

Primljen / Received: 6.9.2024.

Ispravljen / Corrected: 21.11.2024.

Prihvaćen / Accepted: 25.11.2024.

Dostupno online / Available online: 10.12.2024.

# Specifičnosti projektiranja i izvedbe čeličnih prostornih konstrukcija tipa MERO

## Autori:



<sup>1</sup>Lovro Novinc, mag.ing.aedif.  
lovro@max-ing.hr



<sup>2</sup>Prof.dr.sc. Davor Skejić  
davor.skejic@grad.unizg.hr  
Autor za korespondenciju



<sup>1</sup>Želimir Frančišković, dipl.ing.građ.  
zelimir@max-ing.hr



<sup>1</sup>Gordana Vujnović, dipl.ing.građ.  
goga@max-ing.hr



<sup>1</sup>Slaven Novinc, dipl.ing.građ.  
slaven@max-ing.hr

<sup>1</sup> MAX-ING d.o.o., Zagreb

<sup>2</sup> Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet

Stručni rad

[Lovro Novinc](#), [Davor Skejić](#), [Želimir Frančišković](#), [Gordana Vujnović](#), [Slaven Novinc](#)

## Specifičnosti projektiranja i izvedbe čeličnih prostornih konstrukcija tipa MERO

U ovom radu predstavljen je specifičan tip čeličnih prostornih konstrukcijskih sustava čiji su vijčani spojevi izvedeni u sustavu tipa MERO. Dane su značajke koncepta samog sustava te su detaljno opisane njegove komponente, principi i specifičnosti projektiranja, način transporta i specifične metode montaže. Naposljetku, deskriptivni dio rada popraćen je primjerima izvedenih građevina za koje su navedene specifičnosti projektiranja i izvedbe. Prednosti opisanih rješenja tipa MERO istaknute su u zaključku rada.

### Ključne riječi:

čelik, projektiranje, prostorni sustav tipa MERO, mala težina, jednostavan transport, brza montaža

Professional paper

[Lovro Novinc](#), [Davor Skejić](#), [Želimir Frančišković](#), [Gordana Vujnović](#), [Slaven Novinc](#)

## Special features of design and execution of MERO type spatial structures

This paper presents a specific type of steel spatial structural systems whose bolted connections are realised in the MERO system. The features of the concept of the system itself are given and its components, design principles and peculiarities, transport method and specific assembly methods are described in detail. Finally, the descriptive part of the work is accompanied by examples of constructed buildings, for which the particularities of design and execution are given. The advantages of the MERO type solutions described are emphasised in the conclusion of the paper.

### Key words:

steel, design, MERO type spatial systems, lightweight, simple transportation, fast assembly

## 1. Uvod

Razvoj prostornih konstrukcija u svijetu proširio je slobodu arhitektonskog izričaja u koncepciji modernih građevina te je omogućio realizaciju mnogih geometrijski zahtjevnih konstrukcija. Na slici 1. prikazana je jedna takva iznimno nepravilna i razvedena prostorna konstrukcija ovojnice građevine. Vidljivo je kako je potrebno osigurati priključenje velikog broja elemenata u velikome broju čvorova. U svaki čvor spojeno je više konstrukcijskih elemenata i ti se elementi nalaze u trodimenzionalnome prostoru, što dovodi do komplikacija u mehanizmu prijenosa sila [1] i samoj izvedbi [2]. Iz potrebe za učinkovitim i pouzdanim prostornim priključcima razvijeni su mnogi tipovi konstrukcijskih sustava, prema izvoru [1], čak njih više od 250. Neki od poznatijih sustava su UNISTRUT, NODUS, Space deck, Triodetic, a samim time i MERO.



Slika 1. Kulturni centar Baku, Azerbajdžan [3]

MERO sustav jedno je takvo rješenje izvedbe prostornih rešetki, gdje su cijevni elementi rešetke vijčano spojeni u čvornu kuglu s navojnim rupama. Originalno se koristio za ravne dvoslojne rešetke kod kojih se mogao ostvariti velik broj štapova istih duljina i tipova čvorova, što je vrlo pogodno za serijsku proizvodnju. Danas je zbog raznolikih geometrija pristup prebačen na standardizirano nanošenje pokrova i fasade, zbog čega se teži kreaciji ujednačenih površina za pokrov [4]. Prilagodljivost svim geometrijama čini sustav MERO pogodnim za mnoge građevine poput tržnica, sportskih dvorana, aerodroma, nadstrešnica, industrijskih hala i mnogih drugih.

Prednost tog sustava pri prijenosu sila u čvoru jest činjenica da osi svih elemenata prolaze kroz centar čvora, čime se eliminiraju ekscentriciteti, odnosno posljedični momenti savijanja u čvorovima [5]. Također, veličina svakoga cijevnog elementa prilagođena je njegovu opsegu opterećenja i time dolazi do izražaja optimiranje težine konstrukcije.

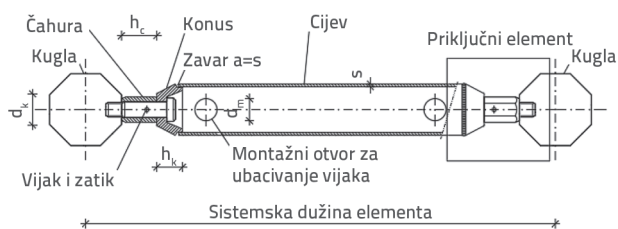
S druge strane, posljedica brojnih vijčanih veza jest određena podatljivost čvorova koja se mora uzeti u obzir pri analizi [6]. Zbog dodatnog smanjenja visine konstrukcije u praksi se javlja i proširenje MERO sustava na modificirani sustav pod nazivom MERO+ sustav. Njegovo je svojstvo zamjena dijela ili cijeloga gornjeg pojasa klasičnim profilima koji imaju ulogu podrošnice, čime iščezava potreba za dodatnom sekundarnom konstrukcijom za prihvata pokrova [7].

Projektiranje tih konstrukcija vezano je uz dostupnost lokalne proizvodnje samih komponenti MERO sustava. Gašenjem određenih proizvodnih pogona koji su se bavili proizvodnjom takvih komponenti smanjila se i učestalost projektiranja takvih konstrukcija. U ovome radu žele se prikazati osnovne značajke i principi sustava tipa MERO koje su zadnjih godina zapostavljene. U radu je objašnjen koncept MERO sustava te je ukratko opisana procedura projektiranja. Na kraju su uz metode montaže predstavljeni primjeri izvedenih prostornih konstrukcija tipa MERO.

## 2. Koncept MERO sustava

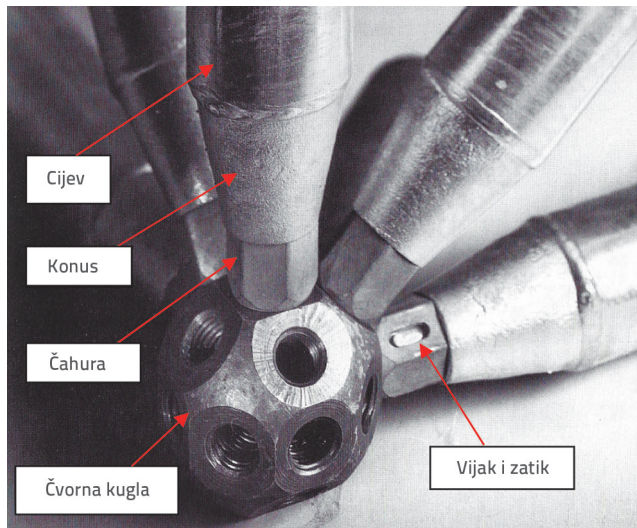
### 2.1. Općenito

Srž tehnologije MERO sustava nalazi se u čeličnim dijelovima koji tvore čvorove prostorne rešetke, a to su cijev, konus, vijak i zatik, čahura i čvorna kugla. Kratica "MERO" predstavlja "Mengerlinghausen Rohrbaueise" (Mengerlinghausenove cijevne konstrukcije) [8]. Osnovni element MERO rešetke jest cijev s dva konusa i dvije čahure u kojima se nalazi vijak sa zaticom. Konusi se zavaruju na cijevi koje se zatim pocinčavaju. Nakon pocinčavanja vijak se kroz montažnu rupu u cijevi unosi u konus i na njega se montira čahura koja je povezana s vijkom pomoću zatika [8]. Potom se cijeli sklop montira na čvornu kuglu okretanjem čahure pomoću ključa. Shema navedenog elementa može se vidjeti na slici 2., gdje je  $d_m$  promjer montažnog otvora,  $s$  debljina stijenke,  $h_c$  visina čahure,  $h_k$  visina konusa, a  $d_k$  promjer donje baze konusa.



Slika 2. Osnovni MERO element i njegove komponente

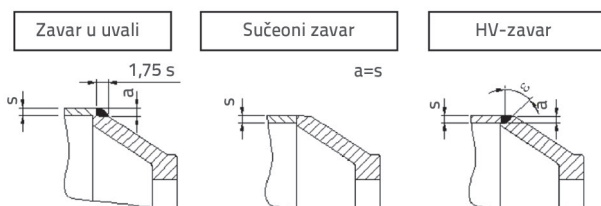
MERO sustav nije normiran, već za njega postoji tehničko dopuštenje [9] u kojemu su definirane specifičnosti, od dimenzioniranja do kontrole kvalitete i montaže. Karakterističan čvor sa svim komponentama MERO sustava prikazan je na slici 3. U nastavku su opisane pojedinačne komponente MERO sustava.



Slika 3. Komponente MERO sustava – prikaz karakterističnog čvora [8]

## 2.2. Cijev s konusnim krajevima

Prema tehničkom dopuštenju [9], cijevi za MERO konstrukcije proizvode se od čelika S235 i S355. Vitkost cijevi ograničava se na maksimalno 150. Odstupanje je, prema [10], dopušteno samo za promjere štapova 42,4 mm (maks. vitkost 200), 60,3 mm (maks. vitkost 185) i 76,1 mm (maks. vitkost 170). Zahtjev za žilavost cijevi nije strogo propisan tehničkim dopuštanjem. Na njih se zavaruju konusi s čijim se osima mora podudarati centrala os cijevi. Konusi se proizvode od čelika S235J2 i S355J2 [9]. Oni su zavareni na cijevi i s njima tvore jednu nerazdvojnu cjelinu. Na slici 4. prikazane su moguće varijante tipova zavora između konusa i cijevi. Ako se radi o debljini stijenke cijevi do 5,6 mm, primjenjuje se zavar u uvali. Za veće debljine stijenke upotrebljavaju se sučeoni zavari i HV zavari [10].

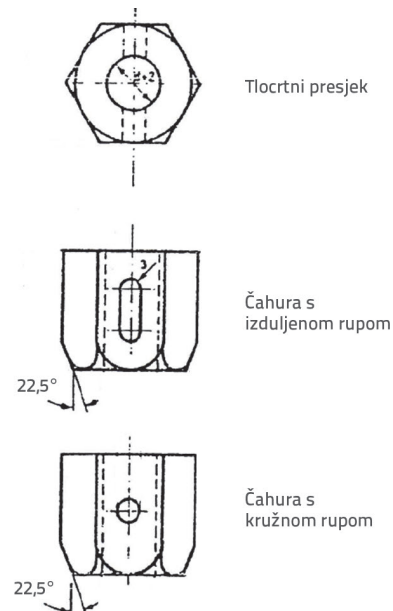


Slika 4. Vrste zavora između konusa i cijevi [9]

Cijev s konusnim završecima mora biti odgovarajuće zaštićena od korozije. Najčešća metoda antikorozivne zaštite jest vruće pocinčavanje, a u slučaju dekorativnih MERO elemenata, koji su općenito manji profili, može se primijeniti eloksiranje [8]. Pocinčavanje je u ovome slučaju povoljno jer je unutrašnjost cijevi, zbog montažnih otvora, izložena riziku korozije te nanošenje isključivo vanjskog premaza nije opcija.

## 2.3. Čahura

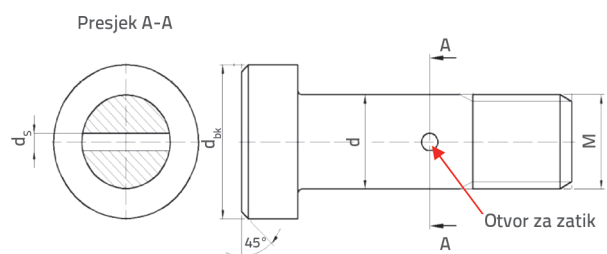
Čahura je komponenta koja obavija vijak i služi kao posrednički element pomoću kojega se vijak zavija u spoj. Proizvodi se od čelika S355 i na nju se također primjenjuje antikorozivna zaštita vrućim pocinčavanjem [9]. Na slici 5. prikazana je šesterokutna čahura s izduljenim otvorom i kružnim otvorom za zatik. Varijanta s izduljenim otvorom vrijedi za vijke do M20 [10]. Manja baza čahure zaglađena je po rubovima i orijentirana prema čvornome elementu, tj. kugli. Otvor ključa kojim se zavija čahura mora biti 1,2 puta veći od promjera tijela vijka koji kroz nju prolazi [9].



Slika 5. Varijante šesterokutnih čahura [10]

## 2.4. Vijak i zatik

Vijak je kod ovog tipa konstrukcije osnovno vezno sredstvo u čvorovima. Na slici 6. može se vidjeti shematski prikaz tipičnog vijka, gdje su  $d_s$  promjer rupe zatika,  $d_{bk}$  promjer glave vijka,  $d$  promjer tijela vijka, a  $M$  promjer navoja. Sve dimenzije vijka definirane su tehničkim dopuštanjem [9].



Slika 6. Shematski prikaz vijka [9]

Na tijelu vijka jest otvor za zatik koji prolazi kroz tijelo vijka. Zatik je mali cilindrični klin kojim se povezuju vijak i čahura. Njegovi

se promjeri kreću u rasponu od 4 mm do 8,1 mm, ovisno o promjeru vijka, a dužina mu je jednaka promjeru čahure.

Minimalni vijak koji se smije upotrebljavati jest M12. Maksimalna veličina vijka ograničava se na M90. Tehničko dopuštenje propisuje i pravilo vezano uz stupnjevanje različitih promjera vijaka koje glasi da nazivni promjer navoja vijka mora biti manji od promjera jezgre sljedećeg vijka. Zbog toga se u konstrukciji ne mogu pojaviti sljedeće kombinacije vijaka: 24 + 27, 27 + 30, 30 + 33, 33 + 36, 48 + 52 i 52 + 56 [9]. Za većinu elemenata opterećenih na vlak vijak predstavlja najslabiju komponentu.

## 2.5. Kugla

Kugle su čvorni elementi MERO sustava kojima se povezuju cijevni elementi. Većina kugli se, prema [9], proizvodi od toplinski obradivog čelika C45 (nelegirani ugljični čelik), čiji je sastav definiran normom [11], iz kojeg se vruće prešaju i normaliziraju ili kale. Ako je negdje potrebno ostvariti zavareni spoj s kuglom, ona se proizvodi od čelika S355J2 koji je pogodniji za zavarivanje, ali je s takvim čelikom vijčani spoj nešto slabiji nego s čelikom C45. Primjer toga bio bi detalj ležajne kugle kod koje se može javiti potreba za zavarivanjem dodatnih limova.

Oko rupa za vijke potrebno je predvidjeti određena zaravnjanja površine koja se zovu plošna mjesta i koja moraju biti izvedena radi odgovarajućega kontakta čahure i kugle. Navoji unutar kugle moraju biti metrički prema ISO normama [12, 13], a dubine navoja i uvrtnja vijaka propisane su tehničkim dopuštanjem [9]. S jednom kuglom dopušteno je ostvariti ukupno 18 spojeva cijevnih elemenata, a unutar jedne ravnine smije ih biti osam [9]. Veličine kugli kreću se od veličina vanjskog promjera od 50 mm do 500 mm, odnosno od 0,5 kg do 500 kg s gledišta mase.

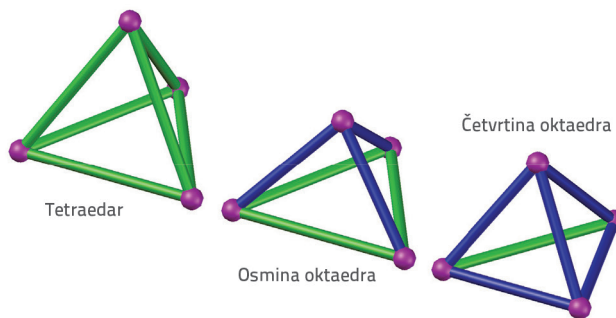
Na kugli moguće je predvidjeti dodatne konstruktivne rupe. Tako se u čvorovima gornjeg pojasa može pojaviti rupa u koju će se montirati ležaj nosača pokrova. S druge strane, u čvorovima donjeg pojasa javlja se potreba za vješanjem razne opreme s donje strane, a s gornje se strane kod rešetki većih visina može predvidjeti revizijska staza čiji se ležaji montiraju u kuglu. Za taj slučaj može se probušiti dodatna rupa kroz cijelu kuglu.

Tablica 1. Tipički elementi MERO sustava (izvadak iz kataloga elemenata [14])

Tip	Cijev	Čelik	Vijak	Čahura	Priključna nosivost [kN]	
					Vlak	Tlak
D3	60,3 x 2,9	S235	M20 5.6	30/22	49,2	82,8
F3	76,1 x 2,9	S235	M20 8.8	30/22	104,9	105,6
G3	88,9 x 3,2	S235	M20 8.8	30/22	104,9	116,0
G5	88,9 x 4,5	S235	M20 10.9	36/22	131,1	189,0
H3	108,0 x 3,6	S355	M20L* 8.8	41/22	104,9	265,0
H3A	108,0 x 3,6	S355	M27 10.9	41/29	265,0	234,2
K3	127,0 x 4,0	S355	M20L* 8.8	41/22	104,9	327,9

## 3. Specifičnosti projektiranja

Prostorne rešetkaste konstrukcije sačinjene od komponenti tipa MERO idejno prate trend ponavljajućih pravilnih prostornih modula u svojoj kompoziciji. Time se postiže ujednačenost duljina pojedinih elemenata rešetke, čime se pospješuje efektivnost tvorničke proizvodnje elemenata rešetke. Osnovna geometrijska tijela koja čine povoljne prostorne module jesu tetraedar, osmina oktaedra i četvrtina oktaedra [8], a prikazana su na slici 7. (elementi istih boja imaju iste duljine).



Slika 7. Osnovni prostorni moduli [8]

Uz kompozicijski dobivene ujednačenosti duljine pojedinih elemenata javlja se i potreba za relativnom ujednačenosti poprečnih presjeka, odnosno tipova elemenata. S obzirom na to da je jedan od osnovnih principa MERO sustava učinkovita industrijska proizvodnja, za potrebe različitih redova veličine opterećenja razvijen je katalog cijevnih elemenata s već definiranim geometrijskim veličinama komponenti. Zbog opsežnosti kataloga samo je izvadak prikazan u tablici 1. Ranije spomenuti termin "tip elementa" odnosi se na kategoriju "tip" iz tablice 1. koji predstavlja skup specifičnih dimenzija komponenti elemenata okupljenih pod jedinstvenim komercijalnim nazivom, npr. tip D3. Vijci sa slovom "L" u oznaci (u tablici 1. označeni su \*) u odnosu na druge vijke imaju nešto veću duljinu koja je potrebna zbog debljine dna konusa.

Priključne nosivosti navedene u tablici jesu proračunske vrijednosti. Vrijednost parcijalnoga koeficijenta kojim je podijeljena pojedina svojstvena vrijednost nosivosti ovisi o prirodi te otpornosti. Sama otpornost MERO elementa može se prikazati kroz analogiju najslabije karike u lancu, gdje su "karike" pojedini segmenti elementa (cijev, konus, čahura, vijak). Najmanja vrijednost otpornosti među segmentima predstavlja priključnu nosivost elementa u cijelosti. Na taj način, ako je vlačna otpornost vijaka najmanja otpornost među segmentima, primijenjen je parcijalni koeficijent  $g_{M2}$  za vijčane spojeve.

Princip takvog pristupa s već definiranim katalogom jest taj da se prije dimenzioniranja konstrukcije oformi lista tipova elemenata od kojih će se kreirati konstrukcija za specifični projekt. Ovisno o rasponu unutarnjih sila, lista elemenata uobičajeno ima između 10 i 20 tipova elemenata. Na taj način pokriven je relativno širok raspon unutarnjih sila i konstrukcija se može optimizirati odgovarajućom veličinom elementa u svakome svom dijelu. Predugačka izborna lista rezultira velikim brojem različitih tipova cijevnih elemenata od kojih je svaki napravljen zasebnom strojnom obradom te time isplativost konstrukcije znatno pada. Prekratkom izbornom listom ne može se obuhvatiti veći spektar unutarnjih sila i konstrukcija time nije optimizirana te postaje ekonomski neisplativa. Takva mogućnost slaganja izborne liste može rezultirati i naknadnim mijenjanjem njezinih komponenti ako se proračunom pokaže da je neki tip elementa neiskorišten ili pak listom nije obuhvaćen dovoljno velik interval nosivosti.

Potrebno je napomenuti kako se svi spojevi u rešetkastoj konstrukciji smatraju zglobnima i svi cijevni elementi dimenzioniraju se na uzdužnu vlačnu i/ili tlačnu silu [9]. Iznimku čini vertikalno montažno opterećenje od 1,0 kN (karakteristična vrijednost) u sredini raspona cijevnog elementa koje vrijedi za sve cijevne elemente s nagibom manjim od 30° u odnosu na horizontalu [9]. Time se simulira opterećenje montažera konstrukcije. Sva ostala nametnuta opterećenja potrebno je koncentrirati u čvorove prostorne rešetke.

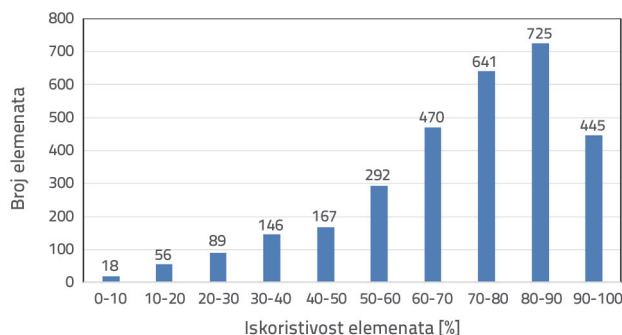
U skladu s navedenim, koncept dimenzioniranja može se sažeti u nekoliko koraka:

- odabir poprečnih presjeka elemenata
- analiza konstrukcije – proračun unutarnjih sila i progiba
- dimenzioniranje elemenata
- odabir optimalnih poprečnih presjeka
- vrednovanje rezultata.

Radi se o iterativnome procesu u kojemu se nakon provedbe četvrtoga koraka ponavlja prvi korak, što čini jednu iteraciju analize/dimenzioniranja. Nakon svake iteracije bilježi se postotak elemenata kojima je promijenjen poprečni presjek. Kraj iteracija nazire se kada je taj postotak razumno malen i kada je veličina poprečnih presjeka konvergirala ka nekoj konstantnoj veličini. U tome slučaju prelazi se na peti korak u kojemu se interpretiraju rezultati iterativnog proračuna. Razmatra se prilagođenost odabrane liste konstrukcijskih elemenata te se, ako je to potrebno, lista korigira i proračun obavlja nanovo.

Na slici 8. prikazan je primjer histograma iskoristivosti elemenata

povoljno dimenzionirane konstrukcije. Vidljivo je kako se najveći broj elemenata nalazi u području visoke iskoristivosti, a sve manji broj prema području male iskoristivosti. To je rezultat dobre usklađenosti liste tipskih elemenata s konstrukcijom. Tek kada je svaki cijevni element dimenzioniran, može se pristupiti određivanju veličina kugli u svakome čvoru. I kugle se, kao i cijevni elementi, odabiru iz kataloga komercijalno dostupnih kugli, ali veličina svake kugle ovisi isključivo o geometrijskim uvjetima čvorova. Ne smije doći do međusobnog sudaranja susjednih štapova u čvoru ni do kontakta vijaka unutar kugle, a to se postiže primjerenim promjerom kugle.



Slika 8. Primjer histograma iskoristivosti jednog tipa elemenata na kraju proračuna [7]

S obzirom na velik broj vijčanih spojeva, kod tih je konstrukcija prisutna određena podatljivost čvorova zbog koje se javljaju pomaci veći od onih dobivenih linearnom analizom. Dosadašnje analize mjerenja na stvarnim konstrukcijama i virtualne analize na modelima pokazuju da se dobre procjene progiba kod konstrukcija tipa MERO sustava mogu dobiti sa smanjenim modulom elastičnosti čelika i s početnim pomakom [6]. Početna deformacija procjenjuje se na 10 % ukupnog progiba iz kombinacije graničnog stanja uporabivosti koja daje najveću vrijednost progiba, a smanjeni modul elastičnosti s 85 % vrijednosti modula elastičnosti čelika [6]. Ako navedene aproksimacije ne daju zadovoljavajuće rezultate, potrebno je provesti analizu po teoriji 2. reda.

#### 4. Specifičnosti izvedbe

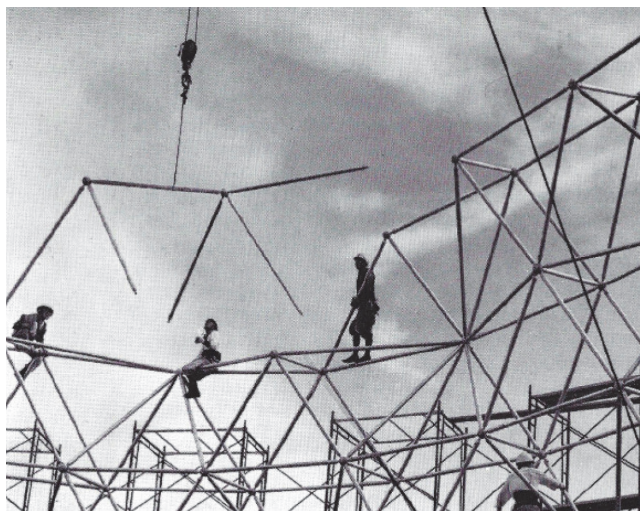
Transport MERO konstrukcije olakšavaju dvije činjenice. Prva je da su MERO konstrukcije općenito jako lagane konstrukcije i time se mogu ostvariti uštede u cijeni transporta. Druga je važna činjenica da se MERO konstrukcija okrupnjuje na gradilištu, a na gradilište se doprema u osnovnim komponentama. Komponente mogu biti pakirane u kutije, na palete ili u kontejnere i tako se do lokacije dovesti mogu u manje prijevoznih sredstava. Na slici 9. mogu se vidjeti dovezeni MERO elementi koji su spremni za ugradnju. Načini montaže MERO konstrukcija mogu se ugrubo podijeliti na četiri metode.

Prema prvoj metodi slobodne konzolne gradnje konstrukcija se postupno gradi od temelja prema gore u svoj konačni oblik. Postupno se montira element po element ili manji

sklop jedan za drugim. Takav tip montaže omogućuje podizanje cijelih konstrukcija uz iskusne montere i dizalicu, bez ikakve druge pomoći. Kod većih konstrukcija oformljuje se više skupina montera, najčešće po tri radnika u skupini [8]. Dodatni pomoćni radnici montiraju sklopove elemenata na tlu koji se zatim dižu kranom na mjesto ugradnje, gdje ih skupine montera ugrađuju u predviđene pozicije. Na slici 10. prikazan je takav tip gradnje.



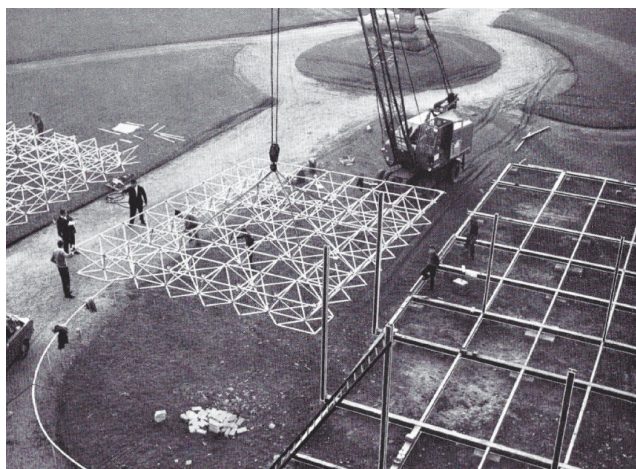
Slika 9. MERO elementi privremeno skladišteni na gradilištu



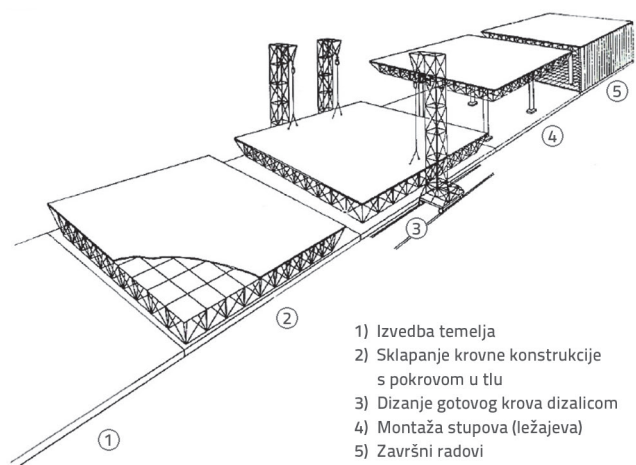
Slika 10. Slobodni konzolni način montaže [8]

Druga je metoda montaža konstrukcije na tlu koja se zatim podiže na mjesto ugradnje pomoću dizalice ili sličnog stroja. S obzirom na to da se konstrukcija sklapa na tlu, moguće je predvidjeti puno više radne snage za montažu. Na taj je način olakšan i pregled spojenih elemenata. To stvara predispoziciju za brzu montažu konstrukcije i raniji završetak radova. Primjer takve metode prikazan je na slici 11.

Treća metoda montaže jest segmentna montaža statički neovisnih krovišta velike površine. Na slici 12. prikazan je njezin redoslijed operacija. Praktičnost te metode sadržana je u mogućnosti izvođenja radova na konstrukciji građevine ispod gotovoga krova koji štiti radnike od vremenskih nepriključnosti [8].

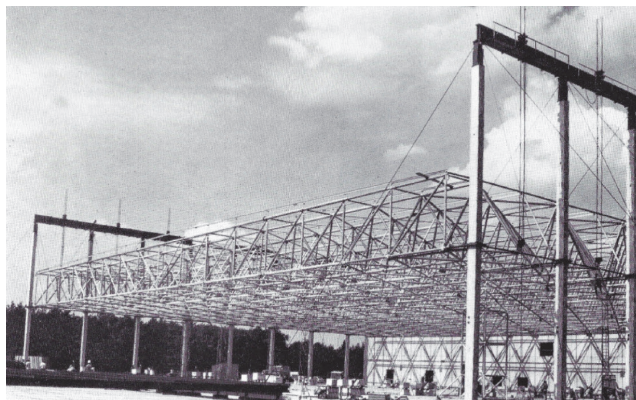


Slika 11. Podizanje gotove konstrukcije dizalicom [8]



Slika 12. Redoslijed operacija segmentne metode montaže [8]

Četvrta je metoda montaža konstrukcije na tlu i njezino uzdizanje na već gotove ležaje koji se nalaze na konturi konstrukcije. Ta metoda, ako je primjenjiva, povoljna je za građevine sportske namjene koji nemaju nikakve ležaje u rasponu i moguće je izravno oslanjanje na rubne ležaje [8]. Takav tip montaže prikazan je na slici 13.

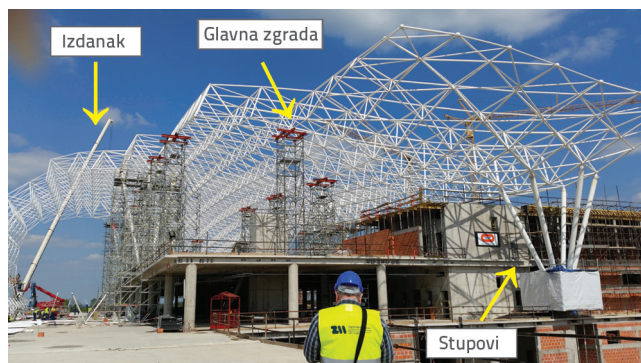


Slika 13. Podizanje gotove konstrukcije na ležaje [8]

## 5. Primjeri izvedenih konstrukcija tipa MERO

### 5.1. Međunarodna zračna luka Franjo Tuđman Zagreb

Novi putnički terminal Međunarodne zračne luke Zagreb (MZLZ) sastoji se od glavne zgrade, dvaju izdanaka, po jednog sa svake strane glavne zgrade, te osam mostova koji se pružaju od glavne zgrade i izdanaka prema uzletno-sletnoj stazi (slike 14. i 15.). Glavni projektanti su arhitekti Branko Kincl i Velimir Neidhardt, dok je glavni projektant konstrukcije Jure Radić. Izvođač čeličnog dijela konstrukcije bila je *Zagreb Montaža*, a glavni izvođač francuska tvrtka *Bouygues International*. Krovšte glavne zgrade i izdanaka izvedeno je u obliku prostorne rešetkaste konstrukcije u prostornome sustavu *Željezare Sisak*, koji je idejni nasljednik MERO sustava na ovim prostorima. Krovšte je istaknuto valovitog oblika te ga zato čini mnoštvo elemenata različitih duljina. Pravi je primjer raznolikosti geometrije i vitkosti kakva se može postići takvim prostornim rešetkama. Sastoji se od ukupno 25.477 cijevnih elemenata, 6119 kugli (čvorova) i 102 stupa. Promjeri cijevnih elemenata kreću se od 88,9 mm do 219,1 mm. Cijevni sklopovi i kugle izrađeni su u Hrvatskoj te svaki štap ima svoj identifikacijski broj, što je vrlo važno zbog nepravilne geometrije u kojoj je važna točnost pozicije svakog elementa. Ukupna površina krovšta iznosi 55.000 m<sup>2</sup> i teži 1400 tona. Time se dobiva plošna težina konstrukcije od 25,5 kg/m<sup>2</sup>, što ju svrstava u vrlo lagane konstrukcije. Montaža konstrukcije krovšta započela je u ožujku 2015. i trajala je nešto kraće od pet mjeseci.



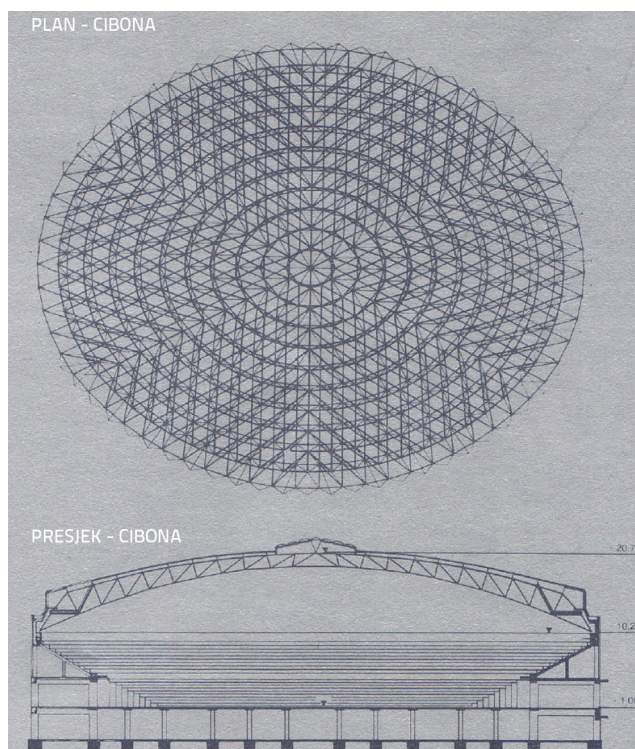
Slika 14. Karakteristični segmenti novoga putničkog terminala MZLZ-a u fazi izgradnje



Slika 15. Prikaz novog terminala MZLZ-a pri kraju radova [15]

### 5.2. Košarkaški centar Dražen Petrović

Košarkaški centar *Dražen Petrović* (KCDP) u Zagrebu višenamjenska je sportska dvorana koju također natkriva prostorna konstrukcija krovšta u sustavu *Željezare Sisak*. Glavni projektanti kompleksa su arhitekti Hrčić, Šerbetić i Piteša, a glavni projektant konstrukcije jest Milutin Anđelić. Glavni izvođač bilo je poduzeće *Vladimir Gortan*, dok je čeličnu konstrukciju krovšta izvodila *Željezara Sisak*. Tlocrtno je ovalnog oblika, s rasponima od 60 m i 74 m, dok statička visina konstrukcije na ležajima iznosi 2,95 m, a u sredini polja 1,8 m. Tlocrt i presjek konstrukcije prikazani su na slici 16. Veće visine konstrukcije na ležajima omogućuju smještaj instalacija u taj prostor. Izgradnja dvorane i pripadnoga poslovnog tornja započela je u veljači 1986., a sama dvorana otvorena je u lipnju 1987. Montaža čelične konstrukcije trajala je dva mjeseca. Kratki rokovi izgradnje i skromna veličina okolnog prostora za smještaj i rad građevinskih strojeva uvjetovali su odabir rješenja konstrukcije krovšta u MERO sustavu zbog fleksibilnih uvjeta montaže i raznolikosti oblika koje može poprimiti.



Slika 16. Tlocrt i presjek dvorane KCDP-a [16]

Specifičnost te konstrukcije upravo je ovalni tlocrtni oblik koji je u vrijeme projektiranja predstavljao vrlo složen zadatak za krojenje mreže rešetke i sam proračun, uzevši u obzir nedostatak modernih programa za proračun konstrukcija. Unatoč otežanim uvjetima izvedbe i projektiranja proizvedeno je vrlo prihvatljivo rješenje. Konstrukcija se sastoji od ukupno 3210 cijevnih elemenata, 793 čvora (kugle) i 66 oslonaca. Veličine cijevnih elemenata variraju od promjera 60,3 mm do 219,1 mm. Ukupna težina konstrukcije

iznosi 135 tona, što na predviđenim rasponima predstavlja plošnu težinu konstrukcije od  $38,7 \text{ kg/m}^2$ . Unutrašnjost dvorane s montiranim krovijem prikazana je na slici 17.



Slika 17. Unutrašnjost dvorane KCDP-a [16]

### 5.3. Gradski stadion Poljud Split

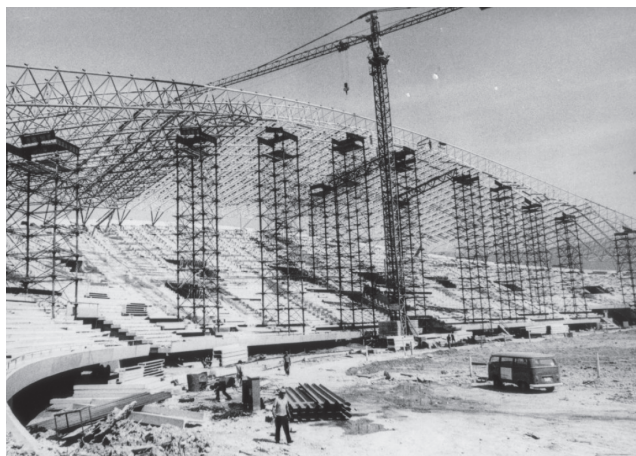
Gradski stadion Poljud glavni je stadion u Splitu i domaći teren nogometnog kluba HNK Hajduk Split (slika 18.). Izgrađen je 1979. za potrebe održavanja 8. Mediteranskih igara. Arhitekturu stadiona potpisuje Boris Magaš, dok je glavni projektant konstrukcije Boženko Jelić iz tvrtke *Lavčević*. Glavni izvođač radova bila je *Hidroelektra*, dok su čelično krovije montirali *Dalmastroj* i *Goša* prema smjernicama tvrtke MERO. Gradnja stadiona počela je 1978. i trajala samo 20 mjeseci, od kojih je samo 3,5 bilo potrebno za montažu čeličnoga krovija tribina. Njegove dvije tribine, istočnu i zapadnu, natkrivaju dvije zrcalno simetrične prostorne MERO rešetke u formi cilindričnih ljuski.



Slika 18. Gradski stadion Poljud Split [17]

Raspon unutrašnjeg luka iznosi 215 m, tlocrtna širina u sredini rešetke 41 m, a statička visina 2,3 m. Krovije se sastoji od ukupno 12.460 cijevnih elemenata, 3460 čvorova (kugli), 28 oslonaca i 28 tipova MERO elemenata. Ukupna površina krovija iznosi približno  $20.000 \text{ m}^2$ , a težina 688 tona, što predstavlja plošnu težinu konstrukcije od  $34,4 \text{ kg/m}^2$ . Mjerenje početnih progiba pri postupnome otpuštanju konstrukcije pri montaži dalo je progibe i dva puta veće od predviđenih analizom

I. reda [18]. Dodatnim ispitivanjima i računskim analizama po teoriji drugog reda utvrđeno je da je razlog povećanja progiba podatljivost čvorova, što se do tada nije uzimalo u obzir. Primjer Poljuda poslužio je kao smjernica za buduće projektiranje takvih konstrukcija, odnosno u obzir se uzimala popustljivost čvorova. Na slici 19. može se vidjeti krovije u trenutku montaže. Prvi toranj teške skele je bio postavljen na sredinu, a na njega je položen inicijalni segment krovija okrupnjen na tlu. On je slobodnom montažom prvo bio povezan sa ležajem nakon čega se ostatak krovija, uz pomoć dodatnih tornjeva teške skele, nastavio okrupnjavati sa svake strane.



Slika 19. Prikaz krovija u trenutku montaže [19], autor HNK Hajduk

### 5.4. Olimpijski bazen Otoka Sarajevo

Olimpijski bazen Otoka natkriveni je gradski bazen u Sarajevu. Koncipiran je kao armiranobetonska konstrukcija s čeličnom prostornom konstrukcijom krovija u prostornome sustavu *Željezare Sisak*. Glavni projektant bio je arhitekt Faruk Kapidžić, a konstrukciju potpisuje inženjer Osman Morankić. Glavni izvođač bila je tvrtka *Unigradnja*, dok je čelično krovije montirao *Metaling*. Izgradnja bazena počela je 2005., a otvoren je 2008. U tome razdoblju izrada i montaža čelične konstrukcije trajala je oko šest mjeseci. Unutrašnjost bazena s pogledom na krovije prikazana je na slici 20.



Slika 20. Unutrašnjost Olimpijskog bazena Otoka Sarajevo [20]



Krovište bazena zamišljeno je kao kupolasta konstrukcija u kojoj su glavna rebra izvedena kao trobojane rešetke koje se spajaju na središnji rešetkasti prsten u kojemu se nalazi revizijska staza i iznad kojeg se nalazi svjetlarnik. Na trobojnim rešetkama i po obodu konstrukcije nalazi se prostorna rešetka na koju se montira pokrov. Na slici 21. prikazan je dio krovišta iz perioda montaže konstrukcije.



Slika 21. Prikaz dijela krovišta iz perioda montaže

Krovište je tlocrtnih dimenzija 63,4 x 44,8 m, a površina iznosi približno 2940 m<sup>2</sup>. Ukupan broj cijevnih elemenata iznosi 2688, a čvorova je 734. Konstrukcija krova oslanja se na betonsku konstrukciju preko osam ležaja. Poprečni presjeci cijevnih elemenata kreću se od promjera 60,3 do 219,1 mm. Ukupna težina krovišta iznosi 174 tone, od čega težina prostorne

konstrukcije iznosi 115 tona. Time plošna težina konstrukcije iznosi 39 kg/m<sup>2</sup>.

## 6. Zaključak

Čelične prostorne konstrukcije tipa MERO relativno su intuitivne konstrukcije za dimenzioniranje. Dimenzioniranje svakoga cijevnog elementa, odnosno odabir njegova optimalnog presjeka s izborne liste predstavlja prednost s gledišta minimiziranja vlastite težine, ali i s gledišta vizualnog praćenja prijenosa unutarnjih sila kroz prostornu rešetku. Gledajući dimenzioniranu rešetku prema veličini odabranih profila, mogu se utvrditi lokacije dominantnih opterećenja i pratiti kako se prenose do ležaja, što omogućuje brzu inženjersku provjeru globalnoga koncepta nosivosti.

Dimenzioniranje takvih konstrukcija otežava nedostatak konkretnih modernih programskih paketa koji bi ga učinili uređenijim i sveobuhvatnijim. Tako se postupak razdvaja na dimenzioniranje elemenata i dimenzioniranje kugli, a oba se provode preko automatiziranih tablica za dimenzioniranje u kombinaciji s programskim paketom iz kojeg se iščitavaju unutarnje sile. Navedene tablice i dodatni, zastarjeli specijalizirani računalni programi nisu komercijalno dostupni pa je i na taj način upotreba MERO sustava ograničena.

Zaključno, MERO konstrukcije se, ako su uvjeti za njihovo projektiranje ostvareni, pokazuju kao vrlo lagane konstrukcije koje unatoč iznimno velikim rasponima zadržavaju svojstvo manje težine u odnosu na ostale konstrukcije. Tamo gdje se težina konstrukcija tipa MERO povećava zbog većeg opterećenja, povećava se i težina drugih konkurentnih konstrukcijskih sustava, no one ne mogu pružiti jednostavnost transporta i montaže te dojam vizualne prostorne prozračnosti kao što to mogu pružiti prostorne konstrukcije tipa MERO sa svojim vrlo vitkim elementima.

## LITERATURA

- [1] Lan, T.T.: Space Frame Structures. CRC Press LLC, 1999.
- [2] Skejić, D.; Alagušić, A.; Hrg, G.; Lokin, M.; Damjanović, D.: Analiza ponašanja čvornog spoja montažne čelične kupole, Građevinar 71 (2019)2. 85-93
- [3] buildpedia.com, Dostupno: <https://buildipedia.com/aec-pros/from-the-job-site/zaha-hadids-heydar-aliyev-cultural-centre-turning-a-vision-into-reality> [Pristupljeno: 08.05.2024.].
- [4] Klimke, H., Sanchez, J.: Design, Analysis and Construction of Space Structures, 2021.
- [5] Kwang, K.J.: Advanced Investigations of Grid Spatial Structures Considering Various Connection Systems, Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen Universität Stuttgart, 2010.
- [6] Frančičković, Ž., Vujnović, G., Bajkovec, I.: Ispitivanja stvarnih konstrukcija i virtualna ispitivanja na modelima, Dani ovlaštenih inženjera građevinarstva, Opatija, 2010, Hrvatska komora inženjera građevinarstva; 2010.
- [7] Novinc, L.: Proračun čelične prostorne konstrukcije izvedene s MERO+ sustavom, Diplomski rad, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski Fakultet, mentor: Davor Skejić, 2024.
- [8] Mengerlinghausen, M.: Komposition im Raum – Raumfachwerke aus Stäben und Knoten, Band 1. Gütersloh: Bauverlag; 1975.
- [9] Technical approval Z-14.4.10 – MERO spatial trusses and their components, German Institute for Construction Technology, 2019. (in German)
- [10] Odobrenje br. 25-406/86. – Odobrenje za prostorni sistem čeličnih konstrukcija MKŽS, Građevinski institut, OOUR Fakultet građevinskih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, 1986.
- [11] HRN EN ISO 683-1:2018, Toplinski obradivi čelici, legirani čelici i čelici za obradu na automatima – 1. dio: Nelegirani čelici za poboljšavanje (ISO 683-1:2016; EN ISO 683-1:2018).
- [12] ISO 261:1998, ISO general purpose metric screw threads – General plan.

- [13] ISO 262:2023, ISO general purpose metric screw threads – Selected sizes for bolts, screws, studs and nuts.
- [14] Interni katalog elemenata MK Željezare Sisak, arhiva MAX-ING d.o.o.
- [15] exyuaviation.com, Dostupno: <https://www.exyuaviation.com/2016/06/photos-zagreb-airport-terminal-nears.html> [Pristupljeno: 20.05.2024.]
- [16] SOUR MK Željezara Sisak: Steel structure spatial system, RZ Marketing, 1988.
- [17] hajduk.hr, Dostupno: <https://hajduk.hr/klub/stadion/posjet> [Pristupljeno: 08.05.2024.].
- [18] Herman, K., Herceg, Lj.: Ispitivanje krovišta i tribina gradskog stadiona u Splitu, 1979.
- [19] tportal.hr, Dostupno: [https://www.tportal.hr/vijesti/clanak/poljudska-ljepotica-nikla-je-na-zemlji-na-kojoj-je-jna-sadila-kupus-otkrivamo-dosad-nepoznat-detalj-o-stadionu-koji-arhitekti-i-danas-uzdizu-u-nebesa-foto-20190921?meta\\_refresh=1](https://www.tportal.hr/vijesti/clanak/poljudska-ljepotica-nikla-je-na-zemlji-na-kojoj-je-jna-sadila-kupus-otkrivamo-dosad-nepoznat-detalj-o-stadionu-koji-arhitekti-i-danas-uzdizu-u-nebesa-foto-20190921?meta_refresh=1) [Pristupljeno: 18.11.2024.].
- [20] klix.ba, Dostupno: <https://www.klix.ba/sport/olimpijski-bazen-otoka-spreman-otvoriti-vrata-na-potezu-su-nadlezni-organi/200515088> [Pristupljeno: 17.05.2024.].