

OPTIMALNO PROJEKTOVANJE ČELIČNIH KONSTRUKCIJA SKLADIŠTA SA ASPEKTA UTROŠKA ČELIKA

Miroslav T. Bešević¹

Anika Tešanović²

UDK: 624.014.2:691.714

Režime: Jedno od najvažnijih pitanja optimalnog projektovanja konstrukcija je izbor kriterijuma optimalnosti. U ovom radu je prikazan kriterijum minimalne cene koštanja, minimalne težine(zapremine), izrade i eksploatacije jedne noseće čelične konstrukcije hale. Analiziran je objekat je pravougaonog oblika u osnovi $42m \times 38m$, visine 20.3, namenjen regalnom skladištu. Optimizacija noseće čelične konstrukcije je obuhvatila tri varijantna dispoziciona rešenja. Analizirano je prvo varijantno rešenje koje predstavlja tri poprečne glavne rešetke raspona 38,0 m, sa kontinualnim rožnjacama u krov i kalkanskom odnosno podužnom sadadnom konstrukcijom. Drugo rešenje je sa jednim odnosno tri unutrašnja stuba, gde su poprečni rešetkasti nosači raspona 19,0 m. Treće varijantno rešenje je koncipirano tako što je postavljen prostorni rešetkasti nosač u sredini hale raspona 38,0 m. Podužni rešetkasti nosači su raspona 19,5 m preko kojih su postavljene rožnjače sa kosnicima. Usvojeno je optimalno rešenje prema uslovu cene koštanja odnosno težine čelične konstrukcije i eksploatacije. Osnovni materijal za čeličnu konstrukciju je Č0361 (S235), koji odgovara SRPS-u C.B0.500 (JUS EN 10025/2003).

Ključne reči: Optimizacija, čelik, proračun, prostorni nosač, rešetkasti nosač, rasponi, rožnjace, stubovi, kalkanska konstrukcija.

1. OSNOVNE POSTAVKE ZADATKA OPTIMALNOG PROJEKTOVANJA KONSTRUKCIJA

Projektovanje konstrukcija je proces u kome se odvija izbor sistema, materijala, oblika, dimenzija, svojstava površina i drugih osobina sa ciljem da se ispune funkcionalni zadaci konstrukcija i zadovolji niz uslova (izvodljivost, čvrstoća, stabilnost, vek trajanja, estetska vrednost, ekonomičnost i dr.). Za svaki uslov korisno je da se unapred odrede racionalne granice u okviru kojih se smatra da je uslov zadovoljen. I uz ovakva ograničenja u projektnom zadatku najčešće se može naći ogroman broj projektnih rešenja koja zadovoljavaju sve uslove u okviru zadatih graničenja. Kod projektovanja na uobičajeni način u konkretnom slučaju se težimaksimalnom ispunjenju zadatih uslova,

¹ Prof.dr. Miroslav T. Bešević, dipl.inž.građ., Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, tel: 554-300, e-mail: miroslav.besovic@gmail.com

² mr Anika Tešanović,, dipl.inž.građ., e-mail: misan.dag@gmail.com

koristeći uglavnom iskustvo i intuiciju, a usvaja se ono rešenje za koje se smatra da je najbolje sa stanovišta najvažnijih uslova. Razlika između traženja najboljeg rešenja na uobičajeni način i matematički definisanog optimalnog projektovanja je u tome što je optimizacija kod optimalnog projektovanja egzaktan proces i to se optimalno rešenje određuje iz skupa svih rešenja koja ispunjavaju sve uslove na osnovu kriterijuma optimizacije. Optimalno projektovanje građevinskih konstrukcija je složen proces 2S, vezan sa rešavanjem kompleksa različitih pitanja, od kojih i osnovni:

- formulisanje kriterijuma optimalnosti, koji uzima u obzir potrebu za ekonomičnošću, tehnologiji izrade, transporta, montaže, pouzdanosti, dugovečnosti;
- formulisanje celog kompleksa ograničenja parametara konstrukcija, koji treba da obezbede rad bez zastoja, mogućnost neprekidne proizvodnje;
- proračun stvarnog obima troškova u etapama izrade konstrukcija, pri gradnji i eksploataciji;
- proračun stvarnih uslova rada na konstrukciji u periodu izgradnje, maksimalno približavanje računskog modela fizičkom;
- razrada plana ili sistema planova za izbor varijanata koje obezbeđuju brzi, i što je najglavnije dovoljno tačno pronalaženje optimalne varijante;
- razrada opštег plana delovanja projektanta, koji bi mu omogućio da koordinira rešenja niza pitanja i dobije optimalnu konstrukciju.

Ova pitanja se moraju rešavati obavezno sa evidencijom specifičnih osobina materijala. Posmatraćemo opštu strategiju optimalnog projektovanja konstrukcija i ukazaćemo na osnovne puteve ekonomije materijalnih resura. Oblast dopustivih rešenja konstrukcije određen je sa tri grupe uslova:

$$g(x) \leq \{g\} \quad (1)$$

$$f(x) \leq \{f\} \quad (2)$$

$$\psi(x) \leq \{\psi\} \quad (3)$$

gde je x skup parametara koji određuju konstrukciju. Grupa uslova (1) izaziva ograničenja apsolutnih rashoda materijalnih resursa-građevinskih materijala, radnih i energetskih troškova. Zato se određuju zavisnosti, koje vezuju obime potrošnih resursa sa parametrima konstrukcije x . Određeno dopušteno značenje $\{g\}$ rashoda resursa, moraju određivati planski organi sa evidencijom opšte ekonomske konjukture u zemlji. Pri odsustvu takvih planskih pokazatelja, projektant može da ih odredi samostalno, orijentujući se na postojeće, relativno bolje konstrukcije koje su analogne. Grupa uslova (2) je potreba za pouzdanošću konstrukcija. Grupa uslova (3) uključuje razne tehničke, konstruktivne i arhitektonske potrebe, koje su predstavljene parametrima konstrukcije, naročito ograničenja pojedinih dimenzija konstrukcije, vrste materijala itd. Uslovi (1) – (3) predstavljaju granicu oblasti dopustivih rešenja. U toj oblasti svako rešenje je ostvarljivo, jer nije vezano sa prekoračenjem rashoda. Takođe realizacija bilo kog od dopustivih rešenja je vezana sa nejednakim troškovima novčanih sredstava. Očigledno, glavno je rešenje koje zahteva minimum troškova. Da bismo dobili takvo rešenje treba formirati funkciju $\phi_k(x)$ koja povezuje sumu troškova konstrukcije sa parametrima x , i iz brojnih mogućnosti, naći takav skup parametara x^* , pri kom

$$\phi_k(x^*) \quad \text{min.} \quad \rightarrow$$

Pri takvoj šemi projekcije, parametri kojima se upravlja su, pre svega veličine $\{g\}, \{f\}, \{\psi\}$, a takođe pri datoј kombinaciji parametri x. Uslovi (1), s jedne strane, i uslovi (2), (3), sa druge, su protivrečni. Ako smanjimo $\{g\}$, oblast dopustivih rešenja će se postepeno ograničavati odozgo, lokalizujući oblast istraživanja. Ograničenja $\{f\}$ u normama (propisima) su čvrsto fiksirana.

Zna se da minimumu $\phi_k(x)$ odgovaraju rešenja koja leže na granici dopustive oblasti, pri čemu položaj tačke optimuma zavisi, kako od vrste funkcije $\phi_k(x)$, tako i od vrste ograničavajućih uslova. Zato, za pronađenje optimalnog rešenja x^* , minimiziranog $\phi_k(x)$ u dopustivoj oblasti, moguća je primena samo onih šema istraživanja, pri kojim, u procesu analize varijanti posmatramo istovremeno funkcije $\phi_k(x)$ i ograničavajuće uslove.

1.1. Kriterijum optimalnosti konstrukcije

Jedno od najvažnijih pitanja optimalnih projektovanja konstrukcija je izbor kriterijuma optimalnosti. Formulisanje kriterijuma optimalnosti je veoma složen problem i zahteva duboko poznavanje problema koji se obrađuje. Rešenja zadataka sa neosnovanim kriterijumom optimalnosti nemaju praktičan značaj. Razmotrimo nekoliko rasprostranjenih kriterijuma optimalnosti u projektovanju optimalnih konstrukcija.

- Minimum težine (zapremine). Ovaj kriterijum je u nekim slučajevima (na primer, za konstrukcije letilica, viseće sisteme od užadi, kapacitet dizalica za montiranje elemenata, itd) opravдан i ima smisla, jer smanjenjem težine skoro uvek se nadoknađuju troškovi komplikovanije izrade. Dosta sličan ovom kriterijumu po smislu je kriterijum minimuma potencijalne energije, mada se uvek ne postiže potpuno poklapanje ova dva kriterijuma, što ne čini kriterijum minimuma potencijalne energije opravdanim u svim slučajevima u kojima se primenjuje.
- Minimum cene koštanja, izrade i eksploatacije. Ovo je najkompleksniji kriterijum koji, pored parametara konstrukcije, omogućuje uzimanje u obzir i izbor tehnologije građenja, veličine serije kod industrijske gradnje, troškova eksploatacije i održavanja i čisto ekonomskih faktora koji su tesno povezani sa mehaničkim karakteristikama konstrukcije (na primer uložene investicije).

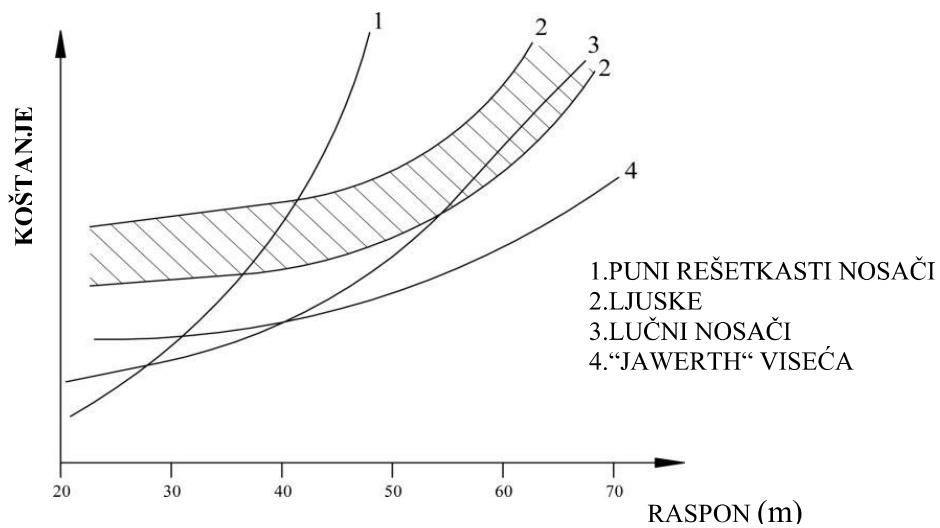
1.2. Ekonomski principi projektovanja konstrukcija od čelika

Ekonomično projektovanje, tj. istraživanje optimalnih konstruktivnih rešenja, zasniva se na dubokom poznavanju tehnologije izrade konstrukcija, primene materijala i odgovarajućih metoda proračunavanja i konstruisanja. Pri ekonomičnom projektovanju konstrukcija sadržani su sledeći principi:

- izbor najcelishodnije i najekonomičnije konstrukcije,
- celishodan izbor i ekonomično korišćenje materijala,
- tipizacija i unifikacija konstrukcija.

Kod projektovanja konstrukcija treba izabrati ekonomičan oblik i veličinu poprečnog preseka elementa, odrediti ekonomičnu veličinu raspona konstruktivnih elemenata i usaglasiti ih sa zahtevima unifikacije i eksploatacije i izabrati odgovarajuće kvalitete materijala.

Sam izbor materijala je zavisan od proizvodne baze materijalnih rezervi i vrste i namene konstrukcije. Tipizacija konstrukcija i unifikacija elemenata je osnovni princip industrijskog građenja, tako što velike serije omogućuju specijalizaciju pogona i linija, efektivno korišćenje opreme i kalupa, što veoma povećava produktivnost rada i smanjuje troškove proizvodnje. Projektovanje konstrukcija klasičnim metodama gde je najveći značaj imalo lično iskustvo inženjera-projektanta, njegova intuicija i vrlo često usvajanje "jakog" rešenja, neminovno dovodi do odstupanja, od optimalnih rešenja, što u savremenim uslovima može dovesti do značajnih ekonomskih gubitaka. U zavisnosti od vrste konstrukcije određuje se izbor metode tehničko-ekonomske ocene, tj. analize. Za raznorodne konstrukcije primenjuje se varijantna metoda. U tom slučaju konstrukcije koje se upoređuju projektuju se do određenog stepena, neophodnog za izračunavanje odgovarajućih tehnico-ekonomskih pokazatelia. Preim秉tvo ove metode je mogućnost kvalitativne i kvantitativne analize svih osnovnih faktora koji određuju ekonomičnost konstrukcije, a veliki nedostatak što je potrebno više vremena i rada za projektovanje, kao i ograničenost dobijenih rezultata na dati problem, koji se ne mogu uopštiti. Zadnjih godina varijantna metoda se primenjuje bez izrade crteža i planova, u čisto računskom obliku, korišćenjem elektronskih računara. Navedeni nedostaci varijantne metode i potreba za prikazivanje opšte zakonitosti u ekonomici konstrukcija doveli su do razvoja analitičke metode. Ovom metodom uspostavlja se, u analitičkom obliku, funkcionalna zavisnost između parametara konstrukcije i pokazatelja optimalnosti - zadatak I vrste i na osnovu tih zavisnosti nalaze optimalne vrednosti tih parametara - zadatak II vrste. Postoji mogućnost primene obe metode u mešovitom obliku. Indikacije o koštanju različitih krovnih konstrukcija - punih i rešetkastih nosača, lučnih nosača i visećih konstrukcija sistema "Jawerth" ukazuju na ekonomska preim秉tva visećih "Jawerth" - konstrukcija pri rasponima L=40m (vidi sl.1).



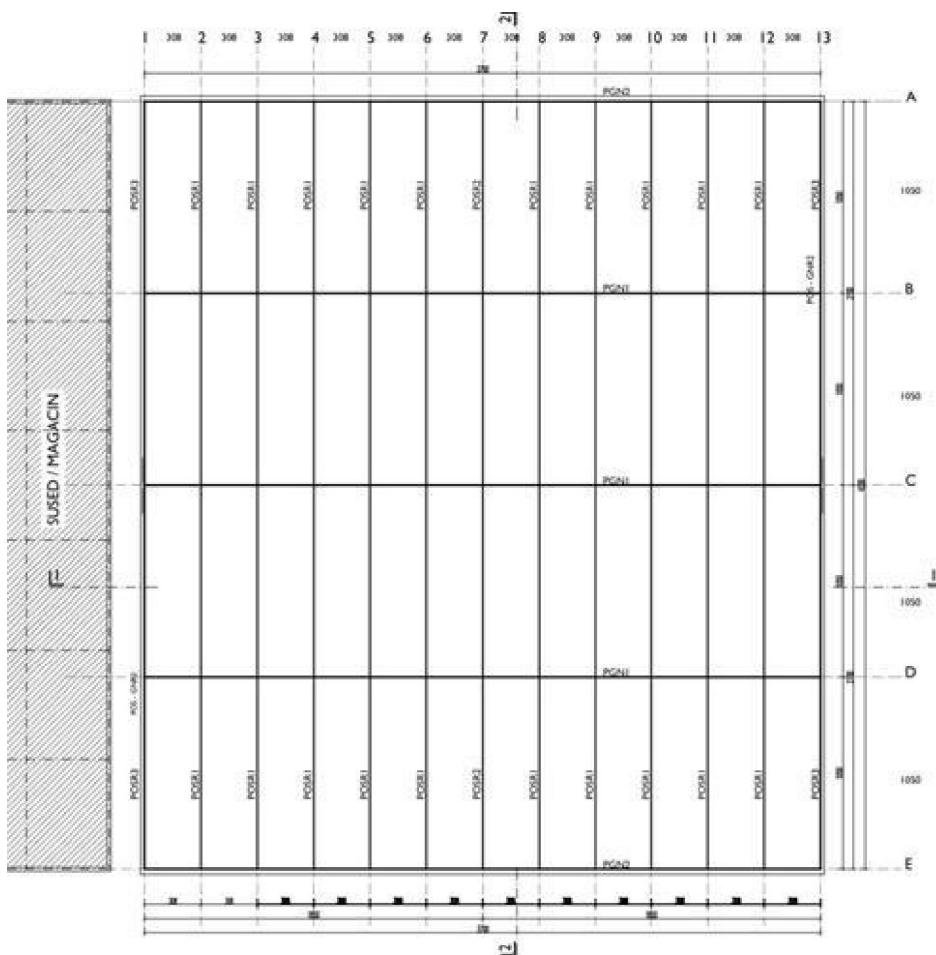
Slika 1. Uporedjivanje koštanja za različite krovne konstrukcije

2. OPTIMALNO PROJEKTOVANJE ČELIČNE KONSTRUKCIJE HALE – REGALNO SKLADIŠTE

2.1. Varijanta bez stubova-linijski statički sistem

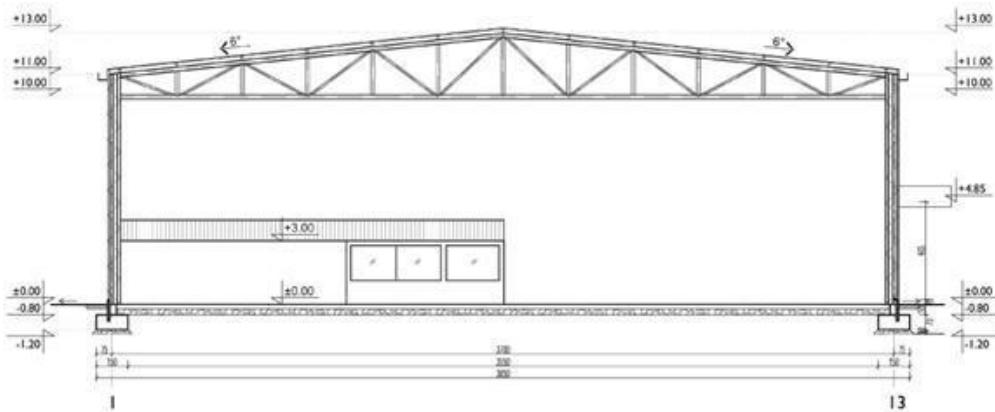
Regalno skladište je isprojektovano u vidu čelične noseće konstrukcije, koja je gabarita u osnovi 42x38 m, visine na vencu 9,50 m, a na slemenu 13,0m. Fasadni kao i kalkanski zidovi su u kombinaciji glavnih i sekundarnih nosećih stubova i poprečno postavljenih rigli. Fasadna obloga je u vidu čeličnih sendvič protivpožarnih panela. Krovni pokrivač je takođe od čeličnih sendvič panela debljine d=10 cm. Krovni pokrivač se vezuje oslanjaju na rožnjače.

Krovna konstrukcija se stabilizuje postavljanjem krovnih poprečnih i podužnih spregova, a uticaji na rožnjače od opterećenja upravno na nju se smanjuju postavljanjem zatega. U krovnoj ravni su postavljene kupole koje su u funkciji osvetljaja i ventilacije objekta prirodnim putem.



Slika 2. dispoziciono rešenje skladišta varijante 1

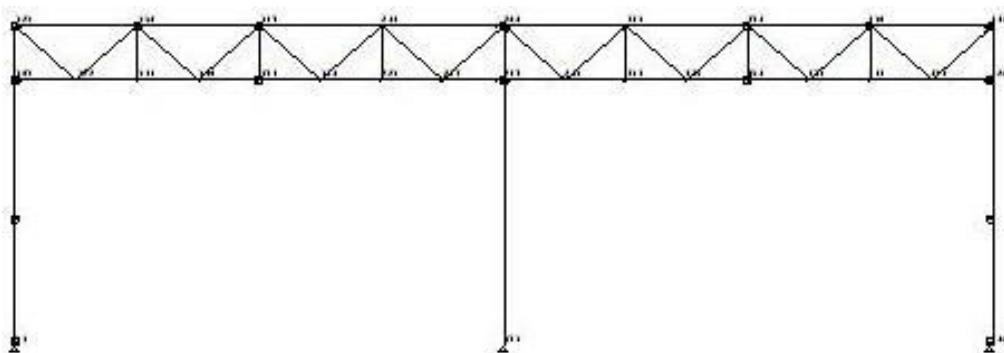
U centralnom magacinskom prostoru je industrijski pod. Industrijski pod regalnog skladišta je izведен u vidu armirane ploče na nasipu, armirana mrešastom armaturom i mikro čeličnih iglica. Debljina industrijske ploče je usvojena $d=18$ cm. Radi određivanja utroška čeličnog materijala za izradu noseće konstrukcije regalnog skladišta, izvršeno je varijantno porojeektovanje. Prva varijanta je dispoziciono rešena u vidu poprečnih glavnih rešetkastih nosača na rasponu $L=38$ m, rastojanju $l=10.50$ m. Kalkanska konstrukcija je projektovana u bondruku stubova i rigli, kao i vertikalnim spregovima za stabilizaciju. Na slikama br. 2 je data osnova sa glavnim pozicijama, a na sl. 3 je dat poprečni presek glavnog nosećeg rama. Utrošak čeličnog materijala iznosio je 40kg/m^2 osnove hale.



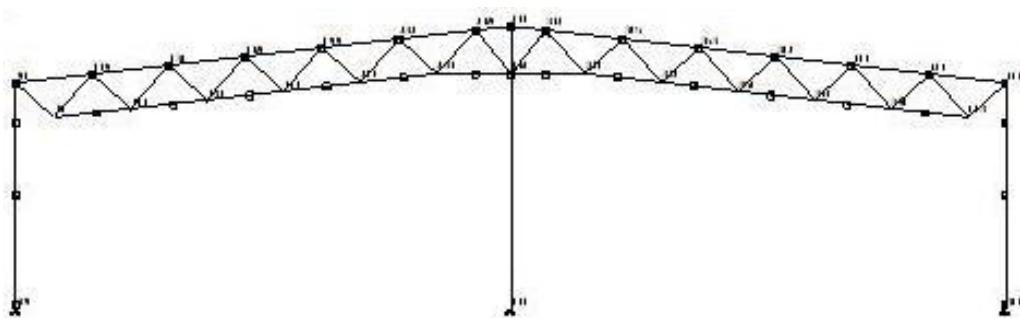
Slika 3. Glavni noseći poprečni sistem varijante 1

2.2. Varijanta sa stubom u sredini hale regalnog skladišta

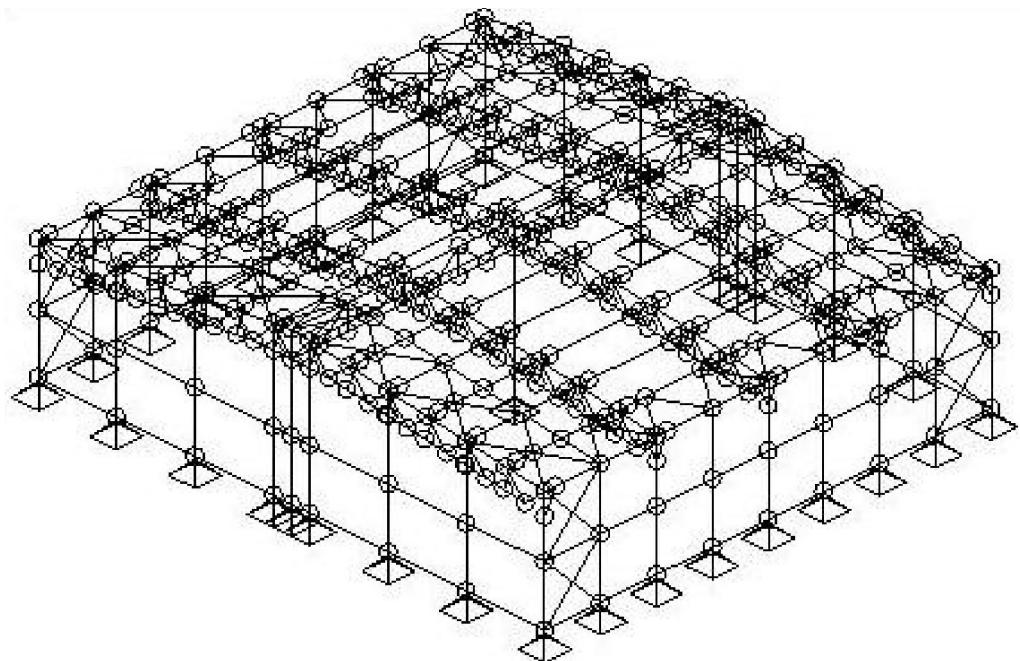
Varijantno rešenje dispozicije je tako odabранo da u hali postoji jedan centralni stub. U sredini hale se postavljaju dve rešetkaste podvlake raspona $L=19.0\text{m}$, a glavni rešetkasti krovni nosači se postavljaju upravno na njih, tako da prate nagi krovne ravni ka podužnim zidovima. Preko ovih rešetkastih nosača postavljaju se rožnjače statičkog sistema kontinualnog nosača. Na sl. 4,5 i 6 dat je konstrukcijski pregled. Utrošak čelika je $g=36.3\text{kg/m}^2$.



Slika 4. Središnja konstrukcija-poprečne podvlake



Slika 5. Podužni krovne rešetkasti nosači

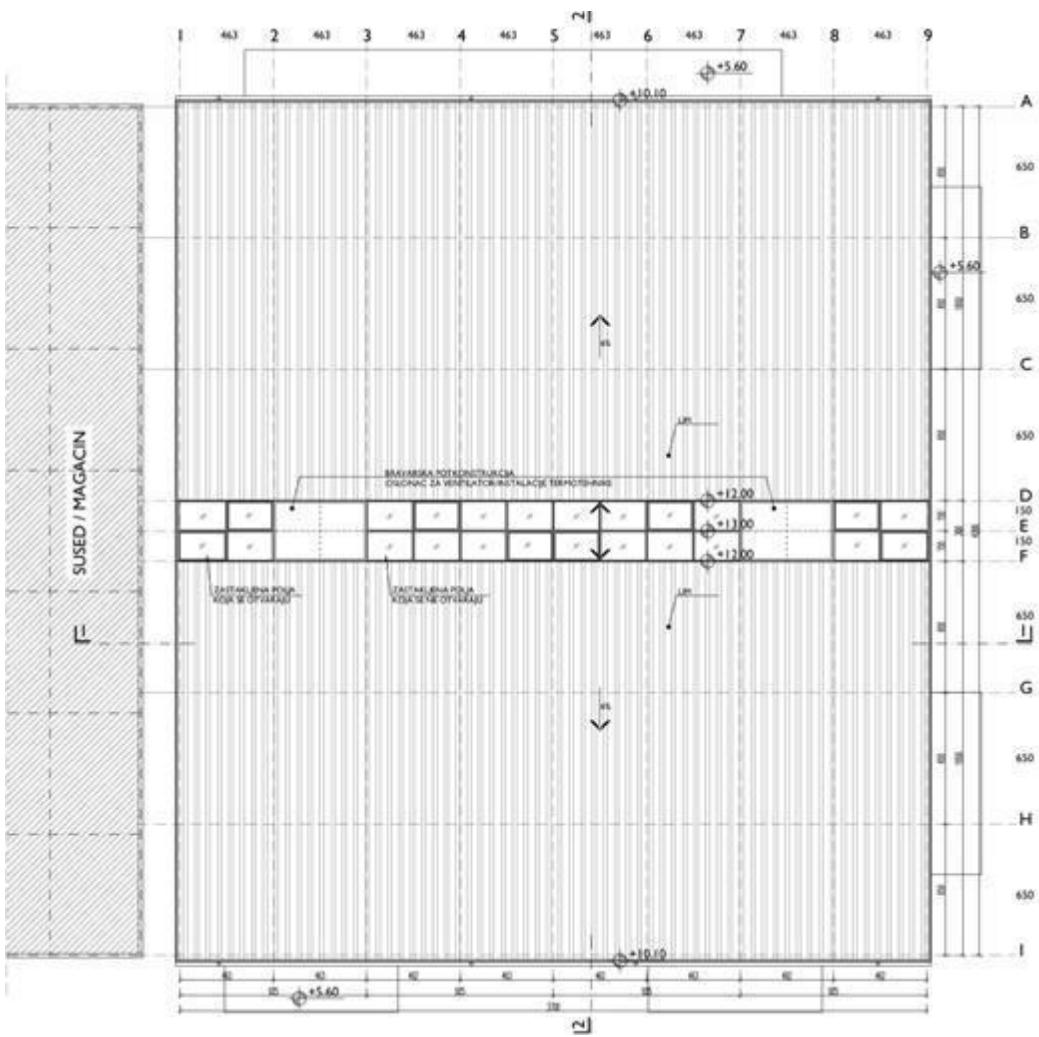


Slika 6. Izometrija noseće konstrukcije hale

2.3. Varijanta u vidu poprečnog prostornog rešetkastog rama

Zbog nepoznate namene skladišta usvojeno je rešenje bez unutrašnjih stubova. Glavna noseća konstrukcija je u vidu poprečnog prostornog rešetkastog rama, zgloboano oslonjenog na armirano betonske temelje. U fasadnim ravnima se nalaze stubovi i međustubovi izrađeni od gotovih IP profila.

Stabilnost objekta je ostvarena postavljanjem vertikalnih spregova u kalkanskim i podužnim zidovima hale, dok se u krovnoj ravni nalaze poprečni odnosno podužni krovni spregovi. Na slici 7 se daje dispozicija krovne ravni.

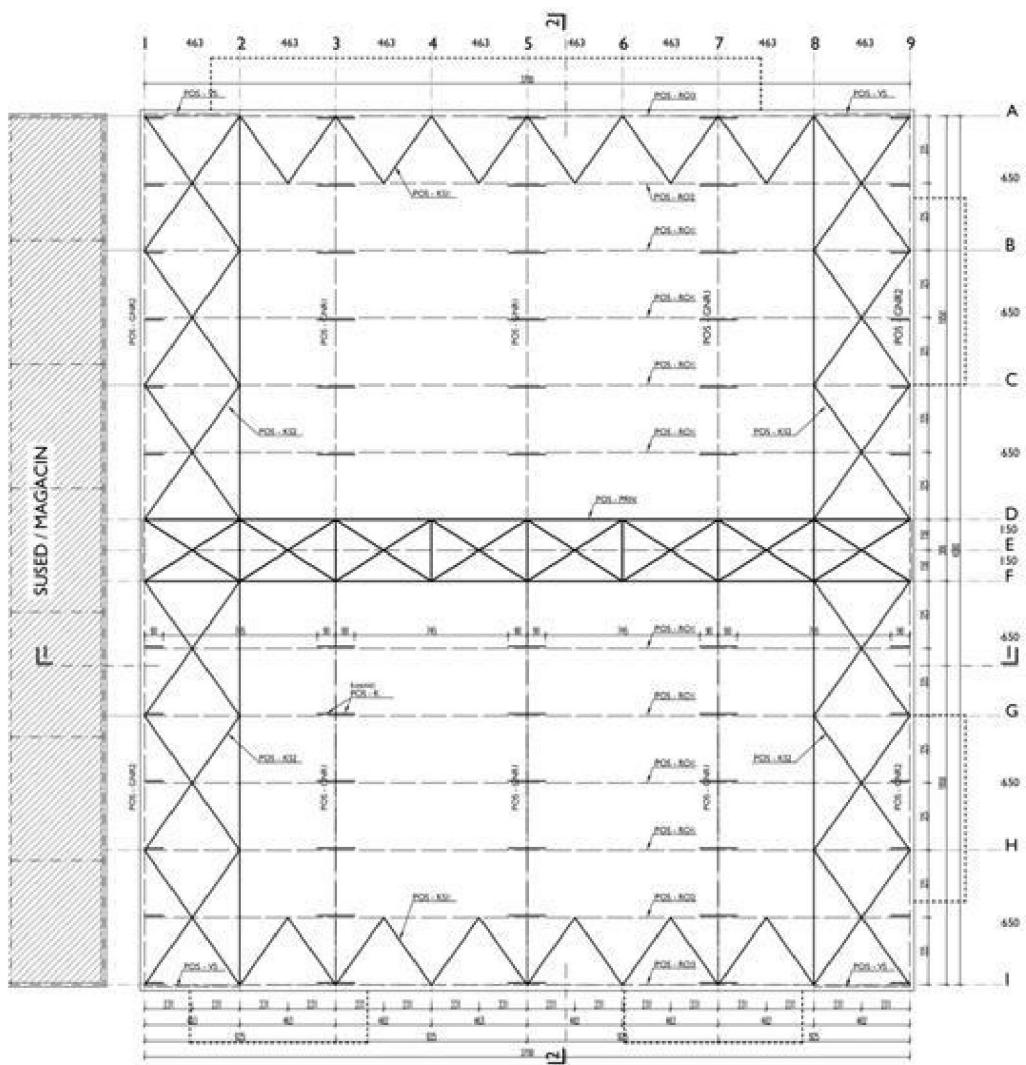


Slika 7. Osnova krova varijante 3

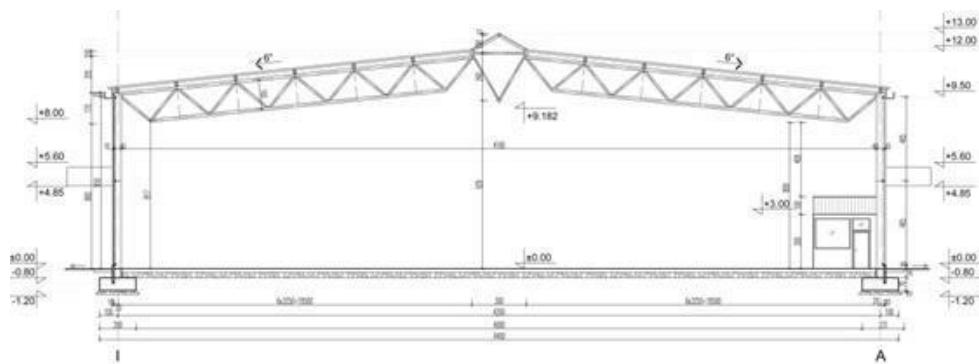
Prostorni rešetkasti dvozglobni ram omogućava da se sa ventralnog dela krova može osvetljavati hala prirodnim osvetljajem, a takođe je predviđena i ventilacija. Dispoziciono je rešen tako da se na gornji pojaz oslanjaju podužni rešetkasti nosači, preko kojih su oslonjene rožnjače sa kosnicima kao optimalno rešenje. Stabilnost krovne ravni je osigurana krovnim poprečnim odnosno podužnim spregom, kao i prostornom poprečnim nosačem.

Na sledećoj slici br.8 je data dispozicija konstrukcije, a na sl 9 poprečni presek.

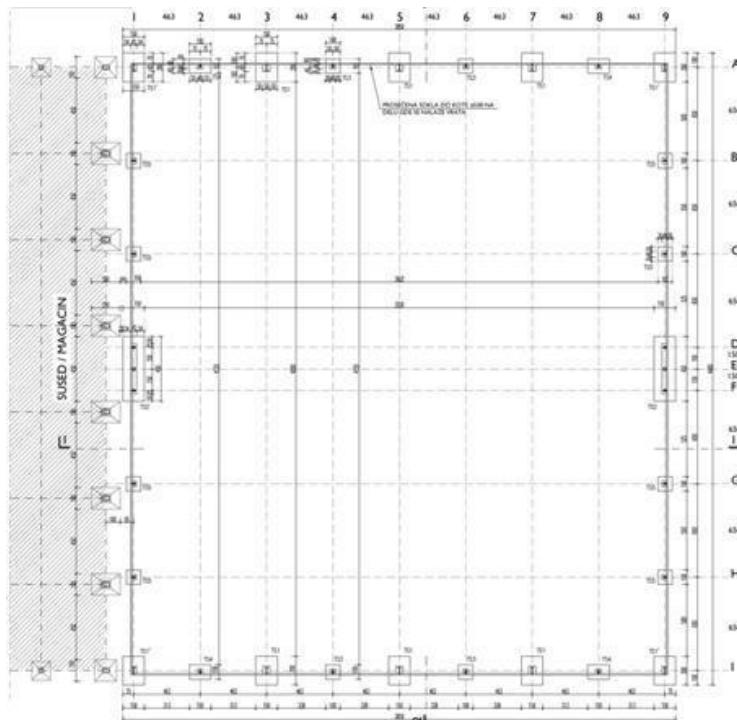
Utrošak čeličnog materijale za ovaku dispoziciju po m² osnove iznosi g=37.4kg/m².



Slika 8. Dispoziciono rešenje varijante 3

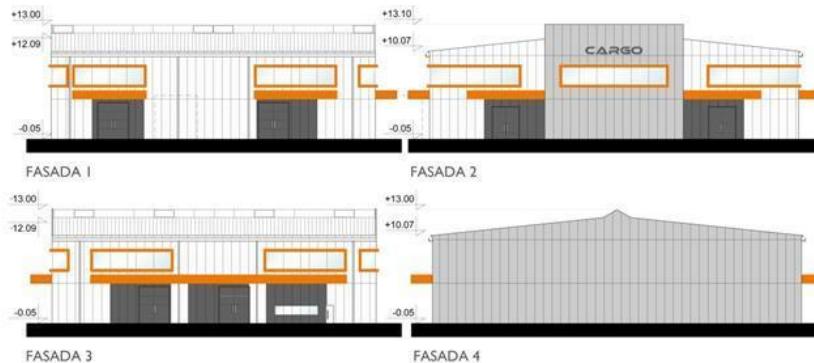


Slika 9. Poprečni presek (poduzni rešetkasti nosači) varijante 3



Slika 10. Osnova temelja hale varijante 3

Sprovedena je analiza utroška čelika ako bi kalkanska poklopna greda bila od toplovaljanih profila. U tom slučaju se utrošak čeličnog materijala za konstrukciju po m^2 osnove bi iznosio $g=42.0kg/m^2$, slika br.11.



Slika 11. Fasade hale varijante 3 za regalno skladište.

3. ZAKLJUČAK

Prikazan je kriterijum minimalne cene koštanja, minimalne težine(zapremine), izrade i eksploatacije jedne noseće čelične konstrukcije hale. Analiziran je objekat je pravougaonog oblika u osnovi $42m \times 38m$, visine 20.3, namenjen regalnom skladištu.

Analizirane su tri varijante dispozicionih rešenja hala. Za varijantu 1 je utrošak čelika po metru kvadratnom osnove iznosio $g=44\text{kg/m}^2$. Za varijantu sa jednim stubom je najmanji utrošak čelika $g=36.4\text{kg/m}^2$, ali je postavljane regala za skladište ograničeno postojanjem centralnog stuba. Najfleksibilnije rešenje je varijanta 3. U tom dispozicionom rešenju je postignuta fleksibilnost faznog postavljanja regala. Utrošak čelika iznosi $g=37.4\text{ kg/m}^2$ osnove hale. Ukoliko bi se kalkanska rešetkasta konstrukcija zamenila punom poklopnom gredom, tada bi utrošak čelikase povećao i iznosio bi $g_1=42.0\text{kg/m}^2$.

LITERATURA

- [1] Bešević, M.: "Optimizacija visećih konstrukcija od čelika", magistarski rad, **1985**. Univerzitet u Beogradu ,Građevinski fakultet.
- [2] Bešević, M.: Primer optimizacije visećih konstrukcija od čelika, VII-KONGRESSDGKJ, Cavtat: VII- KONGRES SDGKJ, **1987**, str. 61- 64, UDK: knjiga T1,
- [3] Lađinović, Đ., Folić, R.: Analiza uticaja teorije drugog reda pri dejstvu zemljotresa, Materijali i konstrukcije, vol. 46, br. 1-2, str. 5-15, **2003**.
- [4] Trifković, M., Bešević, M., Nestorović, Ž.: "Geodetic measurements methods for halfstructural aluminium facades according to life cycle phases "Mateijali i konstrukcije/IV- **2010**, str. 28-38.

OPTIMAL DESIGN OF WAREHOUSE STEEL STRUCTURES WITH STEEL COSTS AS A MAIN CRITERIA

Summery: One of the most important factors for economical design solutions is carefully choose of optimality criterion. This paper presents minimum cost and minimal weight (volume) as a criteria for building and exploitation of a steel structure hall. We analyzed high-shelf warehouse with dimensions: 42m x 38m and height 20.3m. Analysis of steel structures for the most economical design included three different variant solutions. In the first solution three main steel trusses with span 38m with continuous roof beams and gable as well as longitudinal facade construction. The second solution have one or three interior columns with transverse lattice girders, span 19.00m. The third solution is designed with 38.0m span space frame in the middle of the hall. Over longitudinal lattice girders, span 19.50 m, are steel roof beams with struts. Final solution was adopted according to the optimal steel cost and weight of the structure as well as price of exploitation. The base material for the steel structure is Č0361 (S235), appropriate according to SRPS C.B0.500 (JUSEN 10025/2003).

Key words: Optimization, steel, structural analysis, spaceframe, lattice girders, span, roof, beams, columns, gable structures.