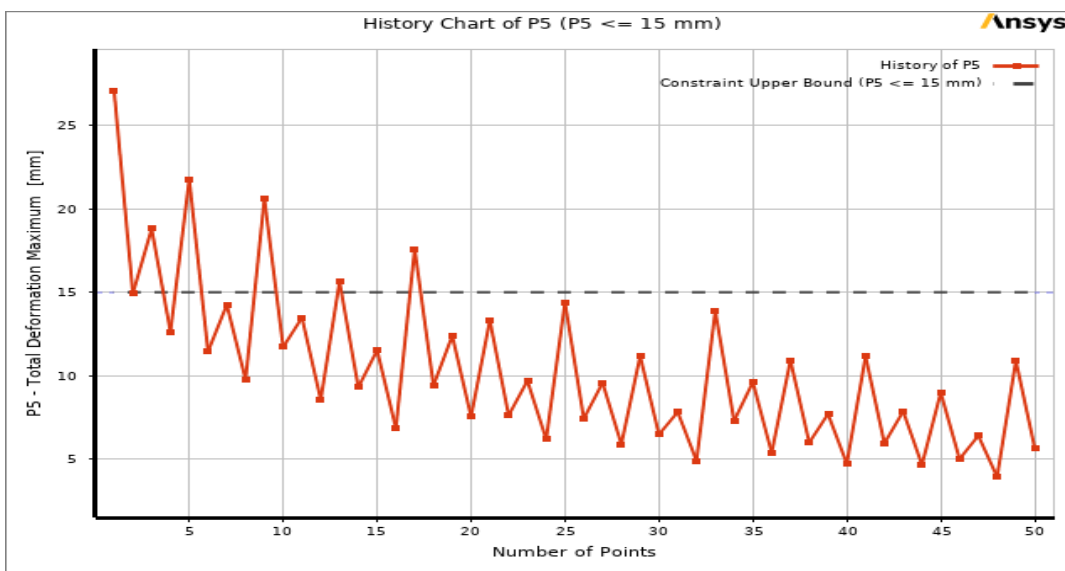


Slika 4.26 Optimizacija – promjena visine šine

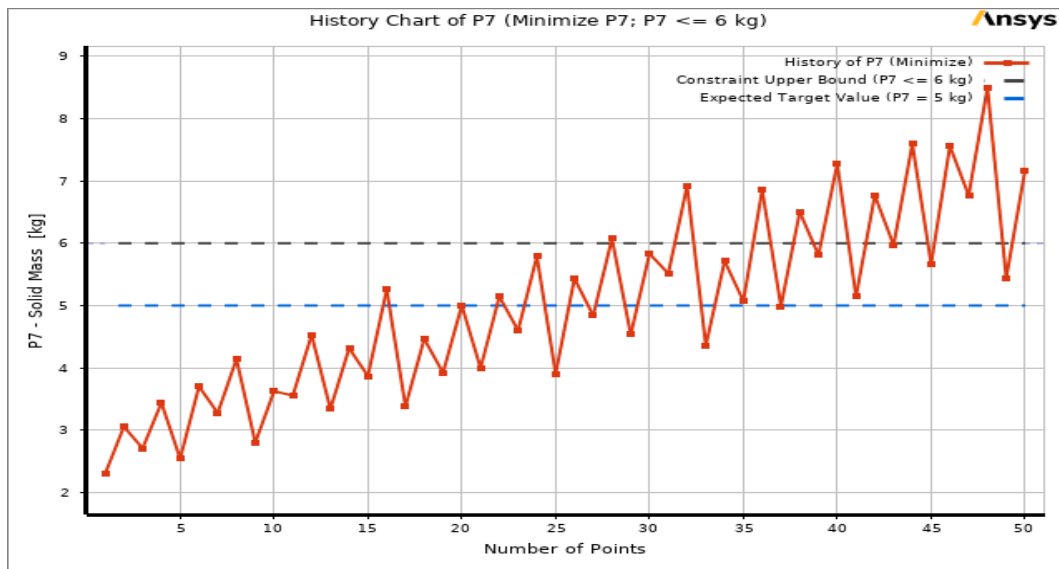
Kao i kod prethodne optimizacije, redoslijed je identičan te sljedeće slike prikazuju promjene funkcije cilja u odnosu na promjene ulaznih parametara. Slika 4.27 prikazuje promjenu ekvivalentnog Von Misesovo naprezanje, slika 4.28 prikazuje promjenu progiba, dok slika 4.29 prikazuje promjenu mase. Optimalno rješenje nalazi se ispod ili na plavim linija na svakom grafu zbog minimiziranja vrijednosti, dok je najbolji kandidat rješenje koje se nalazi ispod ili na svim plavim linijama, odnosno unutar svih ograničenja. Sve što prelazi crnu liniju izlazi van ograničenja.



Slika 4.27 Optimizacija – promjena funkcije cilja (naprezanje unutar zadanih granica)

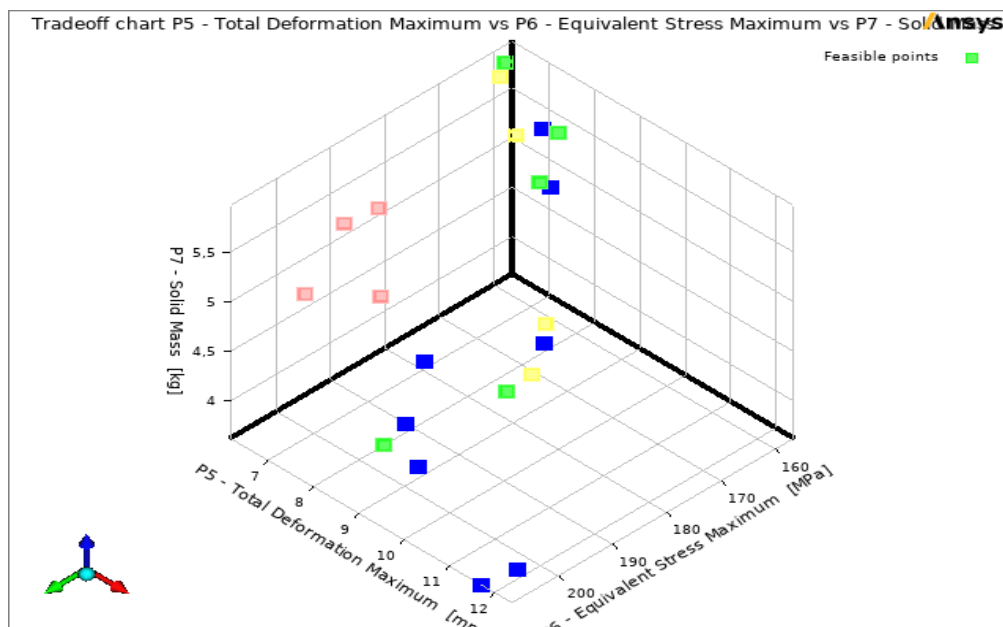


Slika 4.28 Optimizacija – promjena funkcije cilja (progib)



Slika 4.29 Optimizacija – promjena funkcije cilja (mase)

Ukupna rješenja za svaki uzorak prikazana su na slici 4.30. Prikazan je 3D graf na kojem se na x-osi nalazi masa, na y-osi ekvivalentno Von Misesovo naprezanje, a na z-osi progib. Iz grafa se jasno mogu vidjeti potencijalni kandidati optimizacije, dok su rasponi relativno kratki zbog modifikacije ulaznih parametara optimizacije šine. Također je vidljivo da se s smanjenjem mase povećavaju i ekvivalentno Von Misesovo naprezanje te progib.

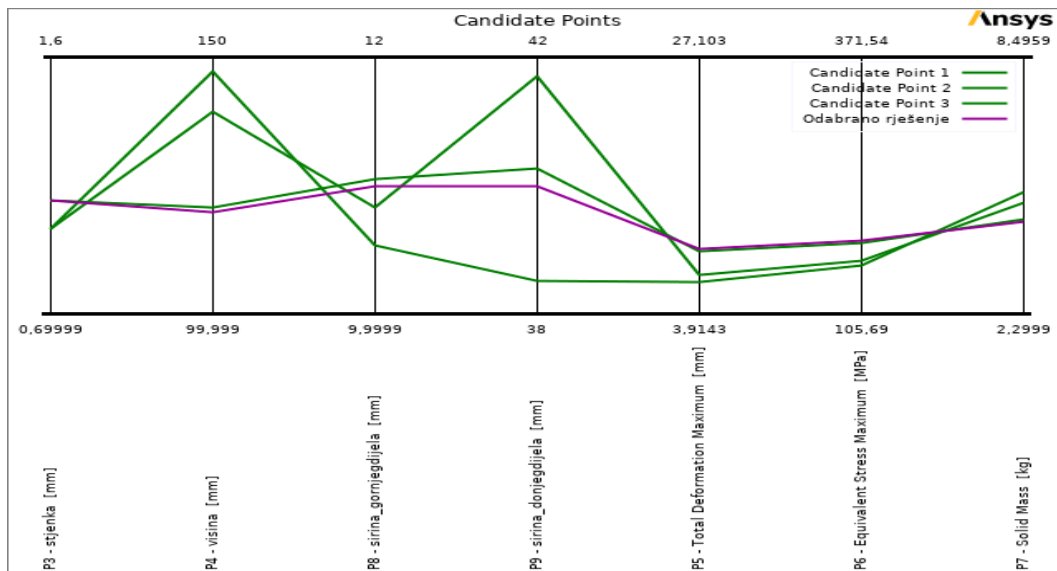


Slika 4.30 Rješenja optimizacije šine

Preostalo je još prikazati konačna rješenja i najbolje kandidate optimizacije šine, što se može vidjeti na slici 4.31. Optimizacijom su odabrana tri najbolja kandidata. Kandidati 1 i 2 mogu biti legitimna odabrana rješenja, no odabran je kandidat 2 jer, uz željeno smanjenje von Misesovog napreznja, daje i značajno smanjenje mase. Odabrano rješenje, prikazano plavom bojom na slici, ima sljedeće dimenzije: širina donjeg dijela = 40,28 mm, širina gornjeg dijela = 11,057 mm, debljina stjenke = 1,1 mm, i visina = 120,81 mm. Svaki od kandidata uspoređivan je s početnim stanjem, označenim crvenom bojom na slici. Zelenom bojom prikazano je konačno rješenje optimizacije šine, koje se temelji na kandidatu 2, ali sa zaokruženim vrijednostima zbog istih razloga kao i kod prečke. Dimenzije konačnog rješenja su sljedeće: širina donjeg dijela = 40 mm, širina gornjeg dijela = 11 mm, debljina stjenke = 1,1 mm, i visina = 120 mm. Takvo rješenje pruža zadovoljavajuća poboljšanja u sva tri segmenta, sa smanjenjem von Misesovog napreznja za 12,85%, smanjenjem mase za 4,55% i smanjenjem progiba za 23,81%. Funkcija cilja je zadovoljena smanjenjem von Misesovog napreznja s 209,07 MPa na 182,21 MPa, što predstavlja smanjenje za 26,28 MPa, što direktno dovodi do povećanja nosivosti. Vidljivo je da visina ima znatno veći utjecaj na nosivost od debljine stjenke, što potvrđuje ranija ispitivanja, dok debljina stjenke značajno utječe na masu (Slika 4.21). Daljnje smanjenje ekvivalentnog von Misesovog napreznja je moguće, ali uz cijenu povećanja mase. Slika 4.32 prikazuje najbolje kandidate optimizacije šine (zeleno boja) zajedno s odabranim rješenjem optimizacije (ljubičasta boja), gdje je vidljivo kako rješenje prati kandidata 2.

Table of Schematic C2: Optimization - Candidate Points												
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	Reference	Name	P3 - stjenka (mm)	P4 - visina (mm)	P8 - sirina_gornjegdjela (mm)	P9 - sirina_donjegdjela (mm)	P5 - Total Deformation Maximum (mm)	P6 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	P7 - Solid Mass (kg)			
2							Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value			
3							Variation from Reference	Variation from Reference	Variation from Reference			
3	○	Candidate Point 1	1	139,56	10,835	41,72	7,5337	-41,93 %	160,95	-23,01 %	5,0018	-4,81 %
4	○	Candidate Point 2	1,1	120,81	11,057	40,28	9,6848	-25,35 %	179,82	-13,99 %	4,6006	-3,60 %
5	○	Candidate Point 3	1	147,38	10,539	38,52	6,8305	-47,35 %	156,57	-25,11 %	5,2565	10,15 %
6	⊕	početno	DP 1 1,5	100	16,5	30	12,973	0,00 %	209,07	0,00 %	4,7723	0,00 %
7	○	Rješenje optimizacije 2	1,1	120	11	40	9,8845	-23,81 %	182,21	-12,85 %	4,5553	-4,55 %
*		New Custom Candidate Point	0,7	125	11	40						

Slika 4.31 Rezultati optimizacije prečke



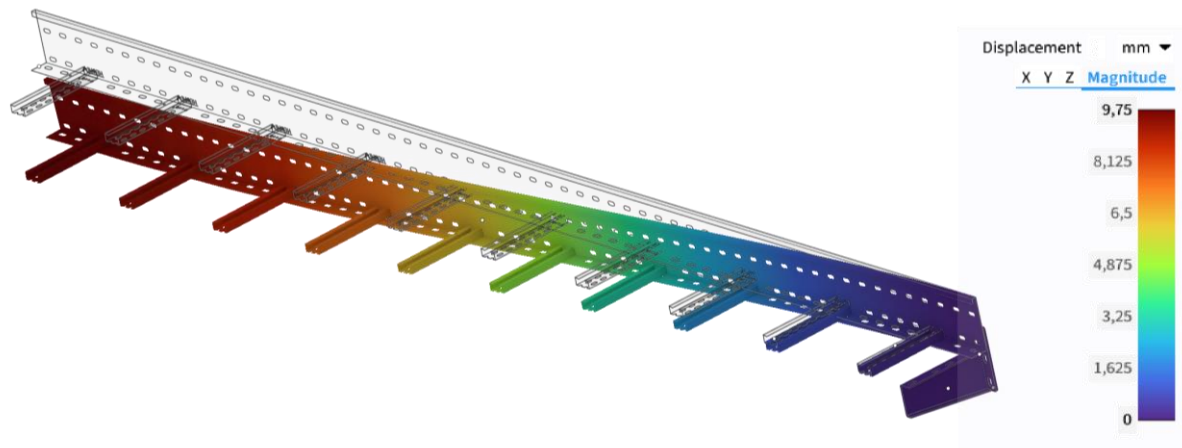
Slika 4.32 Najbolji kandidati optimizacije šine

4.3. Analiza rezultata

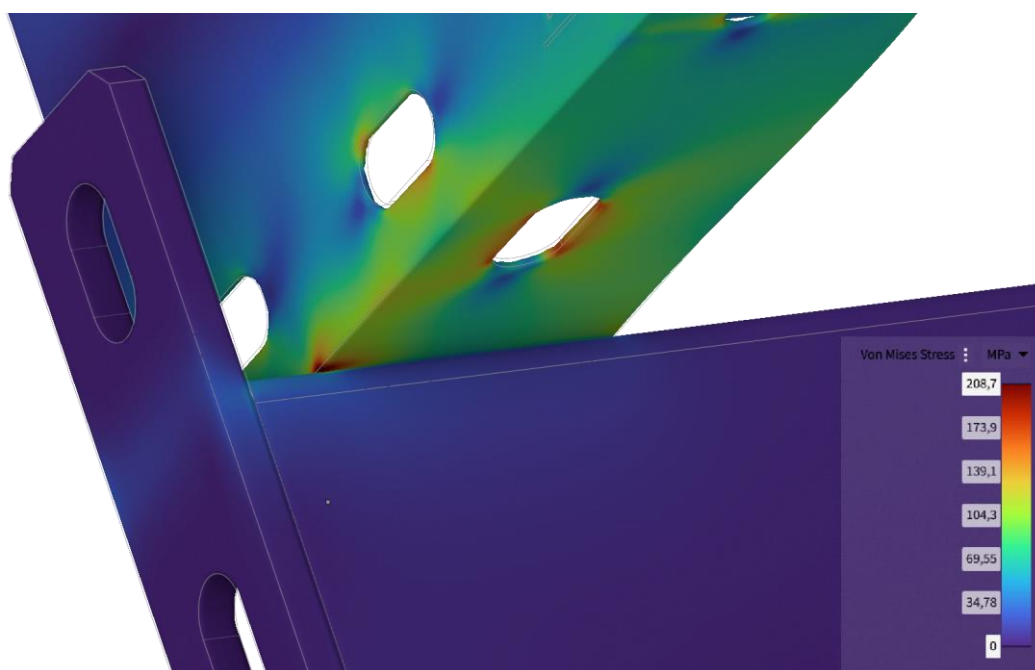
Za kraj preostaje analiza rezultata. Važno za naglasiti da kod ove optimizacije nije korištena metoda podmodeliranja. Optimizacijom osnovna dva dijela ostvarene su funkcije cilja, te je još preostalo ispitivanje cijelog sklopa (ljestava). Ispitivanje cijelih ljestava provedeno je na identičan način kao i za ne optimizirane ljestve, no s vanjskim dimenzijama ljestava $120 \times 400 \times 1,1 \times 6000$ mm sa svim ostalim dimenzijskim promjenama prema provedenoj optimizaciji. Sljedeće slike (4.33, 4.34 i 4.35) prikazuju redom ekvivalentna von Misesova naprezanja, pomake i zonu najviših naprezanja kod optimizacijskog modela korištenjem voksela. Važno je naglasiti da se najviše naprezanje pojavljuje na istom mjestu kao kod početnog modela, na dodiru šine i nosača.



Slika 4.33 Ekvivalentna von Misesova naprezanja na optimiranom modelu



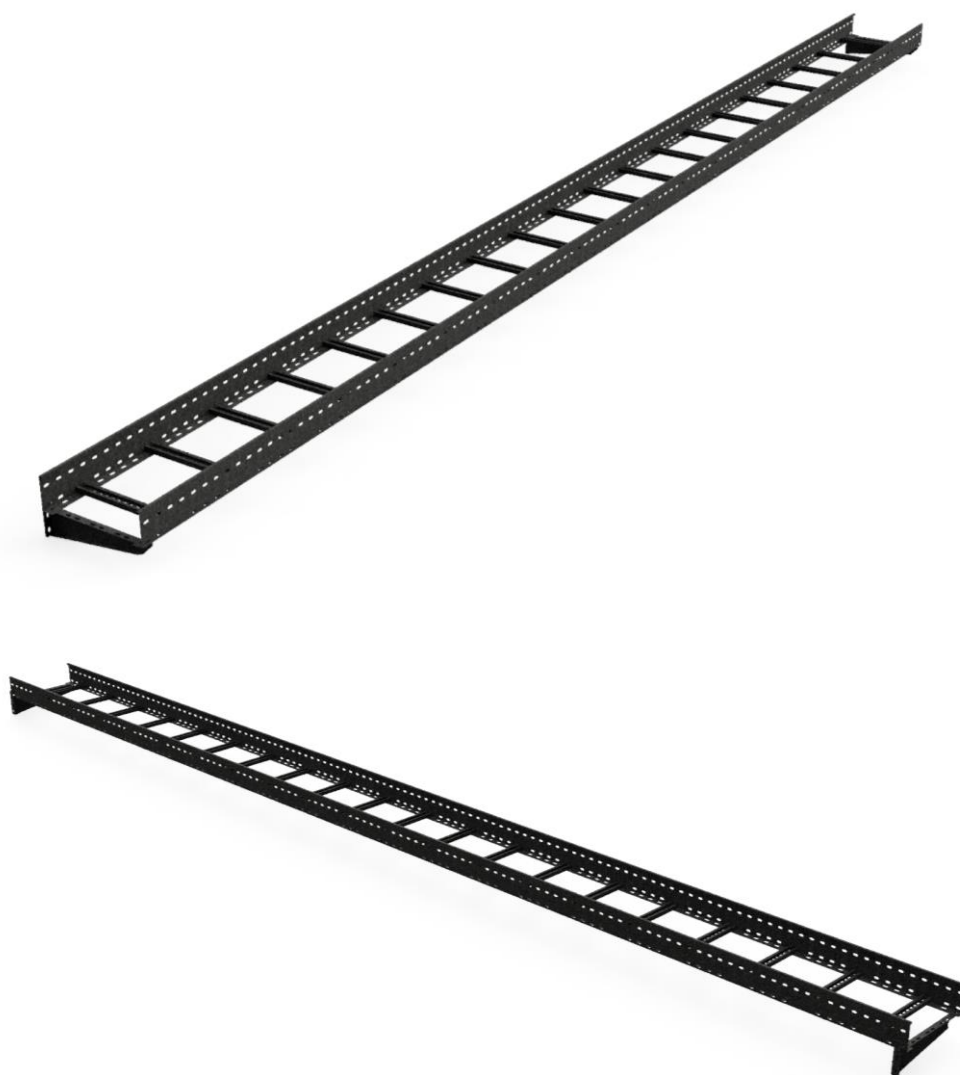
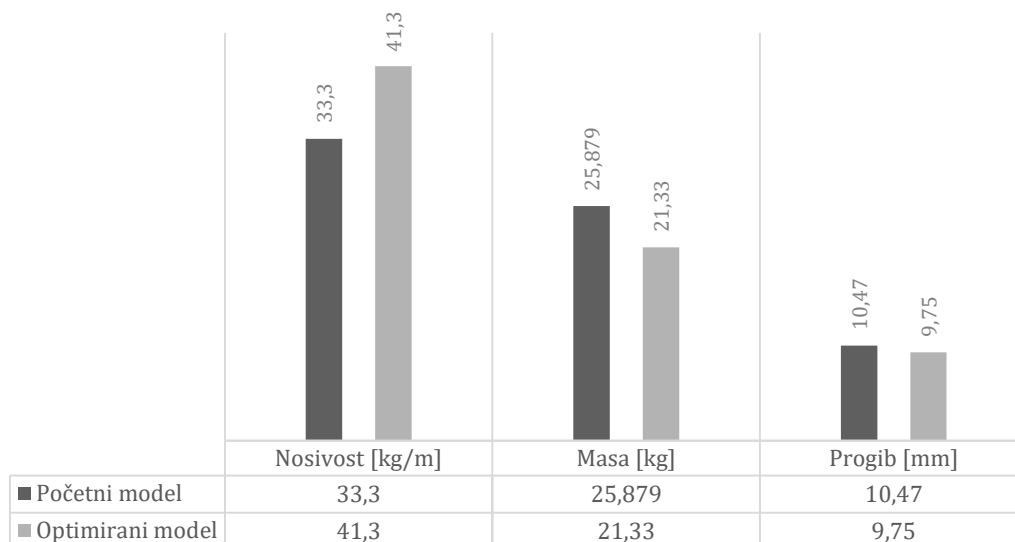
Slika 4.34 Progib na optimiranom modelu (vokseli)



Slika 4.35 Zona najvišeg naprezanja na optimiranom modelu (vokseli)

Graf 4.1 prikazuje dobivene rezultate i usporedbu s početnim modelom. Vidljivo je da je svaki element doživio značajna poboljšanja; nosivost se povećala s 33,3 kg/m na 41,3 kg/m, što predstavlja poboljšanje od 19,37%. Nadalje, masa se smanjila s 25,879 kg za 17,57% na 21,33 kg, a progib se smanjio s 10,47 mm na 9,75 mm. Prema tome, ostvarena su značajna unapređenja konstrukcije. Najvažnija promjena je smanjenje stjenke s 1.5 mm na 1.1 mm uz povećanje ostalih bitnih dimenzija, najčešće visine. Veća visina znači da je materijal dalje od neutralne osi, što povećava otpornost na savijanje i moment inercije. Dobiveno je optimalno rješenje s manjom masom za 4,5 kg i većom maksimalnom nosivošću za 8 kg/m. Tako optimizirani dijelovi su optimalni isključivo za ovaj tip ljestava, no evidentno je da bi dali povoljnije rezultate od originalnih i za ostale tipove ljestava.

Graf 4.1 Razlika početnog i optimiranog modela



Slika 4.36 Optimirani model

5. Zaključak

Rastuće potrebe za električnom energijom u industrijskim i privatnim okruženjima zahtijevaju učinkovitije sustave za vođenje kablova i ožičenja. Kabelske police su ključni elementi za organizaciju i zaštitu kabela, omogućujući sigurnost i jednostavno održavanje, te su prilagođene različitim vrstama kabela i uvjetima okoline. Tehnološki napredak omogućava razvoj lakših, izdržljivijih i ekološki prihvatljivijih materijala i dizajna, što poboljšava instalaciju i fleksibilnost sustava. Odabir odgovarajuće vrste kabelske police ovisi o specifičnim zahtjevima, uključujući nosivost, uvjete okoline i troškove. Optimizacija sustava vođenja kabela uključuje procese prilagodbe i evaluacije kako bi se postigla maksimalna učinkovitost i dugotrajnost. Odabir odgovarajućeg materijala i tipa kabelske police ključan je za dugoročno pouzdano i sigurno funkcioniranje sustava, posebno u izazovnim uvjetima poput područja blizu morske vode ili industrijskih postrojenja s velikim opterećenjima i rasponima.

Na temelju provedene analize i ispitivanja kabelskih ljestava, ovaj diplomski rad usmjeren je na optimiranje njihovih komponenti s ciljem smanjenja mase i poboljšanja nosivosti. Rad istražuje različite strategije i metode za unapređenje konstrukcije, s posebnim naglaskom na ključne komponente koje čine kabelske ljestve. U prvom dijelu rada provedena je sveobuhvatna analiza postojećih rješenja na tržištu, koja je obuhvatila različite vrste kabelskih ljestava, uključujući njihove materijale i izvedbene karakteristike.

Nakon početne analize, fokus je preusmjeren na ispitivanje kabelskih ljestava s obzirom na njihovu nosivost. Istraživanje je obuhvatilo eksperimentalna ispitivanja i simulacije kako bi se utvrdilo kako različite varijante parametara, poput visine, širine i debljine stjenke, utječu na nosivost i sigurnost ljestava. Korištenjem metode konačnih elemenata (Finite Element Analysis - FEA), identificirane su slabe točke i potencijalna područja za poboljšanje.

Drugi dio rada obuhvatio je optimiranje specifičnih komponenti kabelskih ljestava. Optimiranje je provedeno na prečki, ključnim dijelom koji podržava strukturalnu stabilnost. U ovoj fazi postignuto je smanjenje mase prečke za 28,01%, što predstavlja značajan korak prema smanjenju ukupne mase ljestava. Međutim, ovaj postupak također je rezultirao povećanjem Von Misesovog naprezanja za 10,92%. Ovaj porast naprezanja bio je očekivan i prihvaćen, budući da tijekom simulacije na taj objekt nisu zabilježena izražena naprezanja. Sljedeći korak u optimiranju obuhvatio je šinu, drugi ključni element u strukturi ljestava. Ovdje je postignuto smanjenje mase za 4,55%, dok je Von Misesovo naprezanje smanjeno za 12,85%. Ova faza optimizacije omogućila je dodatno poboljšanje performansi ljestava, istovremeno smanjujući ukupnu masu i poboljšavajući efikasnost materijala. Kombiniranjem optimizirane prečke i šine, konačna verzija kabelskih ljestava pokazala je značajna poboljšanja u performansama. Nosivost ljestava povećana

je s 33,3 kg/m na 41,3 kg/m, što predstavlja poboljšanje od 19,37%. Istovremeno, masa ljestava smanjena je s 25,879 kg na 21,33 kg, što predstavlja smanjenje od 17,57%. Dodatno, progib ljestava smanjio se s 10,47 mm na 9,75 mm, što upućuje na poboljšanu krutost i stabilnost konstrukcije.

Istraživanja i optimiranje rezultirali su značajnim unapređenjima u konstrukciji kablskih ljestava. Postignuta poboljšanja ne samo da doprinose smanjenju materijala i mase, već također osiguravaju veću nosivost i sigurnost proizvoda. Rezultati istraživanja potvrđuju da pravilnom optimizacijom ključnih komponenti može značajno smanjiti masu bez kompromisa na nosivost, što omogućuje učinkovitije korištenje materijala i bolje performanse proizvoda. Ova optimizacija ne samo da povećava ekonomske prednosti u proizvodnji, već također doprinosi dugoročnoj održivosti i sigurnosti u primjeni kablskih ljestava. Konačno, provedena istraživanja i rezultati imaju važne implikacije za industriju, uključujući potencijal za smanjenje troškova proizvodnje, poboljšanje energetske učinkovitosti te povećanje ukupne sigurnosti i trajnosti proizvoda. Rad također postavlja temelje za buduća istraživanja i razvoj novih tehnologija u području konstrukcije kablskih ljestava, s ciljem daljnjeg unapređenja performansi i održivosti.

6. Literatura

- [1] Eaton - Gittewire
URL:<https://www.eaton.com/us/en-us/products/support-systems/cable-tray-and-ladder-systems.html> (07.07.2024.)
- [2] Zapier blog (Bryce Emley, October 30, 2023)
URL: <https://zapier.com/blog/process-optimization/> (07.07.2024)
- [3] ResearchGate - TYPE OF CABLETRAY (Bartula Santhosh kumar)
URL:https://www.researchgate.net/profile/Battula_Santhosh_kumar/publication/323119757_TYPE_OF_CABLE_TRAY/data/5a8152bcaca272a7376a172f/TYPE-OF-CABLE-TRAY.pdf, (09.07.2024)
- [4] URL:<https://kr.bossgoo.com/product-detail/wire-mesh-basket-cable-tray-56622903.html>
(09.07.2024)
- [5] Medium - main types of cable tray (Cabletraymanufacturer, May 11, 2023)
URL:<https://medium.com/@cabletraymanufacturer1/what-are-the-six-main-types-of-cable-tray-ca681d100a85>, (09.07.2024)
- [6] Medium - main types of cable tray (Advanced Strut, Mar 16, 2023)
URL:<https://medium.com/@advancedstrut/wire-mesh-cable-tray-the-ultimate-solution-for-cable-management-3a8e5c20d306> (10.07.2024)
- [7] HomeProducts WIRE MESH CABLE TRAY
URL:<https://m.etwmy.com/index.php?ws=ourproducts&cat=WIRE-MESH-CABLE-TRAY&cid=357250>, (10.07.2024)
- [8] KP Green Engineering Limited - Types of Cable Trays and Their Benefits (July 19, 2024)
URL:<https://kpgreenengineering.com/3-types-of-cable-trays-and-their-benefits> (11.07.2024)
- [9] Ralbo Cable Tray
URL:https://www.ralbo.in/dt_project/solid-bottom-cable-trays/ (11.07.2024)
- [10] YuanBo Engineering Co., Ltd. - Perforated Cable Tray
URL:<https://www.cabletray.org/cabletray/perforated-cable-tray.html> (12.07.2024)
- [11] Om Engineering Solution - Hot Dipped Galvanized Perforated Cable Tray
URL:<https://www.omengineeringsolution.com/products/cables-containment-system/hot-dipped-galvanized-perforated-cable-tray/> (12.07.2024)
- [12] Shanghai Qinkai Industrial Co., Ltd. - What is cable ladder used for? (Mar-28-2024)
URL:<https://www.qinkai-systems.com/news/what-is-cable-ladder-used-for/> (14.07.2024)

- [13] Gowin Galvanized Coating Cable Tray Ladders
URL:<https://www.indiamart.com/proddetail/cable-tray-ladders-21318155597.html>
(14.07.2024)
- [14] TechLine Mfg. - Cable Tray Supports
URL:<https://www.techlinemfg.com/cable-tray-supports.html> (15.07.2024)
- [15] Standard Vođenje kabela -- Sustavi kabelskih polica i kabelskih ljestava
<https://repositorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+61537%3A2007>, (14.07.2024)
- [16] Cable Tray Design, Considerations Guide (February 2024)
URL:<https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/support-systems/cable-management/b-line-cable-tray-design-considerations.pdf> (15.07.2024)
- [17] Xometry – Steel DC01
URL:<https://xometry.pro/wp-content/uploads/2023/09/Steel-1.0330-DC01-6112.pdf>
(16.07.2024)
- [18] Aisi 340-info.pdf (Atlas Steels Australia)
URL:<https://www.dm-consultancy.com/TR/dosya/1-59/h/aisi-340-info.pdf> (16.07.2024)
- [19] Cosa Steel - DX51D
<https://www.cosasteel.com/dx51d/> (16.07.2024)
- [20] Stainless Steel Ladder Type Cable Tray
URL:<https://www.indiamart.com/proddetail/ladder-type-cable-tray-2850507537348.html>,
(22.07.2024)
- [21] Multi-Scattering software: part I: online accelerated Monte Carlo simulation of light transport through scattering media: JOAKIM JÖNSSON
Division of Combustion Physics, Department of Physics, Lund University, Sweden
- [22] Medium - Shape Reconstruction
<https://towardsdatascience.com/shape-reconstruction-with-onets-1c1afe89c50> (22.7.2024)

Popis slika

Slika 1.1 Kableske police [1].....	2
Slika 1.2 Proces optimizacije [2].....	3
Slika 2.1 Materijali kablskih polica [4]	7
Slika 2.2 Žičane kableske police [7].....	9
Slika 2.3 Kableska polica s punim dnom [9].....	10
Slika 2.4 Kanalna kableska polica [11]	11
Slika 2.5 Kableske ljestve [13]	13
Slika 2.6 Tipovi nosača [15].....	14
Slika 2.7 Optimalno pozicioniranje nosača kableske police [16].....	14
Slika 3.1 Različiti tipovi kablskih ljestava.....	16
Slika 3.2 Dimenzije kablskih ljestava [20]	18
Slika 3.3 Usporedba voksela i mreže [22].....	20
Slika 3.4 Fiksni oslonci.....	21
Slika 3.5 Koncentrirana sila.....	22
Slika 3.6 Veličina mreža i voksela	22
Slika 3.7 Simulacija ljestava prikaz ekvivalentnog Von Misesovog naprežanja u MPa.....	23
Slika 3.8 Simulacija ljestava prikaz progiba u mm	23
Slika 3.9 Dodavanje simetrije.....	14
Slika 3.10 Simulacija polovice ljestava prikaz ekvivalentnog Von Misesovog naprežanja u MPa	24
Slika 3.11 Simulacija polovice ljestava prikaz progiba u mm	24
Slika 3.12 Debljine stjenki kablskih ljestava (a 1.5 mm (b 2 mm (c 2.5 mm.....	28
Slika 3.13 Prikaz mreže prečke	29
Slika 3.14 Fiksni oslonci prečke.....	29
Slika 3.15 Sila na prečki	30
Slike 3.16 Simulacija prečke (a ekvivalentna von Misesova naprežan (b progib	31
Slika 3.17 (a Fiksni oslonac na šini (b pomični oslonac na šini.....	31
Slika 3.18 Sila na šini	32
Slika 3.19 Simulacija šine (a ekvivalentan von Misesova naprežanja (b progib	33
Slika 3.20 Zone naprežanja na šine	34
Slika 3.21 Područje najvećeg naprežanja kod prečke.....	34
Slika 4.1 Ulazni parametri prečke	36
Slika 4.2 Izlazni parametri prečke	36

Slika 4.3 Funkcije cilja i ograničenja prečke.....	37
Slika 4.4 Rasponi ulaznih parametara prečke.....	37
Slika 4.5 Varijacije optimiranja prečke	37
Slika 4.6 Optimizacija – promjena vrijednosti širine prečke.....	38
Slika 4.7 Optimizacija – promjena vrijednosti visine prečke	38
Slika 4.8 Optimizacija – promjena vrijednosti debljine stjenke prečke	38
Slika 4.9 Promjena funkcije cilja (naprezanje unutar zadanih granica)	39
Slika 4.10 Optimizacija – promjena funkcije cilja (smanjenje mase)	39
Slika 4.11 Utjecaji ulaznih parametara optimizacije prečke	40
Slika 4.12 Rješenje optimizacije prečke	40
Slika 4.13 Rezultati optimizacije prečke	41
Slika 4.14 Najbolji kandidati optimizacije prečke.....	42
Slika 4.15 Kandidati optimizacije prečke	42
Slika 4.16 Ulazni i izlazni parametri šine	43
Slika 4.17 Funkcije cilja i ograničenja šine	44
Slika 4.18 Rasponi ulaznih parametara šine	44
Slika 4.19 Varijacije optimiranja šine	44
Slika 4.20 Rezultati prve optimizacije šine	45
Slika 4.21 Utjecaji ulaznih parametara optimizacije šine	45
Slika 4.22 Novi rasponi ulaznih parametara šine	46
Slika 4.23 Optimizacija – promjena vrijednosti širine donjeg dijela šine	46
Slika 4.24 Optimizacija – promjena vrijednosti širine gornjeg dijela šine.....	47
Slika 4.25 Optimizacija – promjena vrijednosti debljine stjenke šine	47
Slika 4.26 Optimizacija – promjena visine šine	47
Slika 4.27 Optimizacija – promjena funkcije cilja (naprezanje unutar zadanih granica).....	48
Slika 4.28 Optimizacija – promjena funkcije cilja (progib)	48
Slika 4.29 Optimizacija – promjena funkcije cilja (naprezanje)	49
Slika 4.30 Rješenja optimizacije šine	49
Slika 4.31 rezultati optimizacije prečke	50
Slika 4.32 Najbolji kandidati optimizacije šine.....	51
Slika 4.33 Ekvivalentna von Misesova naprezanja na optimiranom modelu.....	51
Slika 4.34 Progib na optimiranom modelu	52
Slika 4.35 Zona najvišeg naprezanja na optimiranom modelu.....	52
Slika 4.36 Optimirani model	53

Popis tablica

Tablica 3.1 Svojstva DC01 čelika [17].....	17
Tablica 3.2 Svojstva AISI 304 [18]	17
Tablica 3.3 Svojstva DX51D Z200 čelika [19]	18
Tablica 3.4 Parametri prečke	29
Tablica 3.5 Parametri šine	31
Tablica 3.2 Svojstva AISI 304 [18]	17
Tablica 3.3 Svojstva DX51D Z200 čelika [19]	18
Tablica 3.4 Parametri prečke	30
Tablica 3.5 Parametri šine	33

Popis grafova

Graf 3.1 Usporedba materijala.....	18
Graf 3.2 Usporedbavremena izvršenja simulacije [21]	20
Graf 3.3 Traženje rješenja	24
Graf 3.4 Utjecaj širine kablskih ljestava na nosivost.....	25
Graf 3.4 Utjecaj visine kablskih ljestava na nosivost	27
Graf 3.5 Utjecaj debljine stijenke kablskih ljestava na nosivost	29
Graf 4.1 Razlika početnog i optimiranog modela.....	53