

KONCEPTUALNO I KONSTRUKCIJSKO RJEŠENJE DEKORATIVNE FASADE

Ćalušić, Tomislav

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:432728>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-02**



Repository / Repozitorij:

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Specijalistički diplomski stručni studij Strojarsstvo

TOMISLAV ČALUŠIĆ

ZAVRŠNI RAD

**KONCEPTUALNO I KONSTRUKCIJSKO RJEŠENJE
DEKORATIVNE FASADE**

Split, srpanj 2022.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Specijalistički diplomski stručni studij Strojstvo

Predmet: Lake konstrukcije

Z A V R Š N I R A D

Kandidat: Tomislav Čalušić

Naslov rada: Konceptualno i konstrukcijsko rješenje dekorativne fasade

Mentor: Vladimir Vetma, viši predavač

Komentor:

Split, srpanj 2022.

REPUBLIKA HRVATSKA
SVEUČILIŠTE U SPLITU
Sveučilišni odjel za stručne studije

Studij: Specijalistički diplomski stručni studij Stojarstvo
Predmet: Lake konstrukcije
Nastavnik: Vladimir Vetma, viši predavač

ZADATAK

Kandidat: Tomislav Čalušić

Zadatak: Konceptualno i konstrukcijsko rješenje dekorativne fasade

U radu je potrebno:

- Opisati metodički postupak konstruiranja s aspekta lakih konstrukcija.
- Apstrahirati projektni zadatak; Nosiva konstrukcija i obloga objekta „Elos“ u Solinu.
- Definirati ulazne parametre projektnog zadatka. Izbor materijala nosive konstrukcije voditi po principu lake konstrukcije.
- Primjenom analitičkog hijerarhijskog procesa (AHP) istražiti utjecajne faktore i definirati kriterije za izbor optimalnog koncepta lake konstrukcije s oblogom za projektni zadatak.
- Odrediti značaj pojedinih kriterija (vektor prioriteta) i indeks konzistencije te vrednovati odabrane koncepte izbora konstrukcije i obloge.
- Determinirati opterećenja i izvršiti dimenzioniranje i oblikovanje nosive metalne konstrukcije u svrhu daljnjeg razvoja konceptualnog i konstrukcijskog rješenja fasadne dekorativne obloge.
- Ulazni parametri za proračun moraju biti u skladu s Eurocod-om 1, 3 i 9.

Sažetak

U radu je izvršena preinaka originalnog plana izrade dekorativne fasade objekta Elos koji je predložen od strane investitora. U dva uvodna poglavlja dan je osvrt na metodologiju pri općenitom odabiru kriterija lakih konstrukcija te i na projektni zadatak specifično. Nakon toga je pomoću tehničkog vrednovanja AHP metodom definiran cilj projekta te je napravljena usporedba različitih kriterija lake konstrukcije u općenitom smislu, ali i specifično za projekt. Potom je izvršen proračun za promjenjivo opterećenje potkonstrukcije metodom početnih parametara za oba promatrana slučaja čime je utvrđeno da je originalna izvedba bila predimenzionirana, nakon čega je izvršeno novo dimenzioniranje i odabir nosača. Problem stalnog opterećenja je prethodno riješen konstruktivnom izvedbom. Nakon toga je uslijedilo vrednovanje s aspekta različitih materijala, analiza i tehnologija oblikovanja limene obloge. Konačno je prikazan i realni proces izvedbe konstrukcije te je objašnjena i proračunata ušteda na masi konstrukcije usporedbom dvaju promatranih slučajeva, a samim time i ušteda u financijskom smislu.

Ključne riječi: laka konstrukcija, dekorativna fasada, AHP metoda, metoda početnih parametara, dimenzioniranje, limena obloga, izvedba konstrukcije.

Summary (Conceptual and constructional solution of decorative facade)

This thesis presents modification of the original plan for the decorative facade of the Elos building, which was proposed by the investor. In two introductory chapters, a review of the methodology in the general selection of lightweight construction criteria and the project task in particular is given. After that, the goal of the project was defined using the technical evaluation with the AHP method, and a comparison of different criteria of lightweight construction in general terms, but also specifically for the project, was made. Then, the calculation for the variable load of the substructure was performed by the method of initial parameters for both observed cases, which determined that the original design was oversized, after which a new dimensioning and selection of beams was performed. The problem of constant load was previously solved by constructive design. This was followed by evaluation from the aspect of different materials, analysis and technologies of sheet metal forming. Finally, the real process of execution of the construction is presented, while the conclusion of the thesis shows

explanations and calculation of the savings in regards to the mass of the construction by comparing the two observed cases, and thus the savings in financial terms.

Keywords: lightweight construction, decorative facade, AHP method, initial parameters method, dimensioning, sheet metal cladding, construction execution.

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| Sažetak | i |
| 1. Uvod..... | 1 |
| 1.1. Projektni zadatak | 3 |
| 2. Vrednovanje AHP metodom..... | 6 |
| 2.1. Vrednovanje projektnog zadatka AHP metodom..... | 9 |
| 3. Opterećenje | 13 |
| 3.1. Stalno opterećenje uslijed vlastite težine..... | 13 |
| 3.2. Promjenjivo opterećenje uslijed djelovanja vjetra..... | 14 |
| 4. Izbor materijala | 21 |
| 4.1. Razmatranje svojstava materijala lakih konstrukcija | 21 |
| 4.2. Konstrukcijski čelik S235J0 | 21 |
| 4.3. Aluminijska legura EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5)..... | 23 |
| 4.4. Usporedba materijala S235J0 i EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5)..... | 24 |
| 5. Izbor vertikalnog nosača | 25 |
| 5.1. Metoda početnih parametara | 25 |
| 5.2. Rješavanje vertikalnog nosača metodom početnih parametara..... | 26 |
| 5.3. Dimenzioniranje vertikalnog nosača | 38 |
| 5.4. Odabir vertikalnog nosača | 47 |
| 6. Limena obloga | 51 |
| 6.1. Vrednovanje dekorativne obloge..... | 52 |
| 6.2. Odabir limene obloge | 53 |
| 6.3. Analiza limene obloge | 54 |
| 6.4. Tehnologija oblikovanja limene obloge | 57 |
| 7. Izvedeno stanje..... | 62 |
| 7.1. Proces montaže potkonstrukcije | 62 |

| | |
|-------------------------------------|----|
| 7.2. Konačno izvedeno rješenje..... | 65 |
| 8. Zaključak..... | 68 |
| Literatura..... | 69 |

Popis slika

| | |
|---|----|
| Slika 1.1 - Dijagram toka pri definiranju rješenja lake konstrukcije | 2 |
| Slika 1.2 - Vizualizacija idejnog projekta | 3 |
| Slika 1.3 - Tlocrtni presjek prizemlja objekta | 3 |
| Slika 1.4 - Prikaz rasporeda potkonstrukcije..... | 4 |
| Slika 1.5 - Predviđeno rješenje potkonstrukcije..... | 5 |
| Slika 1.6 - Obloga jednog segmenta potkonstrukcije..... | 5 |
| Slika 2.1 - Vizualizacija koraka pomoću dijagrama toka pri rješavanju problema AHP metodom [3]..... | 6 |
| Slika 2.2 - Dijagram toka s razinama AHP metode | 7 |
| Slika 2.3 - Vizualizacija odnosa važnosti dvaju kriterija AHP metodom [4] | 8 |
| Slika 2.4 - Dijagram toka kriterija i potkriterija projektnog zadatka | 11 |
| Slika 3.1 - Shematski prikaz djelovanja opterećenja vlastite težine | 13 |
| Slika 3.2 - Grafički prikaz djelovanja vjetra [8]..... | 14 |
| Slika 3.3 - Mapa osnovne brzine vjetra u Republici Hrvatskoj [9]..... | 14 |
| Slika 3.4 - Dijagram temperatura - gustoća zraka [10] | 15 |
| Slika 3.5 - Koeficijenti izloženosti $c_{e(z)}$ kao funkcija visine iznad tla z kategorije terena (za ravan teren!) [11] | 16 |
| Slika 3.6 - Proračunska površina za tlak koji vertikalni nosač preuzima..... | 18 |
| Slika 3.7 - Vertikalni nosač promatran kao greda s tri oslonca..... | 18 |
| Slika 3.8 - a) proračunska površina za tlak koji vertikalni nosač preuzima..... | 19 |
| Slika 4.1 - Kemijski sastav EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5) označen crvenom bojom [16].. | 23 |
| Slika 5.1 - Nosač s vanjskim opterećenjem..... | 25 |
| Slika 5.2 - Nosač oslobođen od veza..... | 25 |
| Slika 5.3 - Linear Equation Solver funkcija u programskom softveru MD Solids za 1. slučaj | 31 |
| Slika 5.4 - Dijagram unutarnjih sila za 1. slučaj iscertan pomoću softvera Excel..... | 32 |
| Slika 5.5 - Dijagram momenta savijanja za 1. slučaj iscertan pomoću softvera Excel..... | 32 |
| Slika 5.6 - Dijagram poprečne sile za 1. slučaj iscertan pomoću softvera MDSolids | 33 |
| Slika 5.7 - Dijagram momenta savijanja za 1. slučaj iscertan pomoću softvera MDSolids | 33 |
| Slika 5.8 - Reakcije u osloncima te maksimalne i minimalne vrijednosti poprečnih sila i momenata savijanja za 1. slučaj dobivenih u softveru MDSolids | 34 |
| Slika 5.9 - Linear Equation Solver funkcija u programskom softveru MD Solids za 2. slučaj | 35 |
| Slika 5.10 - Dijagram poprečnih sila za 2. slučaj iscertan pomoću softvera Excel | 36 |

| | |
|--|----|
| Slika 5.11 - Dijagram momenta savijanja za 2. slučaj iscrtan pomoću softvera Excel..... | 36 |
| Slika 5.12 - Progib vertikalnog nosača iz S235J0 dimenzija 100x60x3 prema funkciji Frame Analysis..... | 45 |
| Slika 5.13 - Dijagram progiba iscrtan pomoću softvera Excel | 45 |
| Slika 5.14 - Prikaz 3D modela čelične potkonstrukcije za prihvat fasade | 47 |
| Slika 5.15 - Presjek spoja potkonstrukcije | 48 |
| Slika 5.16 - Nacrt gornjeg oslonca | 49 |
| Slika 5.17 - Nacrt srednjeg oslonca..... | 49 |
| Slika 5.18 - Nacrt donjeg oslonca | 50 |
| Slika 6.1 - Dizajn i dimenzije elementa limene obloge..... | 53 |
| Slika 6.2 - Statička analiza u Autodesk Inventoru | 54 |
| Slika 6.3 - Aluminijska obloga u Autodesk Inventoru s osloncima (Fixed Constraint) | 54 |
| Slika 6.4 - Aluminijska obloga u Autodesk Inventoru sa zadanim opterećenjem | 55 |
| Slika 6.5 - Naprezanje aluminijske obloga u Autodesk Inventoru..... | 55 |
| Slika 6.6 - Progib aluminijske obloge u „x“ osi u Autodesk Inventoru | 56 |
| Slika 6.7 - Progib aluminijske obloge u „y“ osi u Autodesk Inventoru | 56 |
| Slika 6.8 - Progib aluminijske obloge u „z“ osi u Autodesk Inventoru | 57 |
| Slika 6.9 - 1. korak – nabava limova prikazanih dimenzija | 57 |
| Slika 6.10 - 2. korak – rezanje limova..... | 58 |
| Slika 6.11 - 3. korak – prikaz limova za obradu štancanjem | 58 |
| Slika 6.12 - Detalj ruba lima | 59 |
| Slika 6.13 - 4. korak - savijanje limova #1 | 59 |
| Slika 6.14 - 4. korak - savijanje limova #2..... | 60 |
| Slika 6.15 - 4. korak - savijanje limova #3..... | 60 |
| Slika 7.1 - Fasada objekta prije montaže potkonstrukcije..... | 62 |
| Slika 7.2 - Vertikalni nosač postavljen na temeljnom nosaču..... | 63 |
| Slika 7.3 - Montirani vertikalni nosači | 63 |
| Slika 7.4 - Spoj vertikalnog i horizontalnog nosača..... | 64 |
| Slika 7.5 - Spoj lima i potkonstrukcije | 64 |
| Slika 7.6 - Pogled na objekt s aluminijskom oblogom..... | 65 |
| Slika 7.7 - Pogled na oblogu iz prostorije objekta | 66 |
| Slika 7.8 - Pogled na objekt sa osvjetljenom potkonstrukcijom noću #1 | 67 |
| Slika 7.9 - Pogled na objekt sa osvjetljenom potkonstrukcijom noću #2 | 67 |

Popis tablica

| | |
|---|----|
| Tablica 2.1 - AHP ljestvica ocjenjivanja određivanja važnosti [3]..... | 7 |
| Tablica 2.2 - Tablični prikaz usporedbe kriterija [6] | 9 |
| Tablica 2.3 - Tehničko vrednovanje kriterija projektnog zadatka | 10 |
| Tablica 3.1 - Kategorije i opis terena na kojima je moguće građenje [11] | 16 |
| Tablica 4.1 - Kemijski sastav konstrukcijskog čelika S235 [13] | 22 |
| Tablica 4.2 - Mehanička svojstva konstrukcijskog čelika S235 [13]..... | 22 |
| Tablica 4.3 - Usporedba materijala S235J0 i EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5)..... | 24 |
| Tablica 5.1 - Proračunata vrijednost momenta otpora za 1. slučaj i materijal S235J0 | 40 |
| Tablica 5.2 - Proračunata vrijednost momenta otpora za 1. slučaj i materijal EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5)..... | 41 |
| Tablica 5.3 - Proračunata vrijednost momenta otpora za 2. slučaj i materijal S235J0 | 41 |
| Tablica 5.4 - Proračunata vrijednost momenta otpora za 2. slučaj i materijal EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5)..... | 41 |
| Tablica 5.5 - Odabrani profili za oba slučaja za materijale S235J0 i EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5) te pripadajuće vrijednosti..... | 42 |
| Tablica 5.6 - Geometrijske karakteristike glavnih nosača CFRHS 100x60x3..... | 44 |
| Tablica 5.7 - Geometrijske karakteristike sekundarnih nosača 50x50x3 | 46 |
| Tablica 5.8 - Izračun uštede mase potkonstrukcije prije i nakon razrade | 50 |
| Tablica 6.1 - Vrednovanje materijala dekorativne obloge | 52 |

1. Uvod

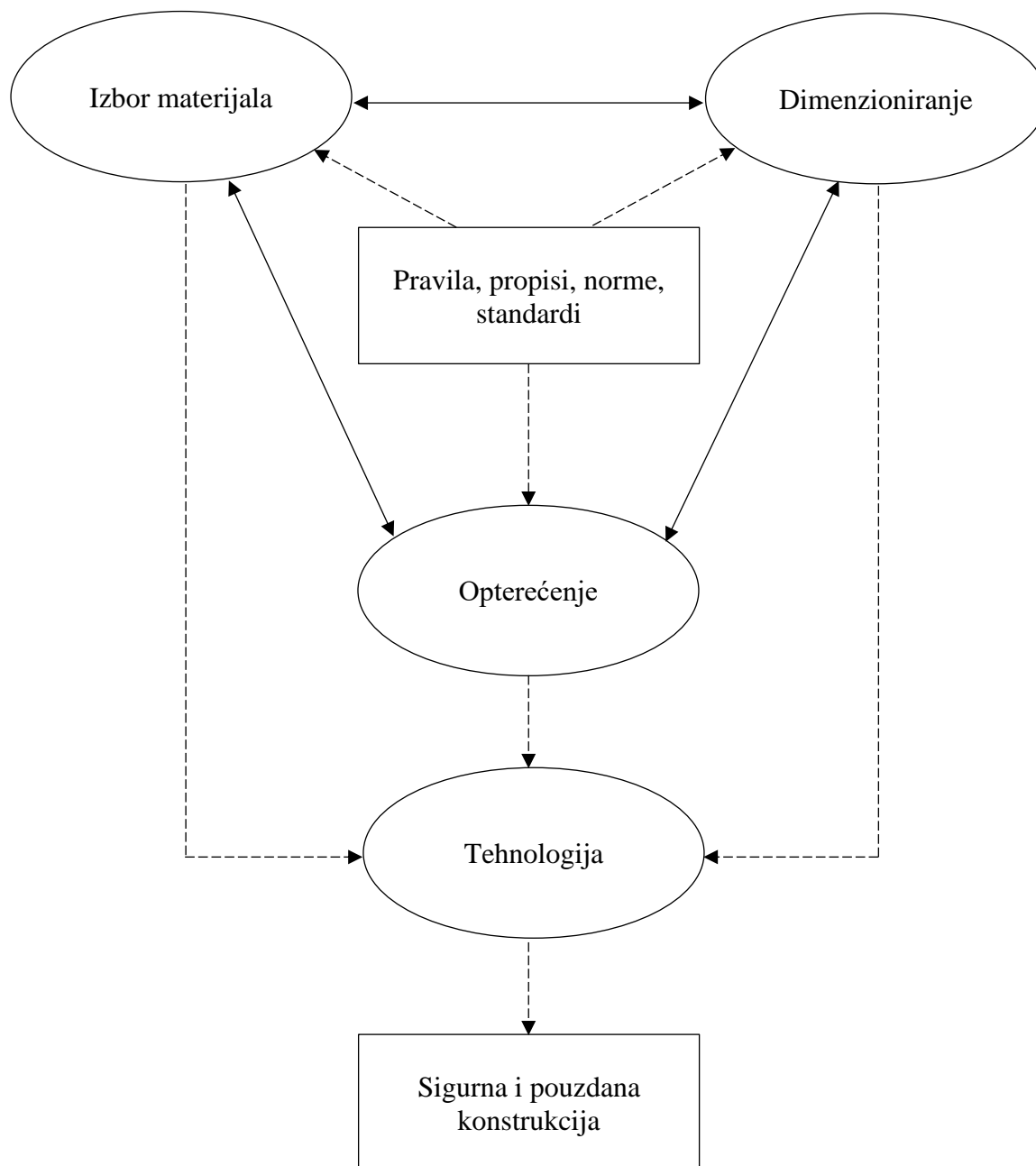
Kad se govori o lakim konstrukcijama, s tehničke strane najvažnije je razmotriti 3 kriterija: nosivost, krutost i ograničenje mase. Ništa manju važnost nema, u ovom kontekstu i povezana s prethodnim kriterijima, ekonomičnost same konstrukcije u vidu troškova materijala, proizvodnih postupaka, montaže i sl.. Međutim, ograničenje mase u odnosu na tipične konstrukcije uzima glavni primat. Smanjenje mase poštivanjem nosivosti i krutosti konstrukcije može se postići primjenom lakših materijala. Npr. konstrukcija od čelika jednakih dimenzija će biti otprilike dva do tri puta teža od aluminijske konstrukcije, pa će stoga aluminij imati prednost pri izradi lakih konstrukcija. Primjena lakših materijala podrazumijeva određeno optimiziranje oblika a da se pritom zadovolji uvjete dizajna, nosivosti i krutosti. Dizajn i estetika kao takvi ponajviše ovise o funkciji konstrukcije. Ukoliko konstrukcija služi samo kao nosivi objekt, estetika nije od izričite važnosti. Neki osnovni ciljevi pri projektiranju lakih konstrukcija su [1]:

- Izraditi konstrukciju koja je sposobna izdržati sva primijenjena opterećenja bez pojave zamora ili loma za vijeka konstrukcije
- Pravilno i ekonomski dimenzionirati konstrukcijske elemente
- Ispitati nosivost, stabilnost i krutost konstrukcije
- Osigurati sigurnost konstrukcije

Proces projektiranja konstrukcije u nekom osnovnom obliku te ovisno o projektu uključuje sljedeće faze:

1. Plan konstrukcije
2. Utvrđivanje opterećenja koje djeluju na konstrukciju i proračun opterećenja
3. Dimenzioniranje elemenata konstrukcije
4. Utvrđivanje tehnologije izvedbe
5. Izrada crteža, razrada detalja i priprema rasporeda

Uspješna realizacija projekta lake konstrukcije podrazumijeva praćenje postupka konstruiranja i međusobno povezanih kriterija koji uvelike utječu na konačnu efikasnost konstrukcije. Kao što je vidljivo na dijagramu toka na slici 1.1, pri definiranju rješenja lake konstrukcije nemoguće je izbjeći isprepletenost svih faktora koji u konačnici određuju sigurnu i pouzdanu konstrukciju.



Slika 1.1 - Dijagram toka pri definiranju rješenja lake konstrukcije

Opterećenje koje se javlja na lakoj konstrukciji utječe i na sam izbor materijala koji je zbog svojstava nosivosti i krutosti u direktnoj korelaciji s konačnim odabirom dimenzija elemenata konstrukcije. Izbor materijala i dimenzije elemenata konstrukcije ovise i o dostupnoj tehnologiji obrade i proizvodnih postupaka. Dakako, definiranje svakog od navedenih faktora je potrebno uraditi prema pravilima, propisima, normama i standardima.

1.1. Projektni zadatak

Od investitora je dobiven projektni zadatak izrade nosača i obloge vanjske ovojnice građevinskog objekta Elos u Solinu, čija je vizualizacija u konačnom obliku prikazana na slikama 1.2 i 1.3. Građevina je tlocrtnih dimenzija 16 x 41 m (visine 7 m), a bruto površina prizemlja predmetne građevine iznosi 650,31 m².

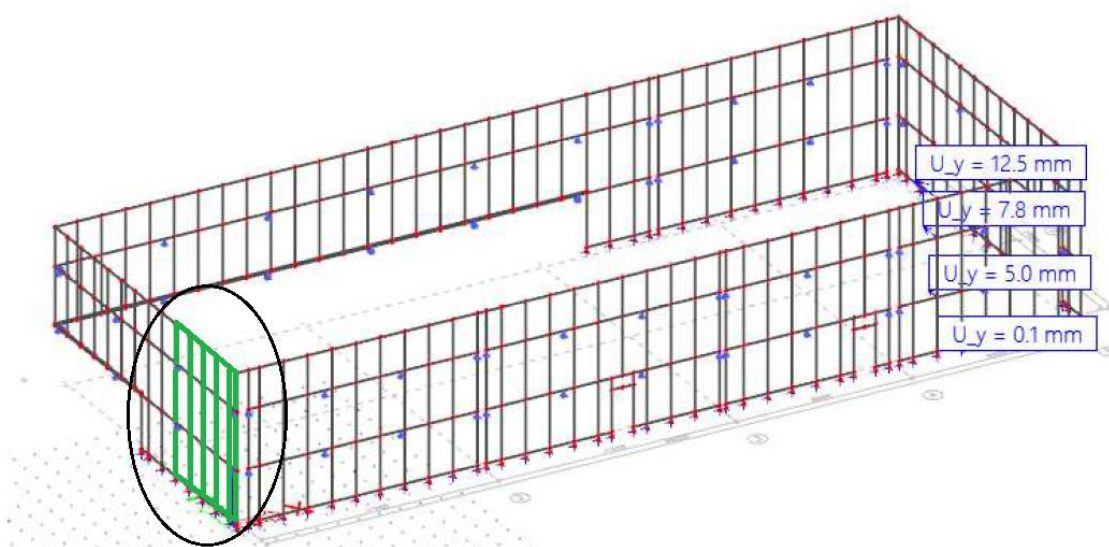


Slika 1.2 - Vizualizacija idejnog projekta



Slika 1.3 - Tlocrtni presjek prizemlja objekta

Investitor je sam dao vlastiti koncept i rješenje. Ideja investitora je bila izvesti potkonstrukciju iz čeličnih cijevi pravokutnog presjeka 100x120x4 mm te je pričvrstiti na postojeću AB konstrukciju. Na sklop vertikalnih i horizontalnih cijevi potrebno je postaviti perforiranu oblogu. Glavni fokus investitora je bio na dizajnu perforirane obloge, odnosno na izvedbi konstrukcije kojom će se ispuniti kriterij funkcionalnog dizajna. Plan je postaviti svjetleće žarulje iza obloge. Zbog perforacija na oblogama, svjetlost koju proizvode žarulje će obasjavati limene obloge i objekt i time će se postići željeni estetski efekt. Nadalje, potrebno je zadovoljiti izvedbu konstrukcije s pozicije funkcionalnosti i tehnoložnosti dok konstrukcija pritom mora zadržati izvorni dizajn, što je i najveći izazov. Na sastancima koji su slijedili, poštivajući izvorno projektiranu vizuru objekta, što je prioritet, nosiva konstrukcija prema preporukama i prijedlogu izvođača doživjela je određene izmjene. Najvažnija promjena je izvedba nosivog dijela konstrukcije o čemu će biti i poseban naglasak u ovom radu. Obzirom na navedenu problematiku, u nastavku će biti napravljena usporedba prvotne ideje investitora i konačnog rješenja sa stajališta nosivosti, krutosti, mase i tehnološke izvedbe (izrade, transporta, montaže segmenata itd.). Upravo će postupak preinake originalnog projektnog zadatka biti fokus ovog rada, ponajviše u vidu proračuna i dimenzioniranja strukturnih elemenata.



Slika 1.4 - Prikaz rasporeda potkonstrukcije

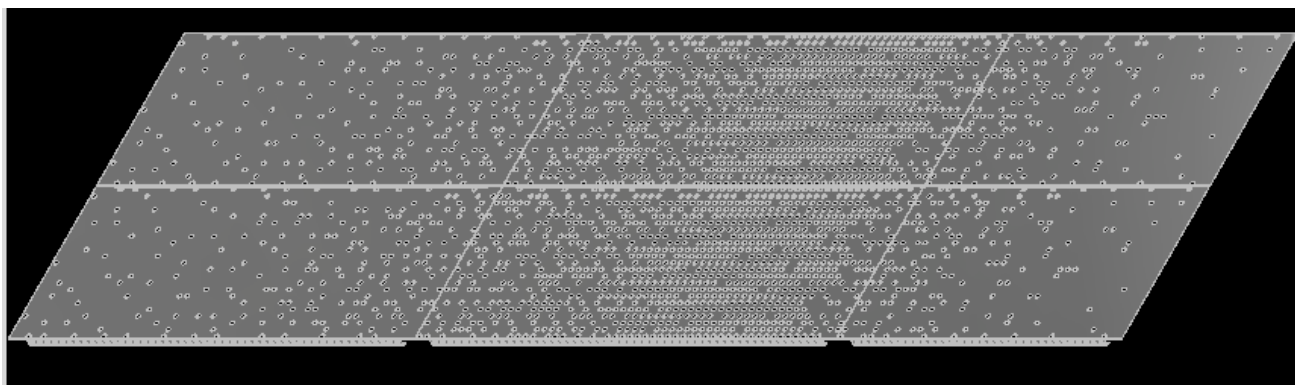
Prvotno projektno rješenje dobiveno od investitora je bilo predimenzionirano zbog čega je masa konstrukcije bila veća nego je potrebno kao i sam trošak nabave materijala. Osim toga, masivnost predviđenih strukturnih elemenata bi značajno utjecala na kompleksnost izvedbe i montaže. Na slici 1.4 shematski i na slici 1.5 u 3D modelu je prikazan jedan takav segment (elementi obojani zelenom bojom i zaokruženi) kojeg je bilo potrebno montirati na fasadu. Segment je sačinjen od vertikalno i horizontalno postavljenih pravokutnih čeličnih cijevi

dimenzija 100x120x4. Proračunata vrijednost mase ovog sklopa je otprilike 420 kg. Potpuno je jasno da bi takav postupak zahtijevao korištenje kрана jer bi u suprotnom bilo nemoguće obaviti montažu. Osim toga, ovakvim dizajnom bilo bi komplicirano postići pročeljnu ravnost konstrukcije pri montaži po duljini fasade. Naime, oslonci se moraju precizno pozicionirati i njihova izvedba dopušta minimalna odstupanja konstrukcije po sve tri osi. Iz tog razloga konstrukcijsko rješenje koje je predlagao investitor nije bilo praktično i time je neprihvatljivo.



Slika 1.5 - Predviđeno rješenje potkonstrukcije

Limena dekorativna obloga po ideji investitora izradila bi se od aluminijske legure. Definirani uzorak perforacija na oblogi se dogovorno mijenjao zbog prilagođavanja estetskom dojmu svijetla iza obloge, koje osvjetljava cijeli objekt. Slika 1.6 prikazuje jedan segment obloge s tri različita elementa po visini jednog nosača s pripadajućim zrcalnim verzijama. U sljedećim poglavljima će metodički biti razrađena optimizacija predložene konstrukcije od strane investitora.



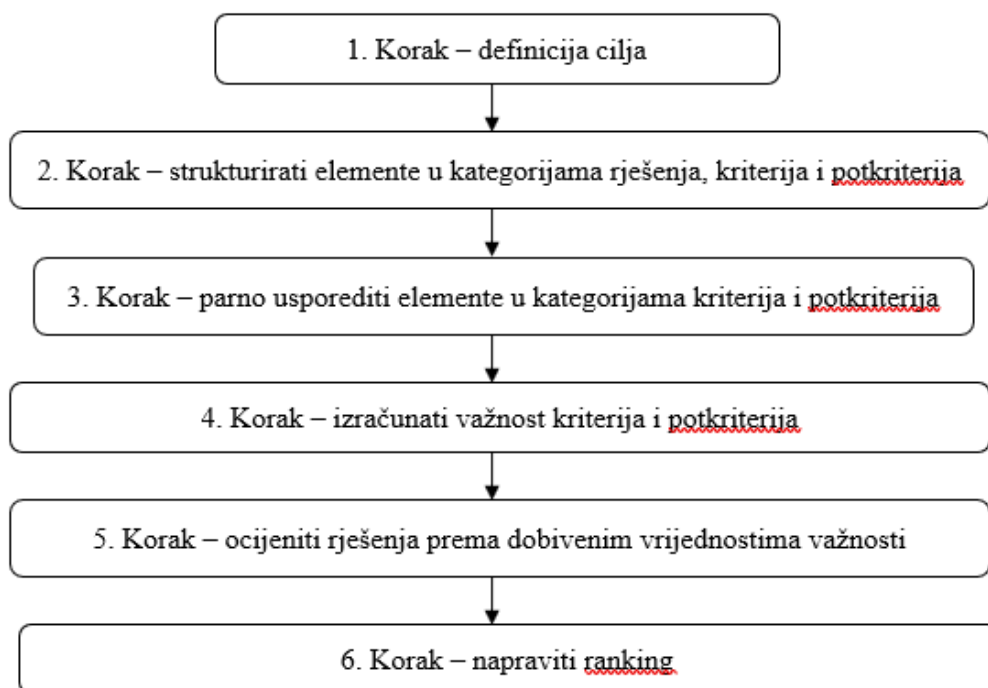
Slika 1.6 - Obloga jednog segmenta potkonstrukcije

2. Vrednovanje AHP metodom

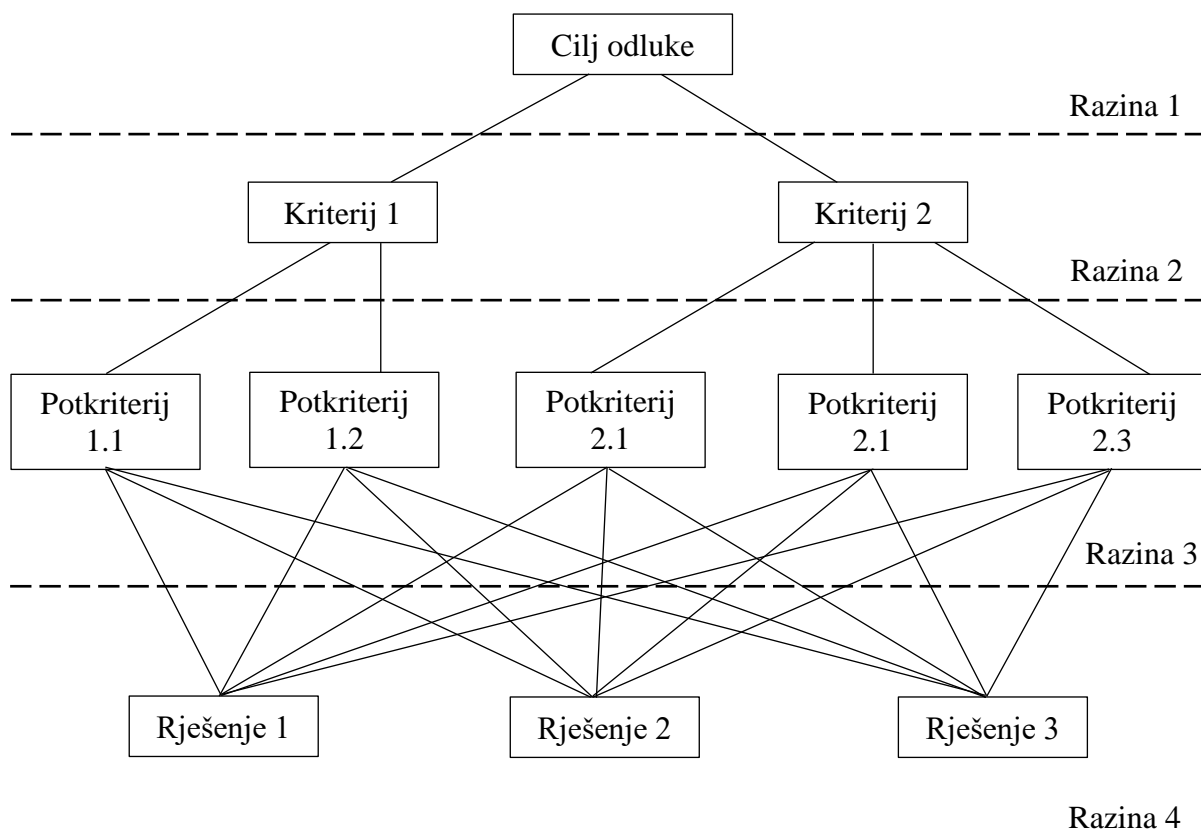
Proces analitičke hijerarhije (AHP) je metoda za organizaciju i analizu složenih odluka, koristeći matematiku i psihologiju. Razvio ju je Thomas L. Saaty 1970-ih i od tada se usavršava [2]. Sastoji se od četiri razine:

- konačnog cilja ili problema koji se pokušava riješiti (npr. kupnja automobila)
- svih mogućih rješenja, koja se nazivaju i alternative (npr. modeli različite snage, potrošnje, boje, udobnosti itd.)
- kriterija po kojima se ocjenjuju potencijalna rješenja (kriteriji navedeni u rješenjima: snaga, potrošnja, boja, udobnost itd.).
- potkriterija odnosno atributa određenog kriterija (boja – crvena, plava, zelena itd.)

AHP pruža okvir za donošenje odluke kvantificirajući kriterije i potencijalna rješenja povezujući ih s konačnim ciljem. Kriteriji se kvantificiraju brojčanom ocjenom ili faktorom koji pomaže ukazati koliko kvalitetno mogu ispuniti cilj. Koliko određeni kriterij ispunjava cilj može biti stvarna, fizička mjera ali i subjektivni doživljaj. U završnom koraku procesa numerički se izračunava „težina“ svakog od mogućih rješenja usporedbom vrijednosti kriterija.



Slika 2.1 - Vizualizacija koraka pomoću dijagrama toka pri rješavanju problema AHP metodom [3]



Slika 2.2 - Dijagram toka s razinama AHP metode

Slika 2.1 prikazuje korake koji se koriste u AHP metodi – od definiranja cilja do konačnog rangiranja rješenja. Slika 2.2 prikazuje primjer dijagrama toka s prethodno opisanim razinama pri korištenju metode. Pri uspoređivanju vrijednosti određenih kriterija koristi se ljestvica vrijednosti kako je prikazano u tablici 2.1.

Tablica 2.1 - AHP ljestvica ocjenjivanja određivanja važnosti [3]

| Intenzitet važnosti | Definicija | Objašnjenje |
|---------------------|------------------|--|
| 1 | Jednako važno | Dva kriterija imaju jednaku važnost |
| 3 | Umjereno važnije | Iskustvo i prosudba blago preferiraju jedan kriterij |
| 5 | Bitno važnije | Iskustvo i prosudba jasno preferiraju jedan kriterij |
| 7 | Znatno važnije | Jedan kriterij se snažno preferira u odnosu na drugi što dokazuje i praksa |
| 9 | Krajnje važnije | Dokaz superiornosti jednog kriterija je najvećeg mogućeg praktičnog značenja |

Slika 2.3 prikazuje primjer vizualizacije primjene AHP ljestvice ocjenjivanja pri usporedbi dvaju praktičnih kriterija – boje i udobnosti automobila pri cilju kupnje automobila. Na ljestvici su prikazani odnosi važnosti dvaju kriterija s pripadajućim numeričkim vrijednostima. Sredina ljestvice s brojem „1“ označava jednaku važnost ispunjavanja i jednog i drugog kriterija, dok se pomicanjem lijevo ili desno na ljestvici približava preferenciji većeg intenziteta određenog kriterija kako je prikazano.



Slika 2.3 - Vizualizacija odnosa važnosti dvaju kriterija AHP metodom [4]

Usporedba parova postiže se korištenjem kvadratne matrice. Redci i stupci predstavljaju različite kriterije koji se uspoređuju, a vrijednosti svake ćelije predstavljaju omjer dviju stavki koje se uspoređuju. Vrijednosti ispod dijagonale su recipročne vrijednosti određenog omjera. Stoga je rezultirajuća matrica pozitivna, recipročna matrica „A“ koju predstavlja izraz 2.1 [5]:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \\ \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & 1 & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \frac{w_1}{w_1} & \dots & \dots & \frac{w_n}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & 1 \\ \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{pmatrix} \quad 2.1$$

$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$ u matrici „A“ predstavlja važnost jednog kriterija u odnosu na drugi. Iz matrice je vidljivo da su svi dijagonalni elementi jednaki 1, odnosno predstavljaju usporedbu određenog kriterija sa samim sobom. Matrica s omjerima kriterija se najčešće prikazuje i tablično (tablica 2.2).

Tablica 2.2 - Tablični prikaz usporedbe kriterija [6]

| K | A_1 | A_2 | \dots | A_n |
|----------|------------|------------|----------|----------|
| A_1 | 1 | a_{12} | \dots | a_{1n} |
| A_2 | $1/a_{12}$ | 1 | \dots | a_{2n} |
| \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots |
| A_n | $1/a_{1n}$ | $1/a_{2n}$ | \dots | 1 |

2.1. Vrednovanje projektnog zadatka AHP metodom

Pri razmatranju tehničkih rješenja lake konstrukcije, vrednovanje se vrši na temelju sljedećih kriterija:

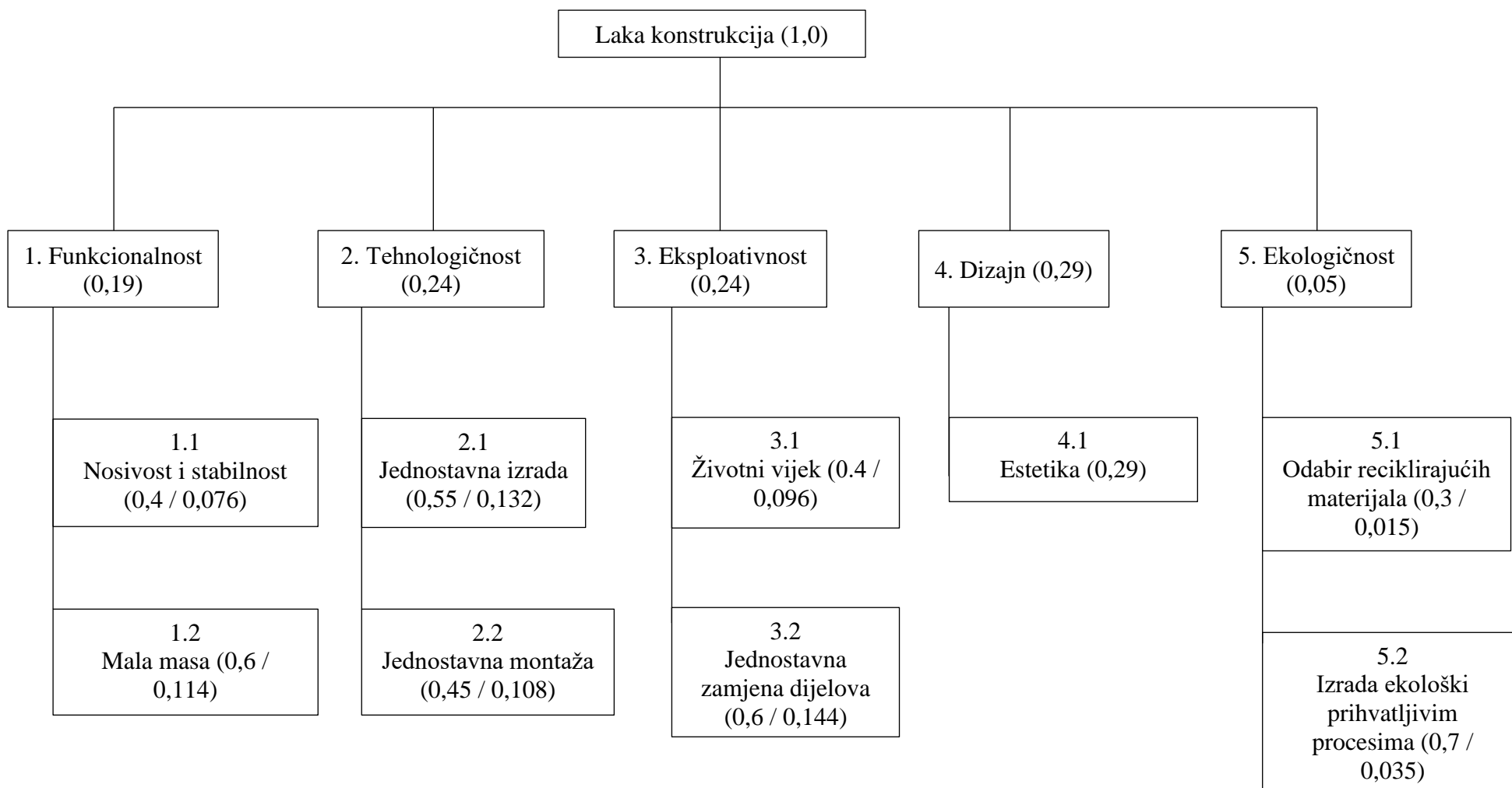
- Funkcionalnost (F) – konstrukcija mora zadovoljiti tehničke uvjete poput nosivosti, stabilnosti i relativno male mase s obzirom na opterećenje, izbor materijala i geometriju prema pravilima, propisima, normama i standardima. Proračun, softverske simulacije i iskustvena saznanja omogućavaju zadovoljavanje teoretske funkcionalnosti konstrukcije.
- Eksploativnost (E_1) – praktična izvedba konstrukcije mora pratiti funkcionalnost – konstrukcija u stvarnosti mora ispunjavati svoju funkciju kroz vlastiti životni vijek.
- Tehnologičnost (T) – potrebno je obratiti pozornost na dostupne tehnološke procese za razmatrane materijale i geometriju (rezanje, zavarivanje, sklapanje, prijenos segmenata, montažu itd.). Ispunjavanje kriterija tehnologičnosti može posljedično povećati nosivost same konstrukcije i ukupne troškove, ali i olakšati montažu on-site.
- Dizajn (D) – spada u domenu zahtjeva investitora koje je potrebno zadovoljiti. Dizajn ima tehničku komponentu, međutim potrebno je osim tehničke iskoristivosti konstrukcije zadovoljiti i estetsku.
- Ekologičnost (E_2) – ekološki kriterij može se zadovoljiti odabirom materijala, tehnoloških procesa, povoljne lokacije ili općenito tehničkih rješenja koji će u obzir uzeti higijenu, čistoću, zbrinjavanje otpadnih materijala, uklanjanje smeća, uštedu energije itd. [7].

Odnos ovih kriterija za laku konstrukciju prikazan je u tablici 2.3. Važno je naglasiti da je pri odabiru rješenja lake konstrukcije važno razmotriti i zahtjeve arhitekta ili investitora.

Tablica 2.3 - Tehničko vrednovanje kriterija projektnog zadatka

| | F | T | E1 | D | E2 | π | $\sqrt[n]{\pi}$ | $\frac{\sqrt[n]{\pi}}{\sum \sqrt[n]{\pi}}$ |
|----|-----|-----|-----|-----|----|--------|-----------------|--|
| F | 1 | 1/3 | 1 | 1 | 5 | 1,650 | 1,105 | 0,19 |
| T | 3 | 1 | 1/3 | 1 | 5 | 5,050 | 1,382 | 0,24 |
| E1 | 1 | 3 | 1 | 1/3 | 5 | 5,000 | 1,380 | 0,24 |
| D | 1 | 1 | 3 | 1 | 5 | 15,000 | 1,719 | 0,29 |
| E2 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1 | 0,002 | 0,276 | 0,05 |
| | | | | | | | 5,862268 | 1,000 |

U tablici 2.3 stupci i redci „F“, „T“, „E1“, „D“, i „E2“ označavaju već navedene kriterije lake konstrukcije te njihove međusobne odnose. Stupac „ π “ označava umnožak retka svakog pojedinog kriterija. Stupac „ $\sqrt[n]{\pi}$ “ označava n-ti korijen navedenog umnoška, dok „n“ pritom poprima vrijednost ukupnog broja kriterija. Zadnji stupac „ $\frac{\sqrt[n]{\pi}}{\sum \sqrt[n]{\pi}}$ “ označava svaku pojedinačnu vrijednost prethodnog stupca podijeljenu s njegovom ukupnom sumom. Kao što je vidljivo, ukupni zbroj vrijednosti zadnjeg stupca mora biti jednak 1. Vrijednosti zadnjeg stupca označavaju važnost ili težinu određenog kriterija. Tako je za slučaj ove specifične lake konstrukcije najveća važnost kriterija dizajna, dok su malo iza po važnosti kriteriji tehnološkičnosti i eksploativnosti. Kriterij ekološkičnosti strogo sa stajališta zadovoljavanja kriterija lake konstrukcije je od relativno manje vrijednosti. Razlog zbog kojeg je dizajn najvažniji kriterij je upravo zbog toga što je glavni aspekt konstrukcije vizualna estetika. Pri samom konstruiranju u stvarnosti, dizajn je bio polazna točka prema kojoj su se svi ostali kriteriji prilagodili.



Slika 2.4 - Dijagram toka kriterija i potkriterija projektnog zadatka

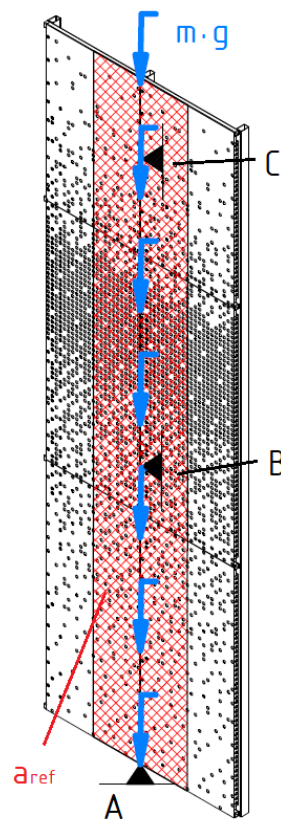
Kod gotovo svakog projekta, važno je razmotriti i ekonomski aspekt konstrukcije – pravilno dimenzioniranje, izbor materijala te tehnologije izrade, obrade i montaže uvelike utječu na konačne troškove, dok istovremeno njihov odabir mora zadovoljiti nosivost konstrukcije, pritom sljedeći standarde, pravila i norme.

Tehničkim vrednovanjem pomaže se kvantitativno utvrditi koliko specifični kriterij određenog tehničkog rješenja ispunjava zahtjeve proizvoda. Usporedbom važnosti odabranih kriterija konstrukcije može se doći do relativno realnog odnosa pojedinih kriterija što uvelike pomaže pri daljnjoj razradi problema. Važno je naglasiti da je ovakva usporedba samo alat pri sagledavanju važnosti različitih tehničkih kriterija pošto je neke kriterije teško objektivno mjeriti.

3. Opterećenje

3.1. Stalno opterećenje uslijed vlastite težine

Stalno opterećenje uključuje opterećenja koja su relativno konstantna tijekom vremena, a ponajviše se odnosi na težinu same konstrukcije. Također, može uključivati i stalne dijelove nekog šireg dijela konstrukcije, a koji nisu dio promatrane nosive konstrukcije, ali svojom težinom djeluju kao stalno opterećenje na nju (poput krova, cjevovoda, različite opreme itd.).

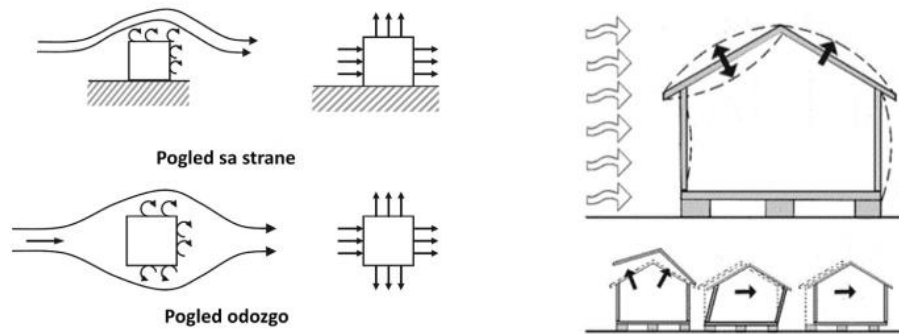


Slika 3.1 - Shematski prikaz djelovanja opterećenja vlastite težine

Na slici 3.1 je shematski prikaz segmenta konstrukcije opterećenog vlastitom težinom označenom plavim strelicama, dok crveno šrafirano područje označava referentnu površinu obloge koju preuzima jedan nosač. Slovom A, B i C su označeni oslonci na nosaču. S obzirom da na nosač ne djeluju nikakva vanjska aksijalna opterećenja, izvijanje konstrukcije se može pojaviti jedino uslijed djelovanja vlastite težine. Problem izvijanja je riješen konstruktivnom izvedbom – osim tri oslonca, vertikalni nosači su međusobno vezani i horizontalnim nosačima koji dodatno pojačavaju poprečni presjek po dužini vertikalnog nosača.

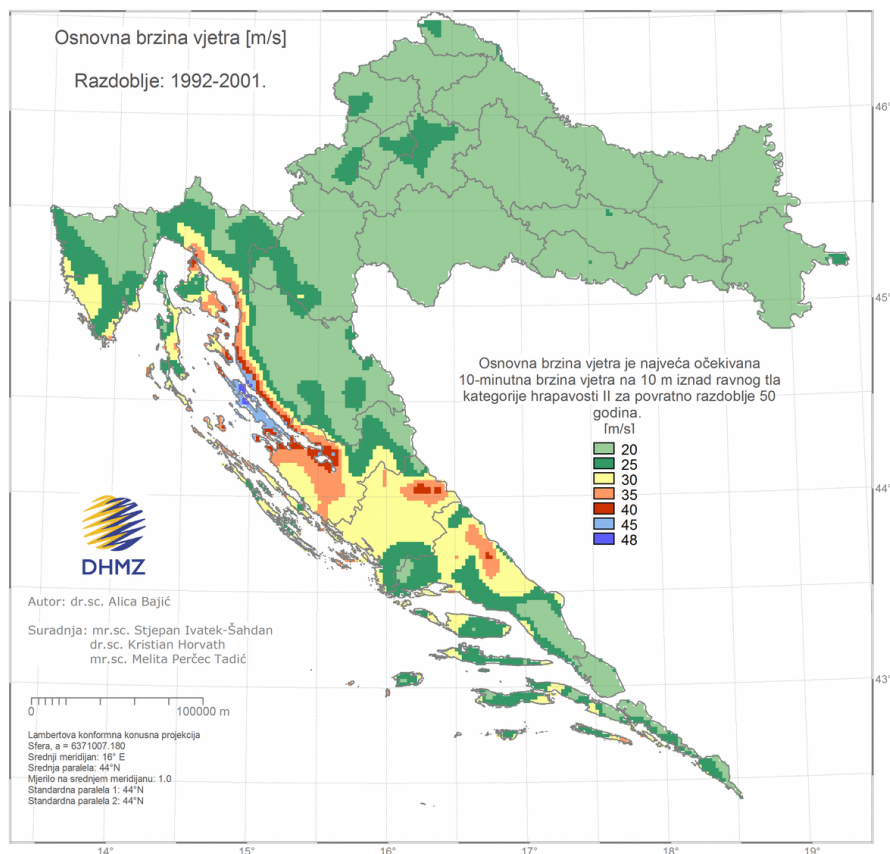
3.2. Promjenjivo opterećenje uslijed djelovanja vjetra

Djelovanje vjetra na građevinu ovisi o brzini vjetra i obliku samih građevina. Očituje se promjenom tlaka u odnosu na normalni atmosferski tlak. Zbog djelovanja vjetrom na izloženoj strani javlja se tlak, a na suprotnoj strani i bočnim stranama javlja se podtlak kako je prikazano na slici 3.2.



Slika 3.2 - Grafički prikaz djelovanja vjetra [8]

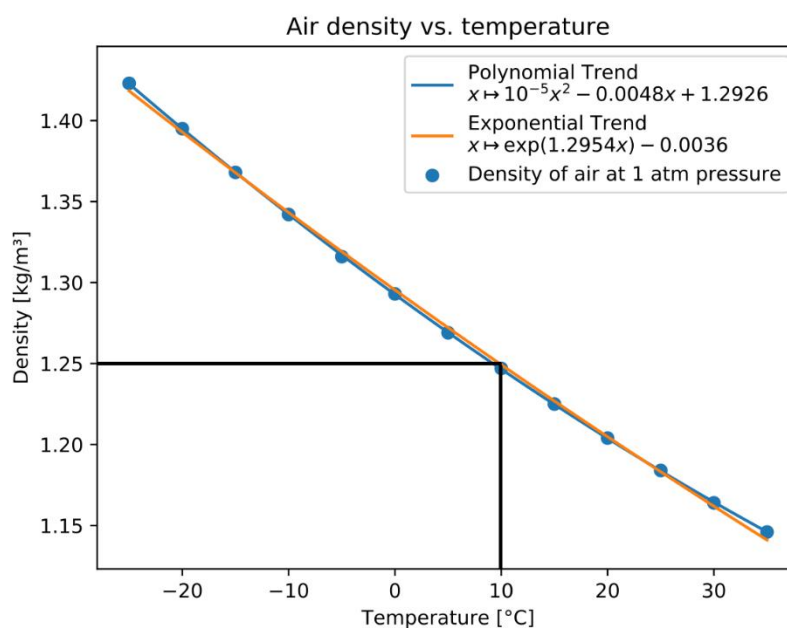
Prema podacima DHMZ-a (slika 3.3), vrijednost osnovne brzine vjetra za lokaciju Split iznosi $v_{ref} = 30$ m/s. Uzet je i faktor sigurnosti pa je brzina vjetra uzeta za proračun $v_{ref} = 35$ m/s.



Slika 3.3 - Mapa osnovne brzine vjetra u Republici Hrvatskoj [9]

Osnovna brzina vjetra definirana je kao maksimalna 10-minutna brzina vjetra na 10 m iznad ravnog tla kategorije hrapavosti II za koju se može očekivati da bude premašena jednom u 50 godina [9].

Prema osnovnoj brzini vjetra, potrebno je izračunati osnovni tlak vjetra. Za to je potrebna vrijednost gustoće zraka pri određenim atmosferskim uvjetima. U ovom slučaju gustoća zraka se proračunava za atmosferski tlak od 1 bar na temperaturi od 10 °C.



Slika 3.4 - Dijagram temperatura - gustoća zraka [10]

Prema dijagramu temperatura – gustoća zraka na slici 3.4 dobivena vrijednost gustoće zraka iznosi:

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

Osnovni tlak vjetra dobije se prema izrazu:

$$q_{ref} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{ref}^2 \quad 3.1$$

$$q_{ref} = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 35^2$$

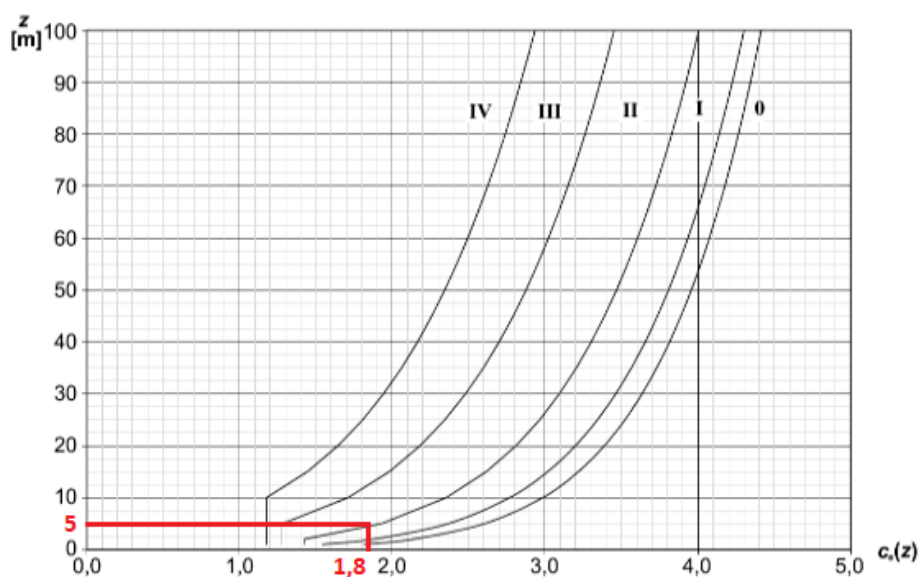
$$q_{ref} = 765,63 \text{ Pa}$$

Nadalje, potrebno je proračunati vršni tlak vjetra $q_{p(z)}$ na zadanoj visini konstrukcije za što je, uz osnovni tlak vjetra, potreban i koeficijent izloženosti konstrukcije na zadanoj visini $c_{e(z)}$. Tablica 3.1 omogućuje odabir kategorije hrapavosti terena, nakon čega je moguće odrediti koeficijent $c_{e(z)}$.

Tablica 3.1 - Kategorije i opis terena na kojima je moguće građenje [11]

| Kategorija terena | Karakteristika terena |
|-------------------|--|
| 0 | More i obalno područje prema otvorenome moru |
| I | Jezera ili područja sa zanemarivom vegetacijom, bez zapreka |
| II | Slaba vegetacija (npr. trava) i izolirane zapreke (npr. drveća i zgrade) s razmakom koji odgovara najmanje 20 visina zapreke |
| III | Normalna vegetacija i izolirane zapreke s razmakom koji odgovara najviše 20 visina zapreke (npr. sela, predgrađa, trajna šuma) |
| IV | Najmanje 15 % površine je prekriveno zgradama čija prosječna visina premašuje 15 m |

Iz tablice 3.1 odabire se kategorija terena II. Pomoću dijagrama na slici 3.5 očitava se vrijednost koeficijenta izloženosti na zadanoj visini konstrukcije. Za visinu od 5 m i kategoriju terena II $c_{e(z)} = 1,8$.



Slika 3.5 - Koeficijenti izloženosti $c_{e(z)}$ kao funkcija visine iznad tla z kategorije terena (za ravan teren!) [11]

S dobivenim vrijednostima koeficijenta izloženosti i osnovnog tlaka vjetra, ulazi se u formulu za vršni proračunski tlak za kojeg je još potrebna i vrijednost faktora sigurnosti za promjenjivo opterećenje, odnosno djelovanje vjetra koje iznosi $\gamma_F = 1,5$:

$$q_w = q_{ref} \cdot c_{e(z)} \cdot \gamma_F \quad (3.2)$$

$$q_w = 765,63 \cdot 1,8 \cdot 1,5$$

$$q_w = 2067,2 \text{ Pa}$$

Za pretvorbu vršnog proračunskog tlaka u kontinuirano opterećenje potrebno je uzeti referentnu širinu a_{ref} proračunske površine koju nosač preuzima. U ovom kontekstu bit će prikazana rješenja za dva slučaja – prvi prema konceptu dobivenom od investitora te drugi nakon interne razrade. Za daljni proračun bitan je i koeficijent sile c_f .

1. slučaj

$$a_{ref} = 7 \text{ m}$$

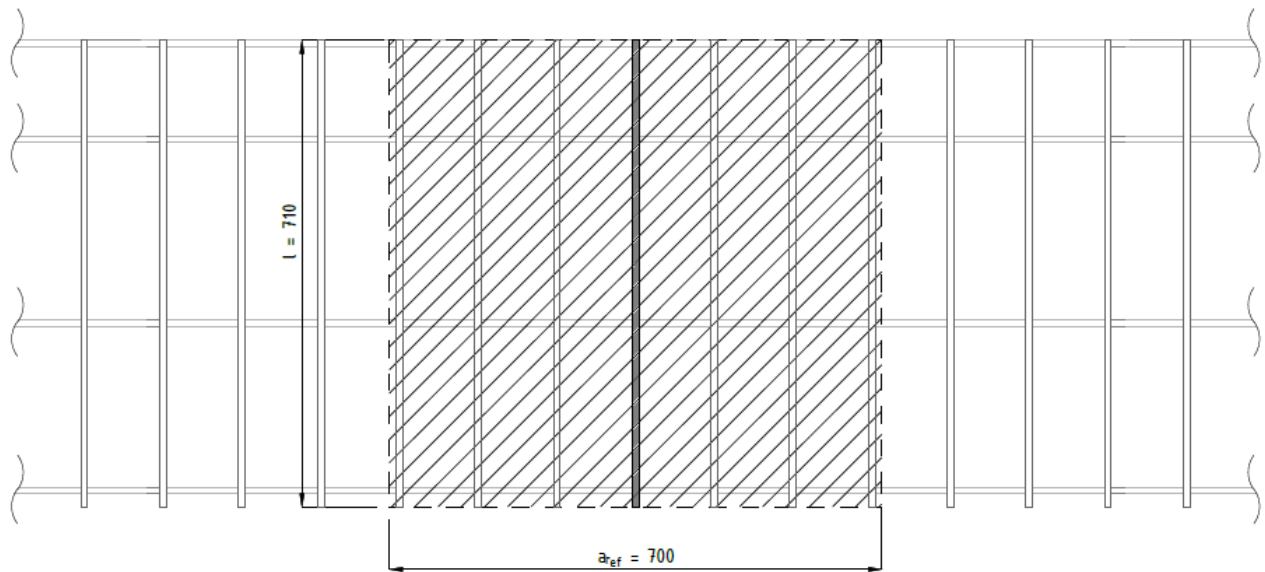
$$c_f = 1,2$$

Kontinuirano opterećenje koje djeluje na vertikalni nosač uslijed djelovanja vjetra je:

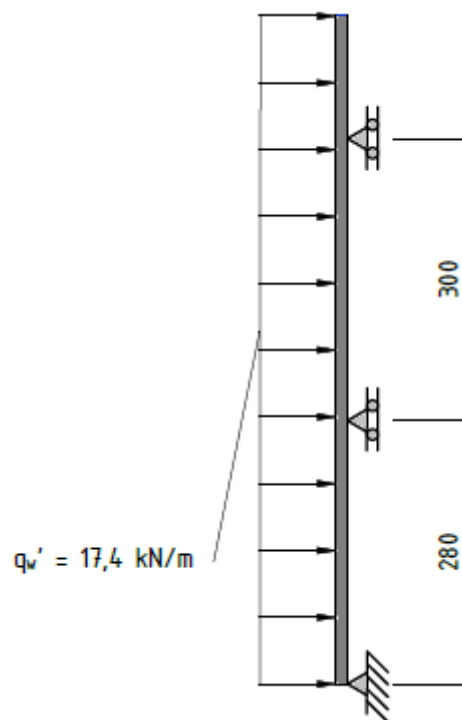
$$q_{w'} = q_w \cdot a_{ref} \cdot c_f \quad (3.3)$$

$$q_{w'} = 2067,2 \cdot 7 \cdot 1,2$$

$$q_{w'} = 17364,48 \frac{\text{N}}{\text{m}} \approx 17,4 \text{ kN/m}$$



Slika 3.6 - Proračunska površina za tlak koji vertikalni nosač preuzima



Slika 3.7 - Vertikalni nosač promatran kao greda s tri oslonca

Slika 3.6 prikazuje promatranu površinu na koju djeluje tlak vjetra kojeg preuzima jedan vertikalni nosač. Referentna širina se uzima kao udaljenost između osiju dvaju nosača, a njena sredina se postavlja na os promatranog nosača. Pomoću referentne širine polja djelovanje tlaka vjetra na vertikalni nosač je na slici 3.7 prikazano kao kontinuirano opterećenje na gredi s tri oslonca.

2. slučaj

$$a_{ref} = 1,2 \text{ m}$$

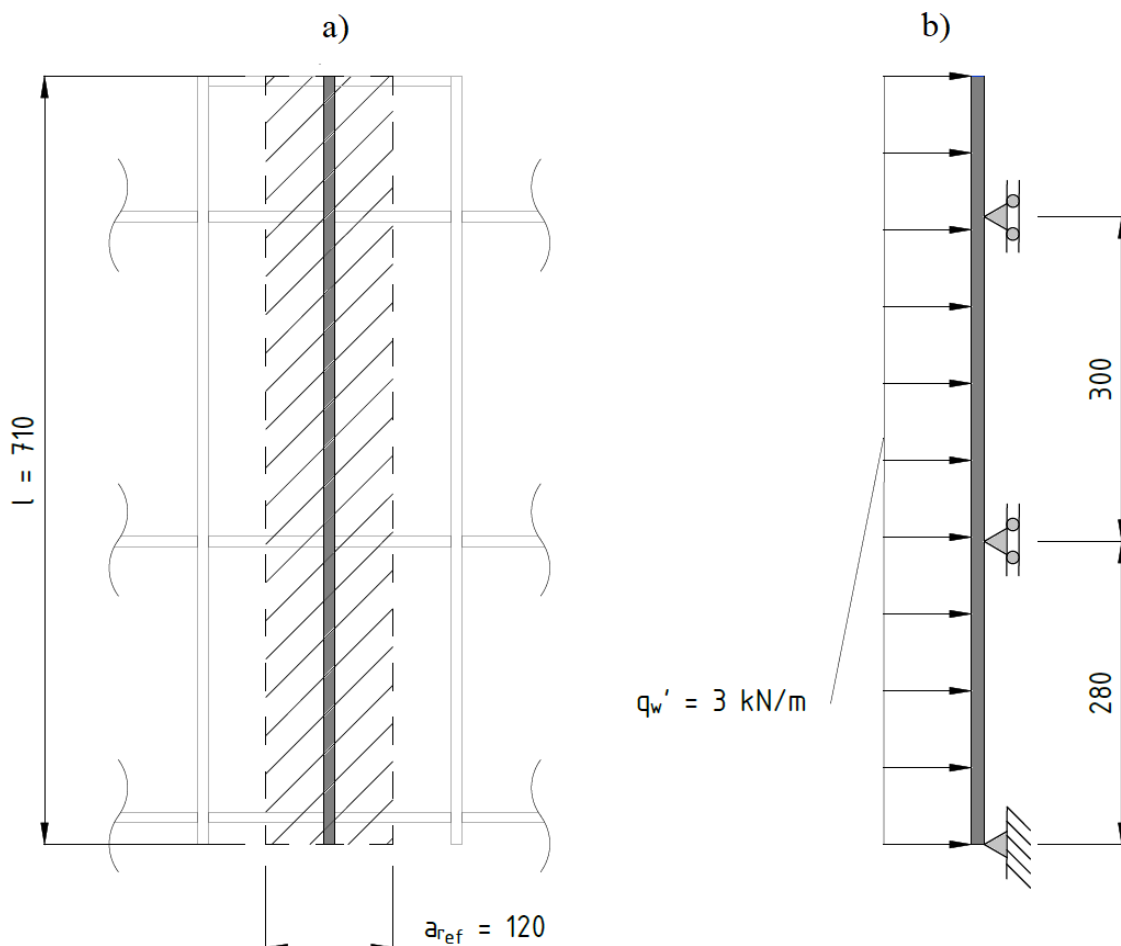
$$c_f = 1,2$$

Kontinuirano opterećenje koje djeluje na vertikalni nosač uslijed djelovanja vjetra je:

$$q_{w'} = q_w \cdot a_{ref} \cdot c_f \quad (3.4)$$

$$q_{w'} = 2067,2 \cdot 1,2 \cdot 1,2$$

$$q_{w'} = 2976,8 \frac{\text{N}}{\text{m}} \approx 3 \text{ kN/m}$$



Slika 3.8 - a) proračunska površina za tlak koji vertikalni nosač preuzima

b) vertikalni nosač promatran kao greda s tri oslonca

Kao i u prvom slučaju, slika 3.8-a) prikazuje promatranu površinu na koju djeluje tlak vjetra kojeg preuzima jedan vertikalni nosač. Referentna širina se uzima kao udaljenost između osiju dvaju nosača, a njena sredina se postavlja na os promatranog nosača. Pomoću referentne širine polja djelovanje tlaka vjetra na vertikalni nosač je na slici 3.8-b) prikazano kao kontinuirano opterećenje na gredi s tri oslonca.

Oba slučaja će biti riješena metodom početnih parametara.

4. Izbor materijala

4.1. Razmatranje svojstava materijala lakih konstrukcija

Najbitnija svojstva za razmotriti pri odabir materijala lakih konstrukcija mogu se podijeliti na:

- Fizička
 - Gustoća materijala, $\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$
 - Linearno toplinsko širenje, $\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta T} \left[\frac{1}{\text{K}} \right]$
 - Toplinska vodljivost, $\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$
- Mehanička
 - Čvrstoća materijala, $R_m, R_e, R_{p0,2}$ [MPa]
 - Modul elastičnosti, E [GPa]
 - Poissonov koeficijent, ν
 - Lomna žilavost, K

Iako postoji velik broj materijala koji se može uzeti u obzir pri izradi lake konstrukcije, zbog nižih cijena i lake dobave, u ovom radu će se razmatrati dva najdostupnija i najčešća materijala korištena u lakim konstrukcijama te prema tome i njihova najbitnija svojstva poput gustoće, čvrstoće i krutosti. Ta dva materijala su:

- S235J0
- EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5)

4.2. Konstrukcijski čelik S235J0

Primjena konstrukcijskih čelika može biti raznolika. Vrlo su prilagodljiv proizvod i često se preferiraju u građevini jer mogu osigurati pozitivan omjer čvrstoće i niske mase. Konstrukcijski čelici zahtijevaju dodatni sloj zaštite od vremenskih prilika. Lako korodiraju, pa se obično premazuju, najčešće postupcima cinčanja ili boriranja. Za trajni premaz, metalnu površinu treba prethodno obraditi i očistiti (pjeskarenje, pranje ili brisanje).

Pri razmatranju čelika kao materijala za korištenje pri izradi lakih konstrukcija prvo treba uzeti u obzir njegovu masu, pošto je mala masa jedan od glavnih kriterija lake konstrukcije.

Konstruktivni čelik ima gustoću $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, te krutost definiranu Youngovim modulom elastičnosti $E = 190 \text{ GPa}$ [12].

U skladu s klasifikacijama europskih standarda, konstrukcijski čelici moraju se referirati pomoću standardnih oznaka koje su usko vezane uz svojstva materijala i njegovu primjenu. U slučaju konstrukcijskog čelika S235 [13]:

- S – označava činjenicu da se radi o konstrukcijskom čeliku
- 235 – označava minimalnu granicu tečenja čelika (na debljini od 16 mm)
- J2/K2/JR/J0 – žilavost materijala provjerena Charpyjevim batom
- W – COR-TEN čelik (otporan na atmosfersku koroziju)
- Z – Konstrukcijski čelik poboljšane čvrstoće okomito na površinu
- C – Hladno oblikovani čelik

Kemijski sastav konstrukcijskog čelika vrlo je važan i strogo reguliran. To je osnovni čimbenik koji definira mehanička svojstva bilo kojeg čelika. U tablici 4.1 mogu se vidjeti maksimalni postotci određenih reguliranih elemenata prisutnih u konstrukcijskim čelicima razreda S235.

Tablica 4.1 - Kemijski sastav konstrukcijskog čelika S235 [13]

| EU Razred | C% | Mn% | P% | S% | Si% |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| S235 | 0,22 max | 1,60 max | 0,05 max | 0,05 max | 0,05 max |

Mehanička svojstva konstrukcijskog čelika osnovni su faktor za njegovu klasifikaciju, a samim time i za primjenu. Iako je kemijski sastav odlučujući čimbenik koji definira mehanička svojstva čelika, također je važno imati na umu standarde mehaničkih svojstva kao što su vlačna čvrstoća i granica popuštanja. Mehanička svojstva konstrukcijskog čelika S235 su prikazana u tablici 4.2.

Tablica 4.2 - Mehanička svojstva konstrukcijskog čelika S235 [13]

| EU Razred | Vlačna čvrstoća [MPa] | Granica popuštanja [MPa] |
|-------------|-----------------------|--------------------------|
| S235 | 360 - 510 | 240 |

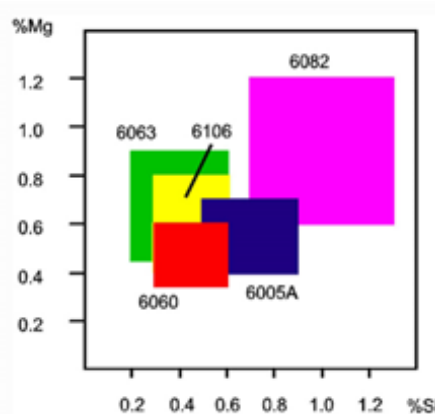
4.3. Aluminijska legura EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5)

Aluminijska legura 6060 je legura srednje čvrstoće, s vrlo dobrom otpornosti na koroziju, vrlo dobrom zavarljivosti i dobrom sposobnosti hladnog oblikovanja. Obično se koristi za proizvodnju složenih poprečnih presjeka [14].

Pri razmatranju aluminijskih legura kao materijala za korištenje pri izradi lakih konstrukcija prvo treba uzeti u obzir njihovu masu, pošto je mala masa jedan od glavnih kriterija lake konstrukcije. Aluminijske legure imaju gustoću $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ te krutost definiranu Youngovim modulom elastičnosti $E = 68 \text{ GPa}$ [15].

U skladu s klasifikacijama europskih standarda, aluminijske legure moraju se referirati pomoću standardnih oznaka koje su usko vezane uz svojstva materijala i njegovu primjenu. U slučaju konstrukcijskog čelika EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5) [16]:

- EN – označava europski standard označavanja aluminijske legure iza kojeg slijedi razmak
- Slovo A – označava aluminijsku leguru
- Slovo W – stoji za proces kovanja kojim je dobiven materijal (iza koje slijedi crtica)
- Sastav legure određen je:
 - brojčano s 4 znamenke „6060“ u kojima prva znamenka definira skupinu legura (Mg + Si); druga znamenka označava broj modifikacija originalne legure ili granicu nečistoća; zadnje dvije znamenke označavaju čistoću aluminijske legure;
 - slova koja označavaju proces popuštanja – oznaka T6 ukazuje na toplinsko tretiranje otopinom, kaljenje i umjetno starenje. Posebnom nedefiniranom obradom se postiže maksimalna čvrstoća – oznaka T66
 - pomoću kemijskih simbola



Slika 4.1 - Kemijski sastav EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5) označen crvenom bojom [16]

4.4. Usporedba materijala S235J0 i EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5)

Najbitniji dosad navedeni faktori pri usporedbi ova dva materijala su prikazani u tablici 4.3.

Tablica 4.3 - Usporedba materijala S235J0 i EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5)

| Materijal | S235J0 | EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5) |
|--------------------------------------|-----------|-----------------------------|
| Gustoća, ρ [kg/m ³] | 7850 | 2700 |
| Krutost, E [GPa] | 190 | 68 |
| Granica popuštanja, R_p [MPa] | 240 | 150 [17] |
| Vlačna čvrstoća, σ_m [MPa] | 360 - 510 | 195 [17] |

Kao što je vidljivo u tablici 4.3, značajna prednost aluminijske legure u odnosu na konstrukcijski čelik je skoro 3 puta manja masa te to kao jedan od najbitnijih faktora lakih konstrukcija igra značajnu ulogu pri odabiru materijala. Također, velika prednost aluminijskih legura je njihova otpornost na koroziju koja je značajna ukoliko je konstrukcija izložena morskim ili korozivnim uvjetima.

Najveći nedostatak aluminijske legure je manjak nosivosti u odnosu na konstrukcijski čelik. EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5) s faktorom materijala $\gamma_m = 1,1$ ima granicu popuštanja $f_{y,d,al} = 136$ MPa što je značajno manje od granice popuštanja S235J0 $f_{y,d,\epsilon} = 218$ MPa. S obzirom da je aluminij mek, savitljiv i deformabilan materijal, problem nosivosti se može riješiti koristeći te karakteristike pri ekstruziji, što omogućuje izrade složenijih i ojačanih poprečnih presjeka (npr. dodavanjem dodatnih stijenki unutar kvadratnog ili pravokutnog profila jednakih dimenzija). U konačnici, dodatnim ojačavanjem poprečnog presjeka dobije se konstrukcija koja je empirijski 2 – 2,5 puta lakša od čelične konstrukcije jednake nosivosti.

Kod aluminijskih konstrukcija se, upravo zbog manjka krutosti koji je u prethodnom primjeru naveden kao prednost, također može pojaviti manjak stabilnosti. Kad su dimenzije jednake, kod aluminijskog vertikalnog nosača u odnosu na vertikalni nosač od konstrukcijskog čelika javit će se veće izvijanje ukoliko postoji aksijalno opterećenje. Problem stabilnosti se može riješiti konstruktivnom izvedbom poput postavljanja oslonaca na kritičnim pozicijama te postavljanjem horizontalnih ukruta po dužini vertikalnog nosača.

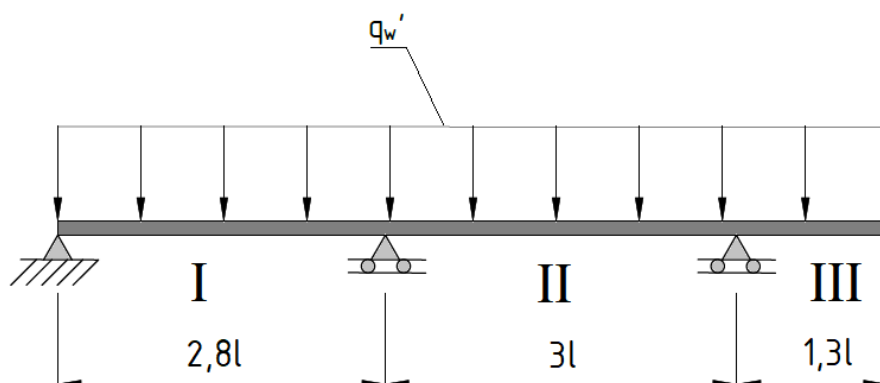
5. Izbor vertikalnog nosača

5.1. Metoda početnih parametara

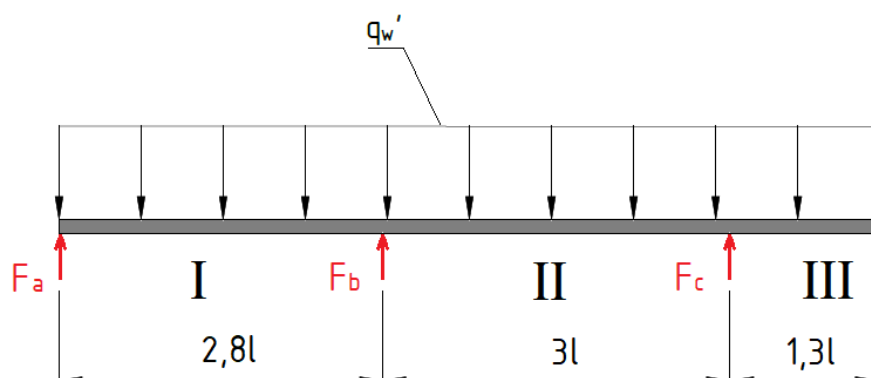
Nosač opterećen jednolikim kontinuiranim opterećenjem q_w' riješit će se metodom početnih parametara. Vertikalni nosač s opterećenjem je položen horizontalno zbog konvencionalnog prikaza. Nosač je vezan za podlogu nepomičnim osloncem u A i pomičnim osloncima u B i C (jedan fiksni, dva klizna) prema slici 5.1. te je prema tome zadatak jedanput statički neodređen. Statička neodređenost može se prikazati izrazom 5.1 pri čemu n predstavlja broj nepoznatih reakcija veza, a k broj nezavisnih jednadžbi ravnoteže. Problem opterećenja vlastitom težinom je riješen konstrukcijskom izvedbom.

$$s = n - k \quad (5.1)$$

$$s = 3 - 2 = 1$$



Slika 5.1 - Nosač s vanjskim opterećenjem



Slika 5.2 - Nosač oslobođen od veza

Na slici 5.2 prikazan je vertikalni nosač oslobođen od veza, odnosno s prikazanim reakcijama u osloncima označenim s pripadajućim slovima. Uzdužni segment sile u osloncu „A“ je $F_{AX} = 0$ jer na nosaču nema uzdužnih opterećenja pa je stoga poprečni segment sile u nosaču $F_{AY} = F_A$. Za oba prethodno navedena slučaja potrebno je postaviti diferencijalnu jednadžbu za savijanje u matričnom obliku za svako područje označeno rimskim slovima.

5.2. Rješavanje vertikalnog nosača metodom početnih parametara

I. polje: $0 \leq x \leq 2,8l$

Vektor stanja prema izrazu 5.2 za prvo polje glasi:

$$v = K \cdot v_0 + I$$

gdje je K matrica prvog polja, vektor v_0 je početni vektor stanja na mjestu $x = 0$ (reakcija u osloncu A), dok je vektor I početni vektor opterećenja prvog polja.

$$\begin{bmatrix} Q_z \\ M_y \\ \beta \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ x & 1 & 0 & 0 \\ \frac{x^2}{2EI_y} & \frac{x}{EI_y} & 1 & 0 \\ -\frac{x^3}{6EI_y} & -\frac{x^2}{2EI_y} & -x & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_A \\ 0 \\ \beta_A \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -q \cdot x \\ -q \cdot \frac{x^2}{2} \\ -\frac{q}{EI_y} \cdot \frac{x^3}{6} \\ \frac{q}{EI_y} \cdot \frac{x^4}{24} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Rješavanjem matrice u izrazu 5.2 dobivaju se sljedeći izrazi:

$$Q_z = F_A - q \cdot x$$

$$M_y = F_A \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2}$$

$$\beta = F_A \cdot \frac{x^2}{2EI_y} + \beta_A - \frac{q \cdot x^3}{6EI_y}$$

$$w = -F_A \cdot \frac{x^3}{6EI_y} - \beta_A \cdot x + \frac{q \cdot x^4}{24EI_y} \quad (5.3)$$

Dobiveni izrazi (5.3) predstavljaju izraze za izračun unutarnjih sila (Q_z , M_y) i izraze za izračun nagiba i progiba (β , w) za prvo polje nosača $0 \leq x \leq 2,8l$.

II. polje: $2,8l \leq x \leq 5,8l$

Vektor stanja za drugo polje glasi:

$$v = K \cdot v_0 + I + K_2 \cdot v_2 + I_2$$

gdje je K_2 matrica drugog polja, vektor v_2 je dodatni vektor stanja na mjestu $x = 2,8l$ (reakcija u osloncu B), dok je vektor I_2 dodatni vektor opterećenja drugog polja.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} Q_z \\ M_y \\ \beta \\ w \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ x & 1 & 0 & 0 \\ \frac{x^2}{2EI_y} & \frac{x}{EI_y} & 1 & 0 \\ -\frac{x^3}{6EI_y} & -\frac{x^2}{2EI_y} & -x & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_A \\ 0 \\ \beta_A \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -q \cdot x \\ -q \cdot \frac{x^2}{2} \\ -\frac{q}{EI_y} \cdot \frac{x^3}{6} \\ \frac{q}{EI_y} \cdot \frac{x^4}{24} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ x - 2,8l & 1 & 0 & 0 \\ \frac{(x - 2,8l)^2}{2EI_y} & \frac{x - 2,8l}{EI_y} & 1 & 0 \\ -\frac{(x - 2,8l)^3}{6EI_y} & -\frac{(x - 2,8l)^2}{2EI_y} & -(x - 2,8l) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_B \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Rješavanjem matrice u izrazu 5.4 dobivaju se sljedeći izrazi:

$$\begin{aligned} Q_z &= F_A - q \cdot x + F_B \\ M_y &= F_A \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2} + F_B \cdot (x - 2,8l) \\ \beta &= F_A \cdot \frac{x^2}{2EI_y} + \beta_A - \frac{q \cdot x^3}{6EI_y} + F_B \cdot \frac{(x - 2,8l)^2}{2EI_y} \\ w &= -F_A \cdot \frac{x^3}{6EI_y} - \beta_A \cdot x + \frac{q \cdot x^4}{24EI_y} - F_B \cdot \frac{(x - 2,8l)^3}{6EI_y} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Dobiveni izrazi (5.5) predstavljaju izraze za izračun unutarnjih sila (Q_z , M_y) i izraze za izračun nagiba i progiba (β , w) za drugo polje nosača $2,8l \leq x \leq 5,8l$.

III. polje: $5,8l \leq x \leq 7,1l$

Vektor stanja za treće polje glasi:

$$v = K \cdot v_0 + I + K_2 \cdot v_2 + I_2 + K_3 \cdot v_3 + I_3$$

gdje je K_3 matrica trećeg polja, vektor v_3 je dodatni vektor stanja na mjestu $x = 5,8l$ (reakcija u osloncu C), dok je vektor I_3 dodatni vektor opterećenja trećeg polja.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} Q_z \\ M_y \\ \beta \\ w \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ x & 1 & 0 & 0 \\ \frac{x^2}{2EI_y} & \frac{x}{EI_y} & 1 & 0 \\ -\frac{x^3}{6EI_y} & -\frac{x^2}{2EI_y} & -x & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_A \\ 0 \\ \beta_A \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -q \cdot x \\ -q \cdot \frac{x^2}{2} \\ -\frac{q}{EI_y} \cdot \frac{x^3}{6} \\ \frac{q}{EI_y} \cdot \frac{x^4}{24} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ x - 2,8l & 1 & 0 & 0 \\ \frac{(x - 2,8l)^2}{2EI_y} & \frac{x - 2,8l}{EI_y} & 1 & 0 \\ -\frac{(x - 2,8l)^3}{6EI_y} & -\frac{(x - 2,8l)^2}{2EI_y} & -(x - 2,8l) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_B \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ x - 5,8l & 1 & 0 & 0 \\ \frac{(x - 5,8l)^2}{2EI_y} & \frac{x - 5,8l}{EI_y} & 1 & 0 \\ -\frac{(x - 5,8l)^3}{6EI_y} & -\frac{(x - 5,8l)^2}{2EI_y} & -(x - 5,8l) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_C \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Rješavanjem matrice u izrazu 5.6 dobivaju se sljedeći izrazi:

$$Q_z = F_A - q \cdot x + F_B + F_C$$

$$M_y = F_A \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2} + F_B \cdot (x - 2,8l) + F_C \cdot (x - 5,8l)$$

$$\beta = F_A \cdot \frac{x^2}{2EI_y} + \beta_A - \frac{q \cdot x^3}{6EI_y} + F_B \cdot \frac{(x - 2,8l)^2}{2EI_y} + F_C \cdot \frac{(x - 5,8l)^2}{2EI_y}$$

$$w = -F_A \cdot \frac{x^3}{6EI_y} - \beta_A \cdot x + \frac{q \cdot x^4}{24EI_y} - F_B \cdot \frac{(x - 2,8l)^3}{6EI_y} - F_C \cdot \frac{(x - 5,8l)^3}{6EI_y} \quad (5.7)$$

Dobiveni izrazi (5.7) predstavljaju izraze za izračun unutarnjih sila (Q_z , M_y) i izraze za izračun nagiba i progiba (β , w) za treće polje nosača $5,8l \leq x \leq 7,1l$.

Nakon definiranja jednadžbi poprečne sile i momenta savijanja te nagiba i progiba za svako polje nosača, potrebno je postaviti dodatne uvjete kako bi se dobile jednadžbe potrebne za određivanje nepoznatih veličina. Dodatni uvjeti određuju se iz rubnih uvjeta ili prema poznatim vrijednostima (npr. progib u osloncima $w = 0$, unutarnje sile na neoslonjenom, slobodnom kraju $Q_z, M_y = 0$):

$$w_B = w(2,8l) = 0 \quad (5.8)$$

$$w_C = w(5,8l) = 0 \quad (5.9)$$

$$M_{y,D} = M_{y,D}(7,1l) = 0 \quad (5.10)$$

$$Q_{z,D} = Q_{z,D}(7,1l) = 0 \quad (5.11)$$

Uvrštavanjem izraza 5.8 u izraz 5.3 za progib nosača slijedi:

$$w(2,8l) = -F_A \cdot \frac{x^3}{6} - \beta_A \cdot x + \frac{q \cdot x^4}{24} = 0$$

Uvrštavanjem izraza 5.9 u izraz 5.5 za progib nosača slijedi:

$$w(5,8l) = -F_A \cdot \frac{x^3}{6EI_y} - \beta_A \cdot x + \frac{q \cdot x^4}{24EI_y} - F_B \cdot \frac{(x - 2,8l)^3}{6EI_y} = 0$$

Uvrštavanjem izraza 5.10 u izraz 5.6 za moment savijanja nosača slijedi:

$$M_{y,D}(7,1l) = F_A \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2} + F_B \cdot (x - 2,8l) + F_C \cdot (x - 5,8l) = 0$$

Uvrštavanjem izraza 5.11 u izraz 5.6 za poprečnu silu slijedi:

$$Q_{z,D}(7,1l) = F_A - q \cdot x + F_B + F_C = 0$$

Za **1. slučaj** poznate vrijednosti potrebne za rješavanje dobivenog sustava jednažbi su:

$$q = 17,4 \text{ kN/m}$$

$$E, I_y = \text{konst.}$$

$$l = 1 \text{ m}$$

Uvrštavanjem ovih vrijednosti u prethodne izraze dobije se ispod prikazani sustav jednažbi:

$$3,66F_A + 2,8\beta_A = 44,56$$

$$32,52F_A + 5,8\beta_A + 4,5F_B = 820,45$$

$$7,1F_A + 4,3F_B + 1,3F_C = 438,57$$

$$F_A + F_B + F_C = 123,54$$

5.12

Sustav jednačbi je riješen daljnjom uvrštavanjem iz jednačbe u jednačbu dok u konačnom izrazu nije ostala samo jedna nepoznanica:

$$F_A = 12,17 - 0,765\beta_A$$

$$F_B = 94,37 + 4,24\beta_A$$

$$F_C = -41,25 - 9,85\beta_A$$

$$12,17 - 0,765\beta_A + 94,37 + 4,24\beta_A - 41,25 - 9,85\beta_A = 123,54$$

$$\beta_A = -9,14 \cdot \frac{1}{EI_y} \text{ rad}$$

Uvrštavanjem dobivene vrijednosti nagiba β_A u prethodne izraze dobivene su reakcije u osloncima:

$$F_A = 19,16 \text{ kN}$$

$$F_B = 55,61 \text{ kN}$$

$$F_C = 48,78 \text{ kN}$$

Točnost dobivenih vrijednosti provjerena je u programskom softveru MDSolids pomoću funkcije Linear Equation Solver (slika 5.3)

Matrix Solution of Simultaneous Algebraic Equations

Back Edit Print

Number of Equations

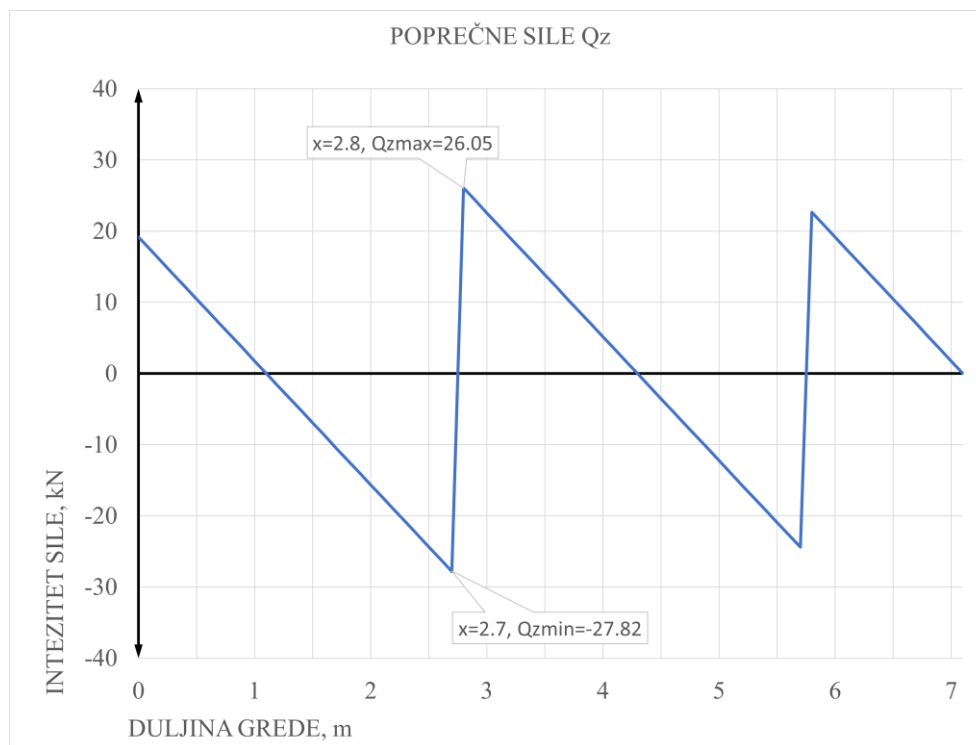
4

Compute

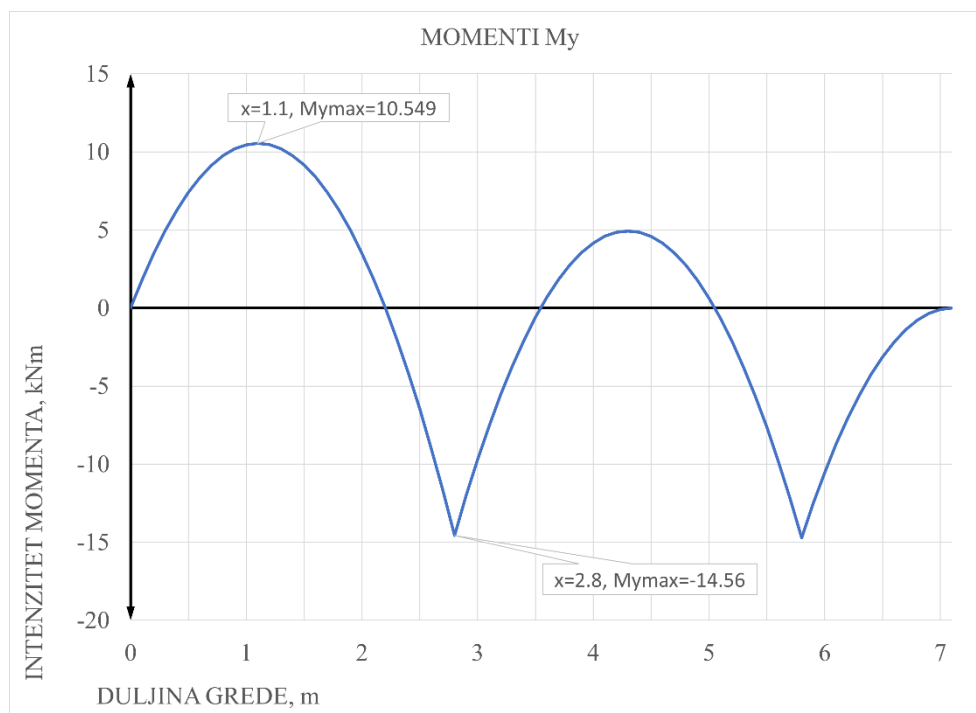
| | 1 | 2 | 3 | 4 | Unknowns | Constants |
|---|-------|-----|-----|-----|----------|-----------|
| 1 | 3.66 | 0 | 0 | 2.8 | 19.16395 | 44.56 |
| 2 | 32.52 | 4.5 | 0 | 5.8 | 55.60570 | 820.45 |
| 3 | 7.1 | 4.3 | 1.3 | 0 | 48.77035 | 438.57 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 0 | -9.13573 | 123.54 |

Slika 5.3 - Linear Equation Solver funkcija u programskom softveru MD Solids za 1. slučaj

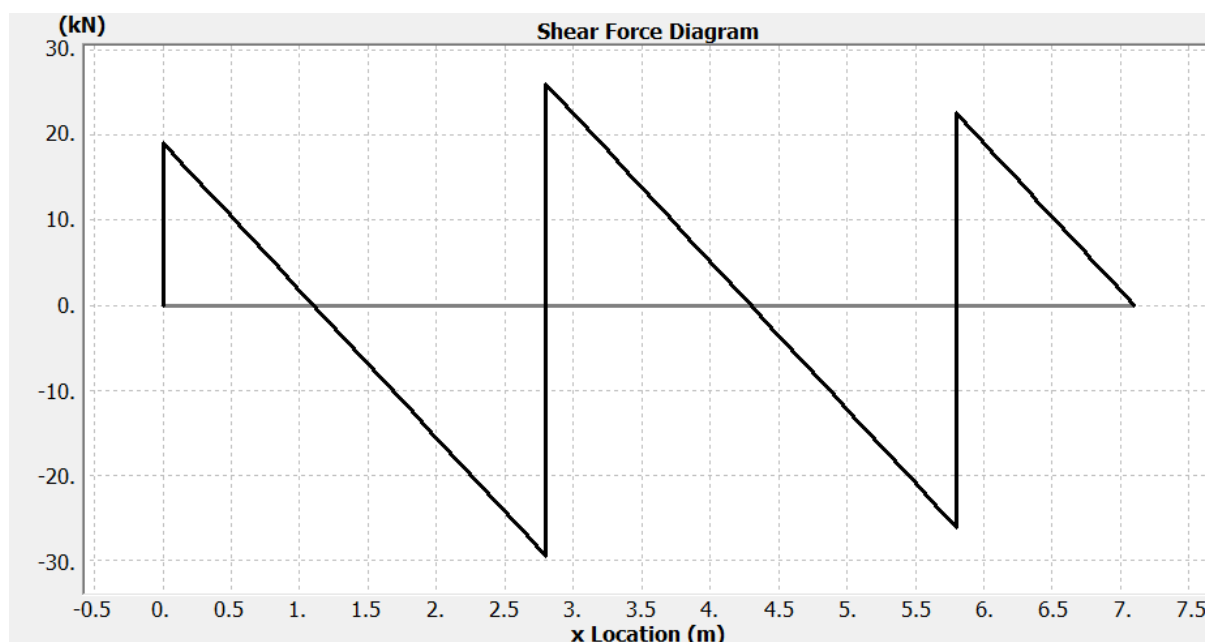
Dijagrami unutarnjih sila i momenata su napravljeni u programskom softveru Microsoft Excel (slika 5.4 i slika 5.5) unošenjem dobivenih jednadžbi za sile i momente svakog polja za svaku točku po duljini grede u intervalu od 0,1 te potom provjereni u MDSolidsu analizom pomoću funkcije Beam Deformation (slika 5.6. i slika 5.7).



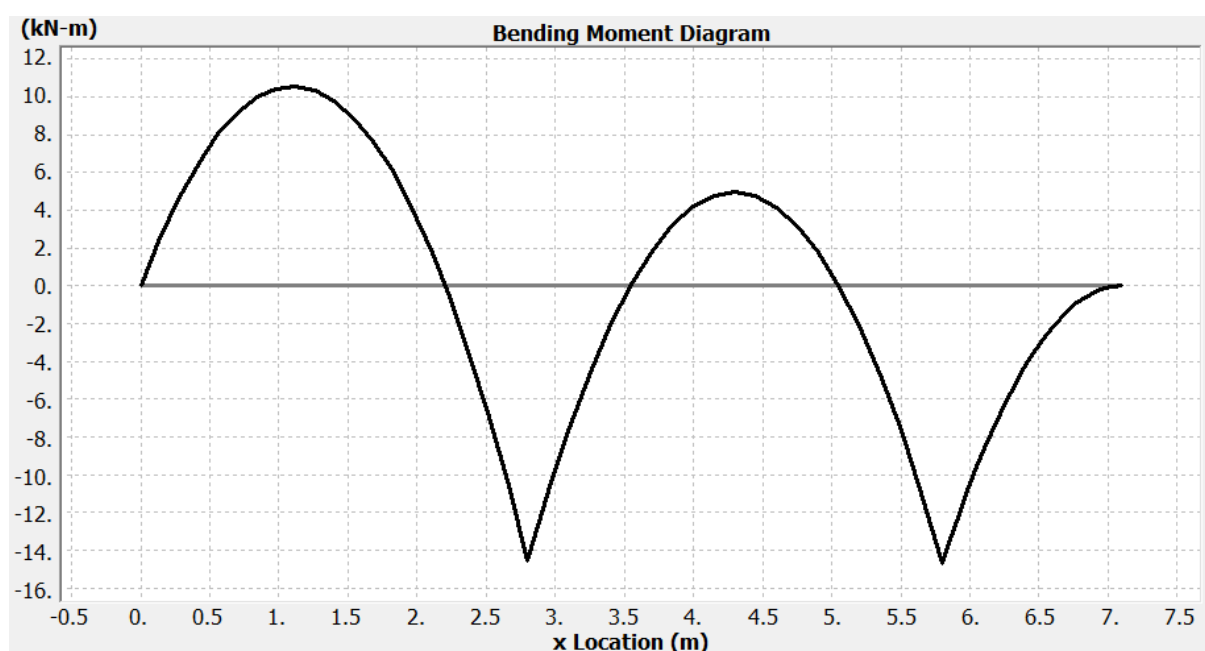
Slika 5.4 - Dijagram unutarnjih sila za 1. slučaj iscertan pomoću softvera Excel



Slika 5.5 - Dijagram momenta savijanja za 1. slučaj iscertan pomoću softvera Excel



Slika 5.6 - Dijagram poprečne sile za 1. slučaj iscrtan pomoću softvera MDSolids



Slika 5.7 - Dijagram momenta savijanja za 1. slučaj iscrtan pomoću softvera MDSolids

Slika 5.8 prikazuje reakcije u osloncima dobivene analizom pomoću funkcije Beam Deformation. Kao što je vidljivo, dobivene vrijednosti odgovaraju vrijednostima dobivenima rješavanjem metodom početnih parametara. Također, slika 5.8 prikazuje maksimalne i minimalne vrijednosti poprečnih sila i momenata savijanja koji odgovaraju vrijednostima dobivenim u iscrtanim dijagramima u softveru Excel.

| BEAM REACTIONS | | |
|----------------|------------------------|------------------|
| Node | Vertical Force (kN) | Moment (kN-m) |
| 1 | 19.1620 | 0.0000 |
| 2 | 55.6085 | 0.0000 |
| 3 | 48.7695 | 0.0000 |

| SUMMARY | | |
|---------|---------------------|-------------------|
| | Shear Force (kN) | x Location (m) |
| Maximum | 26.0505 | 2.8000 |
| Minimum | -29.5580 | 2.8000 |

| | Bending Moment (kN-m) | x Location (m) |
|---------|--------------------------|-------------------|
| Maximum | 10.5512 | 1.1013 |
| Minimum | -14.7030 | 5.8000 |

Slika 5.8 - Reakcije u osloncima te maksimalne i minimalne vrijednosti poprečnih sila i momenata savijanja za 1. slučaj dobivenih u softveru MDSolids

Za **2. slučaj** poznate vrijednosti potrebne za rješavanje dobivenog sustava jednadžbi su:

$$q = 3 \text{ kN/m}$$

$$E, I_y = \text{konst.}$$

$$l = 1 \text{ m}$$

Uvrštavanjem ovih vrijednosti u prethodne izraze dobije se ispod prikazani sustav jednadžbi:

$$3,66F_A + 2,8\beta_A = 7,68$$

$$32,52F_A + 5,8\beta_A + 4,5F_B = 141,46$$

$$7,1F_A + 4,3F_B + 1,3F_C = 75,62$$

$$F_A + F_B + F_C = 21,3 \quad 5.13$$

Sustav jednažbi je riješen daljnjom uvrštavanjem iz jednažbe u jednažbu dok u konačnom izrazu nije ostala samo jedna nepoznanica:

$$F_A = 2,1 - 0,765\beta_A$$

$$F_B = 16,26 + 4,24\beta_A$$

$$F_C = -7,08 - 9,85\beta_A$$

$$2,1 - 0,765\beta_A + 16,26 + 4,24\beta_A - 7,08 - 9,85\beta_A = 21,3$$

$$\beta_A = -1,57 \cdot \frac{1}{EI_y} \text{ rad}$$

Uvrštavanjem dobivene vrijednosti nagiba β_A u prethodne izraze dobivene su reakcije u osloncima:

$$F_A = 3,3 \text{ kN}$$

$$F_B = 9,6 \text{ kN}$$

$$F_C = 8,38 \text{ kN}$$

Točnost dobivenih vrijednosti provjerena je u programskom softveru MDSolids pomoću funkcije Linear Equation Solver (slika 5.9)

Matrix Solution of Simultaneous Algebraic Equations

Back Edit Print

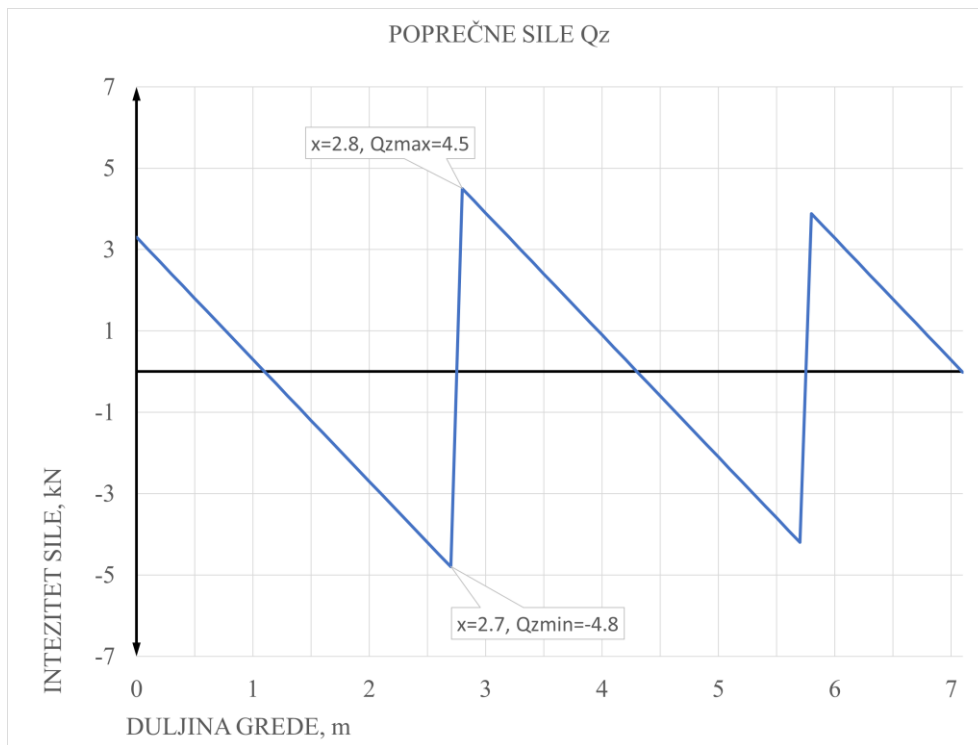
| | 1 | 2 | 3 | 4 | Unknowns | Constants |
|---|-------|-----|-----|-----|----------|-----------|
| 1 | 3.66 | 0 | 0 | 2.8 | 3.30426 | 7.68 |
| 2 | 32.52 | 4.5 | 0 | 5.8 | 9.58843 | 141.46 |
| 3 | 7.1 | 4.3 | 1.3 | 0 | 8.40731 | 75.62 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 0 | -1.57628 | 21.3 |

Number of Equations: 4

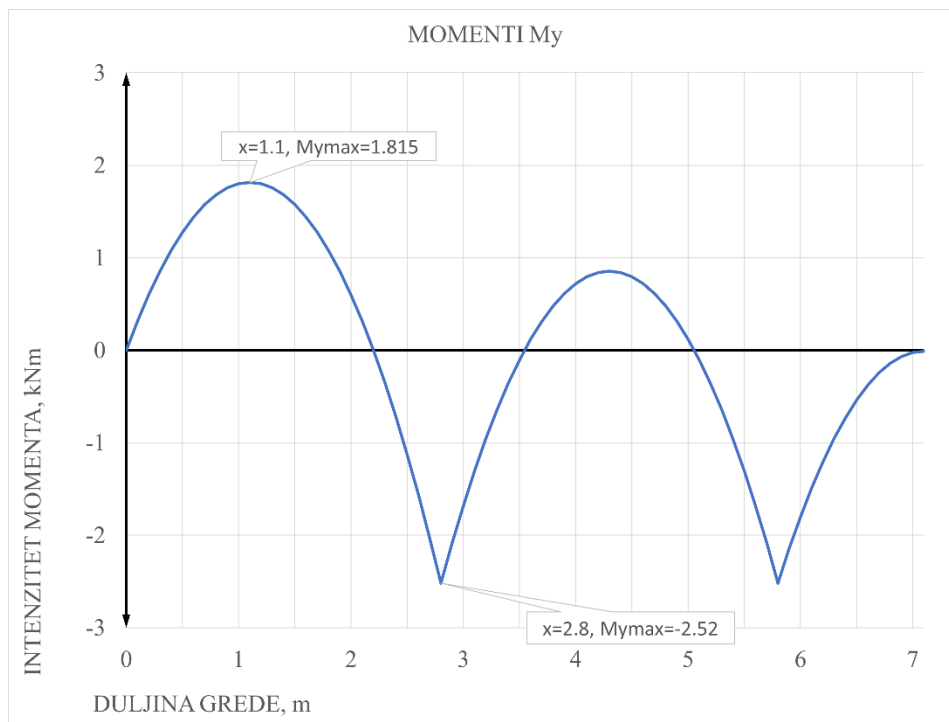
Compute

Slika 5.9 - Linear Equation Solver funkcija u programskom softveru MD Solids za 2. slučaj

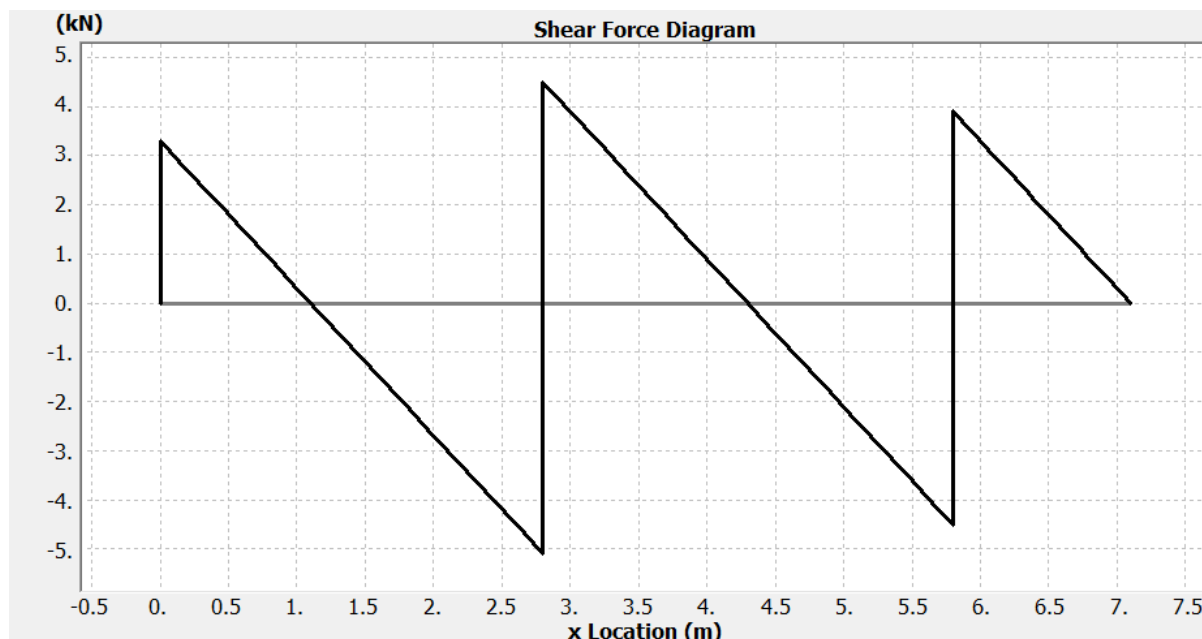
Kao i prvom slučaju, dijagrami unutarnjih sila i momenata su napravljeni u programskom softveru Microsoft Excel (slika 5.10 i slika 5.11) unošenjem dobivenih jednadžbi za sile i momente svakog polja za svaku točku po duljini grede u intervalu od 0,1 te potom provjereni u MDSolidsu analizom pomoću funkcije Beam Deformation (slika 5.12. i slika 5.13).



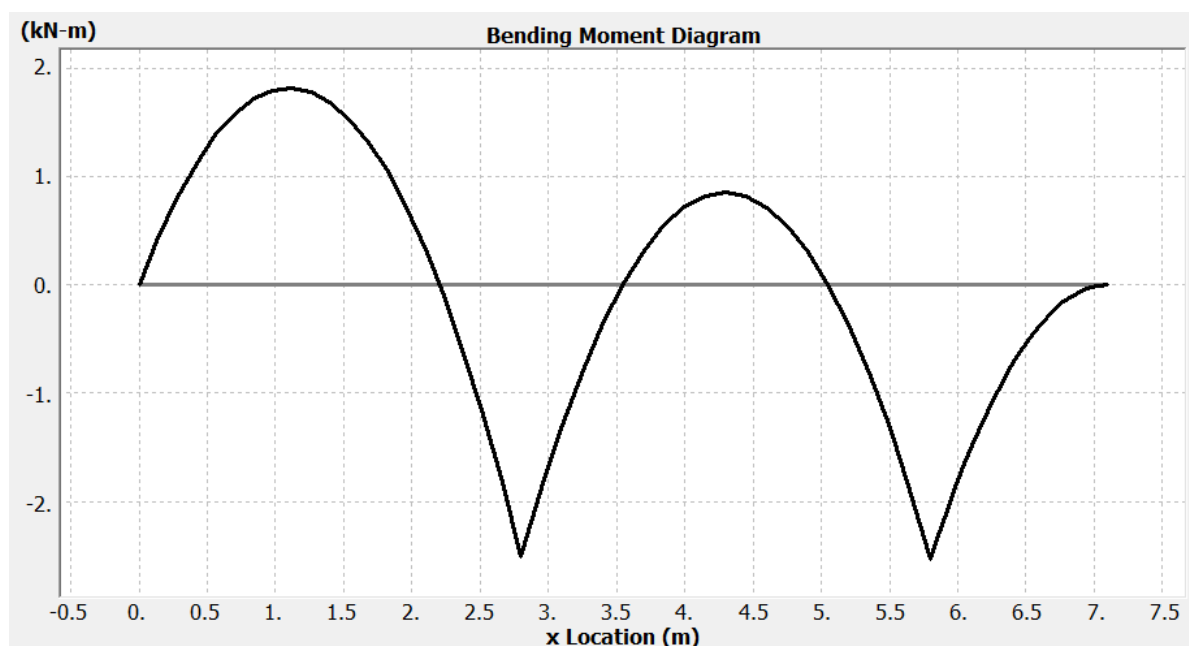
Slika 5.10 - Dijagram poprečnih sila za 2. slučaj iscrtan pomoću softvera Excel



Slika 5.11 - Dijagram momenta savijanja za 2. slučaj iscrtan pomoću softvera Excel



Slika 5.12 - Dijagram poprečnih sila za 2. slučaj iscrtan pomoću softvera MDSolids



Slika 5.13 - Dijagram momenta savijanja za 2. slučaj iscrtan pomoću softvera MDSolids

Slika 5.14 prikazuje reakcije u osloncima dobivene analizom pomoću funkcije Beam Deformation. Kao što je vidljivo, dobivene vrijednosti odgovaraju vrijednostima dobivenima rješavanjem metodom početnih parametara. Također, slika 5.14 prikazuje maksimalne i minimalne vrijednosti poprečnih sila i momenata savijanja koji odgovaraju vrijednostima dobivenim u iscrtanim dijagramima u softveru Excel.

| BEAM REACTIONS | | |
|----------------|--------------------------|-------------------|
| Node | Vertical Force (kN) | Moment (kN-m) |
| 1 | 3.3038 | 0.0000 |
| 2 | 9.5877 | 0.0000 |
| 3 | 8.4085 | 0.0000 |
| SUMMARY | | |
| | Shear Force (kN) | x Location (m) |
| Maximum | 4.4915 | 2.8000 |
| Minimum | -5.0962 | 2.8000 |
| | Bending Moment (kN-m) | x Location (m) |
| Maximum | 1.8192 | 1.1013 |
| Minimum | -2.5350 | 5.8000 |

Slika 5.14 - Reakcije u osloncima te maksimalne i minimalne vrijednosti poprečnih sila i momenata savijanja za 2. slučaj dobivenih u softveru MDSolids

5.3. Dimenzioniranje vertikalnog nosača

U razmatranje za odabir materijala nosača se uzimaju aluminijska legura EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5) i konstrukcijski čelik S235J0 te njihova mehanička svojstva.

Za izračun potrebnog momenta otpora poprečnog presjeka potrebno je zadovoljiti uvjet čvrstoće prema izrazima 5.14, 5.15, 5.16 i 5.17 te su potrebni sljedeći podaci:

$$M_{y,max1} = -14,7 \text{ kNm} \text{ – maksimalni moment u 1. slučaju}$$

$$M_{y,max2} = -2,54 \text{ kNm} \text{ – maksimalni moment u 2. slučaju}$$

$$f_{y,d,\epsilon} = 218 \text{ MPa} \text{ – granica popuštanja materijala S235J0}$$

$$f_{y,d,al} = 136 \text{ MPa} \text{ – granica popuštanja materijala EN AW- 6060 T66}$$

Izrazom 5.14 dobiva se potrebni moment otpora poprečnog presjeka iz S235J0 za prvi slučaj ($a_{ref} = 7$ m).

$$f_{y,d,\check{c}} \geq \frac{M_{y,max1}}{W_{y,1,\check{c}}} \quad (5.14)$$

$$W_{y,1,\check{c}} \geq \frac{M_{y,max1}}{f_{y,d,\check{c}}} = \frac{|-14700000|}{218}$$

$$W_{y,1,\check{c}} \geq 67413 \text{ mm}^3$$

Izrazom 5.15 dobiva se potrebni moment otpora poprečnog presjeka iz EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5) za prvi slučaj ($a_{ref} = 7$ m).

$$f_{y,d,al} \geq \frac{M_{y,max1}}{W_{y,1,al}} \quad (5.15)$$

$$W_{y,1,al} \geq \frac{M_{y,max1}}{f_{y,d,al}} = \frac{|-14700000|}{136}$$

$$W_{y,1,al} \geq 108088 \text{ mm}^3$$

Izrazom 5.16 dobiva se potrebni moment otpora poprečnog presjeka iz S235J0 za drugi slučaj ($a_{ref} = 1,2$ m).

$$f_{y,d,\check{c}} \geq \frac{M_{y,max2}}{W_{y,2,\check{c}}} \quad (5.16)$$

$$W_{y,2,\check{c}} \geq \frac{M_{y,max2}}{f_{y,d,\check{c}}} = \frac{|-2540000|}{218}$$

$$W_{y,2,\check{c}} \geq 11651 \text{ mm}^3$$

Izrazom 5.17 dobiva se potrebni moment otpora poprečnog presjeka iz EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5) za drugi slučaj ($a_{ref} = 1,2$ m).

$$f_{y,d,al} \geq \frac{M_{y,max2}}{W_{y,2,al}} \quad (5.17)$$

$$W_{y,2,al} \geq \frac{M_{y,max1}}{f_{y,d,al}} = \frac{|-2540000|}{136}$$

$$W_{y,2,al} \geq 18676 \text{ mm}^3$$

Maksimalni progib mora zadovoljiti uvjet krutosti prema izrazu 5.18. Kao razmatrana duljina uzima se najduži zasebni segment između oslonaca, odnosno duljina između oslonaca B i C. Pomoću dobivenih vrijednosti potrebnih momenata otpora, u programskom softveru Excel izračunate su vrijednosti momenta otpora koje zadovoljavaju uvjet $W_{y,od} \geq W_{y,pot}$ variranjem vrijednosti visine (H), širine (B) i debljine stijenke profila (T) te su prikazani u tablicama 5.1, 5.2, 5.3 i 5.4 s pripadajućim opisom. Odabrani profili su podešavani do zadovoljavanja uvjeta čvrstoće i uvjeta krutosti. Za oblik poprečnog presjeka odabrana je pravokutna cijev.

$$w_{max} \geq \frac{L_{B-C}}{300} \quad (5.18)$$

$$w_{max} \geq \frac{3000}{300} = 10 \text{ mm}$$

Tablica 5.1 - Proračunata vrijednost momenta otpora za 1. slučaj i materijal S235J0

| | |
|--|-------|
| Potrebni mom. otpora, W_y [mm ³] ≥ 67413 | 66167 |
| b [mm] | 120 |
| h [mm] | 120 |
| t [mm] | 5 |

Tablica 5.2 - Proračunata vrijednost momenta otpora za 1. slučaj i materijal EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5)

| | |
|---|--------|
| Potrebni mom. otpora, W_y [mm ³] ≥ 108088 | 125167 |
| b [mm] | 100 |
| h [mm] | 200 |
| t [mm] | 5 |

Tablica 5.3 - Proračunata vrijednost momenta otpora za 2. slučaj i materijal S235J0

| | |
|---|-------|
| Potrebni mom.otpora, W_y [mm ³] ≥ 11651 | 20476 |
| b [mm] | 60 |
| h [mm] | 100 |
| t [mm] | 3 |

Tablica 5.4 - Proračunata vrijednost momenta otpora za 2. slučaj i materijal EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5)

| | |
|--|-------|
| Potrebni mom. otpora, W_y [mm ³] ≥ 18676 | 48836 |
| b [mm] | 80 |
| h [mm] | 160 |
| t [mm] | 3 |

Prema dobivenim vrijednostima momenta otpora, odnosno odabranih profila i njihovih dimenzija, konačno se dolazi i do vrijednosti momenta inercije koji je potreban za proračun progiba. Valja naglasiti da su odabrane vrijednosti dimenzija standardnih profila koje najbliže zadovoljavaju uvjet $W_{y,od} \geq W_{y,pot}$, ali i uvjet krutosti, čime istovremeno utječu i na vrijednost momenta inercije, odnosno progib. U tablici 5.5 prikazane su dobivene vrijednosti prema prethodno izračunatim podacima za 1. i 2. slučaj te za materijale S235J0 i EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5). Cijena, izvedba i montaža cijele konstrukcije uvelike utječe na konačni odabir profila vertikalnog nosača.

Tablica 5.5 - Odabrani profili za oba slučaja za materijale S235J0 i EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5) te pripadajuće vrijednosti

| Materijal -> | 1. SLUČAJ | | 2. SLUČAJ | |
|---|-----------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|
| | S235J0 | EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5) | S235J0 | EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5) |
| Dimenzije odabranih profila (HxBxT) | 120x120x5 | 200x100x5 | 100x60x3 | 160x80x3 |
| Moment otpora, W_y [mm³] | 66167 | 125167 | 10809 | 16933 |
| Potreban moment inercije, I_y [10⁶ mm⁴] | 5,08 | 15,22 | 1,26 | 4,78 |
| Masa odabranih profila [kg/m] | 18,06 | 7,83 | 7,25 | 3,79 |

Nadalje, prema vrijednostima momenata inercije odabranih profila bit će proračunata vrijednost maksimalnog progiba za oba slučaja i materijala. Maksimalni progib će se pojaviti na krajnjoj, neoslonjenoj točki vertikalnog nosača, odnosno $x = 7,1$ m.

Izrazom 5.19 proračunat će se progib u točki $x = 7.1$ m za 1. slučaj i materijal S235J0.

$$w(7,1l) = -F_A \cdot \frac{x^3}{6EI_y} - \beta_A \cdot x + \frac{q \cdot x^4}{24EI_y} - F_B \cdot \frac{(x - 2,8l)^3}{6EI_y} - F_C \cdot \frac{(x - 5,8l)^3}{6EI_y} \quad (5.19)$$

$$w(7,1l) = -\frac{1}{1,9 \cdot 10^{11} \cdot 5,08 \cdot 10^{-6}} \left(19160 \cdot \frac{7,1^3}{6} - 9140 \cdot 7,1 - \frac{17400 \cdot 7,1^4}{24} + 55610 \cdot \frac{4,3^3}{6} + 48780 \cdot \frac{1,3^3}{6} \right)$$

$$w(7,1l) = 0,0099 \text{ m} \approx 10 \text{ mm}$$

Izrazom 5.20 proračunat će se progib u točki $x = 7.1$ m za 1. slučaj i materijal EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5).

$$w(7,1l) = -F_A \cdot \frac{x^3}{6EI_y} - \beta_A \cdot x + \frac{q \cdot x^4}{24EI_y} - F_B \cdot \frac{(x - 2,8l)^3}{6EI_y} - F_C \cdot \frac{(x - 5,8l)^3}{6EI_y} \quad (5.20)$$

$$w(7,1l) = -\frac{1}{6,8 \cdot 10^{10} \cdot 1,522 \cdot 10^{-5}} \left(19160 \cdot \frac{7,1^3}{6} - 9140 \cdot 7,1 - \frac{17400 \cdot 7,1^4}{24} + 55610 \cdot \frac{4,3^3}{6} + 48780 \cdot \frac{1,3^3}{6} \right)$$

$$w(7,1l) = 0,00923 \text{ m} \approx 9 \text{ mm}$$

Izrazom 5.21 proračunat će se progib u točki $x = 7.1$ m za 2. slučaj i materijal S235J0.

$$w(7,1l) = -F_A \cdot \frac{x^3}{6EI_y} - \beta_A \cdot x + \frac{q \cdot x^4}{24EI_y} - F_B \cdot \frac{(x - 2,8l)^3}{6EI_y} - F_C \cdot \frac{(x - 5,8l)^3}{6EI_y} \quad (5.21)$$

$$w(7,1l) = -\frac{1}{1,9 \cdot 10^{11} \cdot 1,262 \cdot 10^{-6}} \left(3300 \cdot \frac{7,1^3}{6} - 1570 \cdot 7,1 - \frac{3000 \cdot 7,1^4}{24} + 9600 \cdot \frac{4,3^3}{6} + 8380 \cdot \frac{1,3^3}{6} \right)$$

$$w(7,1l) = 0,00693 \text{ m} \approx 7 \text{ mm}$$

Izrazom 5.22 proračunat će se progib u točki $x = 7.1$ m za 2. slučaj i materijal EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5).

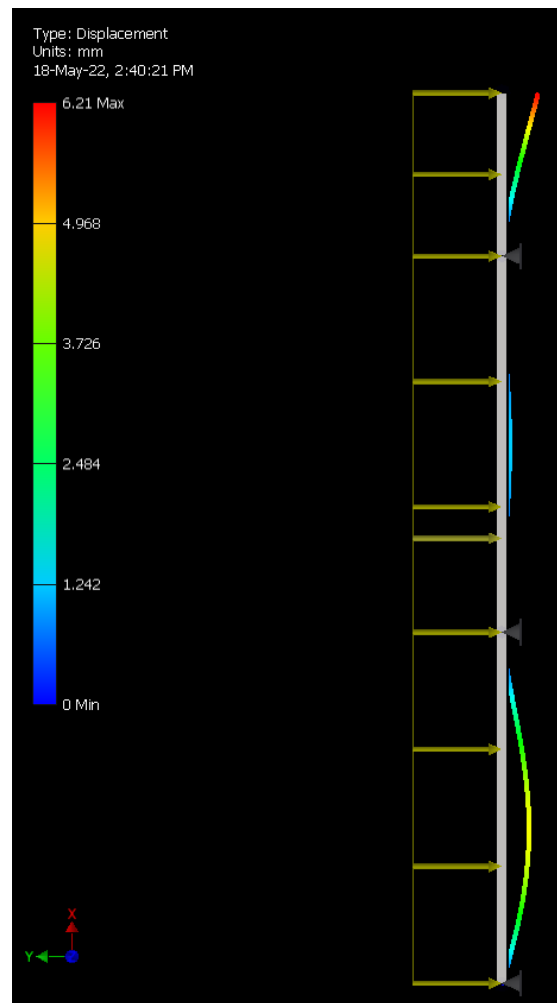
| | |
|--|--|
| $w(7,1l) = -F_A \cdot \frac{x^3}{6EI_y} - \beta_A \cdot x + \frac{q \cdot x^4}{24EI_y} - F_B \cdot \frac{(x - 2,8l)^3}{6EI_y} - F_C \cdot \frac{(x - 5,8l)^3}{6EI_y} \quad (5.22)$ | |
| $w(7,1l) = -\frac{1}{6,8 \cdot 10^{10} \cdot 4,78 \cdot 10^{-6}} \left(3300 \cdot \frac{7,1^3}{6} - 1570 \cdot 7,1 - \frac{3000 \cdot 7,1^4}{24} + 9600 \cdot \frac{4,3^3}{6} + 8380 \cdot \frac{1,3^3}{6} \right)$ | |
| $w(7,1l) = 0,00511 \text{ m} \approx 5 \text{ mm}$ | |

Kao najbolji slučaj, zbog prihvatljive cijene, mase i progiba nosača, ali i dostupnosti poprečnog presjeka profila (što korelira s cijenom), odabire se profil iz S235J0 dimenzija 100x60x3 (tablica 5.6).

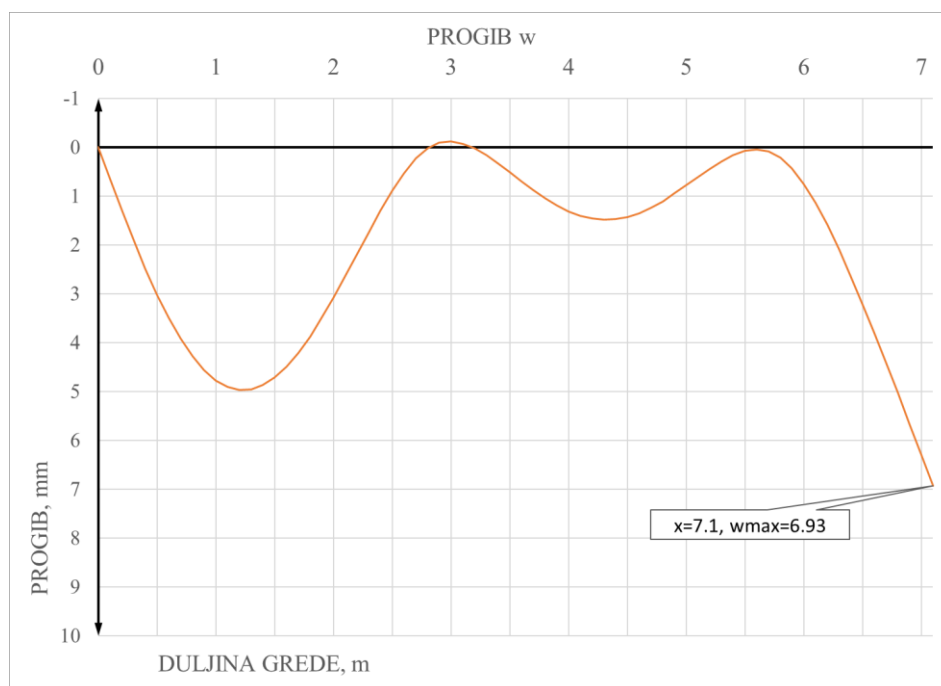
Tablica 5.6 - Geometrijske karakteristike glavnih nosača CFRHS 100x60x3

| Profil | F_GN | |
|--|---------------------------|------------|
| | CFRHS100X60X3 | |
| Tip profila | Šuplji pravokutni presjek | |
| Klasa čelika | S 235 | |
| Tip proizvodnje | Hladno valjani | |
| Izvijanje y-y | c | |
| Izvijanje z-z | c | |
| A [m ²] | 9.0100e-04 | |
| A _y [m ²], A _z [m ²] | 3.3765e-04 | 5.6275e-04 |
| A _L [m ² /m], A _D [m ² /m] | 3.1000e-01 | 6.0048e-01 |
| c _{y,ucs} [mm], c _{z,ucs} [mm] | 30 | 50 |
| α [deg] | 0.00 | |
| I _y [m ⁴], I _z [m ⁴] | 1.2057e-06 | 5.4650e-07 |
| i _y [mm], i _z [mm] | 37 | 25 |
| W _{el,y} [m ³], W _{el,z} [m ³] | 2.4110e-05 | 1.8220e-05 |
| W _{pl,y} [m ³], W _{pl,z} [m ³] | 2.9570e-05 | 2.0790e-05 |
| M _{pl,y,+} [Nm], M _{pl,y,-} [Nm] | 6.94e+03 | 6.94e+03 |
| M _{pl,z,+} [Nm], M _{pl,z,-} [Nm] | 4.88e+03 | 4.88e+03 |
| d _y [mm], d _z [mm] | 0 | 0 |
| I _t [m ⁴], I _w [m ⁶] | 1.2167e-06 | 7.2000e-10 |
| β _y [mm], β _z [mm] | 0 | 0 |
| h [mm] | 100 | |
| b [mm] | 60 | |
| s [mm] | 3 | |
| r [mm] | 6 | |
| r1 [mm] | 3 | |

Simulacija izvedena za navedeni profil u programskom softveru Autodesk Inventor pomoću funkcije Frame Analysis potvrđuje prethodno dobivene rezultate progiba (slika 5.12). Dijagram napravljen u Microsoft Excelu poslužio je kao dodatna provjera (slika 5.13).



Slika 5.12 - Progib vertikalnog nosača iz S235J0 dimenzija 100x60x3 prema funkciji Frame Analysis



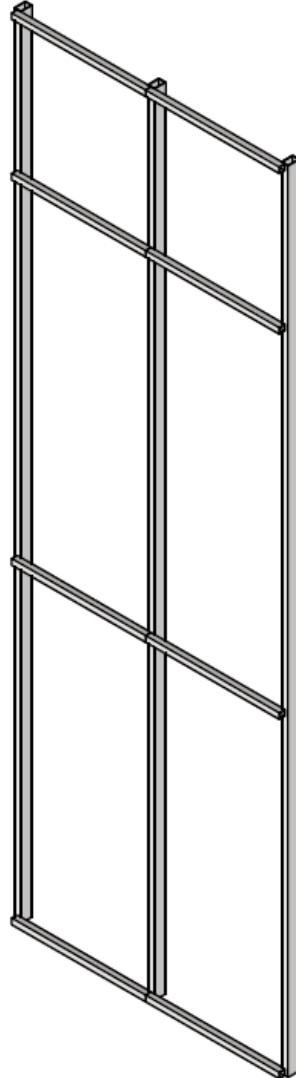
Slika 5.13 - Dijagram progiba iscrtan pomoću softvera Excel

Vertikalni nosači (CFRHS 100x60x3) čelični su elementi zglobno vezani na podnu ploču, međukatnu ploču i rigol. Postavljaju se na osnom razmaku od 1,2 m kao što je prethodno prikazano. Za dodatnu ukrutu konstrukcije, ali i zbog montaže limene obloge, potrebni su i nosači koji će se horizontalno postaviti u odnosu na glavne nosače. Sekundarni nosači (CFRHS 50x50x3, tablica 5.7), na koje se postavlja aluminijska limena obloga, kontinuirano prelaze preko glavnih nosača. Postavljaju se četiri sekundarna nosača na odgovarajućim razmacima.

Tablica 5.7 - Geometrijske karakteristike sekundarnih nosača 50x50x3

| | | F_SN | |
|--|---------------------------------|------------|--|
| Profil | CFRHS50X 50X3 | | |
| Tip profila | Suplji pravokutni presjek | | |
| Klasa čelika | S 235 | | |
| Tip proizvodnje | Hladno valjani | | |
| Izvijanje y-y | c | | |
| Izvijanje z-z | c | | |
| A [m ²] | 5.4100e-04 | | |
| A _y [m ²], A _z [m ²] | 2.7020e-04 | 2.7020e-04 | |
| A _L [m ² /m], A _D [m ² /m] | 1.9000e-01 | 3.6048e-01 | |
| c _{y,ucs} [mm], c _{z,ucs} [mm] | 25 | 25 | |
| α [deg] | 0.00 | | |
| I _y [m ⁴], I _z [m ⁴] | 1.9470e-07 | 1.9470e-07 | |
| i _y [mm], i _z [mm] | 19 | 19 | |
| W _{el,y} [m ³], W _{el,z} [m ³] | 7.7900e-06 | 7.7900e-06 | |
| W _{pl,y} [m ³], W _{pl,z} [m ³] | 9.3900e-06 | 9.3900e-06 | |
| M _{pl,y+} [Nm], M _{pl,y-} [Nm] | 2.20e+03 | 2.20e+03 | |
| M _{pl,z+} [Nm], M _{pl,z-} [Nm] | 2.20e+03 | 2.20e+03 | |
| d _y [mm], d _z [mm] | 0 | 0 | |
| I _t [m ⁴], I _w [m ⁶] | 3.2130e-07 | 7.8125e-11 | |
| β _y [mm], β _z [mm] | 0 | 0 | |
| h [mm] | 50 | | |
| b [mm] | 50 | | |
| s [mm] | 3 | | |
| r [mm] | 6 | | |
| r1 [mm] | 3 | | |

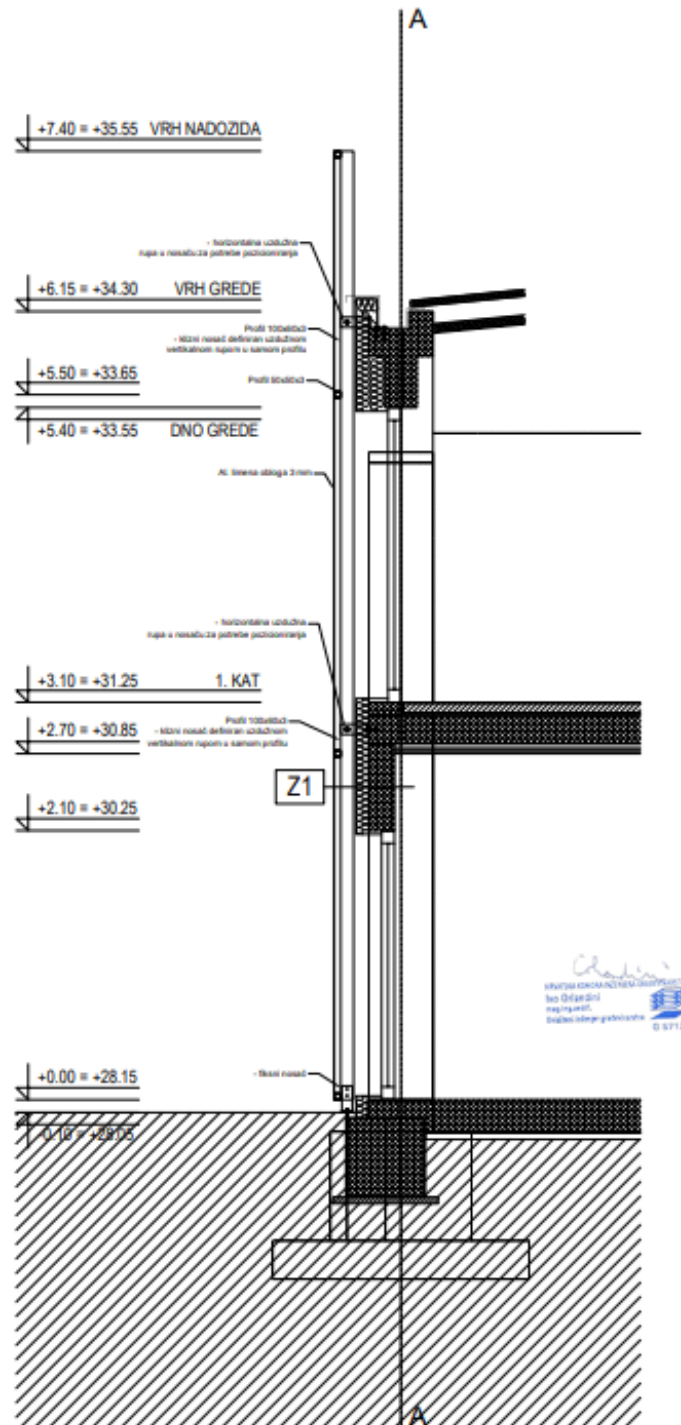
Slika 5.14 prikazuje način montaže jednog segmenta konstrukcije – u ovom slučaju prikazana su tri vertikalna nosača CFRHS 100x60x3 s poprečno položenim sekundarnim nosačima CFRHS 50x50x3.



Slika 5.14 - Prikaz 3D modela čelične potkonstrukcije za prihvat fasade

5.4. Odabir vertikalnog nosača

Nastavno na prikazani proračun, ovlaštteni projektant statike prihvatio je i ovjerio prijedlog nosive konstrukcije.

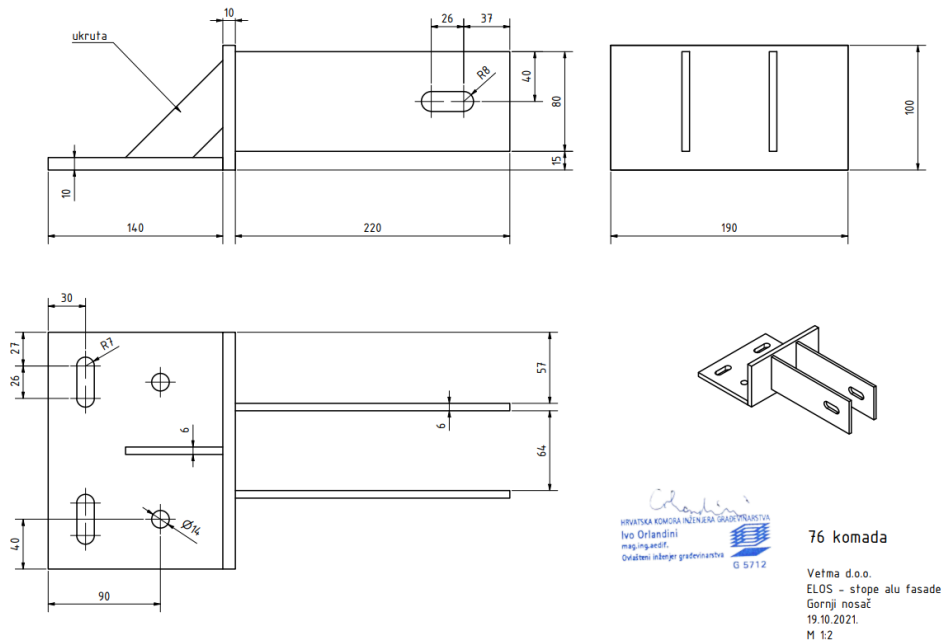


Velma d.o.o.
Vertikalni presjek - nosači čelične potkonstrukcije alu fasade

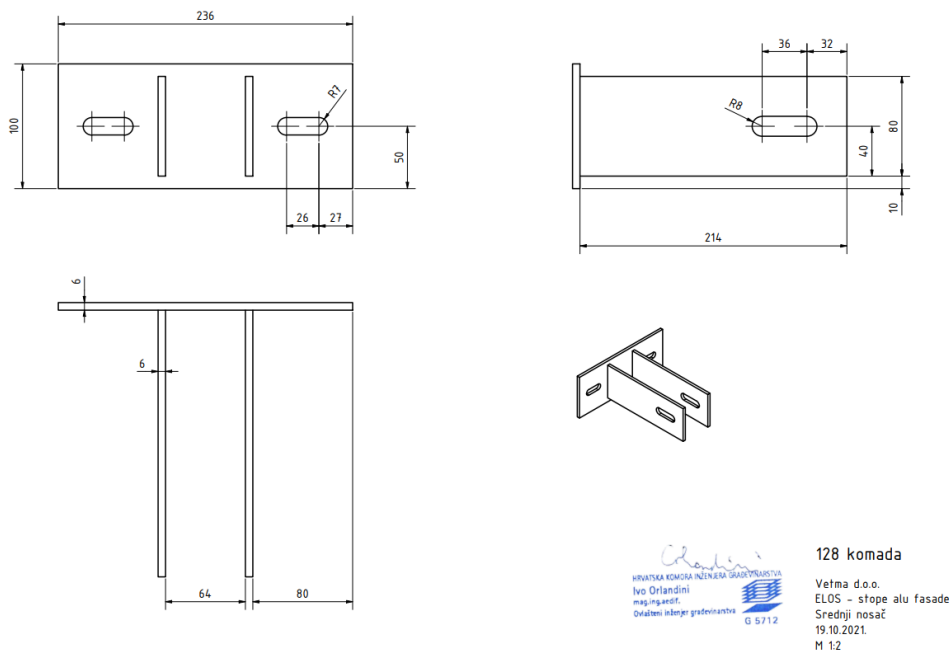
Slika 5.15 - Presjek spoja potkonstrukcije

Slika 5.15 prikazuje spoj potkonstrukcije, odnosno vertikalnog nosača s osloncima.

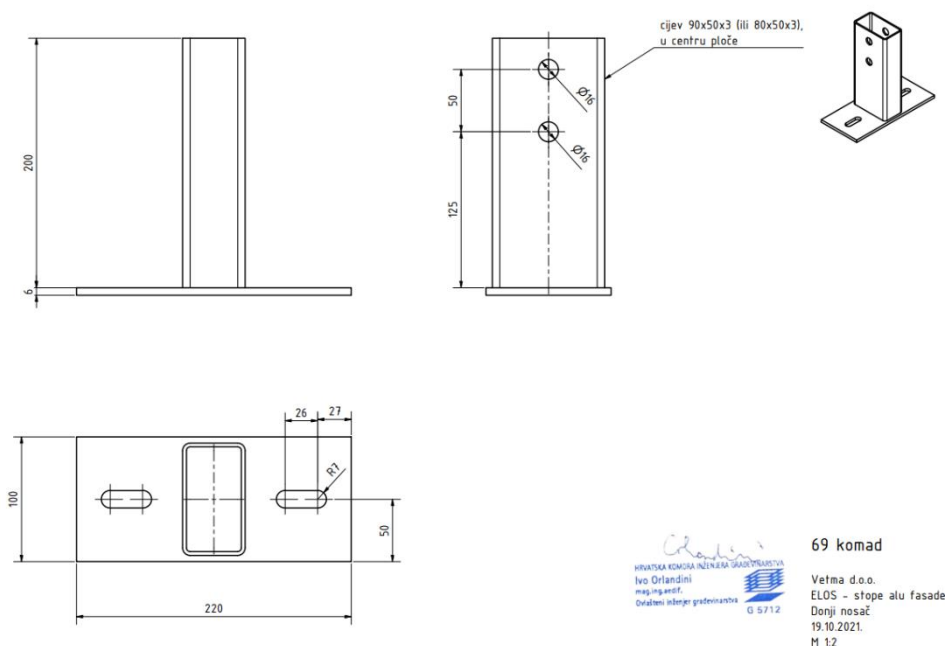
Slike 5.16, 5.17 i 5.18 prikazuju nacрте oslonaca koji se ugrađuju u fasadu objekta. Na oslonce (stope) se vijcima spajaju vertikalni nosači.



Slika 5.16 - Nacrt gornjeg oslonca



Slika 5.17 - Nacrt srednjeg oslonca



Slika 5.18 - Nacrt donjeg oslonca

U tablici 5.8 prikazan je izračun uštede mase cijele originalne potkonstrukcije i nakon razrade.

Tablica 5.8 - Izračun uštede mase potkonstrukcije prije i nakon razrade

| Duljine nosača L (m) | | Broj komada | Dimenzije ($H \times B \times t$) | |
|---|-----|-------------|-------------------------------------|---------------|
| | | | 1. slučaj | 2. slučaj |
| Vertikalni nosač | 7,1 | 63 | 120x100x4 | 100x60x3 |
| Vertikalni nosač | 4,3 | 38 | 120x100x4 | 100x60x3 |
| Horizontalni nosač | 1,2 | 256 | 120x100x4 | 50x50x3 |
| Ukupna masa potkonstrukcije (kg) | | | 12220,6 | 6657,9 |

6. Limena obloga

Limena obloga je vrsta vanjske obloge izrađena iz metala. Iako može biti izrađena iz različitih materijala, obavlja istu funkciju koju obavljaju gotovo sve druge vrste obloga, a to je zaštita eksterijera ili unutrašnjosti konstrukcije. Osim konstrukcijske zaštite, obloge također služe poboljšanju estetskog izgleda zgrade. Metalna obloga stoga može biti vrlo korisna za obje svrhe, budući da su metali općenito čvrsti i izdržljivi, a širok izbor vrsta i završnih obrada osigurava estetsku svestranost. U mnogim okolnostima, s metalnom oblogom se dobiva ravnoteža funkcije i estetike. Dok različite vrste metala imaju potpuno drugačija svojstva te samim time i prednosti i mane, izdržljivosti i izgleda, mogu biti iznimno svestrane kada je u pitanju oblikovanje. Najčešće korišteni materijali su obično aluminij, bakar ili čelik [18].

Kako je već navedeno u poglavlju Izbor materijala, razmatrat će se materijali S235J0 i EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5). Osim već navedenih svojstava ovih materijala, pri izboru obloge lake konstrukcije potrebno je obratiti pozornost i na njihova sljedeća svojstva [19]:

- Zaštita i čvrstoća – jedna od najvažnijih prednosti metalnih ploča za oblaganje je dodatna zaštita zgrade. Metalne ploče za oblaganje štite unutarnje građevinske materijale od agresivnih elemenata i povećavaju mehaničku stabilnost konstrukcije.
- Nezapaljivost – značajne prednosti korištenja nezapaljivih metalnih ploča u odnosu na drvo i druge materijale.
- Nisko održavanje – u usporedbi s drvom, kamenom i obojenim površinama, metalne obloge zahtijevaju vrlo malo održavanja.
- Lagano rješenje – metalne ploče kao obloga mogu biti najlakša opcija za oblaganje, posebno s laganim aluminijskim jezgrama.
- Estetika – Iako su primarni razlozi za korištenje metalne obloge u konstrukciji praktični, postoje i estetske prednosti koje treba uzeti u obzir. Metalne obloge mogu biti u širokom rasponu stilova i završnih obrada.
- Ekološka prihvatljivost – Metalne ploče za oblaganje mogu biti izrađene od recikliranih materijala, što ih čini ekološki prihvatljivim i smanjuje količinu materijala koji odlazi na odlagalište. A budući da su izrađeni od uobičajenih metala, na kraju svog vijeka trajanja kao obloge, lako se mogu reciklirati.

6.1. Vrednovanje dekorativne obloge

U tablici 6.1 vrednovani su materijali koji su zamišljeni kao uži izbor za dekorativnu oblogu. Odabrani materijali su navedeni u prvom stupcu. Za razliku od prethodnog vrednovanja, u ovom slučaju su za svaki materijal u pripadajućem retku date vrijednosti s obzirom na to koliko koji materijal zadovoljava koji kriterij (npr. pocinčani lim ima vrijednost 4 s aspekta kriterija funkcionalnosti, aluminijski lim ima vrijednost 5 s aspekta dizajna). Vrijednosti u retku „Kriteriji“ u tablici su prethodno izračunati faktori težine kriterija projektnog zadatka.

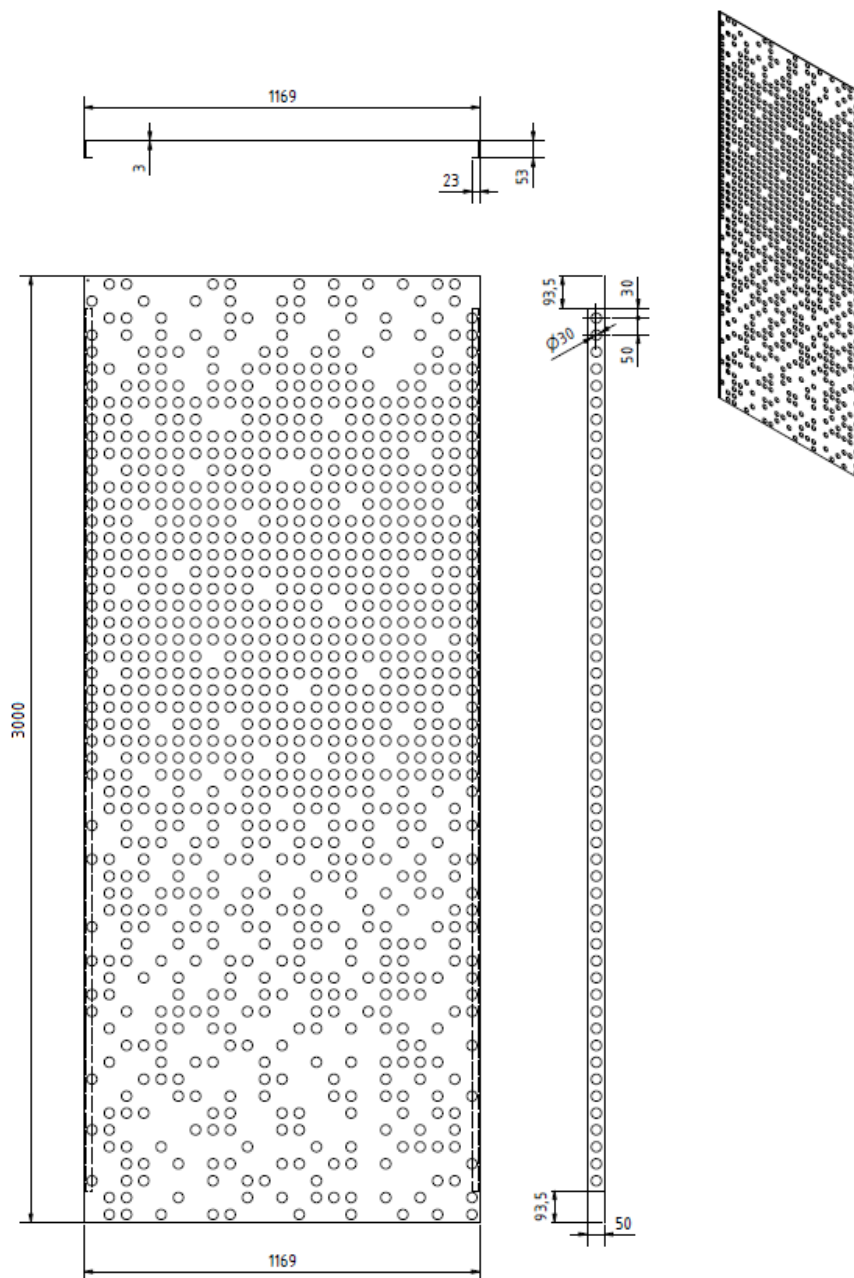
Tablica 6.1 - Vrednovanje materijala dekorativne obloge

| | F | T | E1 | D | E2 | $\pi^* \text{krit.}$ | $\sqrt[n]{\pi^* \text{krit.}}$ | $\frac{\sqrt[n]{\pi^* \text{krit.}}}{\sum \sqrt[n]{\pi^* \text{krit.}}}$ |
|-----------------|------|------|------|------|------|----------------------|--------------------------------|--|
| Kriteriji | 0,19 | 0,24 | 0,24 | 0,29 | 0,05 | | | |
| Materijali | | | | | | | | |
| Pocinčani lim | 4 | 3 | 3 | 2 | 1 | 0,0114 | 0,327 | 0,286 |
| COR-TEN | 2 | 2 | 2,5 | 1 | 1 | 0,0015 | 0,200 | 0,174 |
| HPL | 2 | 1 | 1,5 | 2 | 1 | 0,0009 | 0,176 | 0,154 |
| Aluminijski lim | 4 | 4 | 3 | 5 | 1 | 0,0380 | 0,442 | 0,386 |
| | | | | | | | 1,144 | 1,000 |

Vidljivo je da aluminijski lim ima najveću „težinu“ od svih materijala. Razloga za to je nekoliko – s aspekta tehnološkičnosti, aluminij je značajno lakše oblikovati (savijanje rubova limene obloge, štancanje rupa, plastifikacija površine itd.); funkcionalnost se postiže pravilnim dimenzioniranjem čime se zaobilaze njegove mane po pitanju krutosti i nosivosti u odnosu na čelike; sloj aluminijevog oksida koji sprječava daljnje hrđanje aluminiju daje svjetlucavu površinu što je poželjno s aspekta dizajna, kao i sklonost aluminija da zadrži sloj plastifikata.

6.2. Odabir limene obloge

Prema zahtjevima investitora limena obloga mora biti izrađena iz lima debljine 3 mm te u potpunosti vizualno prekrivati nosače na koje se montira. Također, bitna stvar kod limene obloge su i perforacije po cijeloj površini koje omogućuju prolaz svjetla što u konačnici i daje estetski efekt konstrukciji. Dizajn koji zadovoljava zahtjeve investitora i dimenzije koje odgovaraju funkcionalnosti i izvedivosti konstrukcije su prikazani na slici 6.1. Za materijal limene obloge odabran je EN AW-6060 T66 (AlMgSi 0,5).



Slika 6.1 - Dizajn i dimenzije elementa limene obloge

6.3. Analiza limene obloge

Analiza limene obloge napravljena je u programskom softveru Autodesk Inventor pomoću funkcije Stress Analysis. Slika 6.2 prikazuje vrijednosti koje posjeduje ispitivani materijal o kojima ovise konačni rezultati te zadano opterećenje u vidu tlaka vjetra koji djeluje na konstrukciju.

▣ Static Analysis:1

▣ Material(s)

| | | |
|--------------|---------------------------|-----------------------|
| Name | Aluminum 6061 | |
| General | Mass Density | 2.7 g/cm ³ |
| | Yield Strength | 275 MPa |
| | Ultimate Tensile Strength | 310 MPa |
| Stress | Young's Modulus | 68.9 GPa |
| | Poisson's Ratio | 0.33 ul |
| | Shear Modulus | 25.9023 GPa |
| Part Name(s) | test.ipt | |

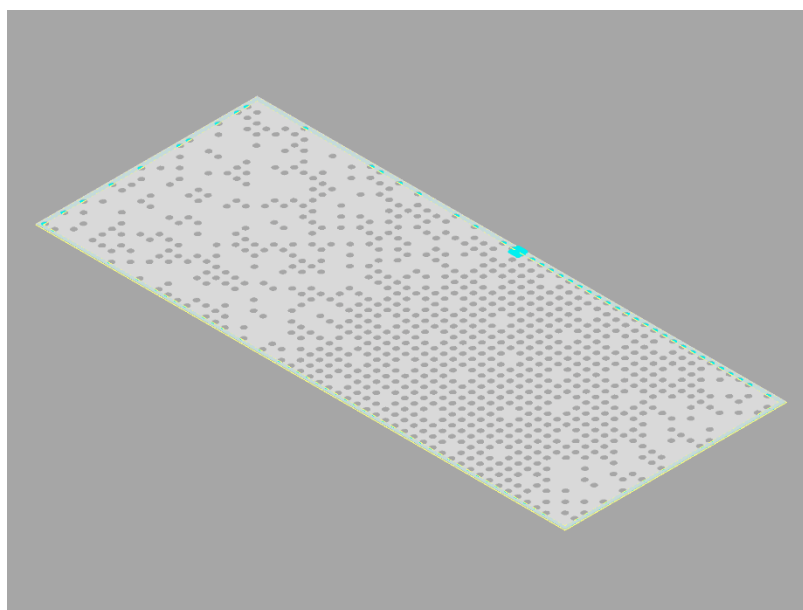
▣ Operating conditions

▣ Pressure:1

| | |
|-----------|-----------|
| Load Type | Pressure |
| Magnitude | 0.002 MPa |

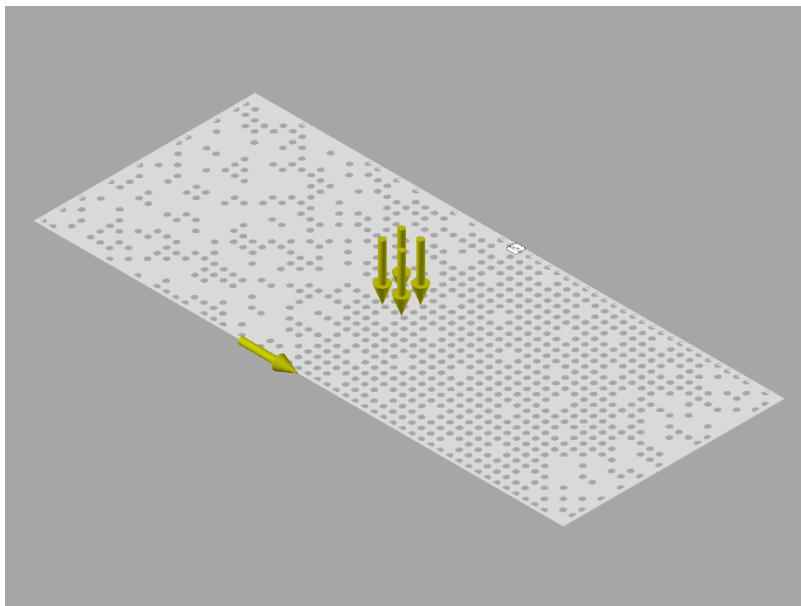
Slika 6.2 - Statička analiza u Autodesk Inventoru

Slika 6.3 prikazuje definirane oslonce obloge po njenim rubovima, odnosno na dijelovima na kojima će se obloga vijcima vezati za nosače.



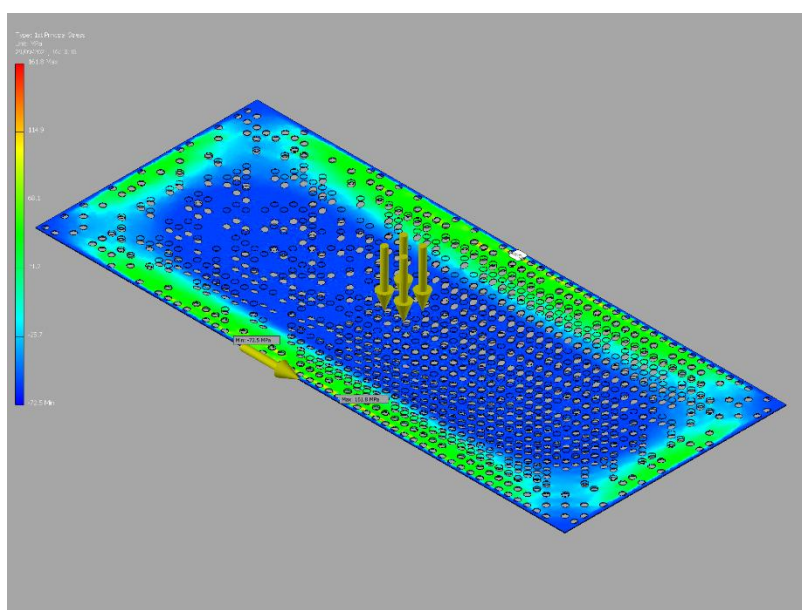
Slika 6.3 - Aluminijska obloga u Autodesk Inventoru s osloncima (Fixed Constraint)

Slika 6.4 prikazuje opterećenje koje djeluje na oblogu uslijed djelovanja vjetra (4 strelice orijentirane poprečno na površinu obloge) te opterećenje obloge uslijed vlastite težine (strelica uzduž obloge).



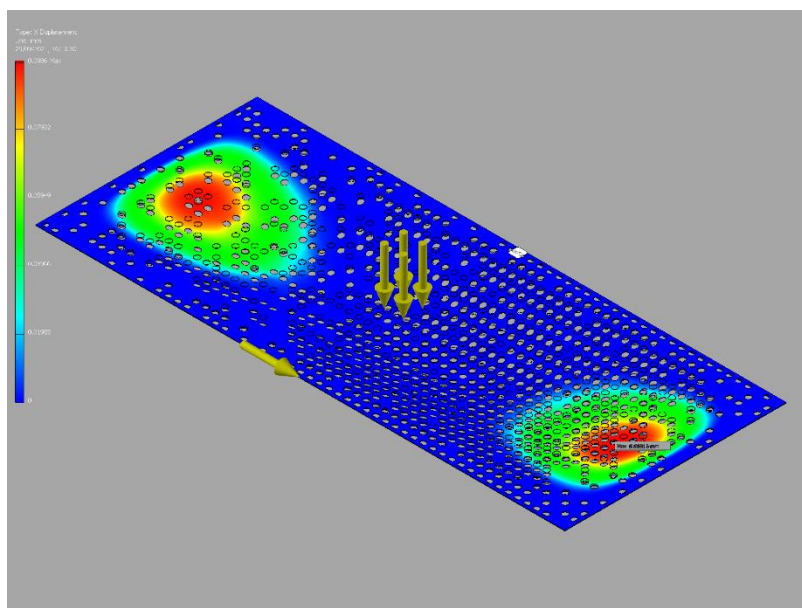
Slika 6.4 - Aluminijska obloga u Autodesk Inventoru sa zadanim opterećenjem

Slika 6.5 prikazuje naprezanje koje se javlja na oblogi uslijed zadanog opterećenja. Najveće naprezanje se javlja na bočnim oslonjenim stranama bližim težištu zbog raspodjele naprezanja po površini. Stupac s bojama u lijevom kutu definira intenzitet parametra (u ovom slučaju naprezanja) koji se promatra – od plave prema crvenoj boji intenzitet promatranog parametra se povećava.



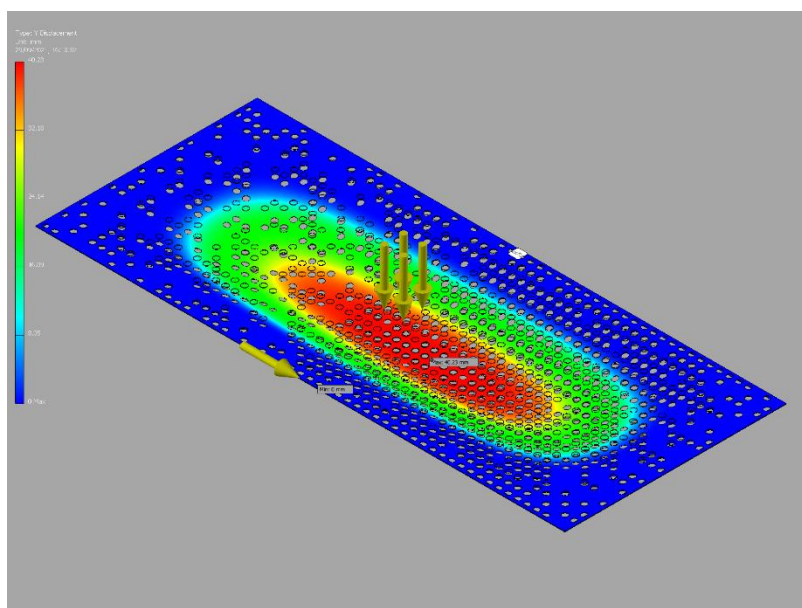
Slika 6.5 - Naprezanje aluminijske obloge u Autodesk Inventoru

Slika 6.6 prikazuje progib u „x“ osi (po širini obloge) koji se javlja uslijed opterećenja vrijednosti $w = 0,3986$ mm. Kao što je vidljivo, pomaci u navedenoj osi su zanemarivi pošto nema sila koje djeluju izravno u tom smjeru.



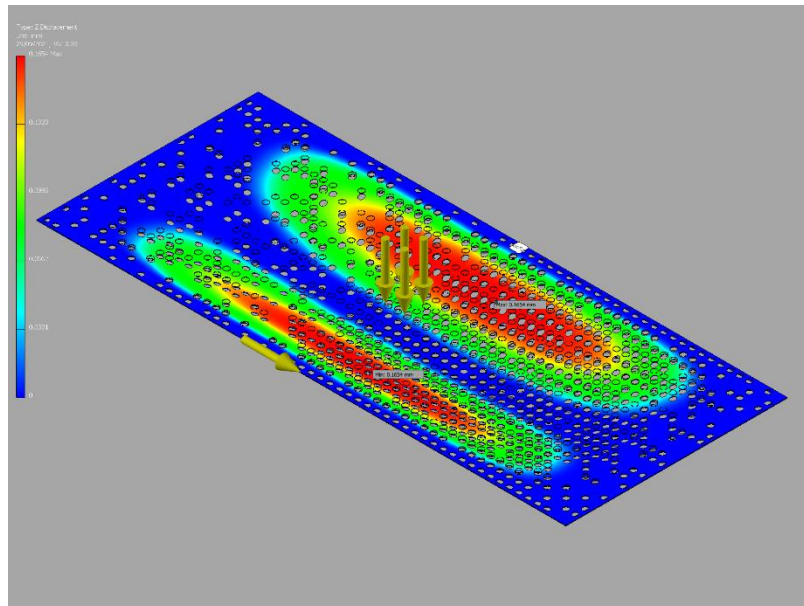
Slika 6.6 - Progib aluminijske obloge u „x“ osi u Autodesk Inventoru

Slika 6.7 prikazuje progib u „y“ osi (po debljini stjenke obloge) koji se javlja uslijed opterećenja vrijednosti $w = 40,23$ mm. Analiza prikazuje očekivan rezultat s obzirom da je za pretpostaviti da će najveći progib (označen crvenom bojom) biti pri sredini obloge, odnosno na dijelu najudaljenijem od oslonjenih dijelova.



Slika 6.7 - Progib aluminijske obloge u „y“ osi u Autodesk Inventoru

Slika 6.8 prikazuje progib u „z“ osi (po visini obloge) koji se javlja uslijed opterećenja s vrijednosti $w = 0,654$ mm. Ovaj segment pomaka je posljedica djelovanja sile u „y“ osi i značajnog pomaka u toj osi zbog povlačenja materijala u obliku hiperbole, ali i zbog djelovanja vlastite mase. Međutim, kao što je vidljivo, progib u ovoj osi je također zanemariv.

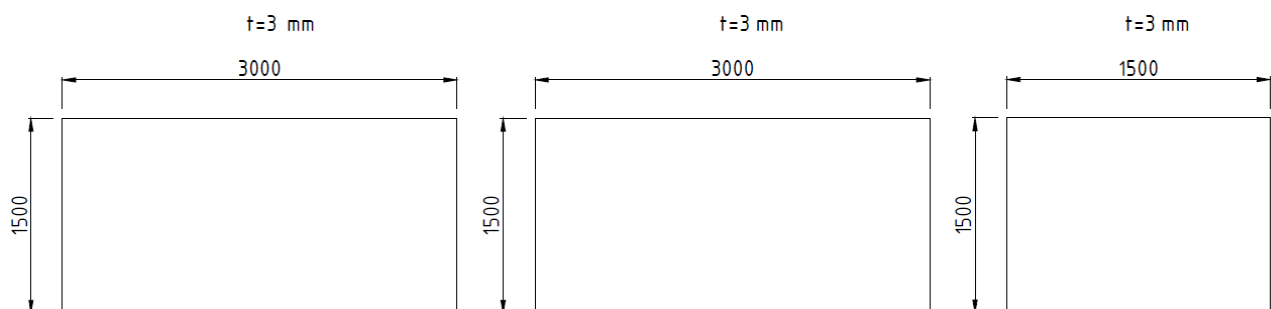


Slika 6.8 - Progib aluminijske obloge u „z“ osi u Autodesk Inventoru

6.4. Tehnologija oblikovanja limene obloge

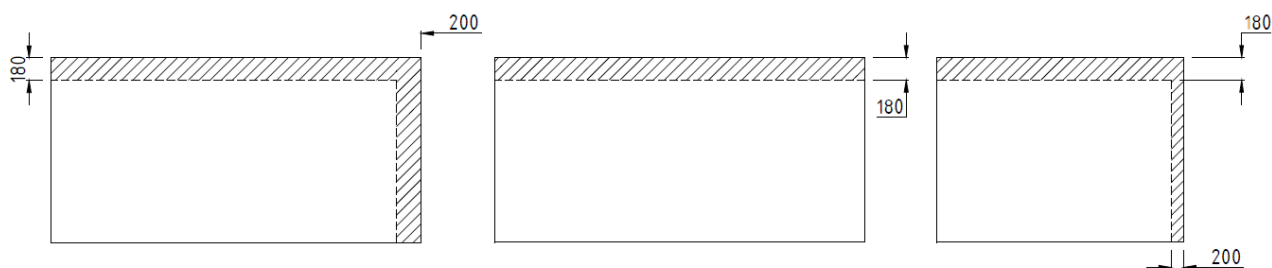
6.4.1. Rezanje limova

Limovi za obradu rezanjem se nabavljaju prema dostupnim standardnim dimenzijama imajući u vidu točan proces obrada koje slijede kako bi se što manje materijala bacilo i u konačnici uštedilo koliko je maksimalno moguće. U ovom slučaju, po jednom vertikalnom nosaču potrebna je nabava dva lima dimenzija 3000x1500x3 i jedan lim dimenzija 1500x1500x3 (slika 6.9).



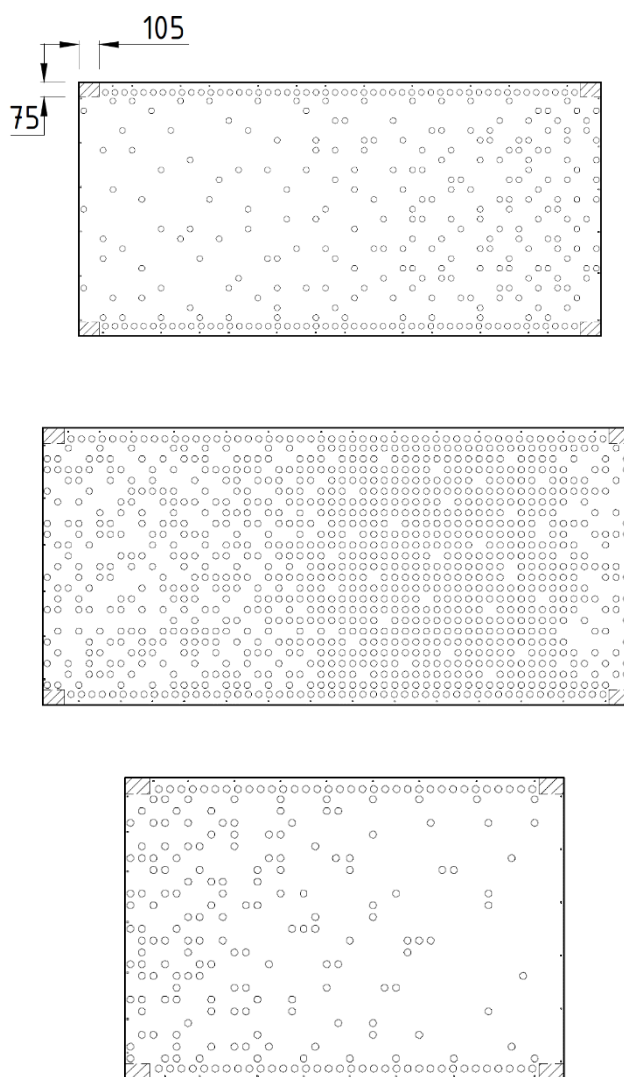
Slika 6.9 - 1. korak – nabava limova prikazanih dimenzija

Limove je potom potrebno izrezati na konačne duljine kako je prikazano na slici 6.10. Šrafirano područje označava dijelove lima koje je potrebno izrezati.

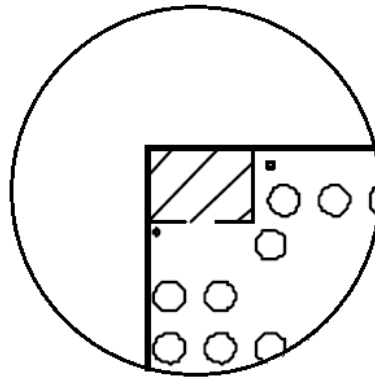


Slika 6.10 - 2. korak – rezanje limova

6.4.2. Štancanje limova



Slika 6.11 - 3. korak – prikaz limova za obradu štancanjem

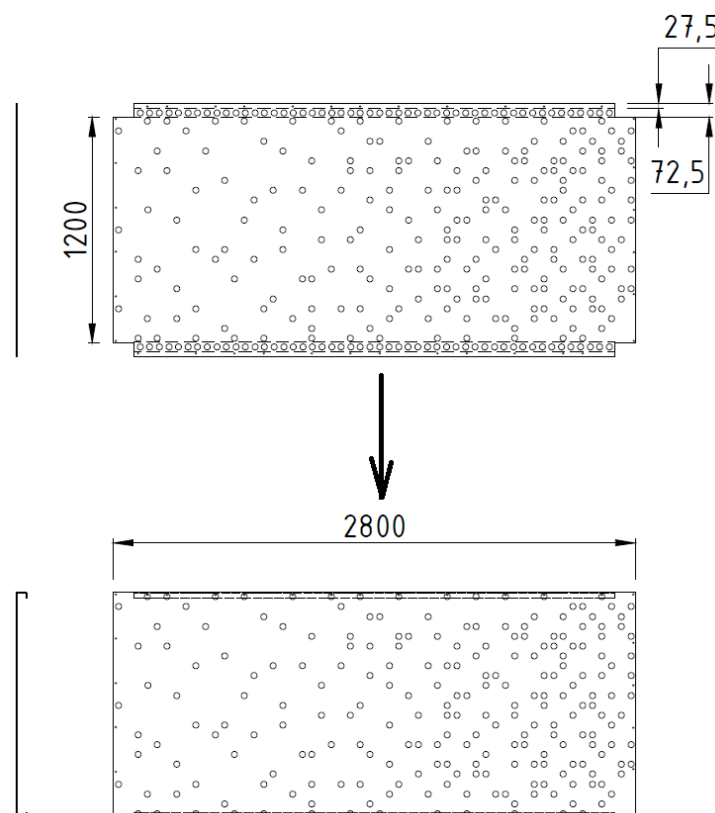


Slika 6.12 - Detalj ruba lima

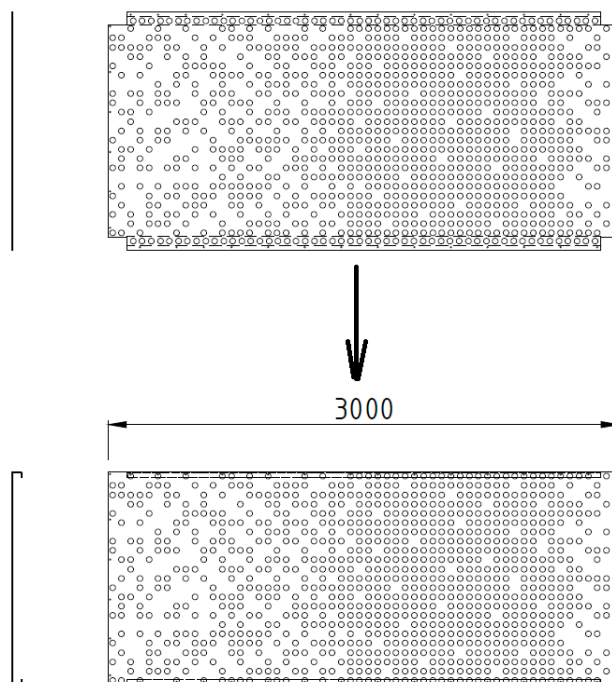
Slika 6.11 prikazuje limove s potrebnim uzorkom perforacija koje je potrebno oštancati na limu kao i šrafirane dijelove rubova limova. Slika 6.12 prikazuje rub lima kojeg je potrebno izrezati.

6.4.3. Savijanje lima

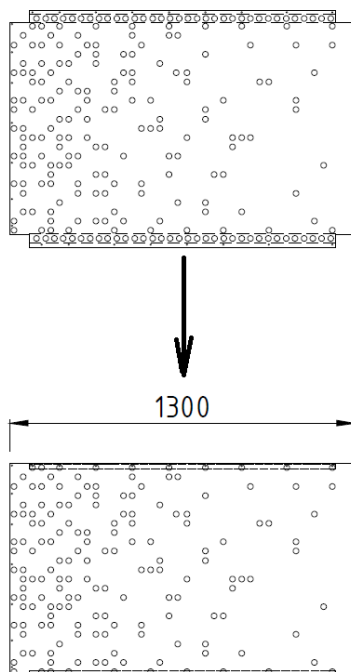
Nakon što se s limova uklonio sav potreban materijal i dobio konačan oblik s isječenim rubovima i potrebnim uzorkom perforacija, limovi se savijaju dvaput po rubu kako bi se dobio kazetni oblik (slika 6.13, 6.14 i 6.15).



Slika 6.13 - 4. korak - savijanje limova #1



Slika 6.14 - 4. korak - savijanje limova #2



Slika 6.15 - 4. korak - savijanje limova #3

6.4.4. *Plastifikacija limova*

Plastifikacija je metoda površinske zaštite metala od korozije. Ona se zasniva na površinskom nanošenju praha, te polimerizaciji praha na određenoj temperaturi. Plastificirani sloj, osim što je odlična zaštita od korozije, otporan je na toplinu i abraziju. Plastificiranje zadovoljava suvremene ekološke standarde te je za okolinu i zdravlje najprihvatljivija metoda antikorozivne zaštite metala. Osim navedenih svojstava, plastifikacija omogućava i neograničen izbor boja, različite površinske strukture [20].

Plastifikacija je složen proces i sastoji se od [21]:

- Pripreme materijala za plastifikaciju - uklanjanje prljavštine i masnoće sa sloja praškastog premaza,
- Nanošenja jednolikog praškastog premaza pomoću velike razlike elektrostatičkog potencijala,
- Proces zagrijavanja - izlaganje toplini na određenoj temperaturi i određeno vrijeme (ovisno o materijalu), pri čemu se prah dovodi u polutekuće stanje kako bi se ravnomjerno rasporedio po površini,
- Hlađenja – zadnja faza kada prah iz polutekućeg stanja prelazi u trajno čvrsto stanje.

7. Izvedeno stanje

7.1. Proces montaže potkonstrukcije

Vertikalni nosači se vijcima montiraju na čelične oslonce ugrađene u fasadu. Kako je prikazano na slici 7.1, oslonci su zaokruženi crvenom bojom. Na osloncima se nalazi longo rupa koja omogućava fleksibilniju montažu te da uslijed opterećenja konstrukcija ima prostor da „pliva“, odnosno napravi blagi pomak zbog čega će naprezanja i progibi u konstrukciji biti manji.



Slika 7.1 - Fasada objekta prije montaže potkonstrukcije

Vertikalni nosač se postavlja na temeljni nosač na kojeg se veže vijcima (slika 7.2). Temeljni nosač se spaja u beton sidrenim vijcima kako bi se cijela potkonstrukcija učvrstila. Spoj temeljnog nosača s vertikalnim nosačem predstavlja fiksni oslonac kako je i prikazano u proračunu.



Slika 7.2 - Vertikalni nosač postavljen na temeljnom nosaču

Slika 7.3 prikazuje izvedeno stanje vertikalnih nosača spojenih na oslonce u fasadi. Na slici su također vidljivi elementi koji služe za montiranje horizontalnih nosača koji služe kao ukrute potkonstrukcije, ali i kao pozicije na koje će se montirati obloga. Na te elemente u vidu L-profila koji su zavareni na vertikalne nosače vijcima se spajaju horizontalni nosači.



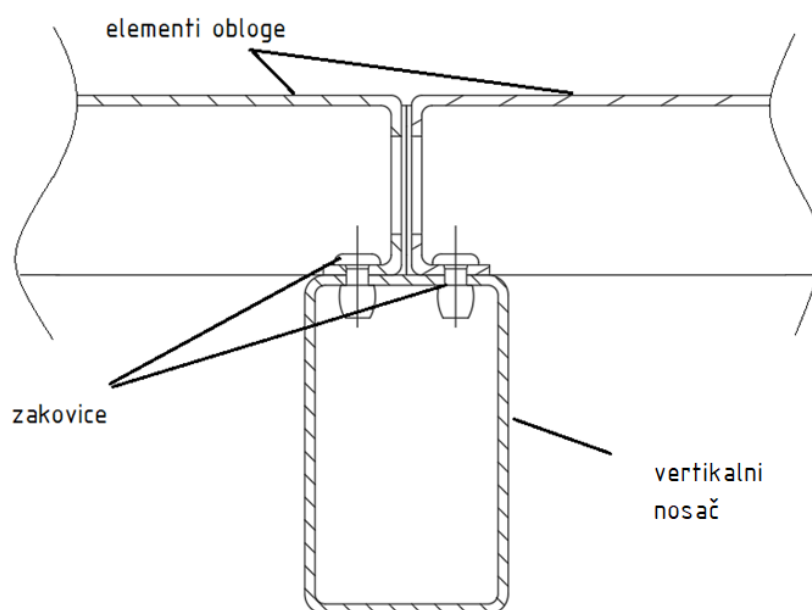
Slika 7.3 - Montirani vertikalni nosači

Slika 7.4 prikazuje jedan takav spoj vertikalnog nosača s horizontalnim nosačem (zaokruženo crvenom bojom).



Slika 7.4 - Spoj vertikalnog i horizontalnog nosača

Slika 7.5 prikazuje shematski prikaz spoja limene obloge i potkonstrukcije. Limena obloga se zakovicama spaja na nosivi dio potkonstrukcije, odnosno na vertikalne i horizontalne nosače.



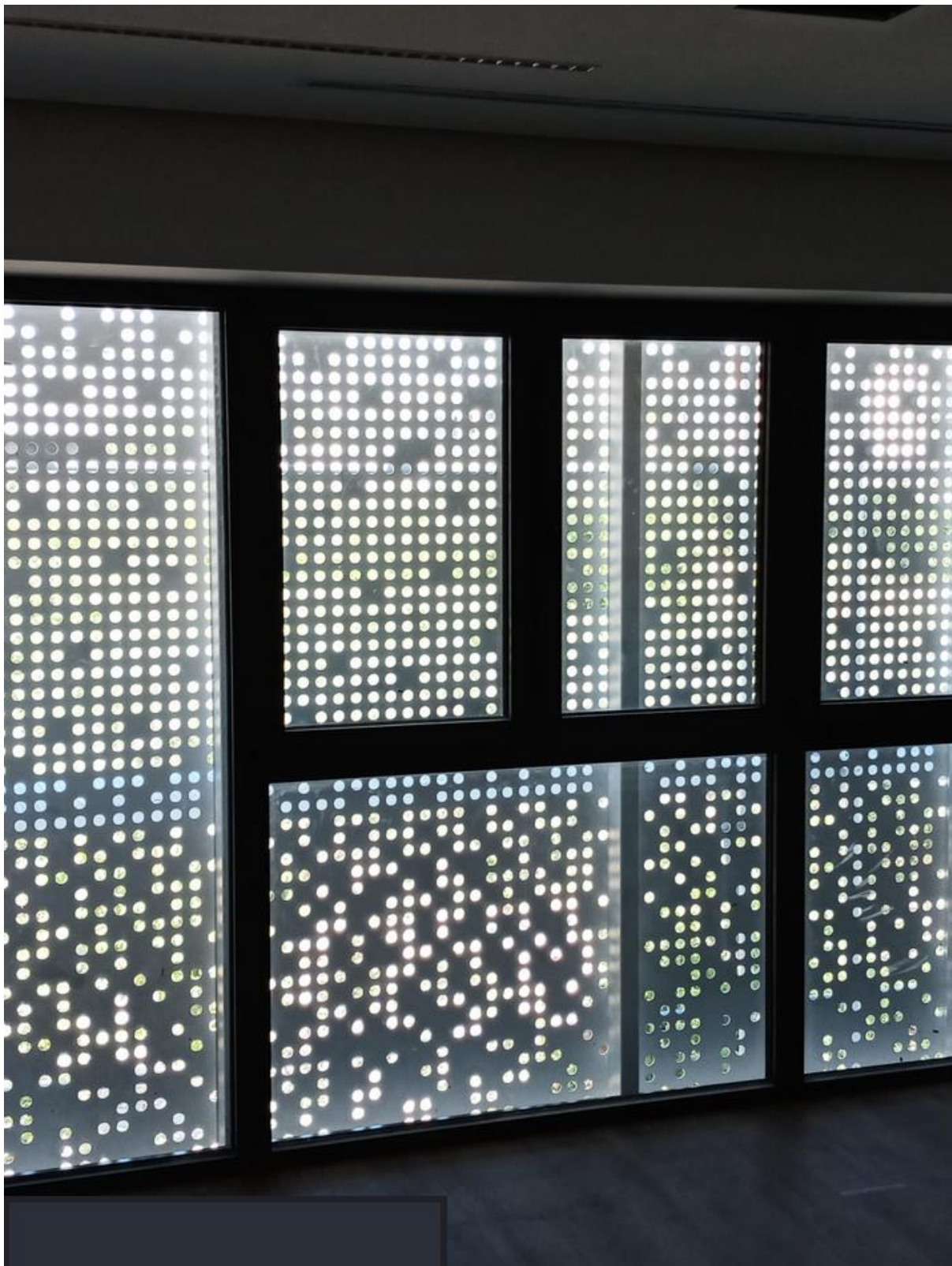
Slika 7.5 - Spoj lima i potkonstrukcije

7.2. Konačno izvedeno rješenje



Slika 7.6 - Pogled na objekt s aluminijskom oblogom

Slika 7.6 prikazuje aluminijsku oblogu montiranu na vertikalne nosače. Na slici se također mogu vidjeti i ugrađene fiksne svjetiljke koje će objektu davati estetski dojam.



Slika 7.7 - Pogled na oblogu iz prostorije objekta



Slika 7.8 - Pogled na objekt sa osvijetljenom potkonstrukcijom noću #1



Slika 7.9 - Pogled na objekt sa osvijetljenom potkonstrukcijom noću #2

8. Zaključak

U radu je potvrđen pravilan izbor konstrukcije prema kriterijima nosivosti, krutosti i minimalne mase, odnosno potvrđena je prednost razrađenog koncepta potkonstrukcije u odnosu na originalni koncept dan od strane investitora. S obzirom da je početno stanje bilo predimenzionirano iz dva primarna razloga se ušlo u detaljnu razradu:

1. S aspekta lake konstrukcije cilj je bio smanjiti masu konstrukcije ukoliko i koliko je to moguće te pritom zadržati ili povećati nosivost i krutost.
2. S ekonomskog aspekta cilj je bio uštedjeti na narudžbama nepotrebne količine materijala kao i njihove obrade, montaže itd.

Ti kriteriji su zadovoljeni metodičkim razvojem i konstruiranjem. Povećanjem broja oslonaca na koje se potkonstrukcija spaja na fasadu objekta jednostavno se riješio problem nosivosti i krutosti, pošto se smanjila površina koju preuzima svaki segment nosivog dijela potkonstrukcije. Pravilnim izvođenjem svih koraka u procesu konstruiranja, izračuna sila, dimenzioniranja i izbora materijala progibi uslijed vanjskog opterećenja su ostali slični kao i kod originalnog koncepta, a uz to se ostvarila maksimalna ušteda na masi i cijeni cjelokupne konstrukcije. Iz izračuna je vidljivo da je nakon razrade masa potkonstrukcije gotovo dvostruko manja (masa je smanjena s 12220,6 kg na 6657,9 kg). Dakle, optimizacijom potkonstrukcije zadovoljio se kriterij lake konstrukcije dok je potkonstrukcija pritom zadržala nosivost i krutost, a ostvarena je i ekonomska ušteda pri nabavi i svakom procesu u obradi.

Također, odabirom perforirane obloge prema AHP metodi udovoljilo se zahtjevima investitora, dok je izvođaču omogućena sigurna i pouzdana izvedba. Potvrđeno je pravilo funkcionalnog dizajna.

Literatura

- [1] »Civil Today,« [Mrežno]. Available: <https://civiltoday.com/structural-engineering/75-what-is-structural-design>.
- [2] »PASSAGE Technology,« [Mrežno]. Available: <https://www.passagetechnology.com/what-is-the-analytic-hierarchy-process>.
- [3] B. Ramezanpour, E. S. Pronker, J. H. C. M. Kreijtz, A. D. Osterhaus i E. Claassen, »Vaccine,« 2015.
- [4] »Revoledu,« [Mrežno]. Available: <https://people.revoledu.com/kardi/tutorial/AHP/Paired-Comparison.htm>.
- [5] B. Thibadeau, »Prioritizing project risks using AHP. Paper presented at PMI® Global Congress 2007—North America, Atlanta, GA. Newtown Square, PA: Project Management Institute.,« 2007.
- [6] A. R. Karimi, N. Mehrdadi, S. J. Hashemian, G. R. N. Bidhendi i R. T. Moghaddam, »Bioline International,« [Mrežno]. Available: <http://www.bioline.org.br/request?st11025>.
- [7] »SpringerLink,« [Mrežno]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-020-05356-0>.
- [8] N. Turčić, H. Vukić i D. Andrić, »Sveučilište u Zagrebu - Arhitektonski fakultet,« [Mrežno]. Available: <https://www.arhitekt.hr/files/radovi/privitak/289/Nosive%20konstrukcije%20II%20-%20Skripta%20za%20vježbe.pdf>.
- [9] »Državni hidrometeorološki zavod,« [Mrežno]. Available: <https://meteo.hr/index.php>.
- [10] T. Seppelt, »Wikipedia,« [Mrežno]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Density>.
- [11] I. Kraus, »Priručnik s tablicama i izrazima za proračun djelovanja na konstrukcije,« 2017..

- [12] »MakeItFrom,« [Mrežno]. Available: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.8958-S235J0W-Weathering-Steel>.
- [13] »AZO Materials,« 13 veljača 2018. [Mrežno]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=15176>.
- [14] »Aluminco,« [Mrežno]. Available: https://www.aluminco.com/media/155961/ALUMINIUM-ALLOY-EN-AW-6060_MATERIAL-DATA-SHEET_ALUMINCO.pdf.
- [15] »MakeItFrom,« [Mrežno]. Available: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/6060-T66-Aluminum>.
- [16] »European Aluminium,« [Mrežno]. Available: <https://www.european-aluminium.eu/media/1533/aam-materials-3-designation-system.pdf>.
- [17] A. Ambroziak, M. T. Solarczyk i A. Biegus, »Numerical And Analytical Investigation Of Aluminum Bracket Strengthening,« u *Archives Of Civil Engineering Vol. LXIV*, Creative Commons, 2018.
- [18] »About Mechanics,« [Mrežno]. Available: <https://www.aboutmechanics.com/what-is-metal-cladding.htm>.
- [19] G. manufacturing. [Mrežno]. Available: <https://www.gilcrestmanufacturing.com/news/technical-news/advantages-metal-cladding-panels/>.
- [20] »Mihoković metal solutions,« [Mrežno]. Available: <https://www.mihokovic.hr/plastifikacija118>.
- [21] Zodex. [Mrežno]. Available: <https://www.zodex.rs/en/plastifikacija-metala>.