

## PROJEKTIRANJE EKONOMIČNIH ČELIČNIH OKVIRNIH KONSTRUKCIJA

**Davor Skejić**

*Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, docent*

**Sead Jamaković**

*Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, student*

**Sažetak:** Čelične konstrukcije se danas sve više ciljano projektiraju uz primjenu suvremenih pristupa kako bi se dobile što ekonomičnije, a opet „dovoljno“ pouzdane konstrukcije. Postoji niz poznatih pristupa za ekonomično projektiranje čeličnih konstrukcija, a jedan od najvažnijih je koncept djelomično nepopustljivih priključaka. U članku su ukratko prikazane konkretne mjere za projektiranje ekonomičnijih čeličnih konstrukcija, a najveći naglasak je na primjeni suvremenog koncepta djelomično-nepopustljivih priključaka. Navedeni koncept s jedne strane zahtijeva nešto više znanja i vremena kod projektiranja, ali s druge strane omogućuje znatne uštede u materijalu i radu potrebnom za izradu najčešćih čeličnih konstrukcija - okvira. Kako bi se kvantificirala navedena racionalizacija, provedena je usporedba primjene tradicionalnog i suvremenog pristupa na konkretnom primjeru hale s dvozglobnim okvirnim nosivim sustavom. Težište ovog članka je na rezultatima provedenih analiza okvira uz što realniju simulaciju ponašanja priključaka i njihovog utjecaja na ponašanje samog okvira. Očekivano, uz uštedu utroška materijala, najveća ušteda postignuta je upravo u cijeni ljudskog rada, što se i nameće kao jedan od primarnih ciljeva suvremenog projektiranja. Iz prikazanih rezultata jasno je da će projektanti koji žele biti konkurentni morati i teorijski i praktično usvojiti postojeća znanja o suvremenim pristupima koje nude europske norme.

**Ključne riječi:** čelični okvir; suvremeno projektiranje; koncept djelomično-nepopustljivih priključaka; ekonomičnost; ušteda materijala i rada

## DESIGN OF COST-EFFECTIVE STEEL FRAME STRUCTURES

**Abstract:** Nowadays, steel structures are more and more specifically designed with the application of modern approaches in order to obtain cost-effective, yet “sufficiently” reliable structures. Among several existing approaches for a design of the steel structures, which are developed to provide their cost-effectiveness, one of the most important is the concept of semi-rigid joints. Present work summarizes the specific measures related to the design of more economical steel structures, and the priority is given to the usage of a modern concept with the semi-rigid joints. This concept, although on the first hand requires more knowledge and time concerning the design, allows on the other hand considerable savings in the material and labour required to produce the most common steel structures – the steel frames. In order to quantify the above mentioned rationalisation, a comparison between the applications of traditional and modern approach on the particular example of the hall with double hinge frame bearing system is investigated. The focus of this article is upon the results of the frame analysis with a more realistic simulation of the joints behaviour and their influence on the behaviour of the steel frame. As expected, while saving material in usage, the largest saving achieved is just the price of human labour, which is more and more one of the primary goals of modern design. Finally, from the perspective of obtained results it is clearly indicated that the designers, who want to be competitive, must adopt theoretically and practically the existing knowledge about modern approaches offered by the European standards.

**Key words:** steel frame; modern design; semi-rigid joints concept; cost-effective; savings in material and labour

## 1 Uvod

U ovome članku prikazana su suvremena dostignuća o mogućnostima ekonomičnog projektiranja čeličnih okvirnih konstrukcija. Uspoređena je primjena tradicionalnog i suvremenog pristupa projektiranju koji se tek treba afirmirati u praksi.

Razlog razvoja suvremenog pristupa, osim u usavršavanju znanja i tehnologije, leži neizbježno i u ekonomskim čimbenicima. Naime, u zadnjih nekoliko desetljeća u svijetu je došlo do značajnog porasta cijene rada, pri čemu je rasla i cijena materijala, ali s daleko manjim prirastom. To je, logično, dovelo do tendencije za određenim prilagođavanjima i pojednostavljenjima radnog procesa, ali i pojednostavljenjima radno najzahtjevnijih dijelova čelične konstrukcije - priključcima. Pojednostavljenje njihove izrade (smanjenje rada) se čak nametnulo kao veća potreba od postizanja minimalnih troškova utroška materijala.

Zbog spomenute veće cijene ljudskog rada, industrija čeličnih konstrukcija prošla je „točku iza koje nema povratka“ (eng. „point of no return“) u razvoju ekonomičnijih rješenja izrade konstrukcija i njihove montaže [1]. Prije svega, automatizacija je uvedena u sve aspekte proizvodnje konstrukcija:

- cjelokupno projektiranje okvira (računalni programi za analizu i dimenzioniranje po zadanim normama i propisima)
- projektiranje priključaka (suvremene norme i računalni programi)
- razrada radioničkih nacrti (CAD sustavi)
- izrada i montaža (numerički kontrolirani uređaji, roboti za zavarivanje...).

Zbog tog razloga ne začuđuje da je razvoj doveo do preispitivanja nečega što se smatralo optimalnim načinom projektiranja i građenja. To pogotovo vrijedi za priključke, jer oni imaju značajan utjecaj na troškove izrade, a time i na cjelokupne troškove konstrukcije. U nastavku su prikazane neke primjenjive mjere za postizanje veće ekonomičnosti čeličnih konstrukcija, a posebni naglasak je dan na primjenu koncepta djelomično nepopustljivih priključaka kod projektiranja [2].

## 2 Stanje područja istraživanja

### 2.1 Općenito o projektiranju ekonomičnih priključaka

Kako bi se došlo do ekonomski prihvatljivijih rješenja u suvremenom projektiranju čeličnih konstrukcija, puno se radilo na proučavanju ponašanja priključaka i na njihovom poboljšanju, odnosno optimiziranju. Tu je važno imati na umu razliku između pojmova „spoj“ i „priključak“. Spoj se definira kao skup fizikalnih komponenata koje mehanički pričvršćuju elemente koje spajaju, a kada se zajedno razmatraju spoj i odgovarajuća zona međudjelovanja između spojenih konstrukcijskih elemenata, koristi se pojam priključak. Neke od mjera koje su išle u smjeru optimiziranja priključaka odnosile su se, primjerice, na primjenu detalja koji zahtijevaju što je moguće manje zavarivanja na terenu, smanjivanje broja različitih tipova vijaka, smanjivanje broja i veličine (debljine) ukrućenja, itd. Ukratko, te mjere nisu išle samo u smjeru veće ekonomičnosti samog proizvodnog procesa, već i veće ekonomičnosti pri montaži konstrukcije na terenu. Od svih istraživanja na tu temu koja su provedena diljem svijeta proizašla su tri najzanimljivija tipa konkretnih mjera:

- izvođenje spojeva najvećim dijelom u radionici i jednostavnost za manipuliranje njima pri montaži
- primjena prednapetih vijčanih spojeva i druge mogućnosti
- primjena koncepta djelomično nepopustljivih priključaka.

U mnogim zemljama su razvijane smjernice za projektiranje s ciljem olakšanja izrade i montaže priključaka. U većini slučajeva je napravljena razlika u smjernicama za tzv. „jednostavne“ priključke i „momentne“ priključke. Razlika je u tome što se „jednostavni“ priključci mogu razmatrati kao zglobni, tj. da prenose samo poprečnu (i uzdužnu) silu, dok „momentni“ priključci prenose i moment savijanja. „Jednostavni“ priključci su popularniji u praksi pa im je i pridano više pažnje u tim smjernicama. Može se reći da se većina tih smjernica temelji na sljedećim principima [1]:

- preferira se primjena vijčanih montažnih priključaka umjesto zavarenih, jer je ugrađivanje vijaka brže u odnosu na zavarivanje na terenu, ali i vijčana izvedba nije podložna vremenskim utjecajima.

- primjena odgovarajuće pričvršćenih vijaka umjesto prednapetih kod konstrukcija dominantno opterećenih statičkim opterećenjem. Pričvršćivanje i provjeravanje prednapetih vijaka zahtijeva više vremena, a time i više novca.
- standardizacija vijaka (po promjeru i kvaliteti). Standardizacija omogućava skladištenje manje vrsta vijaka, strojevi su odmah produktivniji jer je, npr., potrebno manje vremena za mijenjanje bušilica, odnosno svrdla, može se postići i popust na količinu od proizvođača vijaka, a na kraju je manja i mogućnost ugradnje neodgovarajućih vijaka.
- primjena vijaka s punim navojem. Ako se primjenjuju vijci s punim navojem, može se smanjiti broj vijaka s različitim duljinama, a to podrazumijeva manje različitih vijaka na zalih u radionici i na terenu. Vijci s punim navojem imaju dobra duktilna svojstva i neznatno manju vlačnu čvrstoću u odnosu na vijke s djelomičnim navojem.
- standardizacija limova i profila (po geometrijskim i mehaničkim svojstvima). Time je potrebno na zalih imati manje materijala za limove i profile. Postoji i tendencija da se usvoje čelici više čvrstoće (npr. klasa S460 prema EC 3) kao standard za limove i kutnike. Takav materijal je nešto skuplji od nižih klasa, ali dimenzioniranje će zahtijevati manje debljine što povlači za sobom i manje potrebnog zavarivanja i/ili bušenja.
- racionalizacija geometrije kako bi se poboljšala geometrijska svojstva elemenata. Ispravnim dimenzijama limova, zavara, vijaka i rupa za vijke postiže se duktilno ponašanje priključaka, a uz to otpornost ostaje zadovoljavajuća.
- racionalizacija nosača i stupova. U radionici se preferira da se na nekom elementu vrši samo zavarivanje ili bušenje, a ne i bušenje i zavarivanje. Ovo stvara uštede na transportu materijala unutar radionice. Pored toga, izbor jednog spoja na elementu utječe i na izbor ostalih spojeva na tom istom elementu.
- davanje prednosti pri izboru elemenata onima koji olakšavaju montažu na terenu.

Sve gore navedene smjernice se odnose na već postojeće metode koje se koriste u radioničkoj izradi, kao npr. primjena zavara, limova, vijaka, kutnika, itd. Primjer suvremenog iskoraka predstavlja koncept tzv. „ATLSS priključaka“ nosača i stupa [1]. „ATLSS priključke“ je patentirao istraživački centar The Advanced Technology for Large Structural Systems (ATLSS) Center na sveučilištu Lehigh, USA. Ti priključci (spojevi) se postižu pomoću posebnih dijelova koji se zavaruju na stup i na nosač, a rade na jednostavnom principu „klin-utor“ (slika 1).



**Slika 1 - Dijelovi tipičnog „ATLSS priključka“**

Princip montaže ovih spojeva podrazumijeva primjenu specijalnih dizalica koje automatiziraju cijeli proces. Time se minimizira ljudski rad pri montaži, a rezultat je brži, sigurniji i jeftiniji postupak montaže. Ovaj pristup se pokazao jako dobrim u praksi, ali mu je primjena trenutno ograničena jer se njime izvode jednostavniji slučajevi priključaka, tj. oni koji se razmatraju kao zglobni u proračunu. Razvoj teži tomu da se ovaj princip primjenjuje i za priključke koji prenose moment savijanja, ali i razvijanju potpuno automatiziranog procesa montaže s dizalicama, za što je potreban i razvoj samih dizalica.

## 2.2 Koncept djelomično nepopustljivih priključaka

Djelomično nepopustljivi priključci su bili tema više radova koji su dosad objavljeni [3-5], pa se u ovome članku neće davati opširno teorijsko izlaganje o njima, već samo neke osnovne činjenice koje su bitne za shvaćanje njihove primjene. Ovdje se postavlja jasna granica između tradicionalnog i suvremenog pristupa projektiranju čelične konstrukcije, odnosno prikazuje se razlika između tradicionalnog i suvremenog razmatranja ponašanja priključaka nosač-stup.

Tradicionalno razmatranje priključka nosač-stup je podrazumijevalo dvije moguće varijante takvog priključka. Jedna varijanta je da se on ponaša kao zglobovi, a druga varijanta je da se ponaša kao kruti. Zglobni priključak nema otpornost na moment savijanja i nema rotacijsku krutost, dok kruti ima punu otpornost na moment savijanja i posjeduje rotacijsku krutost. Takva gruba podjela se provodila zbog nedovoljnih saznanja o realnom ponašanju priključaka i predstavlja samo granične slučajeve realnog ponašanja priključka. Posljedica toga je da su pretpostavke mogle biti netočne, na strani manje sigurnosti i neekonomične. Glavni problem je bio taj što se zanemarivala činjenica da konstrukcijska svojstva priključka moraju biti usklađena s konstrukcijskim svojstvima elemenata koji se spajaju, što se u konačnici i odražavalo na globalnu analizu konstrukcije.

Tek s razvojem nove inženjerske discipline modeliranja konstrukcija počeli su se konkretnije razmatrati nedostaci tradicionalnog pristupa. Brojna laboratorijska ispitivanja i razvoj numeričkih metoda potaknuli su ideju o realnijoj podjeli priključaka za potrebe svakodnevne inženjerske prakse, čime su i postavljeni temelji suvremenog razmatranja tih dijelova čeličnih konstrukcija.

Zbog toga su nove europske norme postavile sustav podjele priključaka koji ih klasificira obzirom na krutost (zglobni, djelomično nepopustljivi i nepopustljivi) i obzirom na otpornost (zglobni, djelomične otpornosti i pune otpornosti). Po tim normama je moguće klasificirati priključke i prema duktilnosti, ali ipak u EN 1993-1-8 [6], još uvijek ne postoje jasno postavljeni kriteriji po kojima se to može provesti.

Podjela priključaka prema EN 1993-1-8 [6], polazi od činjenice da se rotacijsko ponašanje stvarnih priključaka nalazi između dvije granice: upeto i zglobno. U međuslučajevima između upetog i zglobnog ponašanja, krutost priključka nije niti nula niti je beskonačna. Priključak će prenositi moment, ali će se javiti i razlika između apsolutnih rotacija priključenih elemenata. Kod takvih slučajeva radi se o djelomično nepopustljivim priključcima pa u globalnoj analizi djelomično nepopustljivi priključci, osim što modificiraju pomake, modificiraju veličinu i raspodjelu unutarnjih sila u konstrukciji.

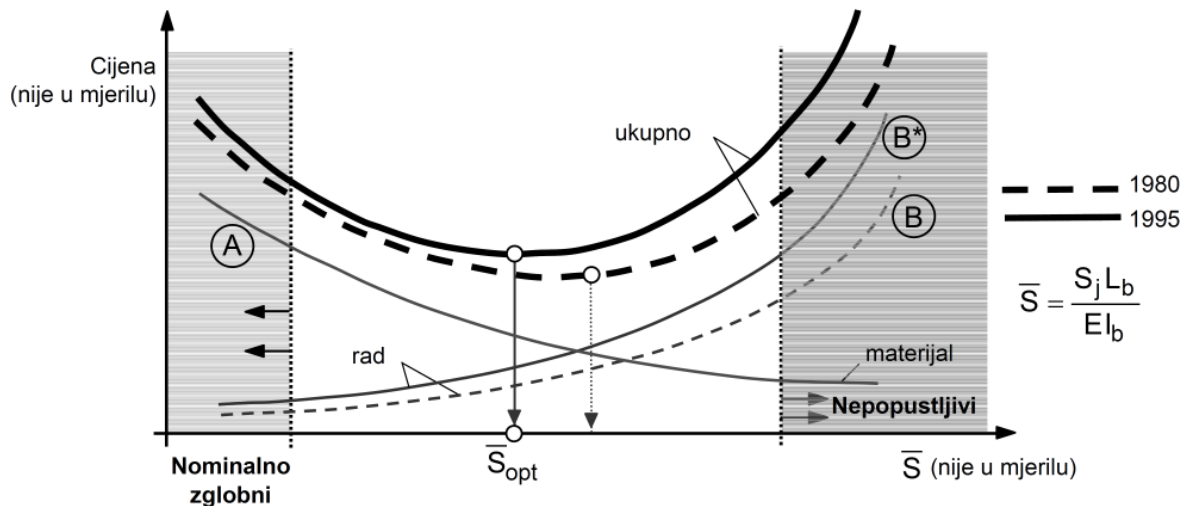
Mogućnosti koje proizlaze iz takvih priključaka očituju se u činjenici da se ovakvim pristupom konstrukcijska svojstva priključaka postavljaju kao promjenjive varijable koje trebaju ispuniti određene potrebe i prioritete, zavisno od projekta do projekta. Korisnost pristupa s djelomično nepopustljivim priključcima ovisi o tipu konstrukcijskog sustava i polaznim pretpostavkama pri projektiranju. Primjena ovog pristupa može se najbolje prikazati ako se promatraju poduprti i nepoduprti okviri. Kod poduprtih okvira obično se radi o jednostavnijoj konstrukciji kod koje se pretpostavljaju zglobni priključci, a kod nepoduprtih okvira obično se pretpostavlja kontinuirana konstrukcija s krutim priključcima. Prema nekim istraživanjima [7], najvažnije koristi primjene djelomično nepopustljivih priključaka za poduprte i nepoduprte okvire mogu se prikazati na sljedeći način:

Poduprti okviri	<ul style="list-style-type: none"> <li>- smanjenje visine nosača</li> <li>- smanjenje troškova za okvirnu konstrukciju</li> <li>- izbjegavanje privremenog podupiranja</li> </ul>
Nepoduprti okviri	<ul style="list-style-type: none"> <li>- smanjenje složenosti detalja izbjegavanjem prevelikog broja ukrućenja</li> <li>- smanjenje troškova za okvirnu konstrukciju</li> </ul>

Optimalno rješenje za priključak takvog tipa može se dobiti tek kada se provedu detaljne kalkulacije svih troškova, ali neke prednosti njihove primjene jasne su i bez toga, kao npr. lakše spajanje ostalih konstrukcijskih elemenata u blizini, lakše provođenje instalacija, lakše premazivanje, manje problema s korozijom, bolji estetski dojam, lakši konstrukcijski elementi, a nerijetko i veća duktilnost ovakvih priključaka.

U zemljama kao što su SAD, Francuska, Belgija, Njemačka i Nizozemska, već se prije više od 20 godina provelo istraživanje o ekonomskoj isplativosti i potencijalnoj koristi primjene ovakvih priključaka. Iako se radi o različitim zemljama, različitim konstrukcijskim sustavima koji su se istraživali, različitim uvjetima koje su pružali proizvođači, različitim troškovima rada i materijala, značajno je da su sva istraživanja došla do sličnih spoznaja pri

usporedbi tradicionalnog i suvremenog pristupa projektiranju. Kada se sve u cjelini sagleda, može se reći da je primjenom principa djelomično nepopustljivih priključaka moguće postići uštedu od 20 do 25% za nepoduprte okvire, odnosno 5 do 9% za poduprte okvire. Ako se polazi od pretpostavke da troškovi čelične konstrukcije čine 10% ukupnih troškova za uredske objekte, odnosno 20% za industrijske objekte, može se zaključiti da redukcija ukupnih troškova može biti od 4 do 5% za nepoduprte okvire, odnosno 1 do 2% za poduprte okvire [8].



**Slika 2 - Kvalitativan odnos cijene čelične konstrukcije ovisno o relativnoj krutosti priključka**

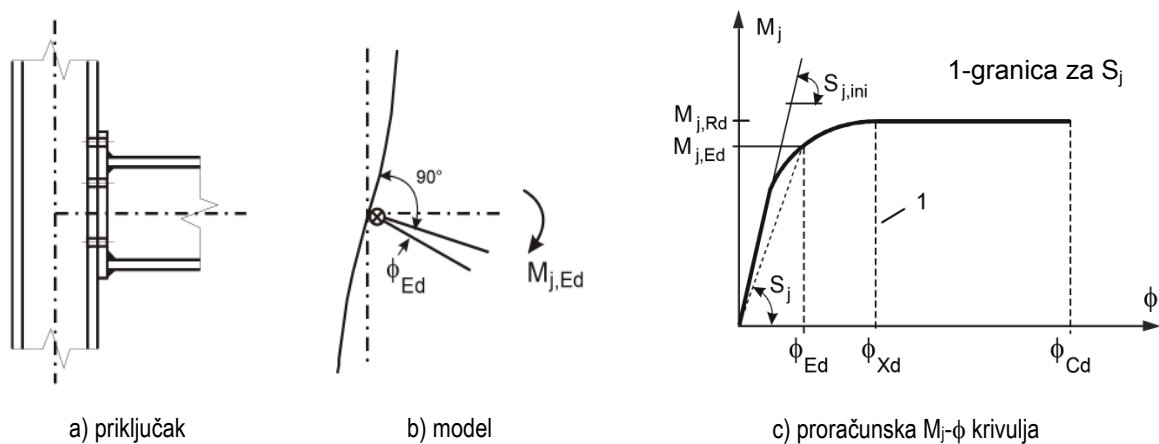
Općenito se ovisnost troškova rada i materijala o krutosti priključka može prikazati slikom 2. [4]. Iz slike slijedi da smanjivanjem troškova materijala (krivulja A) rastu troškovi rada (krivulja B) uz povećanje krutosti priključka. Za ukupne troškove, koji su zbroj krivulja A i B, može se odrediti minimum njihove krivulje, tj. optimalna krutost priključka. U većini slučajeva ta vrijednost (koja vodi optimalnom dimenzioniranju cjelokupne građevine) nije u području niti krutih, niti zglobnih priključaka. Ako se uzme u obzir tendencija rasta cijene rada (vidi krivulju B\*) naspram cijene materijala, iz slike se može očitati da to vodi prema priključcima s manjom rotacijskom krutosti. Stoga se može zaključiti da će područje djelomično-nepopustljivih priključaka postati još zanimljivije kod projektiranja čeličnih konstrukcija.

### 3 Konstrukcijska svojstva i klasifikacija priključaka

#### 3.1 Općenito

Osnovni zahtjevi za konstrukcijske elemente/priključke vezani su za otpornost, krutost i kapacitet deformacije. Na slici 3. definirana je otpornost, krutost i kapacitet deformacije priključka nosač-stup koji je projektiran da prenese moment savijanja s nosača na stup. Kapacitet rotacije je mjera deformacija koje se mogu dogoditi prije nego otkazivanje unutar zone priključka prouzroči smanjenje otpornosti priključka na savijanje.

U nastavku se navode detaljna objašnjenja pojmova otpornosti, krutosti i kapaciteta deformacije priključka kao i klasifikacijske granice za navedena konstrukcijska svojstva [9].



Slika 3 - Konstrukcijska svojstva priključka nosač-stup ( $M_j$ - $\phi$  krivulja)

### 3.2 Rotacijska krutost

Krutost priključka utječe na razinu opterećenja na koji je priključak projektiran. Priključci male rotacijske krutosti ne preuzimaju velike momente savijanja i stoga se kod modeliranja konstrukcije može pretpostaviti da su zglobovi. Naravno da krutost priključka utječe na progibe nosača. Posebno kod nepoduprtih okvira krutost priključka može imati veliki utjecaj na pomake konstrukcije i na njezinu stabilnost.

Ako se kod modeliranja za statičku analizu konstrukcije pretpostavi da su priključci nepopustljivi, tada priključci moraju biti takvi da njihove deformacije imaju zanemariv utjecaj na raspodjelu opterećenja i deformacije konstrukcije. S druge strane, ako se pretpostave zglobni priključci, oni moraju imati dovoljnu popustljivost da omoguće rotaciju bez da uzrokuju značajne momente savijanja koji mogu voditi do preranog otkazivanja priključka (njegovih komponenata) ili elemenata koji se spajaju.

Klasifikacijom prema krutosti priključci se svrstavaju u nepopustljive, djelomično nepopustljive i zglobne priključke. Ovakva klasifikacija provodi se uspoređujući proračunsku krutost priključka s graničnim krutostima. Radi pojednostavljenja, granice krutosti su izvedene tako da dozvoljavaju neposrednu usporedbu s proračunatom inicijalnom krutosti  $S_{j,ini}$  priključka, za bilo koji tip idealizacije priključka koji se rabi u analizi kao unaprijed pretpostavljen. Prema EN 1993-1-8, [6], granice za klasifikaciju prema krutosti su sljedeće:

- nepopustljiv priključak

$$S_{j,ini} \geq 25 \cdot \frac{EI}{L} \quad (\text{nepoduprti okviri})$$

$$S_{j,ini} \geq 8 \cdot \frac{EI}{L} \quad (\text{poduprti okviri})$$

- djelomično nepopustljiv priključak

$$0,5 \cdot \frac{EI}{L} < S_{j,ini} < 25 \cdot \frac{EI}{L} \quad (\text{nepoduprti okviri})$$

$$0,5 \cdot \frac{EI}{L} < S_{j,ini} < 8 \cdot \frac{EI}{L} \quad (\text{poduprti okviri})$$

- zglobni priključak

$$S_{j,ini} \leq 0,5 \cdot \frac{EI}{L}$$

→  $\frac{EI}{L}$  u gornjim izrazima predstavlja fleksijsku krutost spojenog nosača.

### 3.3 Otpornost na savijanje

Za određivanje vrijednosti i raspodjele unutarnjih sila i momenata savijanja za priključke, mora se provesti statička analiza. Ta se analiza sastoji od određivanja proračunskog djelovanja i modeliranja konstrukcije. Kod modeliranja konstrukcije vrlo je bitno ispravno odrediti stvarnu krutost priključaka. Za priključke se može pretpostaviti da su nepopustljivi, zglobni ili da imaju krutost između ta dva ekstrema. Sposobnost, odnosno kapacitet deformacije elemenata (nosača i stupova) i priključaka ima značajnu ulogu za konačnu raspodjelu unutarnjih sila i momenata savijanja unutar konstrukcije.

Svi dijelovi konstrukcije moraju biti projektirani tako da mogu podnijeti izračunate sile i da imaju kapacitet deformacije koji odgovara pretpostavkama koje su usvojene u globalnoj analizi.

Klasifikacija prema otpornosti se provodi tako da se uspoređuje proračunski moment otpornosti priključka  $M_{j,Rd}$  s granicama „pune otpornosti“ i „zglobnog“ ponašanja. Granice za klasifikaciju prema otpornosti su sljedeće:

- priključak pune otpornosti  
 $M_{j,Rd} \geq M_{pl,Rd}$
- priključak djelomične otpornosti  
 $0,25 \cdot M_{pl,Rd} < M_{j,Rd} < M_{pl,Rd}$
- zglobni priključak  
 $M_{j,Rd} \leq 0,25 \cdot M_{pl,Rd}$

$M_{pl,Rd}$  označava proračunsku otpornost slabijeg konstrukcijskog elementa u spoju, detaljnije vidi u [6].

### 3.4 Duktilnost

Zahtjevi za otpornost i krutost su jasni. Oni proizlaze iz statičkog proračuna. Zahtjev za kapacitet deformacije je više kvalitativne prirode i u praksi ga je ponekad teško provjeriti. Odgovarajućim iskustvom i prikladnim detaljiranjem mogu se postići tzv. zglobni priključci koji pokazuju dovoljan rotacijski kapacitet, što znači da mogu podnijeti zahtijevane rotacije.

Duktilni priključci koji imaju veliki deformacijski kapacitet doprinose ukupnoj pouzdanosti konstrukcije na način da priključak omogućava preraspodjelu povećanih učinaka djelovanja. Ovakvi priključci u nekim slučajevima mogu biti projektantski zahtjev, na primjer kada se koristi proračun po teoriji plastičnosti s plastičnim zglobovima u konstrukciji.

Kod priključaka otpornih na savijanje uvodi se pojam klase duktilnosti koji obuhvaća rotacijski kapacitet. Problem klase duktilnosti priključaka još uvijek nije detaljno razrađen u europskim normama [6], ali se provode opsežna istraživanja koja bi trebala dati adekvatna rješenja. Za procjenu duktilnosti priključka može se primijeniti analogija s klasifikacijom poprečnih presjeka prema rotacijskom kapacitetu. Zbog tog razloga možemo priključke s obzirom na duktilnost klasificirati u tri klase:

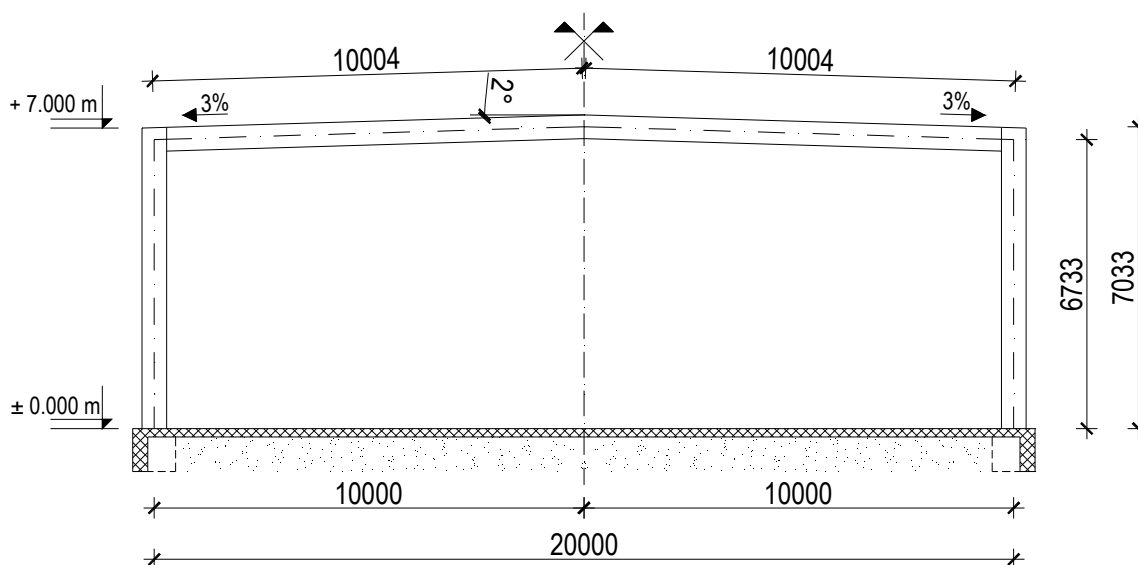
- klasa 1 – neograničen rotacijski kapacitet za preraspodjelu momenata savijanja i unutarnjih sila
- klasa 2 – ograničen rotacijski kapacitet koji dopušta preslaganje unutarnjih sila i momenata savijanja tako daleko da se može razviti puni rotacijski moment plastičnosti
- klasa 3 – ne posjeduje rotacijski kapacitet, elastična raspodjela i unutarnjih sila i momenata savijanja, otpornost je ograničena s otkazivanjem krutih komponenta.

## 4 Analiza okvira s djelomično nepopustljivim priključcima

### 4.1 Ulazni podatci za analizu

Radi usporedbe tradicionalnog i suvremenog pristupa projektiranju čeličnih okvirnih konstrukcija, napravljen je detaljan proračun jedne konstrukcije čelične hale. Detaljna analiza, statički proračun i dimenzioniranje prikazani su u [2].

Tlocrtne dimenzije građevine, koje se odnose na osi glavne nosive čelične konstrukcije, iznose 20,0 m × 60,0 m. Visina konstrukcije u ravninama vertikalnih vanjskih stijena iznosi 7,0 m iznad kote tla, a ista visina u sljemenu iznosi 7,704 m. Glavnu nosivu čeličnu konstrukciju čine okvirni sustavi raspona 20,0 m, postavljeni na osnovnom razmaku od 6,0 m. Glavni nosivi sustav je dvozglojni okvir (slika 4.), a sastoji se od stupova (HE A profili) i prečki (IPE profili) izvedenih iz kvalitete čelika S 355.



Slika 4 - Razmatrani dvozglojni okvir

Zadano je stalno opterećenje instalacija od 0,4 kN/m<sup>2</sup>, opterećenje snijegom na tlu od 1,30 kN/m<sup>2</sup> i vjetar referentne brzine 20 m/s, a vlastita težina je u analizi određena prema odabranim elementima.

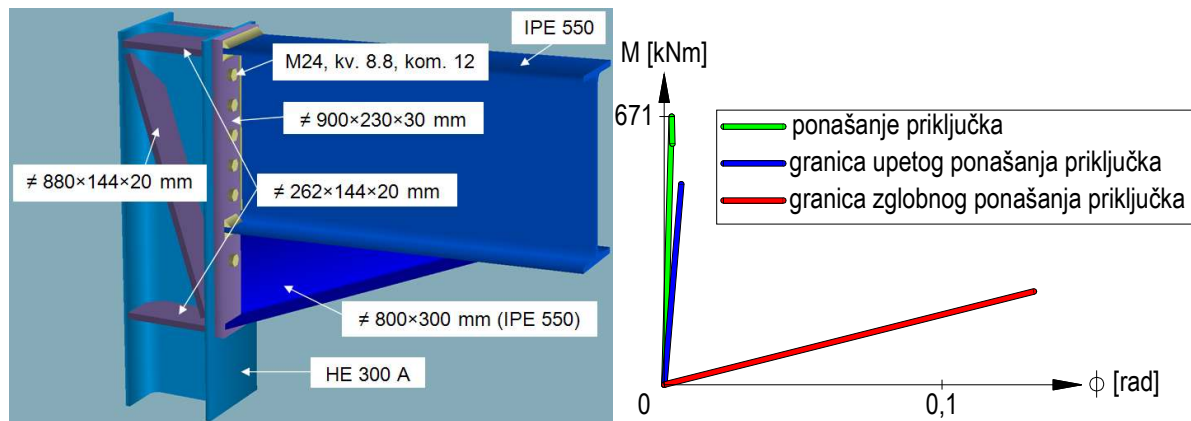
### 4.2 Tradicionalni pristup

U tradicionalnom pristupu projektiranju statičkog sustava dvozglavnog okvira pretpostavljeno je da je priključak prečke i stupa potpuno upet, tj. nepopustljiv. Iz analize je dobiven maksimalni moment savijanja koji priključak treba prenijeti  $M_{j,Ed} = 338$  kNm. U skladu s tradicionalnim pristupom, dodavanjem ukrućenja bez prethodne analize, priključak je „iskustveno“ ukrućen do upetosti.

Naknadno se u računalnom programu „CoP“ [10], provelo modeliranje priključka. Na slici 5. može se vidjeti priključak sa svim komponentama koje omogućavaju njegovo nepopustljivo (upeto) ponašanje. Vrijednosti otpornosti na savijanje i poprečnu silu ovakvog priključka su  $M_{j,Rd} = 671$  kNm, odnosno  $V_{j,Rd} = 658$  kN. Vrijednost početne rotacijske krutosti iznosila je  $S_{j,ini} = 578621$  kNm/rad.

Program automatski provodi i klasifikaciju priključka, što za ovaj konkretan slučaj znači da se radi o upetom priključku pune otpornosti. Inače, „CoP“ provodi analizu prema europskim normama [6], pa kada se izračunaju granice za klasifikaciju priključka kao zglobnog, odnosno upetog prema izrazima iz točke 3.1., dobije se da je granica za zglobno ponašanje 3523,8 kNm/rad, dok je za upeto ponašanje 176190 kNm/rad. Iz toga se jasno vidi da početna krutost ovog priključka „debelo“ odgovara upetom ponašanju.





**Slika 5 - Tradicionalno rješenje priključka prečke i stupa s pripadajućim  $M_j$ - $\phi$  dijagramom**

Dimenzioniranje koje je provedeno pokazalo je da za ovakvu statičku shemu okvira optimalan izbor profila predstavlja IPE 550 za prečke i HE 300 A za stupove. Pod dimenzioniranjem se podrazumijeva provođenje dokaza, u skladu sa Eurocode 3 normama, na razini poprečnog presjeka i na razini elementa prema zahtjevima za krajnje granično stanje, te kontrola graničnog stanja uporabljivosti. Kriterij koji je bio mjerodavan za dimenzioniranje okvira (prečke i stupa) je dokaz elementa za interakciju djelovanja momenta savijanja i uzdužne tlačne sile. Na temelju rezultata tog dokaza, dobila se iskoristivost pojedinog elementa. Tako za ovaj slučaj vrijedi da je iskoristivost elemenata koja je postignuta navedenim izborom profila 72% za prečku, odnosno 86% za stup.

### 4.3 Suvremeni pristup

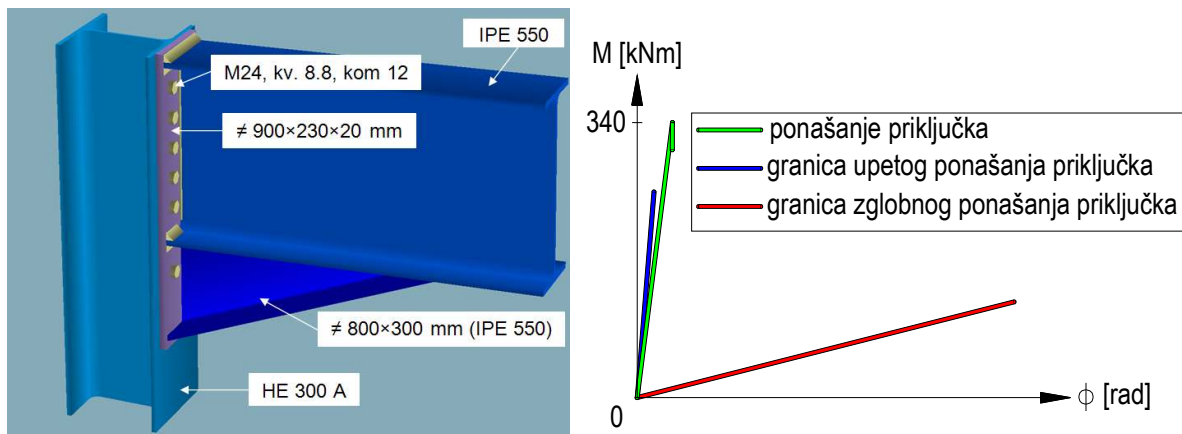
U suvremenom pristupu se krenulo sa svjesnim modeliranjem priključka prečke i stupa koji je djelomično nepopustljiv. Prema EN 1993-1-8 [6], određene su granice unutar kojih se mora kretati krutost priključka kako bi ga se moglo svrstati u djelomično nepopustljive. Kada su određene te granice, pomoću računalnog programa „CoP“ [10], iterativno se određivala konfiguracija priključka (izbor ukrućenja, debljina čelne ploče, geometrija i raspored vijaka...), a iz toga i njegova početna rotacijska krutost. U prvoj iteraciji je izbor profila za prečku i stup bio kao i u prethodno opisanom tradicionalnom postupku.

Otpornost ovakvog priključka (slika 6), iznosila je  $M_{j,Rd} = 339 \text{ kNm}$ , odnosno  $V_{j,Rd} = 1239 \text{ kN}$ , dok je početna rotacijska krutost iznosila  $S_{j,ini} = 109241 \text{ kNm/rad}$ .

U „CoP-u“ je provedena i klasifikacija priključka, što je za ovaj konkretan slučaj značilo da se radi o djelomično-nepopustljivom priključku djelomične otpornosti. Odnosno, kada se napišu konkretne vrijednosti, dobiveno je:

$$3523,8 \frac{\text{kNm}}{\text{rad}} < S_{j,ini} = 109241 \frac{\text{kNm}}{\text{rad}} < 176190 \frac{\text{kNm}}{\text{rad}}$$

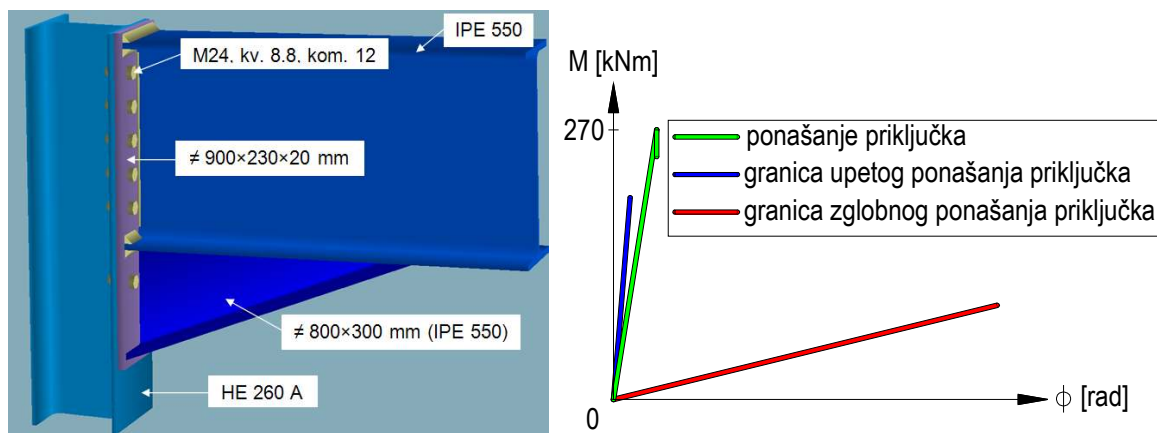
Tada je s izračunatom vrijednosti rotacijske krutosti priključka prečke i stupa ponovo proveden statički proračun okvira. Naravno, došlo je do preraspodjele momenta savijanja na način da se u sredini prečke povećao (sa 516 kNm na 536 kNm), a smanjio na promatranom priključku, odnosno na vrhu stupa (sa 338 kNm na 319 kNm). Ponovno je provedeno dimenzioniranje s istim pretpostavljenim profilima kao i u tradicionalnom pristupu (prečka IPE 550; stup HE 300 A) i pokazalo se da je iskoristivost prečke porasla na 74%, a iskoristivost stupa je pala na 81%.



**Slika 6 - Suvremeno rješenje priključka prečke i stupa s pripadajućim  $M_j$ - $\phi$  dijagramom (1. varijanta)**

Ove promjene u iskoristivosti elemenata su, logično, potaknule na razmišljanje o optimalizaciji profila elemenata. Kod tradicionalnog pristupa je napomenuto da drugi izbor profila nije davao zadovoljavajuće rezultate. Međutim, s djelomično nepopustljivim priključcima postoji više prostora za „manipuliranje“ momentom savijanja jer imamo mogućnost njegovog povećanja, odnosno smanjivanja, ovisno o fleksijskoj krutosti priključaka.

U ovom konkretnom slučaju se pretpostavilo da profil prečke ostaje IPE 550, ali da se profil stupa smanji s HE 300 A na HE 260 A. Budući da se radilo o novoj kombinaciji profila prečke i stupa (slika 7), bilo je potrebno odrediti novu rotacijsku krutost priključka.



**Slika 7 - Suvremeno rješenje priključka prečke i stupa (optimizirano rješenje)**

Dobivena je manja otpornost priključka  $M_{j,Rd} = 270$  kNm,  $V_{j,Rd} = 1239$  kN, odnosno manja početna rotacijska krutost  $S_{j,ini} = 89290$  kNm/rad.

Granice za klasifikaciju su ostale jednake kao i u prethodna dva slučaja, jer se profil prečke nije mijenjao i priključak je opet ostao djelomično nepopustljiv. Ponovo je provedena analiza (moment u sredini prečke se povećao s 536 kNm na 609 kNm; moment na vrhu stupa se smanjio s 319 kNm na 251 kNm) i dimenzioniranje u kojemu je postignuta iskoristivost prečke od 84%, dok je iskoristivost stupa narasla do 98%.

## 5 Ekonomska opravdanost suvremenog pristupa

Iz prethodne točke odmah se uočava da je suvremenim pristupom postignuta određena ušteda u utrošku materijala, jer je potreban profil stupa bio manji, a time i lakši. Ušteda u materijalu može se prikazati i rezultatima iz iskaza materijala [2], za tradicionalno i za suvremeno rješenje, kako je rezimirano u tablici 1.

**Tablica 1 - Utrošak čelika za tradicionalni i suvremeni pristup**

Utrošak čelika za okvir	Tradicionalni pristup	Suvremeni pristup
[kg/m <sup>2</sup> ]	34,8	32,1

Kako bi se dobio jasniji uvid što se zapravo postiglo „kompliciranjem“ oko pitanja priključaka, napravljena je procjena troškova za izradu okvira, odnosno procjena troškova za izradu priključka prečke i stupa na tradicionalni (kruti priključak) i na suvremeni (djelomično nepopustljivi priključak) način. U narednoj tablici 2 mogu se vidjeti rezimirani rezultati te procjene. Napominje se da su za procjenu ukupne cijene korištene trenutačno važeće cijene materijala i rada u RH.

**Tablica 2 - Troškovi izrade za polovice okvira za tradicionalni i suvremeni način**

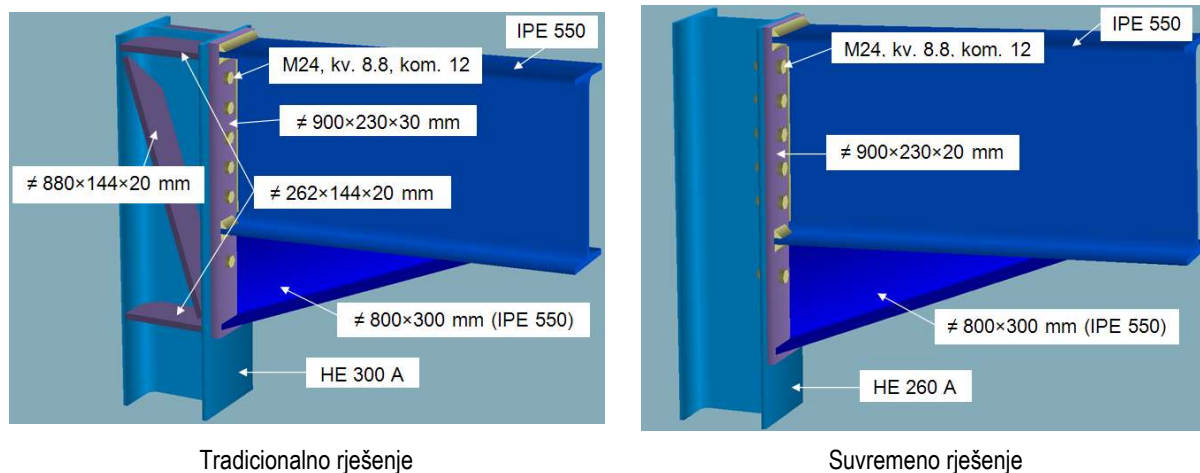
Troškovi	Tradicionalni način	Suvremeni način
ukupna količina materijala [kg]	1.817,1	1.595,6
ukupna cijena materijala [kn]	9.994,10	8.776,00
ukupna cijena ljudskog rada [kn]	2.617,60	1.670,50
ukupna cijena za polovicu okvira (materijal + rad) [kn]	12.611,70	10.446,50

Analizom tablice 2 mogu se izvesti sljedeći zaključci za ovaj konkretni slučaj hale. Beneficije od suvremenog pristupa za samo polovicu okvira su:

- ušteda u količini materijala u iznosu od 222 kg ili 12%,
- ušteda u cijeni materijala u iznosu od 1.218,10 kn ili 12%,
- ušteda u cijeni ljudskog rada u iznosu od 947,10 kn ili 36%,
- ušteda u ukupnoj cijeni polovice okvira u iznosu od 2.165,20 kn ili 17%.

Ako se promotre gornji podatci, lako je uočiti da se najveća ušteda postigla upravo u cijeni ljudskog rada. Pod ljudskim radom ovdje se podrazumijevaju radne operacije vezane uz rezanje, bušenje i zavarivanje svih čeličnih elementa koji čine okvir. Ako se pogleda slika 2, na kojoj su prikazani trendovi cijena za materijal i ljudski rad, te pronalaženje optimalnog rješenja u skladu s njima, može se zaključiti da je ovom analizom postignuto optimalno rješenje priključka. Drugim riječima, suvremenim pristupom su smanjeni troškovi ljudskog rada, što se i nameće kao jedan od primarnih ciljeva u današnjem projektiranju. Osim ljudskog rada, postignuta je i solidna ušteda u utrošku materijala. Također, ušteda u ljudskom radu se može prikazati ekvivalentno količini materijala, tj. ušteda u ljudskom radu bi bila (trenutačno) istovrijedna uštedi od 172 kg materijala. Ako se tom iznosu pridoda ušteda od 222 kg stvarnog materijala, dobije se ušteda po jednom priključku (polovici okvira) u iznosu od čak 394 kg čelika.

Usporedbom rješenja sa slike 8 odmah je jasno kako je došlo do značajne uštede. Suvremeno rješenje priključka nema bočnih ukrčenja na stupu, što podrazumijeva da nema utroška dodatnog materijala niti ljudskog rada potrebnog za njihovo oblikovanje i (skupo) zavarivanje.



**Slika 8 - Usporedba tradicionalnog i suvremenog rješenja priključka**

## 6 Zaključak

Postoji niz poznatih pristupa za ekonomično projektiranje čeličnih konstrukcija, a jedan od najvažnijih je upravo koncept djelomično nepopustljivih priključaka. Stoga je težište ovog članka fokusirano na rezultate provedenih analiza okvira uz što realniju simulaciju ponašanja priključaka i njihovog utjecaja na ponašanje samog okvira. Da bi se stekao jasan uvid u mogućnosti i važnost primjene tog suvremenog koncepta, napravljene su detaljne analize jedne uobičajene čelične hale prema tradicionalnom i suvremenom pristupu [2]. Rezultati su u konačnici izraženi u novčanim vrijednostima.

U vrijeme kada se nisu mogla brzo i pouzdano procijeniti konstrukcijska svojstva priključaka, inženjer je po „osjećaju“ ukrućivao priključke. Tako je na primjer kod krutih priključaka dodavao ukrućenja koja vjerojatno nisu bila potrebna, ali su dodana za „sigurnost“. U Njemačkoj su takva „prekomjerna“ ukrućenja u praksi dobila naziv „Angststeifen“, što bi se moglo prevesti kao „ukrućenja zbog straha“. Posljedica je da su brojni priključci bili predimenzionirani, što je sasvim sigurno koštalo truda u radionici, vremena i novca.

Danas, u elektroničko doba, kada je tehnologija ipak dovoljno napredovala i kada su razvijeni i dostupni različiti programski paketi za proračun konstrukcija i njihovih elemenata, kao što su npr. priključci, argument da je takav proračun prekomplikiran vrlo brzo gubi na snazi. Svaka struka, pa tako i građevinska, mora se unaprjeđivati u skladu s razvojem tehnologije i usvajanjem novih znanja. Osim potrebnog moderniziranja svih metoda u građevinarstvu, potrebno je imati na umu i suvremene trendove troškova. Čelična industrija u građevinarstvu mora optimizirati svoje troškove kako bi ostala konkurentna na tržištu, a upravo se primjena djelomično nepopustljivih priključaka pokazuje kao značajniji korak naprijed. Ta tvrdnja je potkrijepljena brojnim istraživanjima, ali i analizom prikazanom u ovome članku.

Za kraj, potrebno je istaknuti kako bi se u graditeljskoj praksi trebalo i teorijski i praktično usvojiti postojeća znanja o suvremenim pristupima, kao što je ovaj s djelomično nepopustljivim priključcima. Rješenje je zasigurno u suvremenoj i kontinuiranoj edukaciji stručnjaka, u ovom slučaju inženjera „čeličara“. Ako se uzmu u obzir suvremeni trendovi graditeljstva, prilično je sigurno da će ovaj pristup, kojeg danas nazivamo „suvremeni“, morati postati osnovni pristup u proračunu. Ono što danas zovemo „tradicionalnim“ pristupom, vrlo vjerojatno će zbog svoje ekonomske neisplativosti, a time i nekonkurentnosti, postati stvar graditeljske prošlosti.

## Literatura

- [1] Steenhuis, C.M.; Stark, J.W.B.; Gresnigt, A.M. 1997: Cost effective connections, Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 1, pp. 18-24

- 
- [2] Jamaković, S. 2011: Projekt čelične konstrukcije hale - okvir s djelomično nepopustljivim priključcima, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, voditelj: Skejić, D.
  - [3] European Convention for Constructional Steelwork - TC8 1992: Analysis and Design of Steel Frames with Semi-Rigid Joints, No. 67, Brussels
  - [4] Dujmović, D., Androić, B., Skejić, D. 2003: Modeliranje priključaka čeličnih okvirnih konstrukcija, Građevinar 55, pp. 339-348
  - [5] Dujmović, D.; Skejić, D.; Androić, B. 2003: Modeliranje priključka nosač-stup prema Eurokodu 3, Građevinar 55, pp. 397-405
  - [6] European Committee for Standardization (CEN) 2005: EN 1993-1-8:2005, Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.8: Design of joints, Final draft, May 2005, Brussels
  - [7] ECCS, European Convention for Constructional Steelwork 1997: Connections and Frame Design for Economy, Brussels
  - [8] Weynand, K.; Jaspert, J.-P.; Steenhuis, M. 1998: Economy Studies of Steel Building Frames with Semi-Rigid Joints, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 46
  - [9] Androić, B.; Dujmović, D.; Džeba, I. 2009: Čelične konstrukcije 1, IA projektiranje, Zagreb
  - [10] CoP Software, Version 2005 R02, RWTH/PSP Aachen, M&S Liège, ICCS Hoofddorp