

Modeliranje priključka nosač-stup prema Eurokodu 3

Darko Dujmović, Davor Skejić, Boris Androić

Ključne riječi

priključak nosač-stup,
modeliranje,
metoda komponenata,
vijčana izvedba,
primjena novog
postupka

Key words

girder-pier connection,
modeling,
component method,
bolted connection,
application of the new
procedure

Mots clés

assemblage poutre-poteau,
modélisation,
méthode des composantes,
assemblage boulonné,
mise en œuvre de la
nouvelle méthode

Ключевые слова

подсоединение балка-
колонна,
моделирование,
метод компонентов,
выполнение винтами,
применение нового
способа

Schlüsselworte:

Anschluss Träger - Stütze,
Modellieren,
Methode der
Komponenten,
Verschraubungsausführung,
Anwendung eines neuen
Verfahrens

D. Dujmović, D. Skejić, B. Androić

Stručni rad

Modeliranje priključka nosač-stup prema Eurokodu 3

Razmatra se modeliranje priključaka između nosača i stupova uvažavajući njihovo stvarno ponašanje opisano M_j - ϕ krivuljom. Prvo su općenita razmatranja o novoj filozofiji proračuna priključaka, prema Eurokodu 3. Zatim se opisuje metoda komponenata kao analitička metoda karakterizacije priključaka. Identificirane su i obrađene komponente koje čine priključak nosača i stupa u vijčanoj izvedbi. Primjena opisanog modeliranja pokazana je posebno razvijenim kompjutorskim programom CoP.

D. Dujmović, D. Skejić, B. Androić

Professional paper

Girder-pier connection modeling according to Eurocode 3

The modeling of girder/pier connections is analyzed taking into account real behavior of such connections as described by the M_j - ϕ curve. General considerations relating to the new connection design philosophy, as based on Eurocode 3, are given in the initial part of the paper. The method of components, an analytical method for characterization of connections, is then described. Components enabling bolted connection between girders and piers are identified and analyzed. The use of the described modeling procedure is shown by means of a specially devised computer program CoP.

D. Dujmović, D. Skejić, B. Androić

Ouvrage professionnel

Modélisation de l'assemblage poutre-poteau selon l'Eurocode 3

L'on étudie la modélisation des assemblages poutres-poteaux tenant compte de leur comportement réel décrit par la courbe M_j - ϕ . Au début on présente les considérations générales sur la nouvelle philosophie de calcul des assemblages, conformées à l'Eurocode 3. On décrit ensuite la méthode des composantes en tant qu'une méthode analytique de la caractérisation des assemblages. On a identifié et traité les composantes constituant un assemblage boulonné poutre-poteau. La mise en œuvre de la modélisation décrite a été démontrée par le logiciel CoP, développé à cet effet.

Д. Дуймович, Д. Скеич, Б. Андрић

Отраслевая работа

Моделирование подсоединения балка-колонна согласно Еврокоду 3

Обсуждается моделирование подсоединений между балками и колоннами, учитывая их действительное поведение, описано M_j - ϕ кривой. Сначала, речь идет о общем рассмотрении новой философии расчета подсоединений, согласно Еврокоду 3. Потом, описывает метод компонентов как аналитический метод характеристики подсоединений. Идентифицированы и обработаны компоненты, представляющие подсоединения балки и колонны в выполнении винтами. Применение описанного моделирования показано особенно развитой компьютерной программой CoP

D. Dujmović, D. Skejić, B. Androić

Fachbericht

Modellieren des Anschlusses Träger - Stütze nach Eurocode 3

Erwägt ist das Modellieren des Anschlusses zwischen Trägern und Stützen, wobei deren wirkliches Verhalten, beschrieben mittels der M_j - ϕ Kurve, in Betracht gezogen wird. Am ersten Platz sind allgemeine Erwägungen über die neue Philosophie der Berechnung von Anschlüssen nach Eurocode 3. Weiter beschreibt man die Methode der Komponenten als analytische Methode der Charakterisierung der Anschlüsse. Identifiziert und bearbeitet sind die Komponenten die den Anschluss zwischen Träger und Stütze in Verschraubungsausführung vorstellen. Die Anwendung des beschriebenen Modellierens ist mittels des besonders dafür entwickelten Komputersprogramms CoP dargestellt

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

1 Uvod

Laboratorijska istraživanja i razvitak numeričkih metoda potaknuli su brži razvoj ideje o realnijoj podjeli priključaka za potrebe svakodnevnih inženjerskih prakse. Danas se složeno ponašanje priključaka čeličnih konstrukcija, nelinearnost $M_j-\phi$ dijagrama, vrlo djelotvorno rješava metodom komponenata koja je pobliže objašnjena u radu autora [1].

Uz primjenu metode komponenata, te razvoj mehaničkih modela kojima se opisuju pojedini tipovi priključaka, moguće je odrediti osnovne karakteristike, odnosno poprilično jasnu i realnu sliku ponašanja priključka. Osnovne karakteristike priključka su krutost, otpornost na savijanje i kapacitet rotacije.

U ovome radu prikazat ćemo osnovne ideje novog pristupa. Numerički primjer ilustrativno će pokazati nov način dokaza sigurnosti priključka nosač-stup prema Eurokodu 3 i prednosti koje metoda komponenata nudi u usporedbi s tradicionalnim pristupom.

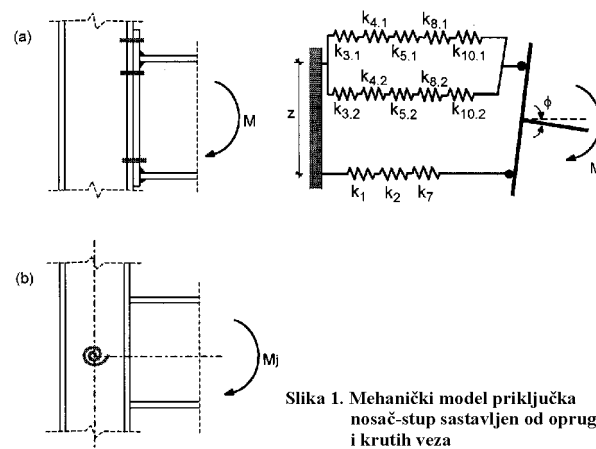
Važno je još napomenuti da nov pristup modeliranju priključaka zbog svoje opsežnosti nužno povlači za sobom upotrebu računalnih paketa. U ovome radu koristili smo se *Connection programom* - CoP [2].

2 Model priključka nosač-stup

Identifikacija različitih komponenata koje čine priključak daje zornu sliku složenosti analize priključka. Analiza priključaka zahtijeva točno uzimanje u obzir mnoštvo pojava: nelinearnost materijala (plastičnost, očvršćivanje), nelinearnosti kontakta i klizanja u spoju, geometrijsku nelinearnost (lokalni instabilitet), zaostale napone i složenu geometriju konstrukcijskog detalja. 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 eliminiraju mnoge varijabilnosti koje proizlaze iz same procedure analize. Iz tog je razloga Eurokod 3 [3] usvojio postupak proračuna poznat pod nazivom metoda komponenata. Metoda komponenata vrlo dobro 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 vrsti naprezanja, tvore prepoznatljiv udio za jednu ili više konstrukcijskih osobina, kao što je prikazano na slici 1. Tipične komponente vijčanog priključka su: panel hrpta stupa u posmiku, čelona ploča u savijanju, po-

jasnica nosača u savijanju, hrpat nosača u vlaku, pojasnica nosača i hrpat u tlaku, vijci u vlaku i varovi.



Slika 1. Mehanički model priključka nosač-stup sastavljen od opruga i krutih veza

Koristeći se metodom komponenata, prvo se procjenjuju karakteristike otpornosti, krutosti i duktilnosti osnovnih komponenata. Ove se karakteristike tada kombiniraju radi postizavanja mehaničkih karakteristika čitavog priključka.

Općenito, svaka od ovih komponenata karakterizirana je nelinearnom krivuljom sila-deformacija ($F-\Delta$), iako su moguće i jednostavnije idealizacije. Predloženo je nekoliko modela od opruga i krutih veza koji se sastoje od istih osnovnih komponenata [4]. Pojednostavljeni model komponenata revidiranog Dodatka J, EC3 [5] kombinira odgovor spoja na savijanje i odgovor panela stupa na posmik, što rezultira ekvivalentnom rotacijskom oprugom, kao što je prikazano na slici 1.b.

Primjena metode komponenata na čelične priključke zahtijeva sljedeće korake:

1. Odabir aktivnih komponenata iz globalne liste komponenata (20 različitih komponenata zasada je obuhvaćeno u Eurokodu 3, dio 1.8).
2. Procjena odgovora sila-deformacija ($F-\Delta$) svake komponente.
3. Sastavljanje aktivnih komponenata za procjenu odgovora priključka koristeći se reprezentativnim mehaničkim modelom 1.a.

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

Poznavanje mehaničkog ponašanja različitih komponenata priključka omogućuje analizu velikog broja različitih konfiguracija priključaka s relativno malim brojem ponavljajućih komponenata. Bit metode komponenata stoga se odnosi na karakterizaciju $F-\Delta$ krivulje za svaku pojedinu oprugu. Za procjenu inicijalne krutosti priključka,

zahtijeva se samo linearna krutost svake komponente. Međutim za procjenu duktilnosti zahtijeva se poznavanje nelinearnog $F-\Delta$ odgovora svake komponente.

U ovom radu obuhvaćene su samo komponente bitne za priključak nosač-stup. Za procjenu duktilnosti priključka, komponente priključka podijeljene su u tri skupine analogno klasifikaciji poprečnih presjeka čeličnih elemenata: komponente s visokom duktilnošću, komponente s ograničenom duktilnošću te krte komponente [6].

3 Pouzdanost komponenata modela nosač-stup

3.1 Komponente s visokom duktilnošću

Prema [6], ove komponente predstavljene su $F-\Delta$ krivuljom koja se mijenja od početno linearno elastičnog ponašanja do drugog dijela u kojem se dozvoljava povećanje deformacije s povećanjem sile. Kapacitet deformacije komponente gotovo je neograničen.

3.1.1 Hrbat stupa – posmik

Rezultati opsežnih ispitivanja sređenih i obrađenih u [7] jasno pokazuju postojanje rezerve otpornosti hrpta stupa u posmiku.

Otpornost zone panela hrpta stupa na posmik dana je s:

$$V_{wp,Rd} = \frac{f_{y,wc} \cdot A_{vc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (1)$$

gdje je $f_{y,wc}$ granica popuštanja hrpta stupa i A_{vc} posmična površina stupa. U slučaju zavarenih poprečnih presjeka, posmična površina stupa odgovara površini hrpta. Za valjane profile posmična površina poprečnog presjeka dana je izrazom:

$$A_{vc} = A_c - 2 \cdot b_c \cdot t_{fc} + (t_{wc} + 2 \cdot r_c) \cdot t_{fc} \quad (2)$$

gdje je A_c ukupna površina stupa, b_c , t_{fc} i t_{wc} su, kako slijedi, širina pojasnice, debljina pojasnice i debljina hrpta stupa, a r_c je radijus zakrivljenosti sjecišta hrpta i pojasnice. Jednadžba (1) zanemaruje uzdužnu silu u stupu. S druge strane, primjenom Von Misesova kriterija tečenja bilo bi moguće odrediti reduciranu vrijednost otpornosti koja uzima u obzir uzdužnu silu u stupu.

U radu [7] predlaže se koeficijent redukcije 0,9 koji približno rješava ovaj problem, a prihvaćen je i ugrađen u Dodatak J, EC3. Otpornost neukrućenog hrpta stupa na posmik za jednostrano uobličene priključke određena je izrazom:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{y,wc} \cdot A_{vc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (3)$$

gdje je γ_{M0} parcijalni faktor sigurnosti na strani otpornosti.

Prema [7], [8] i [9] doprinos posmične deformacije panela hrpta stupa na ukupnu inicijalnu rotaciju priključka jest:

$$\phi_s = \frac{Q}{G \cdot A_{vc}} \quad (4)$$

gdje Q označava posmičnu silu u hrptu stupa, uzetu kao $2 \sum F_i$ (F_i je sila u i -tom redu vijaka), a A_{vc} je već definiran prije. Odgovarajuća uzdužna krutost prema tome glasi:

$$K_{wp} = \frac{G \cdot A_{vc}}{z} = \frac{0,38 \cdot E \cdot A_{vc}}{z} \quad (5)$$

gdje z označava krak između dijela površine u tlaku i dijela površine u vlaku. Iz izraza (4) uočava se da krutost ove komponente ovisi o veličini posmične sile na hrptu stupa.

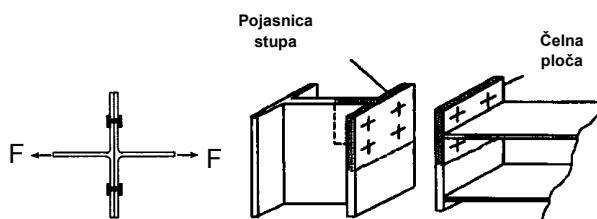
Za dvostrano uobličeni priključak i za neujednačene momente savijanja izraz (5) modificira se parametrom β tako da sada glasi:

$$K_{wp} = \frac{0,38 \cdot E \cdot A_{vc}}{\beta \cdot z} \quad (6)$$

Za ukružene panele hrpta stupa posmična deformacije može se zanemariti ($K_{s,wp} = \infty$). Konačno, treba napomenuti da za vitke hrptove instabilitet postaje mjerodavan faktor koji zasada nije obuhvaćen EC3.

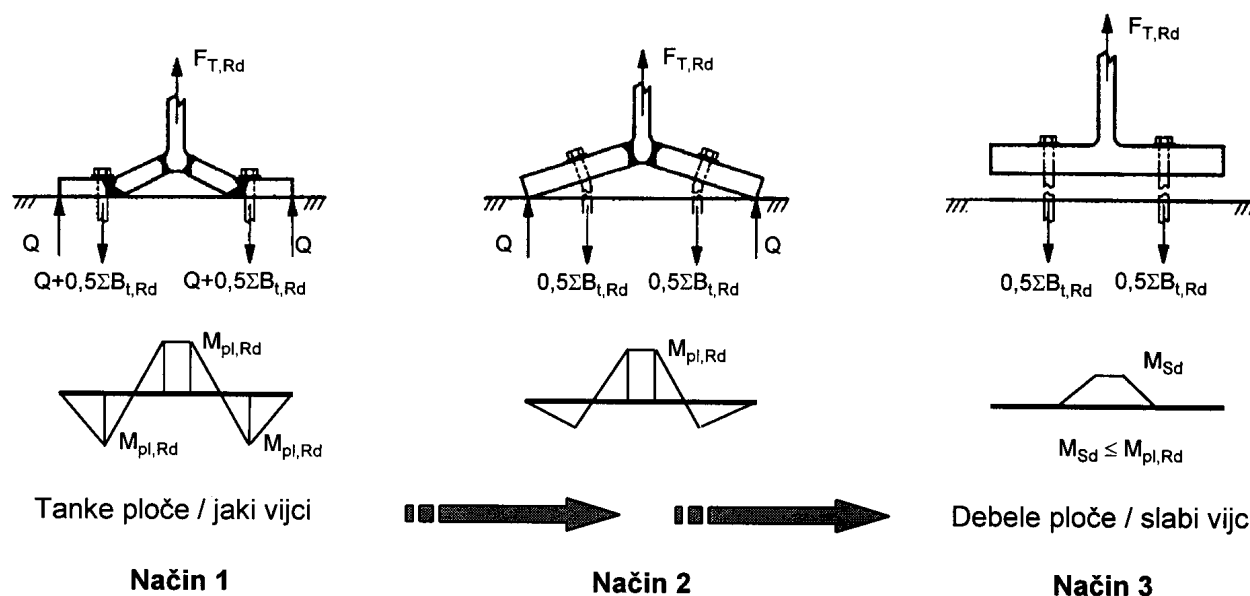
3.1.2 Čelna ploča – savijanje

Deformacija ove komponente obično se procjenjuje primjenom jednostavnoga zamjenskog modela, T komad [10], [11]. On predstavlja ponašanje vlačne zone priključka, a prikazan je na slici 2.



Slika 2. Zamjenski model, T komad

Pretpostavljaju se tri moguća načina otkazivanja pojasnice ekvivalentnog T komada koja će biti slična onima koji se očekuju da će nastupiti na temeljnoj komponenti koju T komad predstavlja.



Slika 3. Načini otkazivanja pojasnice T-komada

Načini otkazivanja:

Način 1. Potpuno tečenje čelne ploče

$$F_{T,ep,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,ep,Rd}}{m} \quad (7.1)$$

Način 2. Otkazivanje vijaka sa tečenjem čelne ploče

$$F_{T,ep,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,ep,Rd} + n \cdot \sum B_{t,Rd}}{m + n} \quad (7.2)$$

Način 3. Otkazivanje vijaka

$$F_{T,ep,Rd} = \sum B_{t,Rd} \quad (7.3)$$

U gornjim je izrazima m udaljenost između središnje linije vijaka i ruba vara koji spaja hrbat nosača sa čelnom pločom, n je efektivna udaljenost do slobodnog kraja, $B_{t,Rd}$ odnosi se na otpornost vijaka na vlak, a $M_{pl,ep,Rd}$ na otpornost čelne ploče na savijanje:

$$M_{pl,1,ep,Rd} = 0,25 \cdot \sum l_{eff,1,ep} \cdot t_{ep}^2 \cdot f_y / \gamma_{M0} \quad (8.1)$$

$$M_{pl,2,ep,Rd} = 0,25 \cdot \sum l_{eff,2,ep} \cdot t_{ep}^2 \cdot f_y / \gamma_{M0} \quad (8.2)$$

$$n = e_{min} \text{ ali } n \leq 1,25 \cdot m.$$

$l_{eff,ep}$ su vrijednosti efektivnih širina čelne ploče u savijanju, a t_{ep} i $f_{y,ep}$ debljina i granica popuštanja čelne ploče.

$\sum l_{eff,1}$ je vrijednost $\sum l_{eff}$ za način 1,

$\sum l_{eff,2}$ je vrijednost $\sum l_{eff}$ za način 2.

Za otpornost čelne ploče na savijanje uzima se minimalna vrijednost od moguća tri načina otkazivanja.

Analitički izrazi za inicijalnu krutost T komada mogu biti izvedeni iz klasične teorije nosača, kada je efektivna širina ispravno procijenjena, iz čega slijedi:

$$K_{b,ep} = \frac{0,85 \cdot E \cdot l_{eff} \cdot t_{ep}^3}{m^3} \quad (9)$$

Ekperimentalni rezultati potvrdili su postojanje rezerve krutosti.

3.1.3 Pojasnica stupa - savijanje

Ova se komponenta ponaša slično kao čelna ploča opterećena na savijanje te pristup s ekvivalentnim T komadom jednako vrijedi. Izuzetak čini slučaj kada je pojasnica ukrućena. Za pojasnicu stupa bez ukrućenja pretpostavlja se jednak stupanj duktilnosti i rezerve krutosti. Izrazi za otpornost i krutost su:

Načini otkazivanja:

Način 1. Potpuno tečenje pojasnice stupa;

$$F_{T,fc,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,fc,Rd}}{m} \quad (10.1)$$

Način 2. Otkazivanje vijaka sa tečenjem pojasnice stupa,

$$F_{T,fc,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,fc,Rd} + n \cdot \sum B_{t,Rd}}{m + n} \quad (10.2)$$

Način 3. Otkazivanje vijaka,

$$F_{T,fc,Rd} = \sum B_{t,Rd} \quad (10.3)$$

Za otpornost pojasnice stupa na savijanje uzima se minimalna vrijednost od navedena tri načina otkazivanja.

Krutost ove komponente dana je izrazom:

$$K_{b,fc} = \frac{0,85 \cdot E \cdot I_{eff} \cdot t_{fc}^3}{m^3} \quad (11)$$

Različite oznake imaju isto značenje kao i za čelnu ploču, uz primjenu karakteristika pojasnice stupa umjesto čelne ploče.

3.1.4 Hrbat nosača – vlak

Za vijčane priključke s čelnom pločom računaska vlačna otpornost hrpta nosača dana je izrazom:

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} \cdot t_{wb} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} \quad (12)$$

gdje $b_{eff,t,wb}$ odgovara efektivnoj širini ekvivalentnog T komada koji predstavlja čelnu ploču izloženu savijanju, a t_{wb} i $f_{y,wb}$ označavaju, redom, debljinu hrpta nosača i odgovarajuću granicu tečenja. Inicijalna krutost za ovu komponentu može biti uzeta kao beskonačna ($K_{t,wb} = \infty$).

3.2 Komponente s ograničenom duktilnošću

Ovo su komponente koje karakterizira $F-\Delta$ krivulja s graničnom točkom nakon koje krivulja pada.

3.2.1 Hrbat stupa - tlak

Ova komponenta posjeduje ograničeno duktilno ponašanje sa padanjem krivulje nakon dostizanja maksimalne otpornosti [12].

Otpornost ove komponente može se podijeliti prema dvama različitim kriterijima, otpornost na gužvanje i otpornost na izbočivanje. Otpornost na gužvanje hrpta stupa mora uzeti u obzir interakciju između lokalnih napona koji nastaju iz posmičnih napona u zoni panela, vertikalnih normalnih napona zbog uzdužne sile i momenta savijanja u stupu i horizontalnih normalnih napona koje prenose pojasnice nosača. Koristeći se Von Misesovim kriterijem tečenja, računaska otpornost na gnječenje jest:

$$F_{c,wc,Rd} \leq \frac{k_{c,wc} \cdot \omega \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{y,wc}}{\gamma_{M1}} \quad (13)$$

$b_{eff,c,wc}$ je efektivna širina hrpta stupa u tlaku, dana s, za vijčane priključke izrazom:

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2} \cdot a + 5 \cdot (t_{fc} + s) + s_p \quad (14)$$

s a označena je efektivna debljina vara, $s = r$ za valjane poprečne presjeke stupa i s_p označava dužinu nastalu rasprostiranjem pod kutem od 45° kroz čelnu ploču. $k_{c,wc}$ uzima u obzir utjecaj vertikalnog normalnog napona σ_v i dan je izrazom:

$$k_{c,wc} = 1,25 - 0,5 \cdot \frac{\sigma_v}{f_{y,wc}} \leq 1 \quad (\sigma_v > 0,5 \cdot f_{y,wc}) \quad (15)$$

Faktor redukcije ω uzima u obzir učinak posmika u hrptu stupa [7], a dan je izrazom:

$$\omega = \begin{cases} 1 & 0,0 \leq \beta \leq 0,5 \\ \omega_1 + 2 \cdot (1 - \beta) \cdot (1 - \omega_1) & 0,5 \leq \beta \leq 1,0 \\ \omega_1 + (\beta - 1) \cdot (\omega_2 - \omega_1) & 1,0 \leq \beta \leq 2,0 \end{cases} \quad (16)$$

sa

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \cdot (b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc} / A_{vc})^2}} \quad (17.1)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + 5,2 \cdot (b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc} / A_{vc})^2}} \quad (17.2)$$

Računska otpornost na izbočivanje uzeta je približno rabeći Winterovu formulu:

$$F_{c,wc,Rd} \leq \frac{k_{c,wc} \cdot \omega \cdot \rho \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{y,wc}}{\gamma_{M1}} \quad (18)$$

gdje je ρ faktor redukcije za izbočavanje ploče (panela hrpta stupa):

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,22}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{za } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad (19.1)$$

odnosno

$$\rho = 1 \quad \text{za } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad (19.2)$$

$\bar{\lambda}_p$ je svedena vitkost ploče (panela hrpta stupa),

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 \cdot \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} \cdot d_{wc} \cdot f_{y,wc}}{E \cdot t_{wc}^2}} \quad (20)$$

Inicijalna deformacija ove komponente Φ_c glasi prema [9]:

$$\Phi_c = \frac{N}{E \cdot A_c} \cdot \frac{d}{h_c} \quad (21)$$

U izrazu (21) N je ukupna tlačna sila, uzeta kao $2\sum F_i$ (F_i je sila u i -tom redu vijaka), A_c je efektivna površina hrpta u tlačnoj zoni, $A_c = t_{wc} \cdot b_{eff,c,wc}$, d je ravna visina

hrpta stupa, a h_c je visina nosača minus debljina pojasnice nosača, tako da inicijalna (uzdužna) krutost postaje

$$K_{c,wc} = E \cdot A_c \cdot \frac{1}{d} = E \cdot \frac{0,7 \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc}}{d} \quad (22)$$

Potrebno je napomenuti da je za proračun krutosti upotrijebljena reducirana efektivna širina koja je usvojena za proračun otpornosti ($0,7 \cdot b_{eff,c,wc}$).

3.2.2 Hrbat stupa - vlak

Isključujući pojave instabiliteta, otpornost ove komponente slična je kao da se radi o hrptu stupa u tlaku. Dosljedno tome, računaska otpornost neukrućenog hrpta stupa glasi:

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega \cdot b_{eff,t,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{y,wc} \cdot k_{t,wc}}{\gamma_{M0}} \quad (23)$$

gdje različite oznake imaju isto značenje kao prije zamjenjujući t (vlak) sa c (tlak). Napominje se da je u Eurokodu 3, Dodatak J zanemaren utjecaj vertikalnih napona nastalih u stupu. U svrhu uzimanja u obzir ovog utjecaja, otpornost hrpta stupa na vlak trebalo bi reducirati analogno otpornosti hrpta stupa na tlak sa $k_{t,wc}$.

Analogno s prethodnim slučajem, inicijalna deformacija ove komponente Φ_w glasi prema [9]:

$$\Phi_w = \frac{T}{E \cdot A_t} \cdot \frac{d}{h_t} \quad (24)$$

U izrazu (24) T je ukupna vlačna sila, uzeta kao $2 \sum F_i$ (F_i je sila u i -tom redu vijaka), A_t je efektivna površina hrpta u vlačnoj zoni, $A_t = t_{wc} \cdot b_{eff,t,wc}$, d je ravna visina hrpta stupa, a h_t je udaljenost od vlačne sile do centra pritiska, tako da inicijalna (uzdužna) krutost postaje:

$$K_{t,wc} = E \cdot A_t \cdot \frac{1}{d} = E \cdot \frac{0,7 \cdot b_{eff,t,wc} \cdot t_{wc}}{d} \quad (25)$$

3.2.3 Pojasnica i hrbat nosača – tlak

Komponenta, pojasnica i hrbat nosača u tlaku, u blizini spoja nosača ograničava otpornost priključka. Stoga se zahtijeva određivanje njezine najveće otpornost prema izrazu:

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{z} \quad (26)$$

Njezina krutost se uzima kao beskonačna.

3.3 Krte komponente

Ove komponente ponašaju se linearno sve do otkazivanja. Iskazuju vrlo malu deformaciju prije otkazivanja.

3.3.1 Vijci u vlaku

Vijci iskazuju linearni odgovor sila-pomak ($F-\Delta$) sve do otkazivanja. Otpornost i inicijalna krutost svakog vijka dana je sljedećim izrazima:

$$F_{t,Rd} = 0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s \quad (27)$$

$$K_{t,b} = \frac{1,6 \cdot E \cdot A_s}{L_b} \quad (28)$$

A_s je površina jezgre vijka, f_{ub} vlačna čvrstoća vijaka i L_b je zbroj debljina ploča koje se spajaju (pojasnica stupa i čelna ploča), debljine podložnih pločica, te polovice debljine matice i glave vijka.

3.3.2 Varovi

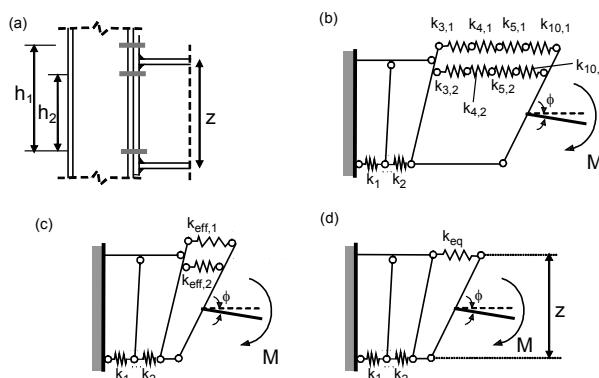
Varovi su nedeformabilni, usvaja se $K_w = \infty$. Idealno-plastični model usvaja se kao odgovarajući, a računaska otpornost jest:

$$F_{w,Rd} = a \cdot \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{Mw}} \quad (29)$$

U izrazu (29) a je efektivna debljina vara, f_u je vlačna čvrstoća vara i β_w je faktor korelacije.

4 Sastavljanje komponenata

Sastavljanje komponenata tvori treći i posljednji korak metode komponenata. Kako i samo ime govori, treći korak sastoji se u sastavljanju komponenata tako da se dobivaju mehanička svojstva cijelog priključka. Odnos između svojstava komponenata i svojstava priključka temelji se na poznatom pojmu nazvanom "raspodjela unutarnjih sila u priključku". Dakle, za zadani skup vanjskih sila koje djeluju na priključak određuje se način na koji se ove sile raspodjeljuju na komponente koje tvore priključak (analogija s poprečnim presjekom konstrukcijskog elementa).



Slika 4. Model opruge priključka s dva reda vijaka u vlaku

Slika 4. prikazuje primjer modela opruga za vijčani priključak s čelnom pločom. Svaka od komponenata posjeduje krutost k_i . Opruge su spojene serijski i/ili paralelno i inicijalna je krutost:

$$S_{j,ini} = \frac{E \cdot z^2}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}} \quad (30)$$

Otpornost priključka na savijanje jest:

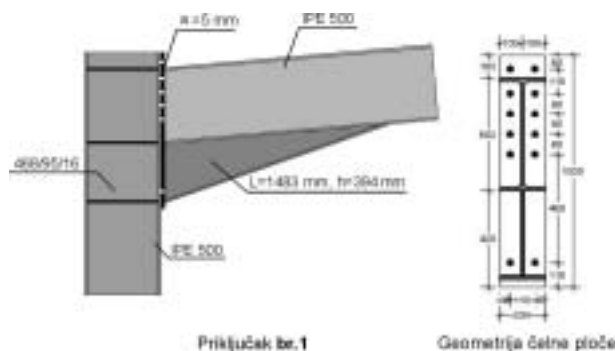
$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r \cdot F_{tr,Rd} \quad (31)$$

U izrazu (30) $F_{tr,Rd}$ je efektivna vlačna otpornost r -tog reda vijaka, h_r je udaljenost od r -tog reda vijaka do centra pritiska i r je broj redova vijaka.

5 Numerički primjer

Numerički primjer prikazuje praktičnu primjenu novog pristupa proračunu čeličnih priključaka nosač-stup koji je usvojen u EC3.

Priključak nosač-stup prikazan na slici 5. stvarno je izveden priključak industrijskog portalnog okvira sa skošnim nosačem ($\alpha = 5^\circ$), raspona $L = 19,5$ m, visine $h = 6,32$ (u sljemenu $H = 7,20$ m). Nosač je ojačan vutom dužine 1,5 m. Proračun ovog priključka temeljen je na tradicionalnom pristupu i intuitivno se smatralo da je nepopustljiv.



Slika 5. Detalj izvedenog priključka

Drugi je korak proračun mehaničkih karakteristika ovog priključka (priključak br. 1) proveden po Eurokodu 3, revidiranom Dodatku J (EC3, dio 1.8), a vrijednosti su:

- inicijalna rotacijska krutost $S_{j,ini} = 260\ 863$ kNm/rad
- otpornost na savijanje $M_{j,Rd} = 554$ kNm.

Kako bi bili usklađeni s projektantovim očekivanjima, svaka pojedina vrijednost mora biti veća:

- od granice nepopustljivosti, s obzirom na rotacijsku krutost u ovom slučaju $129\ 769$ kNm/rad,

- od maksimalnog momenta savijanja koji se prenosi priključkom iz globalne analize okvira $M_{j,Sd} = 416$ kNm.

Budući da su zadovoljena oba uvjeta, proračun priključka može se smatrati zadovoljavajućim.

Dokaz krutosti po revidiranom Dodatku J nije proveden, a priključak je jednostavno bio uzet kao nepopustljiv na temelju iskustva projektanta. Dodatni napor potreban prema Eurokodu 3 za provjeru je li priključak nepopustljiv mogao bi se stoga smatrati nepotrebnim.

Prije daljnje rasprave o ovome, trebamo znati:

- da nedostatak znanja potrebnog za projektiranje priključaka, kada se definira geometrija priključka projektanta, vodi sustavno primjeni transversalnih ukrućenja stupa (u tlačnim i vlačnim zonama priključaka) u kombinaciji s debelim čelnim pločama
- zbog ovog prekomjernog ukrućivanja, raspodjela unutarnjih sila u priključcima je linearnog tipa, što objašnjava zašto se elastični pristup proračunu tradicionalno upotrebljavao za pronalaženje sila u vijcima
- u takvim procedurama projektiranja vijci su slabe komponente priključka i nije potrebno provjeravati pločaste elemente (čelne ploče, pojasnice stupa itd.), kao što je to slučaj u mnogim nacionalnim propisima.

Ovaj tradicionalni pristup projektiranju može se smatrati valjanim, ali često rezultira predimenzioniranjem priključaka i neekonomičnim rješenjima uobličavanja priključaka, budući da izrada uvelike ovisi o stupnju ukrućivanja. Štoviše, ukrućivanje često sprječava laku montažu na gradilištu. Konačno, manjak duktilnosti povezan s otkazivanjem vijaka daleko je od zadovoljavajućeg, uzimajući u obzir duktilnost priključka.

Kao alternativu Eurokod 3, revidirani Dodatak J, predlaže pravila za projektiranje gdje nije unaprijed odabran način otkazivanja. Karakteristike krutosti i otpornosti svih sudjelujućih komponenata uzete su u obzir u proračunu. Drugim riječima, stvarne karakteristike priključaka izračunane su i na projektantu je da mijenja geometriju priključka u skladu s potrebom, birajući duktilni način otkazivanja, čineći tako priključak otpornijim, krutim i duktilnijim.

U promatranom slučaju, karakteristike priključka su iznad zahtjevanih (otpornost je veća od zahtijevane, a rotacijska krutost od $129\ 769$ kNm/rad dovoljna je da se osigura da je priključak nepopustljiv, kako je pretpostavljeno u analizi okvira). Stoga, pojednostavljenje geometrije priključka smanjuje troškove izvedbe priključaka, a prema tome i čitave konstrukcije. Međutim, značajnija je činjenica da na ovaj način projektiramo priključke koji će ostvariti zahtjevanu razinu pouzdanosti. Intuitiv-

no predviđanje ukrućenja sa svrhom da se ostvari pouzdaniji priključak može imati sasvim suprotni učinak.

U sljedećoj tablici prikazana su različita konstrukcijska oblikovanja priključaka. Razmatraju se s ciljem pojednostavljenja geometrije priključka, vodeći pri tome računa da se uvažavaju zahtjevi analize okvira.

- Priključak br. 1: 6 redova vijaka, produljena čelna ploča, 6 ukrućenja hrpta stupa (tri para).
- Priključak br. 2: 5 redova vijaka, 6 ukrućenja hrpta stupa.
- Priključak br. 3: 5 redova vijaka, 4 ukrućenja hrpta stupa (tlačna i vlačna zona).
- Priključak br. 4: 5 redova vijaka, 2 ukrućenja hrpta stupa (tlačna zona).
- Priključak br. 5: 5 redova vijaka, bez ukrućenja hrpta stupa.
- Priključak br. 6: 4 reda vijaka, 2 ukrućenja hrpta stupa (tlačna zona).
- Priključak br. 7: 4 reda vijaka (unutarnji razmaci 120 mm), 2 ukrućenja hrpta stupa (tlačna zona).
- Priključak br. 8: 3 reda vijaka, 2 ukrućenja hrpta stupa (tlačna zona).
- Priključak br. 1. što ga je predložio projektant, zadovoljava zahtjeve analize konstrukcije okvira, odnosno i krutost je takova da se priključak može smatrati nepopustljivim, a otpornost na savijanje mu je veća od momenta savijanja koji se dobije iz globalne analize okvira.
- Budući da je otpornost priključka poprilično veća od zahtijevane, zaključuje se da nam je produljena čelna ploča nepotrebna, stoga se izbacuje gornji red vijaka, (priključak br. 2.). Time se smanjuje i krutost priključka, ali samo još u granicama nepopustljivosti.
- Treći korak (priključak br. 3.) jest smanjenje broja ukrućenja, izbacuje se srednje ukrućenje, čime se ne smanjuje ni krutost ni otpornost priključka na savijanje. Dakle, srednje ukrućenje je nedjelotvorno.
- Zatim, izbacujemo ukrućenje iz vlačne zone (priključak br. 4.), a otpornost na savijanje i krutost priključka se smanjuju, ali još uvijek zadovoljavaju zahtjeve globalne analize.
- Sljedeći korak bio bi izbacivanje ukrućenja i iz tlačne zone. Međutim takav priključak (priključak br. 5.) ne

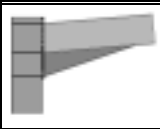

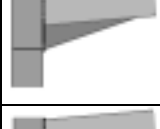




zadovoljava budući da mu je otpornost manja od učinka djelovanja.

- Budući da je mjerodavan način otkazivanja hrbat stupa u tlaku, vraćamo se za 1 korak odnosno na priključak br. 4 sa ukrućenjem u tlačnoj zoni, samo što izbacujemo 1 red vijaka. Takav priključak (priključak br. 6.) potpuno zadovoljava.
- Zatim, reduciramo broj redova vijaka na 3 i priključak br. 7. ne zadovoljava po kriteriju otpornosti na savijanje (razmaci između prvog i drugog reda vijaka povećani su s 90 mm na 120 mm).

Priključak br. 6 konačno je rješenje. Otpornost na savijanje snižena je na prihvatljivu razinu, a po krutosti priključak i dalje spada u nepopustljive.

Za svako od ovih konstrukcijskih rješenja, prikazane su pripadne vrijednosti otpornosti i krutosti te zadovoljenje zahtjeva analize okvira (tablica 1.).

Tablica 1. Konfiguracije priključaka s pripadnim vrijednostima otpornosti i krutosti te zadovoljenje zahtjeva analize okvira

Konfiguracija priključka	M_j, R_d [kNm]	$S_{j,ini}$ [kNm/rad]	Zadovoljava
 Br. 1	554 Pune otpornosti	260 863 Nepopustljiv	DA
 Br. 2	477 Pune otpornosti	205 551 Nepopustljiv	DA
 Br. 3	477 Pune otpornosti	205 562 Nepopustljiv	DA
 Br. 4	474 Pune otpornosti	203 511 Nepopustljiv	DA
 Br. 5	306 Djelomične otpornosti	138 441 Nepopustljiv	NE
 Br. 6	451 Djelomične otpornosti	200 225 Nepopustljiv	DA
 Br. 7	386 Djelomične otpornosti	192 289 Nepopustljiv	NE

Provedena analiza vrlo zorno prikazuje da i za nepopustljive priključke novi pristup projektiranju priključaka po Eurokodu 3 može postići značajnu korist. To proizlazi iz točnije definicije pojma nepopustljiv i upotrebe poboljšanih računskih modela za određivanje krutosti i otpornosti priključaka.

6 Zaključak

Prikazan je potpuno nov pristup koji se očituje realnim predstavljanjem priključaka u modeliranju konstrukcija. Priključci u širem smislu spajaju sve tipove nemonolitnih konstrukcijskih elemenata i prema tome oni su najbitniji unutar konstrukcijskih elemenata i unutar cijele konstrukcije. Unatoč tome, a zbog pomanjkanja spoznaja o njihovim stvarnim karakteristikama i načinu modeliranja, priključci su do sada bili zanemarevani i usvajane su vrlo pojednostavljene pretpostavke vezane na for-

miranje modela. To je rezultiralo skupim konstrukcijskim rješenjima i vrlo često niže razine pouzdanosti.

Ovaj novi pristup uspješno je primijenjen u svijetu proteklih godina na brojnim projektima i ostvarene su dodatne uštede proizašle iz smanjenja vlastite težine konstrukcije ili redukcije troškova izrade i montaže. Prikazani primjer predstavlja praktičnu primjenu novog pristupa prema Eurokodu 3.

Daljnja istraživanja o ponašanju priključaka trebalo bi provoditi metodama teorije pouzdanosti konstrukcija. Prikupljanjem statističkih podataka o komponentama priključaka koji bi se dobili iz ispitivanja u laboratoriju bilo bi moguće postaviti njihove stohastičke modele. Rješenjem jednadžbi graničnih stanja omogućila bi se usporedba razina pouzdanosti različitih tipova priključaka. Na taj način mogu se odabrati optimalna rješenja u skladu s općim zahtjevima pouzdanosti prema u EN 1990: 2001, Eurocode: *Basis of structural design*.

LITERATURA

- [1] Dujmović, D.; Androić, B.; Skejić, D.: *Modeliranje priključaka čeličnih okvirnih konstrukcija*, Građevinar 55 (2003) 6, 339-348
- [2] CoP Software, Version 2002R03, RWTH Aachen, MSM Liège, ICCS Hoofddorp.
- [3] Eurocode 3, *Design of Steel Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings*, European Prestandard ENV 1993-1-1, Brussels: CEN, 1992.
- [4] Huber, G.; Tschemmernegg, F.: *Modelling of steel connections*, Journal of Constructional Steel Research 45 (1998) 2, 199-216.
- [5] Revised Annex J of Eurocode 3. *Joints in Building Frames*, European Prestandard ENV 1993-1-1: 1992/A2, Brussels: CEN, 1998.
- [6] Kuhlmann, U.; Davison, J.B.; Kattner, M.: *Structural systems and rotation capacity*, Proceeding of COST Conference on Control of the Semi-rigid Behaviour of Civil Engineering Structural Connections, Liège, 1998., 167-176.
- [7] Jaspert, J.P.: *Etude de la semi-rigidité des noeuds poutre-colonne et son influence sur la résistance des ossatures en acier*, PhD thesis, Department MSM, University of Liège, 1991.
- [8] Janss, J.; Jaspert, J.P.: *Strength and behaviour of in plane weak axis joints and of 3-D joints*, In: Bjorhovde, R.; Colson, A.; Zandonini, R. (Editors): *Connections in steel structures*, Proceedings of the International Workshop on Joints, Elsevier Applied Science, New York, 1987.
- [9] Shi, Y.J.; Chan, S.L.; Wong, Y.L.: *Modelling for moment rotations characteristic for end-plate joints*, Journal of Structural Engineering 122 (1996) 11, 1300-1306.
- [10] Yee, Y.L.; Melchers, R.E.: *Moment-rotation curves for bolted connections*, Journal of Structural Engineering 112 (1986) 3, 615-635.
- [11] Zoetemeijer, P.: *A design method for the tension side of statically-loaded bolted beam-to-column joints*, Heron 1974; 1-59.
- [12] Kuhlmann U.: *Influence of axial forces on the component: web under compression*, Proceeding of COST-C1 Working Group Meeting, C1/WG2/99-01, Thessaloniki, 1999.