

UDK 924.94:624.078

Primljeno 14. 3. 2003.

Modeliranje priključaka čeličnih okvirnih konstrukcija

Darko Dujmović, Boris Androić, Davor Skejić

Ključne riječi

konstrukcijski priključci, okvirne konstrukcije, metoda komponenata, karakterizacija, modeliranje, klasifikacija, idealizacija

Key words

structural connections, frame structures, component method, characterization, modeling, classification, idealization

Mots clés

raccords constructifs, ossatures métalliques, méthode des composantes, caractérisation, modélisation, classification, idéalisation

Ключевые слова

конструкционные соединения, рамные конструкции, метод компонентов, характеристика, моделирование, классификация, идеализация

Schlüsselworte

konstruktive Anschlüsse, Rahmenkonstruktionen, Komponentenmethode, Charakterisierung, Modellierung, Klassifizierung, Idealisierung

D. Dujmović, B. Androić, D. Skejić

Stručni rad

Modeliranje priključaka čeličnih okvirnih konstrukcija

Prikazuje se međudjelovanje čeličnih okvira i njihovih priključaka te metoda dimenzioniranja priključaka prema EC 3. Opisana su četiri temeljna pojma vezana uz novi pristup dimenzioniranju priključaka, a to su: karakterizacija, klasifikacija, modeliranje i idealizacija. Istaknute su prednosti metode komponenata, usvojene u EC 3, u odnosu na dosadašnji postupak modeliranja priključaka. Također su obrazložene i ekonomske opravdanosti novog načina dimenzioniranja priključaka.

D. Dujmović, B. Androić, D. Skejić

Professional paper

Modeling connections of steel frame structures

The interaction between steel frames and their connections is explained, and the connection dimensioning method according to EC 3 is presented. Four basic terms related to novel approach to connection dimensioning are described. These terms are: characterization, classification, modeling and idealization. An emphasis is placed on advantages of component method, adopted in EC 3, when compared to the procedure currently used for connection modeling. Economic bases for the use of the new connection dimensioning method are also explained.

D. Dujmović, B. Androić, D. Skejić

Ouvrage professionnel

Modélisation des raccords des ossatures métalliques

L'article décrit l'interaction des ossatures métalliques et de leurs raccords, ainsi qu'une méthode de dimensionnement des raccords selon l'EC 3. Quatre notions fondamentales liées à une nouvelle approche du dimensionnement sont décrites, à savoir: caractérisation, classification, modélisation et idéalisation. On souligne les avantages de la méthode des composantes, retenue dans l'EC 3, par rapport à la méthode conventionnelle de modélisation des raccords. Les avantages économiques de la nouvelle méthode de dimensionnement des raccords sont également démontrés.

Д. Дуймович, Б. Андроић, Д. Скејич

Отраслевая работа

Моделирование соединений стальных рамных конструкций

В работе показывается взаимное действие стальных рам и их соединений, а также метод расчета соединений по EC 3. Описаны четыре основных понятия, связанных с новым подходом к расчету соединений, а это следующие: характеристика, классификация, моделирование и идеализация. Подчеркнуты преимущества метода компонентов, принятые в EC 3, по отношению к способу моделирования соединений, применяющегося до настоящего времени. В работе также аргументированы и экономические обоснованности нового способа расчета соединений.

D. Dujmović, B. Androić, D. Skejić

Fachbericht

Modellieren des Anschlusses von Stahlrahmenkonstruktionen

Dargestellt ist die Interaktion von Stahlrahmen und deren Anschlüsse, sowie das Bemessungsverfahren für Anschlüsse nach EC 3. Beschrieben sind vier Grundbegriffe verbunden mit dem neuen Zutritt zur Bemessung der Anschlüsse. Das sind: Charakterisierung, Klassifizierung, Modellierung und Idealisierung. Hervorgehoben sind die Vorteile der Komponentenmethode, angenommen im EC 3, im Verhältnis zum bisherigen Modellierungsverfahren für Anschlüsse. Auch die wirtschaftliche Berechtigung der neuen Bemessungsweise ist begründet.

Autori: Prof. dr. sc. **Darko Dujmović**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Boris Androić**, dipl. ing. građ.; **Davor Skejić**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, Zagreb

1 Uvod

Tradicionalno su priključci nosač–stup razmatrani kao zglobni bez ikakve otpornosti i krutosti (jednostavni priključci) ili kao potpuno kruti s punom otpornosti (kontinuirani priključci). Razlog je u nedostatku spoznaje o njihovu realnom ponašanju. U stvarnosti obje navedene pretpostavke mogu biti netočne i neekonomične i samo su granični slučajevi realnog ponašanja opisanog odnosom momenta savijanja, M , i kuta rotacije, ϕ . Zbog nedovoljnih spoznaja o ponašanju priključaka u području između graničnih slučajeva, u tradicionalnom pristupu dimenzioniranju usvojeni su postupci koji su u potpunosti zanemarili ovo područje i u mnogo slučajeva postizu neekonomična rješenja ili rješenja na strani manje sigurnosti.

Osnovni je problem bio u tome da se nije vodilo računa da konstrukcijska svojstva priključka moraju biti usklađena s konstrukcijskim svojstvima elemenata koji se spajaju. To znači da je taj nedostatak bio naročiti problem gledajući globalnu analizu konstrukcije. Uvođenjem jedne nove inženjerske discipline, koja se naziva *modeliranje konstrukcije*, počelo se voditi računa o nedostatku tradicionalnog pristupa. Brojna laboratorijska istraživanja i razvitak numeričkih metoda potaknuli su brži razvoj ideje o realnijoj podjeli priključaka za potrebe svakodnevnih inženjerskih prakse. Nove europske norme postavile su sustav podjele priključaka koji klasificira priključke s obzirom na krutost (zglobni, djelomično nepopustljivi i nepopustljivi) i otpornost (zglobni, djelomične otpornosti i pune otpornosti). Također, priključci se mogu klasificirati s obzirom na duktilnost, iako u Eurokodu 3 [1] još nisu jasno postavljeni kriteriji ove klasifikacije.

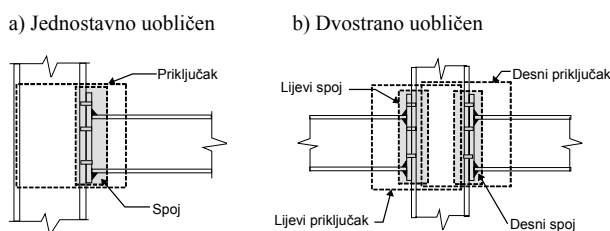
Tijekom posljednjih revizija Dodatka J, EC3 (priključci između H i I profila) [2], uvedena je kao osnovna procedura za iznalaženje karakteristika krutosti i otpornosti konstrukcijskog priključka *metoda komponenata*, koja dopunjuje novi opsežni pristup proračuna priključaka. Iznalaženje osnovnih karakteristika (krutosti i otpornosti) po metodi komponenata postaje prilično mukotran

posao bez obzira na uobličavanje priključka (jednostrani ili dvostrani) ili tip priključka (zavareni, vijčani s čelnom pločom ili kutnicima, itd.).

Važnost problematike modeliranja priključaka kod čeličnih konstrukcija očituje se i u razvitku Dodatka J u novi dio 1.8, Eurokoda 3, pod nazivom Projektiranje priključaka [3]. Potrebno je napomenuti da pri razmatranju navedenog problema treba voditi računa o tome da se razlikuje pojam priključka i spoja.

2 Konstrukcijsko ponašanje priključaka

Spoj je definiran kao skup fizikalnih komponenata koje mehanički pričvršćuju elemente koje spajaju. Za spoj se smatra da je koncentriran na mjestu gdje se ostvaruje pričvršćivanje, na primjer pri sučeljavanju kraja nosača i stupa za priključak nosač–stup oko jače osi. Kada se spoj i odgovarajuća zona međudjelovanja između spojenih konstrukcijskih elemenata razmatraju zajedno, rabi se izraz *priključak* (slika 1.).

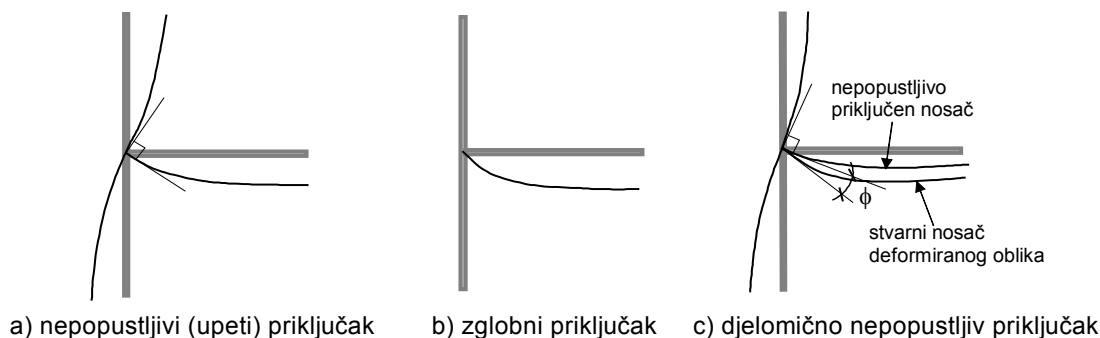


Slika 1. Priključci i spojevi

Ovisno o broju elemenata u ravnini spojenih zajedno, definiraju se jednostrano, slika 1.a), i dvostrano uobličeni priključci, slika 1.b).

Poznata je činjenica da se rotacijsko ponašanje stvarnih priključaka nalazi između dvije granice: upeto i zglobno. Slika 2. ilustrira ovakvo ponašanje u elastičnom području jednostranog priključka stupa i nosača.

Slika 2.a) predstavlja nepopustljiv priključak. Smatra se da su svi elementi priključka dovoljno kruti. Ne postoji razlika između rotacija na krajevima konstrukcijskih elemenata spojenih u priključku. Rotacija priključka je rotacija čvora uobičajeno rabljena u metodama analize



Slika 2. Klasifikacija priključka prema rotacijskoj krutosti

okvirnih konstrukcija. Priključak koji ne posjeduje krutost, slika 2.b), je zglobni priključak. Spojeni nosač ponaša se kao jednostavno oslonjen nosač. Za međuslučajeve, krutost priključka nije niti nula niti beskonačna. Moment koji priključak prenosi imat će za posljedicu razliku ϕ između apsolutnih rotacija dva spojena konstrukcijska elementa, slika 2.c). U ovom slučaju govori se o djelomično nepopustljivom priključku.

Najjednostavniji način predstavljanja ovih pojmova je pomoću rotacijske opruge smještene između krajeva konstrukcijskih elemenata koji se spajaju. Rotacijska krutost opruge S je parametar koji povezuje preneseni moment M_j s odgovarajućom rotacijom ϕ , koja je razlika između apsolutnih rotacija dva spojena konstrukcijska elementa. Rotacijska krutost definirana je kao nagib krivulje M_j - ϕ koja ovisi o svojstvima priključka.

Kada je ova rotacijska krutost jednaka nuli, ili kada je ona relativno mala, priključak je u klasi nominalno zglobnog priključka. Suprotno, kada je rotacijska krutost S beskonačna, ili kada je relativno velika, priključak je u klasi nepopustljivog priključka. U svim ostalim međuslučajevima, priključak pripada klasi djelomično nepopustljivog priključka.

Za djelomično nepopustljive priključke opterećenja će prouzročiti i moment savijanja M_j i odgovarajuću rotaciju ϕ između spojenih konstrukcijskih elemenata. Moment i odgovarajuća rotacija povezani su odnosom koji ovisi o konstrukcijskim svojstvima priključka. Ovaj odnos ilustriran je na slici 3., gdje se, u radi pojednostavnjenja, pretpostavlja da je globalna analiza provedena s linearnim elastičnim pretpostavkama.

Kod globalne analize, učinak koji imaju djelomično nepopustljivi priključci, u odnosu na učinak nepopustljivih

ili zglobnih priključaka, nije samo modificiranje pomačka nego i raspodjele i veličine unutarnjih sila i momenata savijanja u konstrukciji.

Koncept djelomično nepopustljivih priključaka uveden je u Eurokod 3 za proračun čeličnih konstrukcija za statička opterećenja.

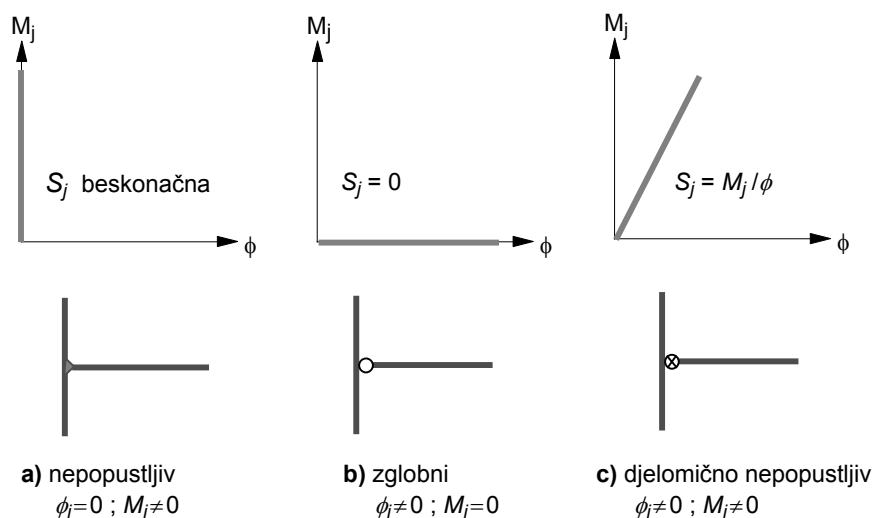
3 Značajke suvremenog pristupa

Oboje, i zahtjevi prema Eurokodu 3 i želja da se modelira ponašanje konstrukcije na što realniji način upućuju na razmatranje ponašanja djelomične nepopustljivosti kada je to potrebno.

Mnogi se projektanti obično zaustave već pri osnovnoj interpretaciji Eurokoda 3 i protive se suočavanju koje podrazumijeva njihov dodatni proračunski napor. Očito prilično neodgovarajući način da savladaju ovaj napor bit će da dimenzioniraju priključke koji će dosljedno biti klasificirani ili kao da su zglobni ili potpuno kruti (nepopustljivi). Međutim, takva zahtijevana svojstva priključaka trebat će se dokazati na kraju procesa dimenzioniranja. Za takve se priključke može dogoditi da će se utvrditi u brojnim situacijama da su neekonomični.

Mora se napomenuti da pojmovi nepopustljivi i zglobni priključci još uvijek postoje u EC3. Prihvaćeno je da se priključak, koji je gotovo nepopustljiv ili gotovo zglobni, može još uvijek u procesu dimenzioniranja razmatrati kao stvarno nepopustljiv ili stvarno zglobni. Kako prosuditi smije li se priključak razmatrati kao nepopustljiv, djelomično nepopustljiv ili zglobni ovisi o usporedbi između krutosti priključka i krutosti okvira (tj. krutosti nosača, koja ovisi o momentnoj površini drugog stupnja poprečnog presjeka, modulu elastičnosti i dužini nosača).

Suvremenim pristupom projektant može ostvariti koristi koje se dobiju iz razmatranja ponašanja priključaka kao



Slika 3. Modeliranje priključaka za slučaj elastične globalne analize

djelomično nepopustljivih. Ove se koristi mogu postići na dva načina:

1. Projektant odlučuje nastaviti sa praksom početnog pretpostavljanja - katkad pogrešnog - da su priključci ili zglobni ili potpuno nepopustljivi. Međutim, ispravno razmatranje mora uzeti u obzir utjecaj koji ima stvarno ponašanje priključaka na globalno ponašanje konstrukcije, tj. na točnost s kojom se određuje raspodjela unutarnjih sila, momenata i pomaka. Ovaj zahtjev nije jednostavno potvrditi kada su priključci dimenzionirani u zadnjoj fazi u procesu projektiranja budući da se mogu zahtijevati neke iteracije između globalne analize i provjere dimenzioniranja. Usprkos tome, moguće je predvidjeti sljedeće:

- Uobičajena je praksa ugraditi ukrućenja hrpta stupa za priključak pretpostavljen kao nepopustljiv. EC3 pruža načine da se provjeri jesu li takva ukrućenja stvarno potrebna da priključak bude i nepopustljiv i ima dovoljnu otpornost. Postoje praktični slučajevi gdje ukrućenja nisu potrebna. Dakle, dozvoljava se usvajanje ekonomičnijeg dimenzioniranja priključaka.
- Kada se za priključke, pretpostavljene da budu zglobni, kasnije utvrdi da imaju značajnu krutost (tj. da su djelomično nepopustljivi), projektant može biti u poziciji da smanji visinu nosača. Ovo smanjenje visine nosača moguće je zbog toga što momenti savijanja koje preuzimaju priključci (djelomično nepopustljivi) smanjuju momente u rasponu nosača.

2. Projektanti trebaju u fazi preliminarnog dimenzioniranja razmisliti o svojstvima konstrukcijskih elemenata, ali također i o konstrukcijskim svojstvima priključaka. Može se pokazati [4] da je suvremeni pristup općenito kompatibilan s katkad uobičajenim odvajanjem dimenzioniranja između onih koji imaju odgovornost za projektiranje konstrukcije i provode globalnu analizu i onih koji imaju odgovornost za dimenzioniranje priključaka u sklopu radioničke izrade. Zbog toga, obje zadaće su vrlo često provedene s različitim profilima stručnjaka, ili pak s različitim izvođačima, zavisno od nacionalnih ili lokalnih običaja u procesu proizvodnje. Usvajajući ovu novost razmatranja priključaka u ranoj fazi procesa dimenzioniranja zahtijeva se izvršno razumijevanje ravnoteže između cijene koštanja i složenosti priključaka te optimizacije ponašanja konstrukcije i izvedbe točnijim razmatranjem ponašanja priključka za proračun kao cjeline. Dva su primjera navedena za ilustraciju:

- Spomenuto je prethodno da je u nekim situacijama moguće eliminirati ukrućenja hrpta stupa i prema tome sniziti cijenu koštanja. Usprkos smanjenju

njegove krutosti i, vjerojatno, njegove otpornosti, priključak se može još uvijek smatrati nepopustljivim i može se ustanoviti da ima dovoljnu otpornost. Takav slučaj osobito je moguć kod portalnih okvira s ojačanim nosačem na mjestu priključenja na stup.

- Općenitije, isplativo je razmatrati učinak usklađivanja krutosti priključka tako da se postigne najbolja ravnoteža između cijene koštanja priključaka i cijene koštanja nosača i stupova. Na primjer, za poduprte okvire, primjena djelomično nepopustljivih priključaka, koji su nešto skuplji nego zglobni priključci, rezultira smanjenjem visine nosača. Za nepoduprte okvire, primjena jeftinijih djelomično nepopustljivih priključaka, umjesto nepopustljivih priključaka, rezultira povećanjem presjeka nosača i uglavnom povećanjem presjeka stupova.

Očito, projektanti-statičari imaju mogućnost izbora između tradicionalnog pristupa i suvremenog pristupa koji pruža ekonomičnija rješenja. Naravno, kao i uvijek, čini se da je prihvaćanje ovih novina teška zadaća. Međutim, čitava filozofija može se iskazati sljedećim: budući da se ovo mora usvojiti, treba iskoristiti pružene prednosti.

4 Formiranje modela priključka

4.1 Općenito

Istraživanja vezana uz priključke bila su usredotočena uglavnom na sljedeće aspekte:

- procjenu mehaničkih svojstava priključaka s pomoću rotacijske krutosti, otpornosti na savijanje i rotacijskog kapaciteta [5],
- postupke analize i dimenzioniranja okvira uključujući ponašanje priključaka [6].

Iz takvog je pristupa shvaćeno da postoji međukorak koji se uzima u razmatranje, radi integriranja, na konzistentan način, stvarnog odgovora priključka u analizu okvira, a naziva se formiranje modela priključka.

Formiranje modela priključka obuhvaća četiri koraka:

- *karakterizaciju priključka*: određivanje krutosti, otpornosti i duktilnosti priključaka s pomoću M_j - ϕ krivulje koja opisuje njegovo ponašanje
- *klasifikaciju priključka*: daje granične uvjete za primjenu tradicionalnih tipova modeliranja priključaka tj. zglobnih ili nepopustljivih
- *idealizaciju priključka*: izvođenje pojednostavljene M_j - ϕ krivulje tako da bude prilagođena sa specifičnim postupcima globalne analize okvira, npr. linearna idealizacija za elastičnu analizu
- *modeliranje priključka*: način kako se fizikalno predstavlja priključak s obzirom na analizu okvira.

4.2 Karakterizacija priključka

Točniji ali i skuplji način da se karakteriziraju deformabilnost i otpornost priključaka jest ispitivanje u laboratorijima. Ovaj je način u osnovi ograničen na istraživačke aktivnosti i ne preporučuje se za svakodnevnu praksu. S druge pak strane, razvijeni su brojni matematički modeli koji se mogu razvrstati u četiri glavne skupine:

- modeli prilagođeni $M_j - \phi$ krivulji,
- pojednostavnjeni analitički modeli,
- mehanički modeli,
- analiza konačnim elementima.

Postupak usvojen u revidiranom Dodatku J za karakterizaciju mehaničkih svojstava priključaka temelji se na metodi komponenata. Identifikacija različitih komponenata koje čine priključak (vijci, zavari, ukrućenja) daje dobru sliku složenosti analize priključka [7], [8]. Analiza priključaka zahtijeva točno uzimanje u obzir mnoštva pojava: nelinearnost materijala (plastičnosti, očvršćavanja), nelinearnost kontakta, geometrijske nelinearnosti (lokalni instabilitet), zaostale napone i složene geometrijske strukture. Iako numerički postupci koji se koriste nelinearnim konačnim elementima mogu uzeti u obzir sve te složenosti, oni zahtijevaju dugačke procedure i vrlo su osjetljivi na mogućnosti modeliranja i analize.

Praktično, predviđeni pristup mora stoga biti temeljen na jednostavnijim modelima koji izostavljaju mnoge promjenljivosti što proizlaze iz same procedure analize. Metoda komponenata precizno odgovara pojednostavljenom mehaničkom modelu sastavljenom od opruga i krutih veza. Pri tome je priključak simuliran odgovarajućim izborom krutih i popustljivih komponenata. Ove komponente predstavljaju specifične dijelove priključka koji, ovisno o tipu opterećivanja, tvore prepoznatljiv udio za jednu ili više konstrukcijskih osobina [9].

Osnovne su komponente uključene u Eurokod 3:

- (1) panel hrpta stupa – posmik
- (2) hrbat stupa – transverzalni pritisak (tlak)
- (3) hrbat stupa – transverzalno razvlačenje (vlak)
- (4) pojasnica stupa – savijanje
- (5) čelna ploča – savijanje
- (6) kutnici – savijanje
- (7) pojasnica i hrbat nosača – pritisak (tlak)
- (8) hrbat nosača – razvlačenje (vlak)
- (9) ploča – razvlačenje ili gnječenje
- (10) vijci – razvlačenje (vlak)
- (11) vijci – posmik
- (12) vijci (osnovni materijal: pojasnica nosača, pojasnica stupa, čelna ploča, kutnik) – gnječenje

- (13) beton – pritisak (tlak)
- (14) temeljna ploča – pritisak (tlak)
- (15) temeljna ploča – razvlačenje (vlak)
- (16) sidreni vijci - razvlačenje (vlak)
- (17) sidreni vijci - posmik
- (18) sidreni vijci - gnječenje
- (19) zavari
- (20) vuta – spojevi.

Koristeći se metodom komponenata, prvo se procjenjuju karakteristike otpornosti, krutosti i duktilnosti osnovnih komponenata. Ove se karakteristike tada kombiniraju radi postizanja mehaničkih karakteristika čitavog priključka. Kao rezultat, primjena metode komponenata je prema tome prilično široka, budući da se može primijeniti na sve čelične priključke za koje se karakteristike sastavnih komponenata mogu izvesti. Općenito, svaka od ovih komponenata karakterizirana je nelinearnim odnosom sila-deformacija ($F-\Delta$), iako su i jednostavnije idealizacije moguće. Predloženo je više modela, sastavljenih od opruga i krutih veza, koji se sastoje od istih osnovnih komponenata.

Primjena metode komponenata na čelične priključke zahtijeva sljedeće korake:

1. Odabir mjerodavnih komponenata iz općenite liste komponenata (20 različitih komponenata zasada je kodirano u Dodatku J, Eurokodu 3).
2. Procjena odgovora s pomoću odnosa sila-deformacija svake komponente.
3. Skup mjerodavnih komponenata za procjenu odgovora moment-rotacija ($M_j - \phi$) priključka, koristeći se reprezentativnim mehaničkim modelom.

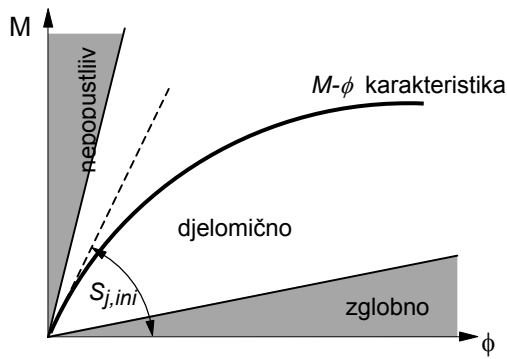
Njezina primjena može odgovarati različitim razinama "obrade" komponenata, npr. pojednostavljena karakterizacija komponenata moguća je kad se god traži samo otpornost ili inicijalna krutost priključka.

Poznavanje mehaničkih ponašanja različitih komponenata priključka omogućuje analizu velikog broja različitih konfiguracija priključaka sa relativno malim brojem komponenata. Ključni pristup metode komponenata stoga se odnosi na karakterizaciju $F-\Delta$ odnosa za svaku pojedinu oprugu (komponentu). Za procjenjivanje inicijalne krutosti priključka, potrebna je samo linearna krutost svake komponente, dok je za procjenu duktilnosti potrebno poznavanje nelinearnih $F-\Delta$ odnosa svake komponente.

4.3 Klasifikacija priključka

4.3.1 Klasifikacija prema krutosti

Klasifikacija prema krutosti u nepopustljive, djelomično nepopustljive i zglobne priključke provedena je uspoređujući jednostavno računsku krutost priključka s graničnim krutostima (slika 4.).



Slika 4. Granice klasifikacije krutosti priključka

Radi pojednostavljenja, granice krutosti izvedene su tako da dozvoljavaju neposrednu usporedbu sa proračunatom inicijalnom krutosti $S_{j,ini}$ priključka, za bilo koji tip idealizacije priključka koji se rabi u analizi unaprijed kao pretpostavljen.

Granice klasifikacije prema krutosti su sljedeće:

- nepopustljiv priključak
 $S_{j,ini} \geq 25 \cdot EJ / L$ (nepoduprti okviri)
- djelomično nepopustljiv priključak
 $0,5 \cdot EJ / L < S_{j,ini} < 25 \cdot EJ / L$ (nepoduprti okviri)

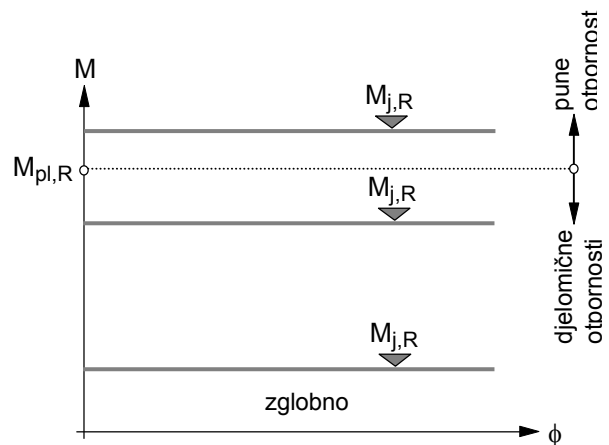
$0,5 \cdot EJ / L < S_{j,ini} < 8 \cdot EJ / L$ (poduprti okviri)

- zglobni priključak
 $S_{j,ini} \leq 0,5 \cdot EJ / L$

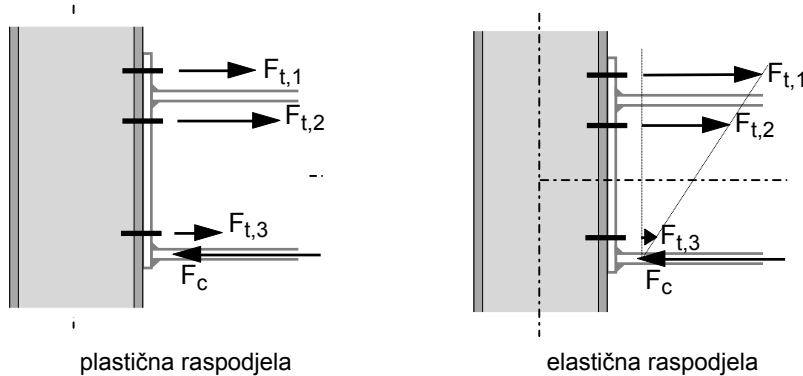
EJ/L označuje fleksijsku krutost spojenog nosača.

4.3.2. Klasifikacija prema otpornosti

Klasifikacija prema otpornosti sastoji se od uspoređivanja računskog momenta otpornosti priključka, $M_{j,Rd}$, s granicama “potpune-otpornosti” i “zglobne” (slika 5).



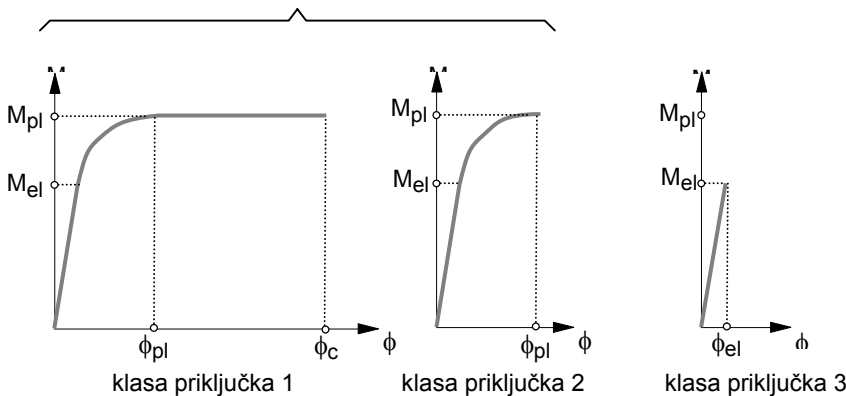
Slika 5. Granice klasifikacije otpornosti priključka



Klasa 1 - Neograničen rotacijski kapacitet za preraspodjelu momenata savijanja i unutarnjih sila.

Klasa 2 - Ograničen rotacijski kapacitet koji dopušta prelaganje 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 komponenata.



Slika 6. Klase duktilnosti priključka – klasifikacija po rotacijskom kapacitetu

Granice klasifikacije prema otpornosti su sljedeće:

- priključak pune otpornosti

$$M_{j,Rd} \geq M_{pune\ otpornosti}$$

- priključak djelomične otpornosti

$$0,25 \cdot M_{pune\ otpornosti} < M_{j,Rd} < M_{pune\ otpornosti}$$

- zglobni priključak

$$M_{j,Rd} \leq 0,25 \cdot M_{pune\ otpornosti}$$

$M_{pune\ otpornosti}$ označuje računsku otpornost slabijega konstrukcijskog elementa u spoju.

Važno je napomenuti da se klasifikacija temeljena na eksperimentalnim M_j - ϕ karakteristikama priključka nije uzimala u obzir jer se samo uzimaju računska svojstva.

4.3.3 Klasifikacija prema duktilnosti

Odgovarajuće iskustvo i prikladno detaljiranje rezultira takozvanim zglobnim priključcima koji pokazuju dovoljan rotacijski kapacitet. Znači da mogu podnijeti zahtijevane rotacije.

U slučaju priključaka otpornih na savijanje uvodi se pojam klasa duktilnosti koje obuhvaćaju rotacijski kapacitet. Ovaj problem još nije detaljnije dan u Eurokodu 3, iako se provode opsežna istraživanja o ovome problemu. Radi procjene duktilnosti priključka može se primijeniti analogija sa klasifikacijom poprečnih presjeka prema rotacijskom kapacitetu. Stoga priključke s obzirom na duktilnost možemo klasificirati u tri klase (slika 6.).

4.4. Modeliranje priključka

Tradicionalno su razmatrani sljedeći tipovi modeliranja priključaka:

- za rotacijsku krutost: kruti ili zglobni
- za otpornost: pune otpornosti ili zglobni.

Međutim, što se tiče rotacijske krutosti priključka i ekonomičnog dimenzioniranja priključka, oni mogu biti djelomično nepopustljivi. Ovime se pruža nova mogućnost modeliranja priključka: djelomično nepopustljiv-pune

otpornosti i djelomično nepopustljiv-djelomične otpornosti. Eurokod 3 uzima u obzir ove mogućnosti s tri tipa modeliranja priključka (tablica 1.).

Tablica 1. Tipovi modeliranja priključka

Popustljivost	Otpornost		
	Puna	Djelomična	Zglobna
nepopustljiv	kontinuirano	djelomično kontinuirano	–
djelomično nepopustljiv	djelomično kontinuirano	djelomično kontinuirano	–
zglobni	–	–	jednostavno

- kontinuirano: pokriva samo slučaj nepopustljiv-pune otpornosti,
- djelomično kontinuirano: pokriva slučajeve nepopustljiv-djelomične otpornosti, djelomično nepopustljiv-pune otpornosti i djelomično nepopustljiv-djelomične otpornosti.
- jednostavno: pokriva samo slučaj zglobni.

Pojmovi kontinuirano, djelomično kontinuirano i jednostavno imaju sljedeće značenje:

- kontinuirano: priključak osigurava potpuni rotacijski kontinuitet između elemenata koje povezuje;
- djelomično kontinuirano: priključak osigurava samo djelomično rotacijski kontinuitet između elemenata koje povezuje;
- jednostavno: priključak sprječava bilo kakav rotacijski kontinuitet između elemenata koje povezuje.

Ova značenja povezana su s tipom globalne analize okvira. U slučaju elastične globalne analize okvira, samo su svojstva krutosti priključka bitna za modeliranje priključka. U slučaju idealne plastične analize, glavna značajka priključka je otpornost. U svim ostalim slučajevima svojstva i krutosti i otpornosti mjerodavni su za način na koji se moraju modelirati priključci. Navedene

Tablica 2. Modeliranje priključka i analiza okvira

Modeliranje priključka	Tip analize okvira		
	Elastična	Idealno plastična	Elastična-idealno plastična i elastoplastična
kontinuirano	nepopustljiv	pune otpornosti	nepopustljiv-pune otpornosti
djelomično kontinuirano	djelomično nepopustljiv	djelomične otpornosti	nepopustljiv-djelomične otpornosti; djelomično nepopustljiv-pune otpornosti djelomično nepopustljiv-djelomične otpornosti
jednostavno	zglobni	zglobni	zglobni

Modeliranje priključka	Priključci nosač-stup (savijanje oko jače osi)	Nastavci nosača	Stopa stupa
Jednostavno			
Djelomično kontinuirano			
Kontinuirano			

Slika 7. Pojednostavnjeno modeliranje priključaka za analizu okvira mogućnosti i njihova fizikalna interpretacija za analizu okvira dani su u tablici 2. odnosno na slici 7.

4.5 Idealizacija priključka

$M_j-\phi$ krivulja koja opisuje nelinearno ponašanje priključka nije prikladna za svakodnevnu praksu. Međutim, ona može biti idealizirana bez značajnijeg gubitka točnosti. Jedna od najjednostavnijih idealizacija je elastičnim-idealno plastičnim odnosom (slika 8.). Prednost takvog modeliranja je u tome da je ono potpuno slično onom koje se primjenjuje za modeliranje poprečnih presjeka konstrukcijskih elemenata izloženih savijanju.

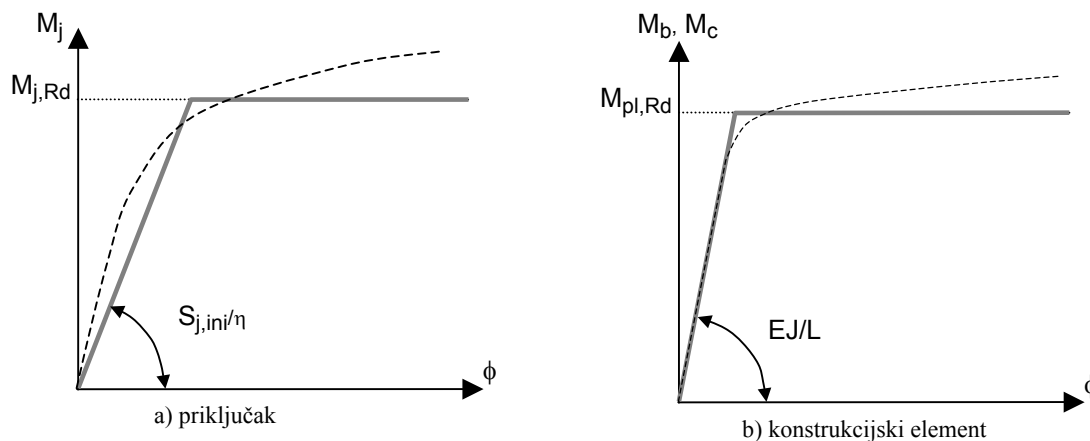
Moment $M_{j,Rd}$ ki odgovara platou tečenja naziva se u Eurokodu 3 računski otpornost na savijanje. Može se smatrati kao pseudoplastični moment otpornosti priključka.

Učinci očvršćivanja i mogući membranski učinci su zanemareni, što objašnjava razliku sa slike 8. između stvarne $M-\phi$ krivulje i platoa tečenja na idealizaciji.

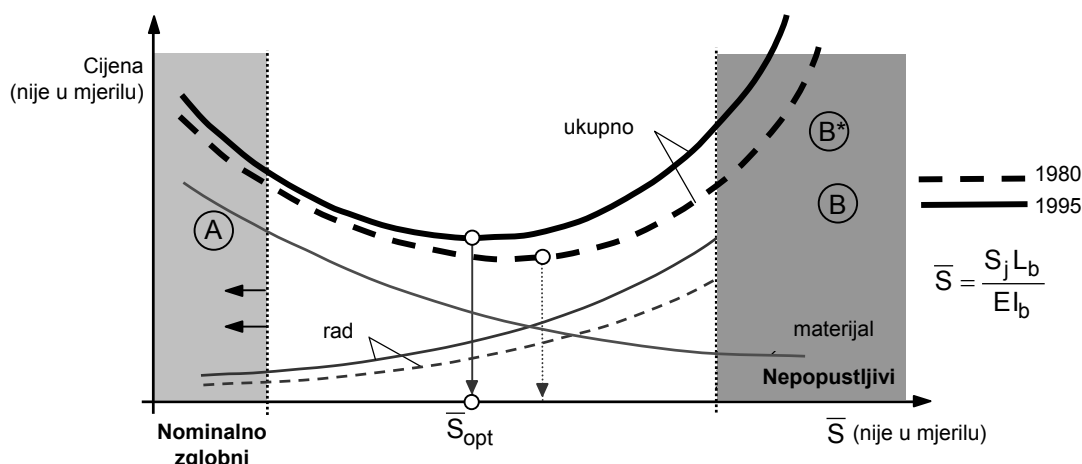
Vrijednost konstantne krutosti priključka $S_{j,ini}/\eta$ obrazložena je u nizu radova, [8], a praktične vrijednosti dane su u Eurokodu 3, Revidirani dodatak J. Koeficijent η proizlazi iz vrlo izražene nelinearnosti $M_j-\phi$ krivulja priključaka u usporedbi s $M-\phi$ krivuljama za konstrukcijske elemente.

Postoje različite mogućnosti idealizacije $M_j-\phi$ krivulja priključaka. Odabir jedne od njih ovisi o tipu globalne analize okvira, a Eurokod 3 ih navodi prema sljedećem:

- elastična idealizacija za elastičnu analizu
- idealno plastična idealizacija za idealno plastičnu analizu



Slika 8. Bilinearizacija $M-\phi$ krivulja



Slika 9. Kvalitativan odnos čelične konstrukcije ovisno o relativnoj krutosti priključka

- nelinearna idealizacija za elasto-plastičnu analizu.

5 Ekonomska opravdanost novog pristupa

Suvremeni pristup ponašanju priključaka zasniva se na realnom ponašanju priključaka kao djelomično nepopustljivih. Proizašao je iz ekonomske opravdanosti konstrukcije u kojoj su priključci razmatrani kao djelomično nepopustljivi. Radi postizavanja minimalne cijene čelične konstrukcije, moguće su dvije strategije proračuna, u odnosu prema izvedbi priključka:

- Pojednostavljenje detaljiziranja priključka, npr. smanjenjem troškova radioničke izvedbe. Značajno je za nepoduprte okvire gdje priključci preuzimaju značajne momente i to su nepopustljivi priključci.
- Smanjenjem dimenzija elemenata, npr. smanjenjem troškova materijala. To je značajno za poduprte okvire s nominalno zglobnim priključcima.

Općenito obje strategije vodit će k primjeni djelomično nepopustljivih priključaka. U slučaju nepopustljivih priključaka ekonomično rješenje može se postići već ako je krutost priključka blizu klasifikacijske granice s djelomično nepopustljivim priključkom.

Iz različitih ekonomskih studija može se zaključiti da je moguća ušteda zbog primjene djelomično nepopustljivih priključaka i odgovarajućeg proračuna 20-25% u slučaju nepoduprtih okvira i 5-9% u slučaju poduprtih okvira. Uz pretpostavku da je cijena samih čeličnih okvira oko 10% ukupne cijene poslovne građevine i oko 20% za industrijsku halu, smanjenje ukupnih troškova građenja može biti procijenjeno na 4-5% za nepoduprte okvire. Za poduprte okvirne sustave moguće su uštede od 1-2%. Troškovi materijala i radioničke izrade ovisni su o relativnoj krutosti priključka [10] (slika 9.).

S povećanjem relativne krutosti priključka troškovi utroška materijala se smanjuju, krivulja A, dok se troškovi

rada povećavaju, krivulja B. Za ukupne troškove koji su zbroj troškova krivulja A i B može se naći minimum, a prema tome i optimalna relativna krutost. U mnogo slučajeva vrijednost koja vodi do optimalnog proračuna konstrukcijskog sustava s uvažavanjem minimuma ukupnih troškova nije ni u području nominalno zglobnih ni nepopustljivih priključaka.

Prateći tendenciju posljednjih desetljeća, očito je da se troškovi rada povećavaju u usporedbi s troškovima utroška materijala (vidi krivulju B*). Kao posljedica toga, vidi sliku 9., postaje jasno da se brz razvoj optimalnih krutosti priključka pomiče prema više popustljivim priključcima. Stoga će za nalaženje ekonomičnog rješenja čelične konstrukcije upotreba djelomično nepopustljivih priključaka postati sve više zanimljivijom.

6. Zaključak

Proračun konstrukcijskih priključaka koji je predložen u Eurokodu 3, temeljen je na istraživanjima provedenim u posljednja dva desetljeća. Eurokod 3 daje praktične smjernice za karakterizaciju većine čeličnih priključaka (priključci stup-nosač, nastavci nosača, temeljne stope stupa, itd.) okvira izvedenih od I ili H poprečnih presjeka, opterećenih statičkim opterećenjem. Daljna istraživanja usmjerena su na proširenje smjernica za karakterizaciju priključaka na priključke spregnutih konstrukcija na priključke izvedene od drugih tipova poprečnih presjeka i na ostale tipove opterećenja.

Novi pristup, djelomično nepopustljivi priključci – djelomično kontinuirana konstrukcija, omogućuje veću slobodu nego tradicionalni pristup. To proizlazi iz činjenice da su karakteristike priključka u proračunu razmatrane kao varijable, koje se biraju radi zadovoljavanja pojedinih zahtjeva određenog projekta.

Za poduprte okvire, novi pristup omogućuje uporabu manjih poprečnih presjeka nosača i smanjenje troškova konstrukcijskog okvira. Primjena ovakvih nosača rezultira smanjenjem ukupne visine konstrukcije, a prema

LITERATURA

- [1] Eurocode 3, *Design of Steel Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings*, European Prestandard ENV 1993-1-1, Brussels: CEN, 1992.
- [2] Revised Annex J of Eurocode 3. *Joints in Building Frames*, European Prestandard ENV 1993-1-1: 1992/A2, Brussels: CEN, 1998.
- [3] Eurocode 3, *Design of Steel Structures, Part 1.8: Design of Joints*, European Prestandard prEN 1993-1-8, Final Draft, Brussels: CEN, 2001.
- [4] Maquoi, R.; Chabrolin, B.: *Frame Design Including Joint Behaviour*, ECSC Report 18563, Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 1998.
- [5] Nethercot, D.; Zandonini, R.: *Methods of prediction of joint behaviour – Beam to column connections*, In: Naranayan, R. (ed.) *Structural Connections – Stability and Strength*, Elsevier Applied Science, 1989., 23-62
- [6] European Convention for Constructional Steelwork, *Analysis Design of Steel Frames with Semi-rigid Joints*, Publication 67, Brussels: ECCS, 1992.
- [7] Zoetemeijer, P.: *A design method for the tension side of statically-loaded bolted beam-to-column joints*, Heron 1974; 1-59
- [8] Weynand, K.; Jaspert, J.-P.; Steenhuis, M.: *The stiffness model of revised Annex J of Eurocode 3*, In: Bjorhovde, R.; Colson, A.; Zandonini, R., (editors): *Connections in steel structures*, Trento, 1995., 441-452
- [9] Huber, G.; Tschemmerneegg, F.: *Modelling of steel connections*, *Journal of Constructional Steel Research* 45 (1998) 2, 199-216
- [10] Weynand, K.; Jaspert, J.-P.; Steenhuis, M.: *Economy Studies of Steel Building Frames with Semi-Rigid Joints*, *Journal of Constructional Steel Research* 46:1-3 (1998)