

NOSIVOST CENTRIČNO PRITISNUTIH ELEMENATA I-PRESEKA OD ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE

Studijski program: građevinarstvo
Modul: konstrukcije
Predmet: Metalne konstrukcije inženjerskih objekata
Mentor: v. prof. dr Jelena Dobrić, dipl. građ. inž.

IVAN NACKOV

Osnovne studije upisao: 2016. godine
Osnovne studije završio: 2020. godine
Prosečna ocena: 9.72 (devet i 72/100)

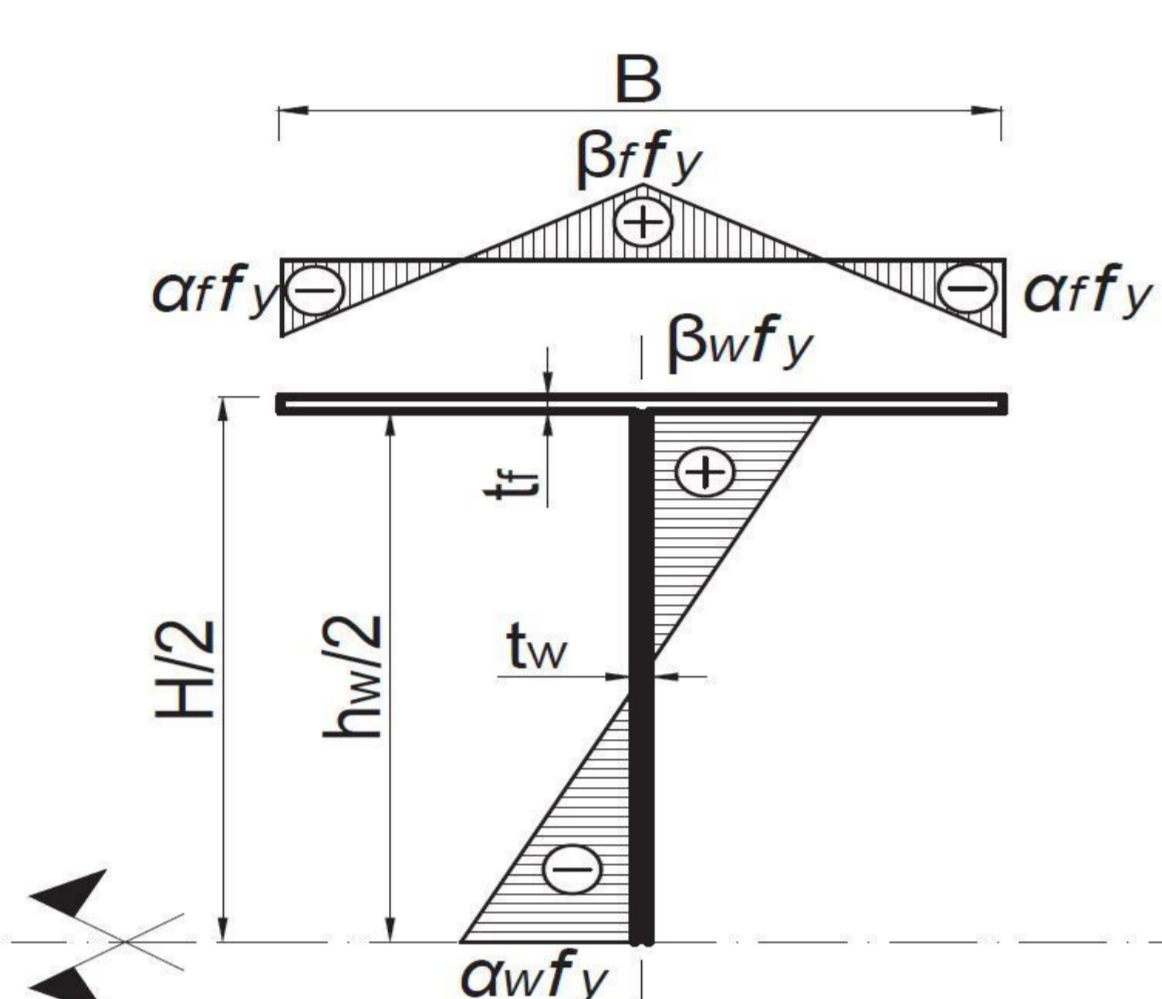
Master studije upisao: 2020. godine
Master studije završio: 2021. godine
Prosečna ocena: 9.88 (devet i 88/100)

1. REZIME

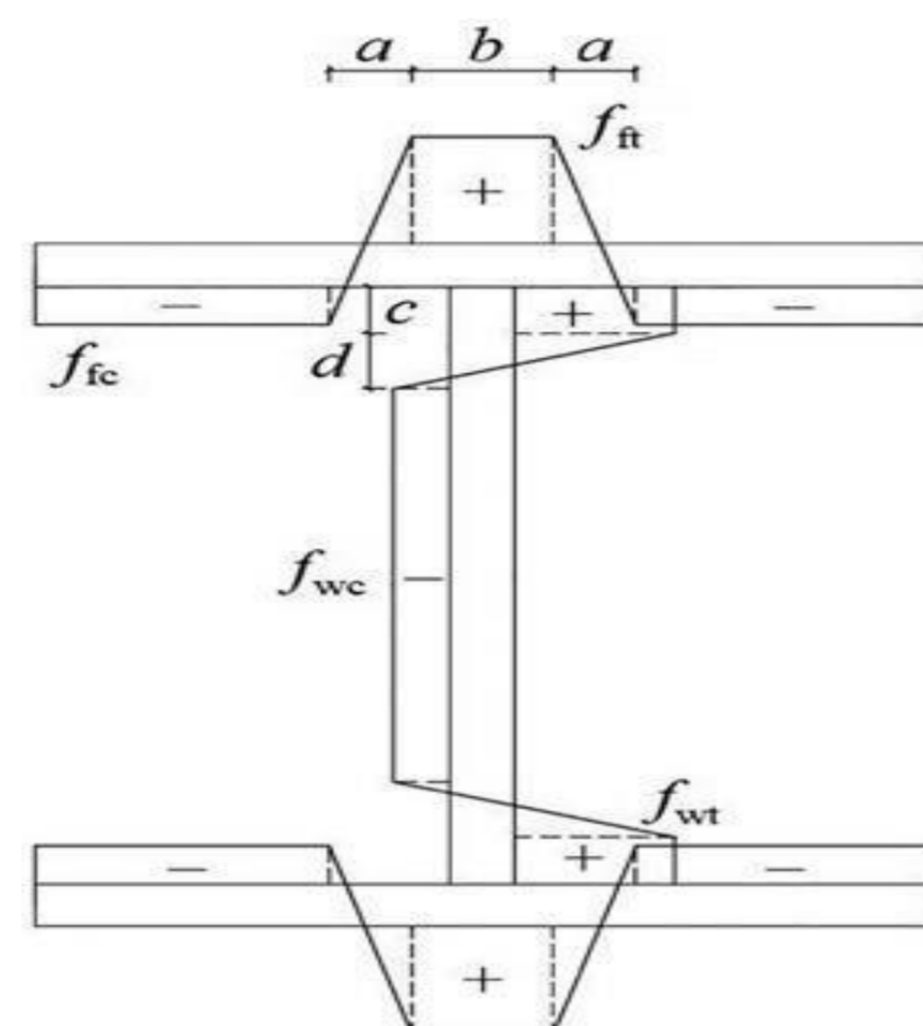
Poslednjih nekoliko decenija svedoci smo najveće ekspanzije građevinarstva u ljudskoj istoriji. Mostovi premošćuju sve veće raspe, visoke zgrade postaju sve više, a tuneli sve duži. Kako bi ovaj eksponencijalni rast zahteva koji se postavljaju pred inženjere bio prevaziđen, potrebno je razviti nove materijale i nove metode proračuna. Jedan od novih i savremenih materijala je i čelik visokih čvrstoća koji nalazi sve veću primenu u svim granama građevinarstva zbog svojih prednosti u vidu superiornosti svojih mehaničkih karakteristika u odnosu na uobičajene konstrukcione čelike. Ovaj master rad predstavlja skroman, ali ne beznačajan, doprinos analizi ponašanja ovog materijala i formiranju standardizovanih proračunskih metoda u cilju pojednostavljenja njegovog korišćenja u praksi. Osnovni cilj je bio sprovođenje opsežne parametarske analize ponašanja vrućevaljanih i zavarenih profila različitih geometrijskih karakteristika pod dejstvom centričnog pritiska. Usled nedostatka sopstvenih eksperimentalnih ispitivanja, validacija i verifikacija numeričkih modela izvršena je na osnovu eksperimentalnih istraživanja sprovedenih od strane autora Sun i ostali. Rezultati dobijeni iz numeričkih modela upoređeni su sa pravilima i smernicama koje daju standardi SRPS EN 1993-1-1:2005, SRPS prEN 1993-1-1:2020 (draft verzija) i SRPS EN 1993-1-5:2006 koji se koriste za dimenzionisanje čeličnih elemenata. Na kraju su na osnovu ovih rezultata izvedeni zaključci i zapažanja.

2. TEORETSKE OSNOVE

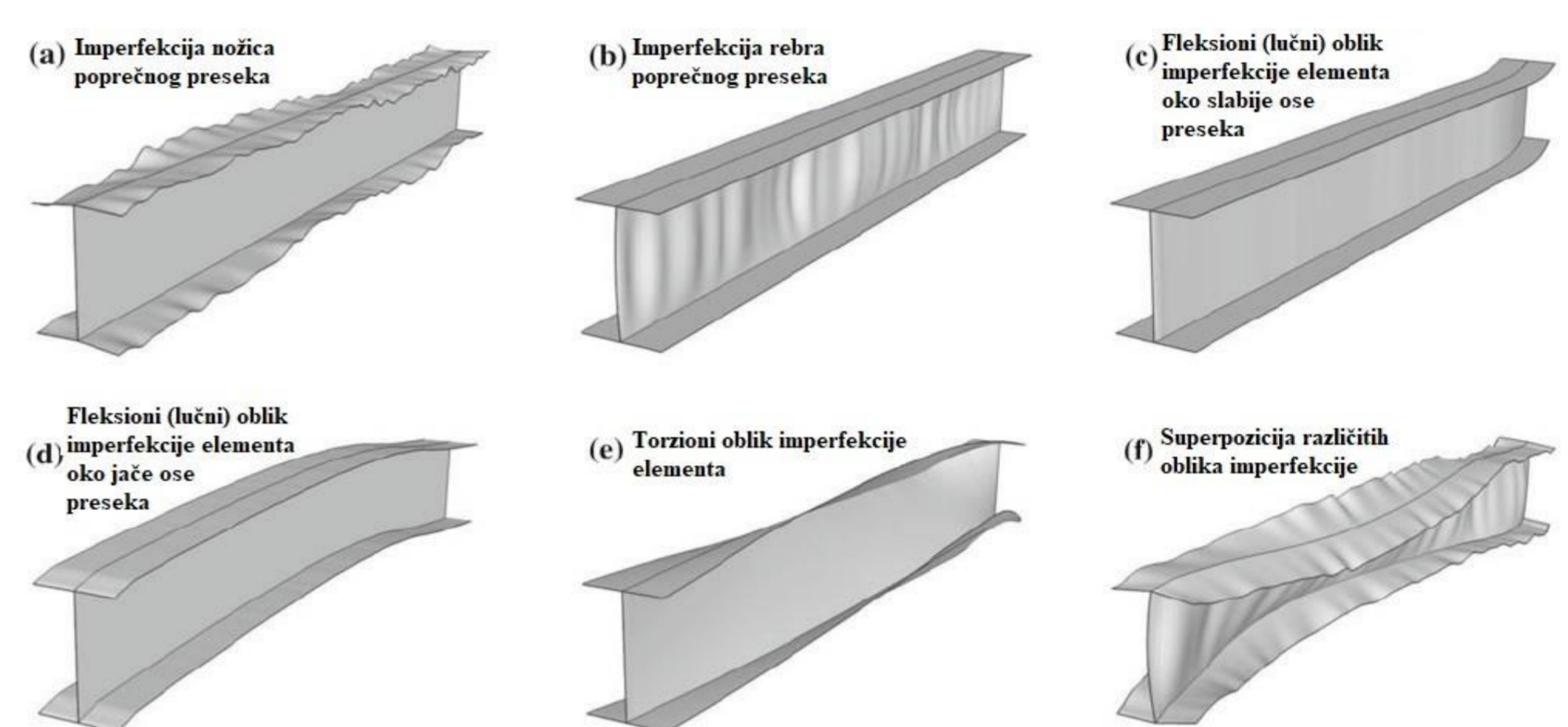
Na samom početku izrade master rada bilo je neophodno detaljno sagledati osnovne uticajne parametre koji određuju graničnu nosivost poprečnog preseka i elementa: mehaničke karakteristike materijala (veza napon-dilatacija), geometrijske karakteristike, zaostali (rezidualni) naponi i početne geometrijske imperfekcije. Materijalna kriva napon-dilatacija ključno određuje ponašanje čeličnog konstruktivnog elementa usled različitih oblika opterećenja i određuje njegovu graničnu nosivost u elastičnoj ili plastičnoj oblasti naprezanja. Geometrijske karakteristike direktno utiču na kapacitet nosivosti aksijalno napregnutog poprečnog preseka preko njegove površine i na graničnu silu pri izvijanju aksijalno napregnutog elementa preko njegove dužine. Zaostali (rezidualni ili sopstveni) naponi su naponi koji ostaju u materijalu ili telu nakon određenog procesa proizvodnje ili prerade. Za njihovu implementaciju prilikom numeričke analize u ovom radu korišćeni su prediktivni modeli prikazani na slici 1 i 2. Početne geometrijske imperfekcije predstavljaju odstupanje dimenzija realnog elementa i njegovog poprečnog preseka od idealnih dimenzija. Postoje početne lokalne geometrijske imperfekcije (na nivou poprečnog preseka) i početne globalne geometrijske imperfekcije (na nivou elementa). Neke od njih su prikazane na slici 3.



Slika 1: Prediktivni model raspodele rezidualnih napona za vrućevaljane I profile



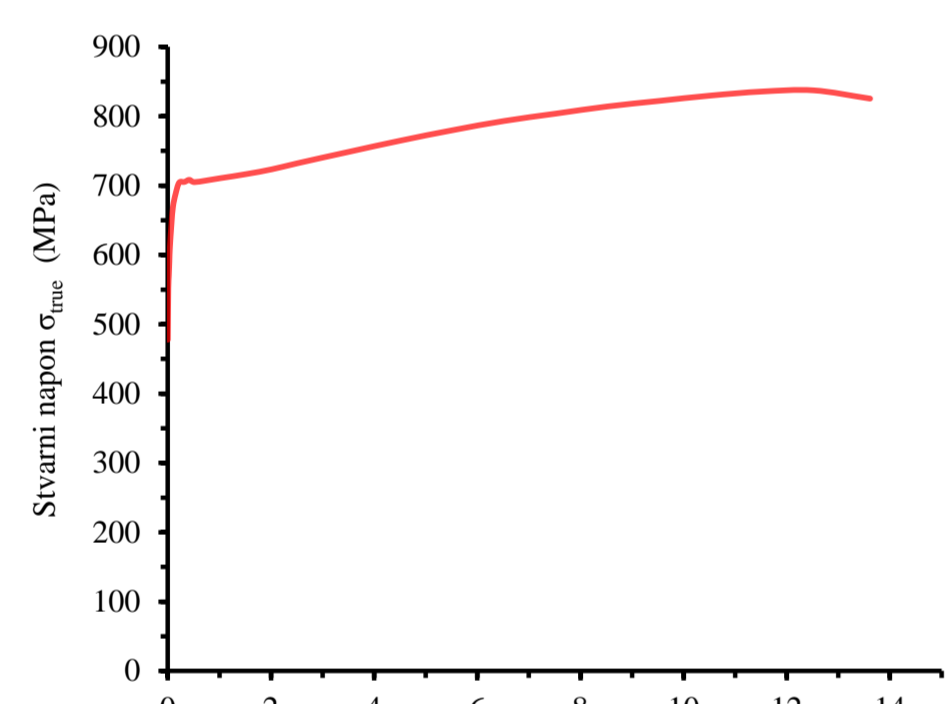
Slika 2: Prediktivni model raspodele rezidualnih napona za zavarene I profile



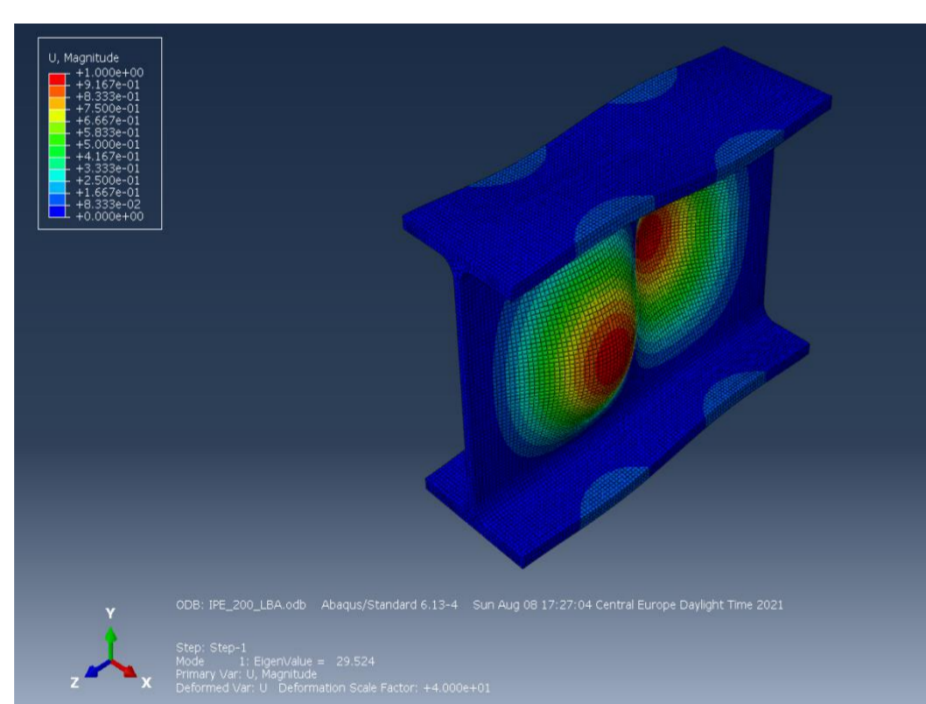
Slika 3: Primeri početnih globalnih i lokalnih geometrijskih imperfekcija kod I profila [shellbuckling.com]

3. NUMERIČKA ANALIZA PRIMENOM METODE KONAČNIH ELEMENATA

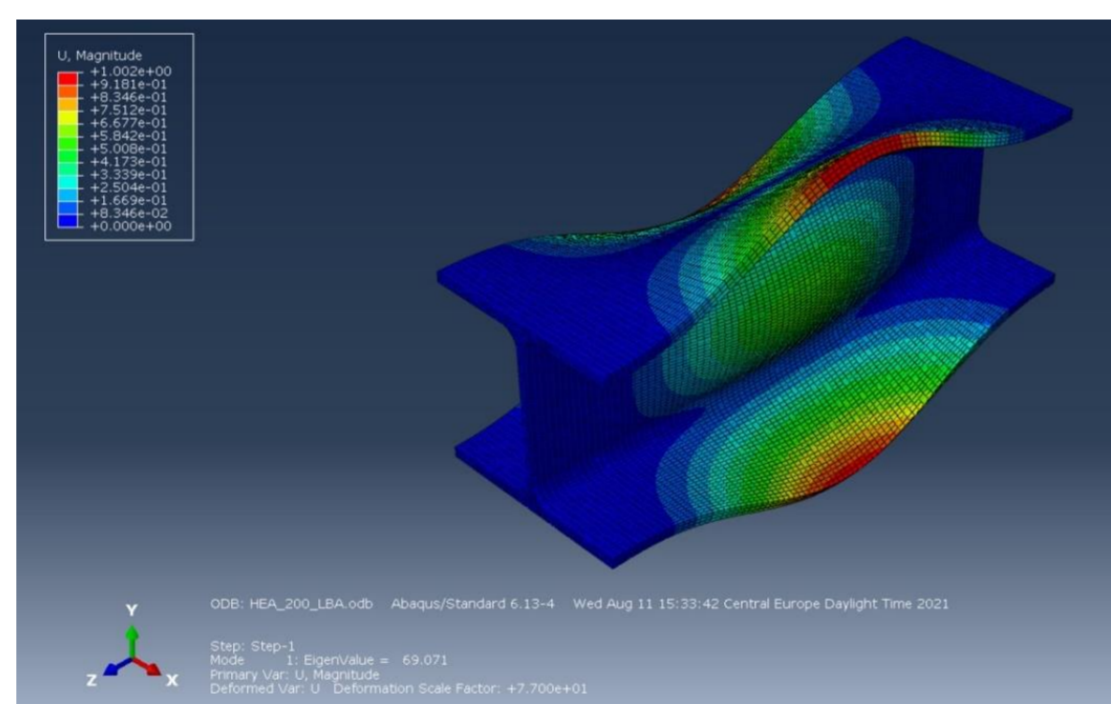
Numerička simulacija testa kratkog stuba sprovedena je primenom metode konačnih elemenata u komercijalnom softveru ABAQUS 6.13-4. Eksperimentima su validirane numeričke krive opterećenje-deformacija i istražen je uticaj različitih parametara, kao što su materijalna veza napon-dilatacija, početne geometrijske imperfekcije i rezidualni naponi, na nosivost i ponašanje poprečnog preseka stuba od čelika visokih čvrstoća kvaliteta S690. Sprovedena je geometrijska i materijalna nelinearna analiza sa početnim geometrijskim imperfekcijama i rezidualnim naponima (GMNIA). Numerički modeli su napravljeni prema nominalnim dimenzijama poprečnih preseka, pri čemu su korišćeni 3D „solid“ konačni elementi pod nazivom: linearni heksaedar tipa C3D8R. Mreža konačnih elemenata je birana za svaki element posebno, tako da se se po debljini poprečnog preseka javi barem dva konačna elementa.



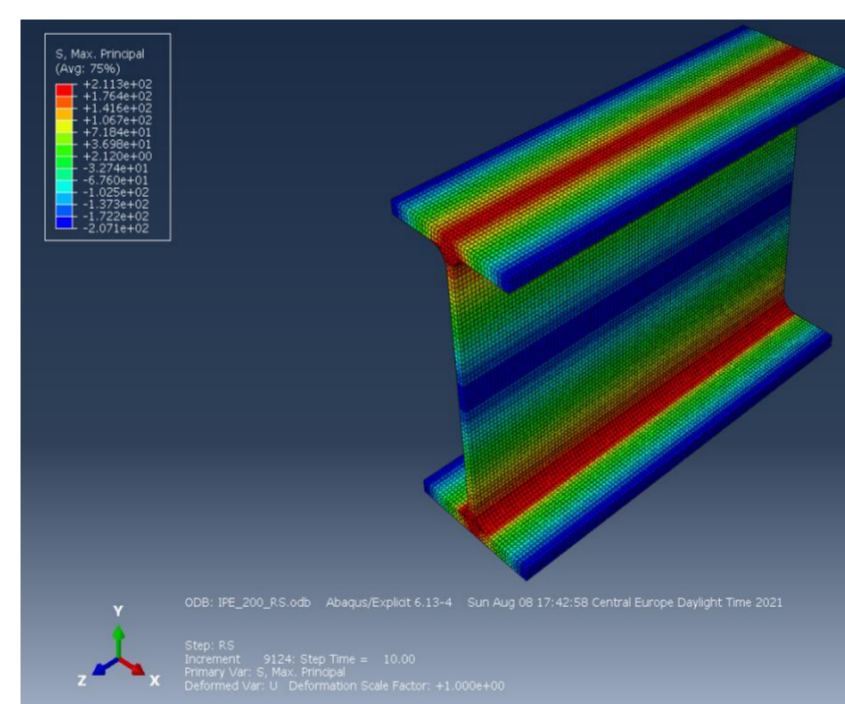
Slika 4: Materijalni model stvarnih napona i dilatacija $\sigma_{true} - \epsilon_{true}$



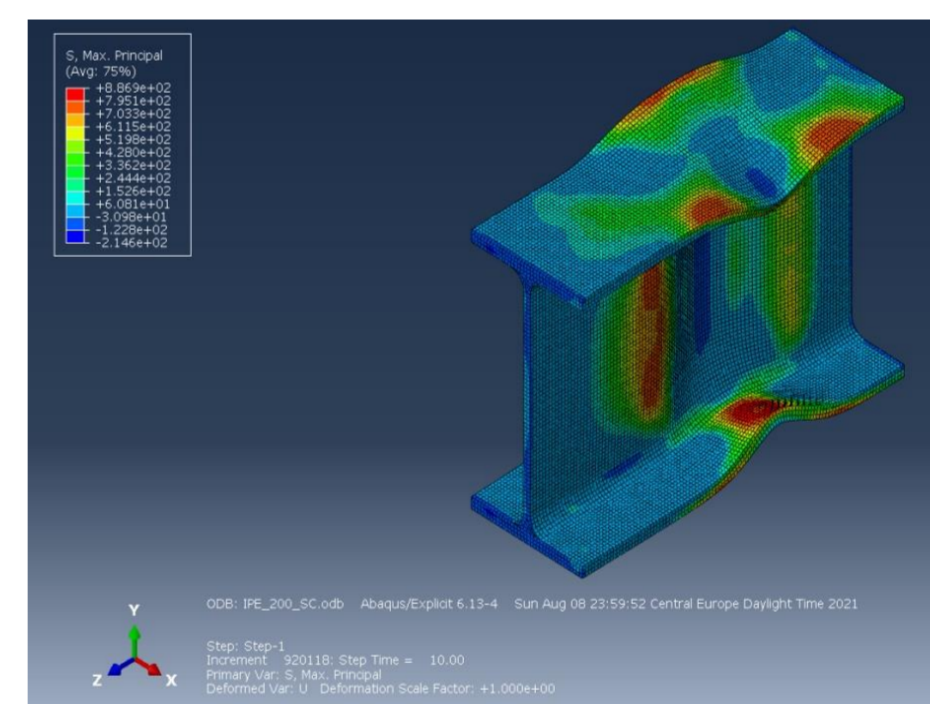
Slika 6: Prikaz prvog oblika izbočavanja profila IPE 200



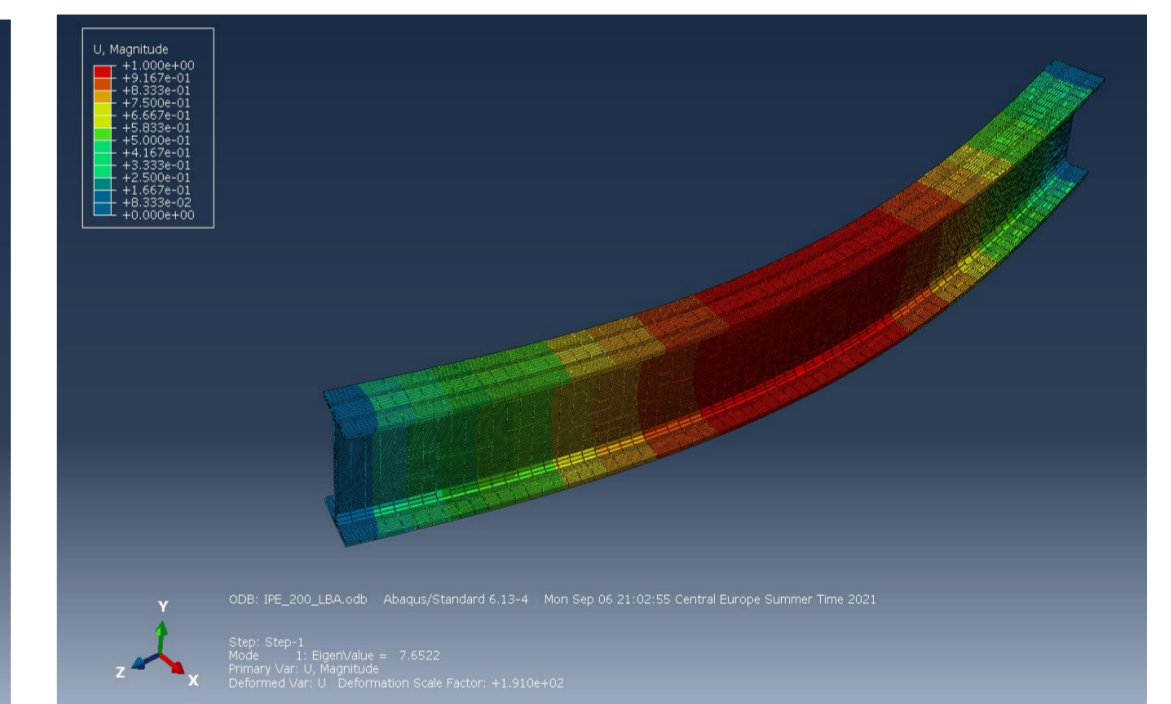
Slika 7: Prikaz prvog oblika izbočavanja profila HEA 200



Slika 8: Raspodela rezidualnih napona na vrućevaljanom profilu



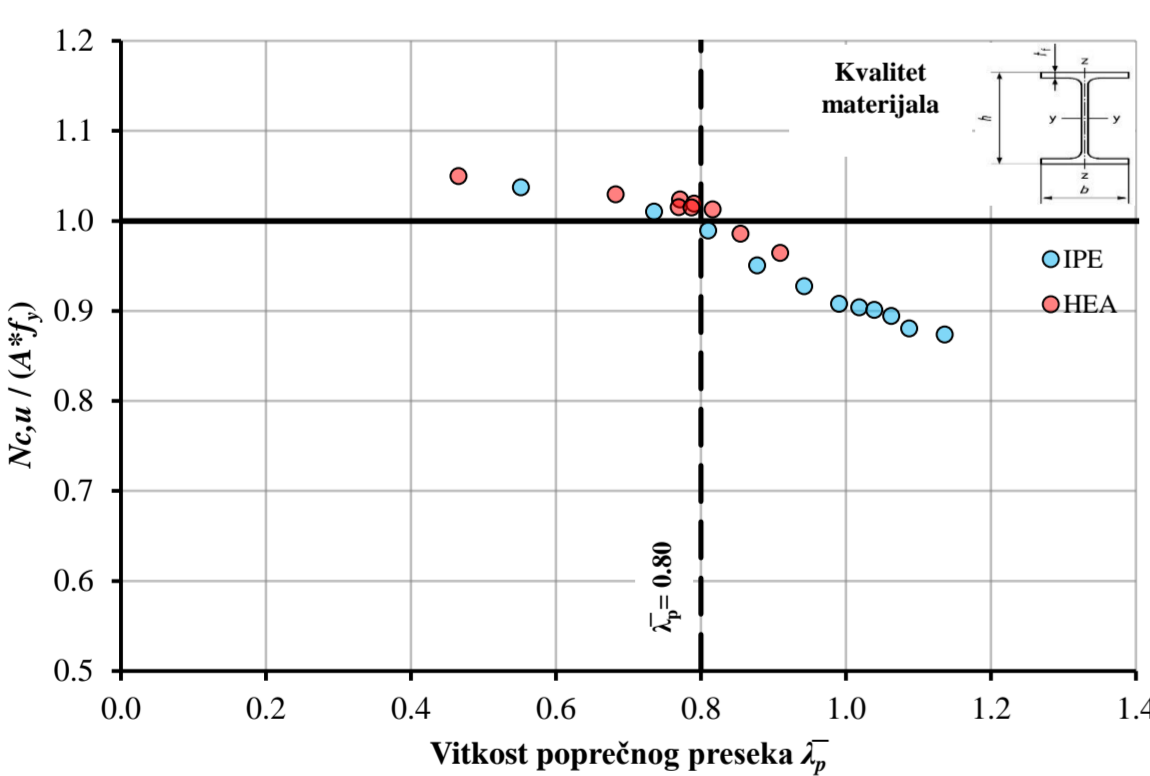
Slika 10: Plastifikacija kratkog stuba u 3D pogledu



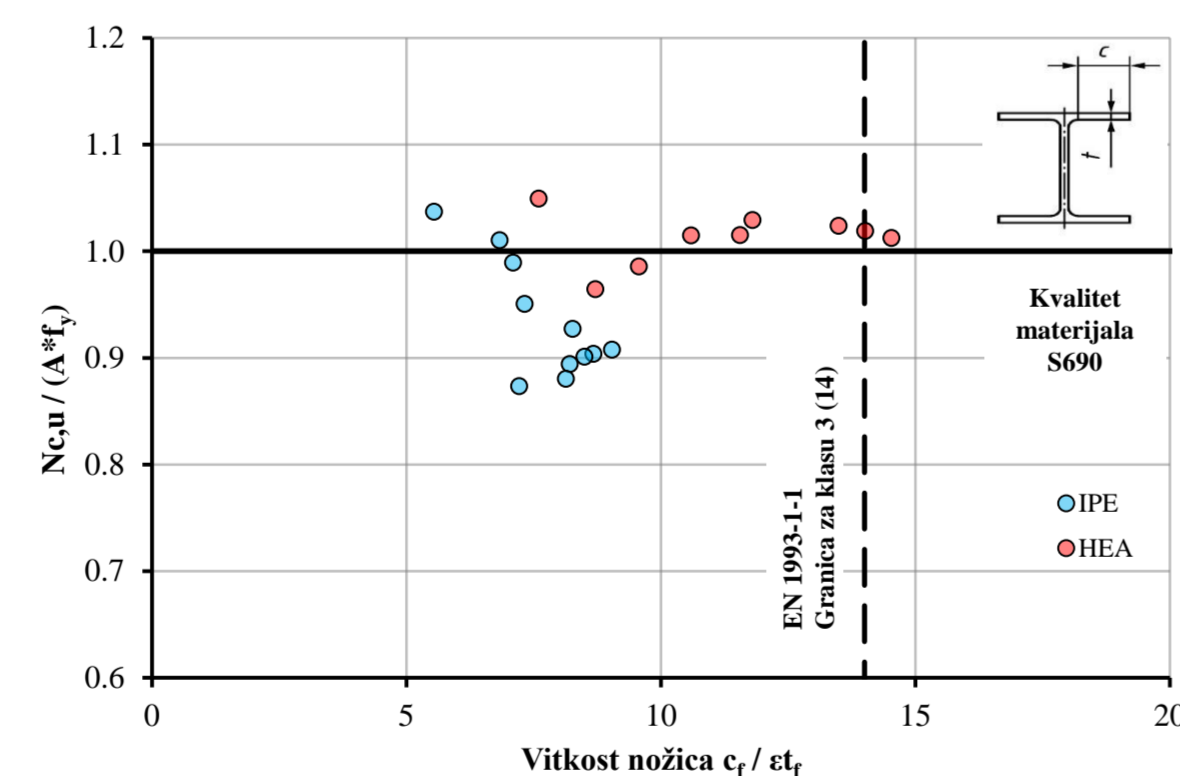
Slika 9: 3D prikaz prvog globalnog oblika izvijanja profila

4. REZULTATI

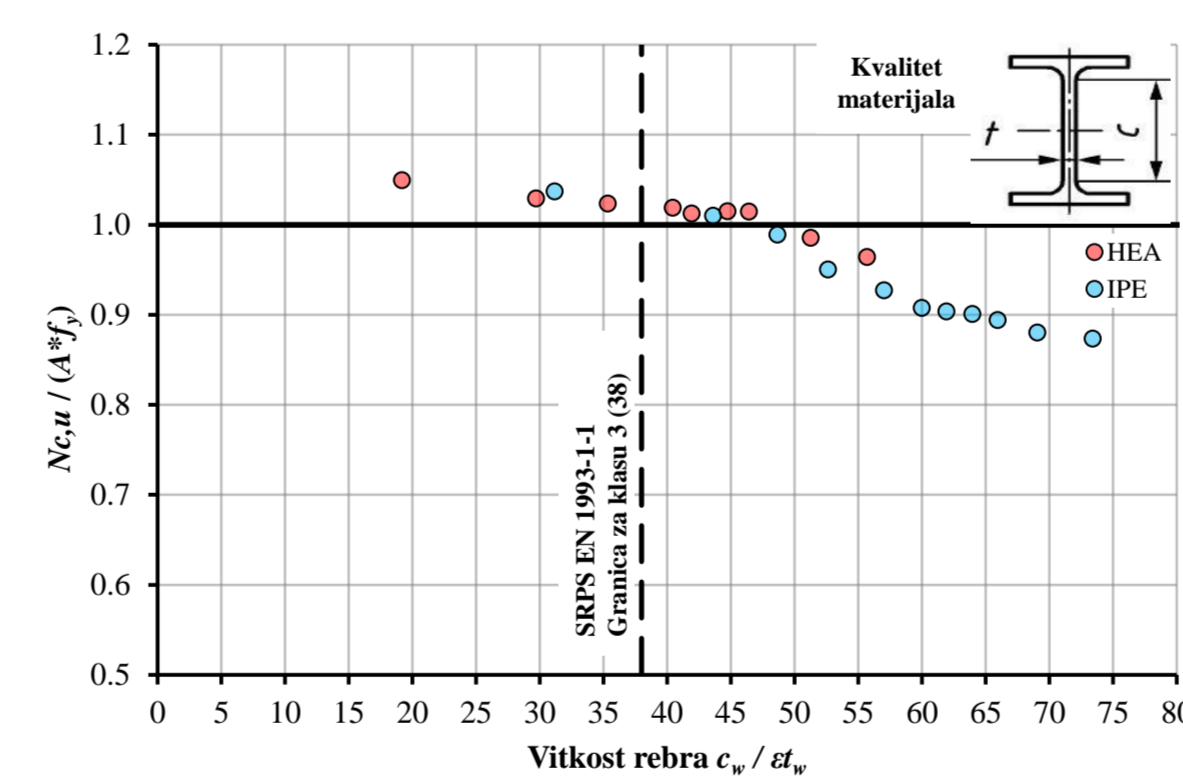
Na kraju su prezentovana komparativna analiza i poređenja numeričkih vrednosti graničnih nosivosti elemenata i njihovih poprečnih preseka od vrućevaljanih IPE i HEA profila, odnosno zavarenih I-preseka sa odgovarajućim računskim prediktivnim vrednostima u skladu sa SRPS EN standardima.



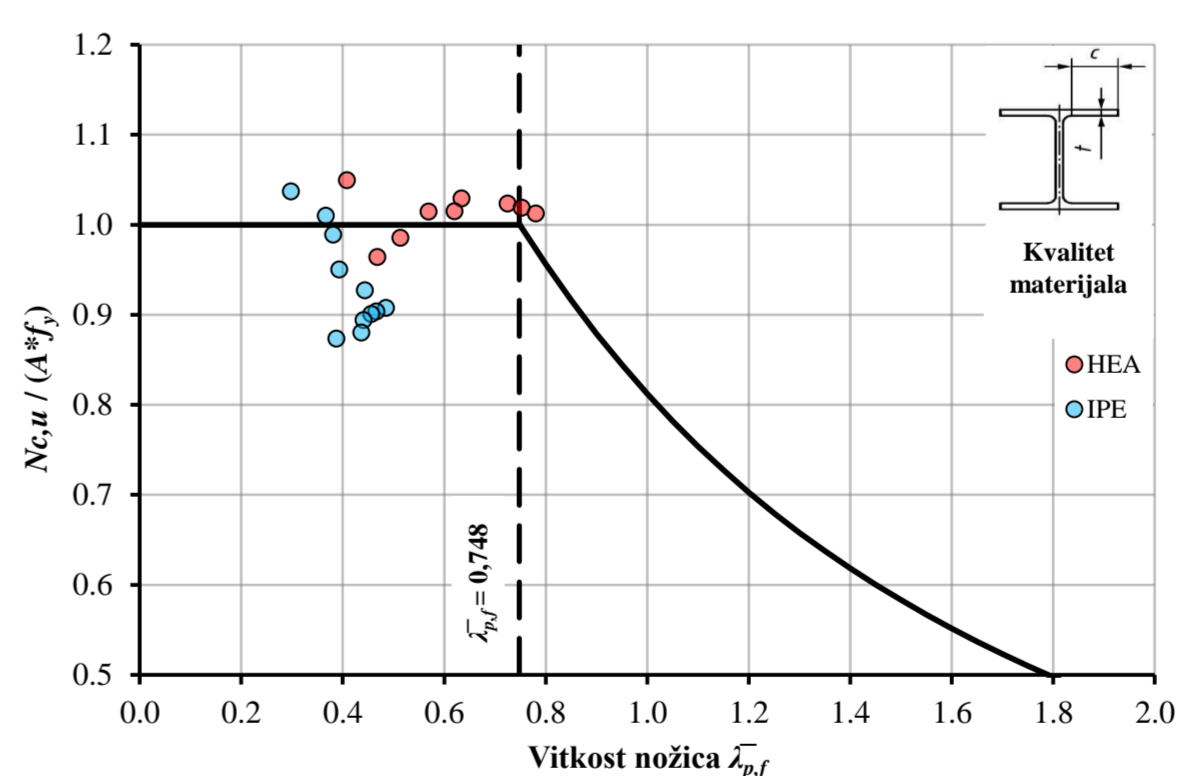
Slika 10: Dijagram promene odnosa N_{cu}/N_{pred} u odnosu na vitkost za vrućevaljane profile (IPE i HEA)



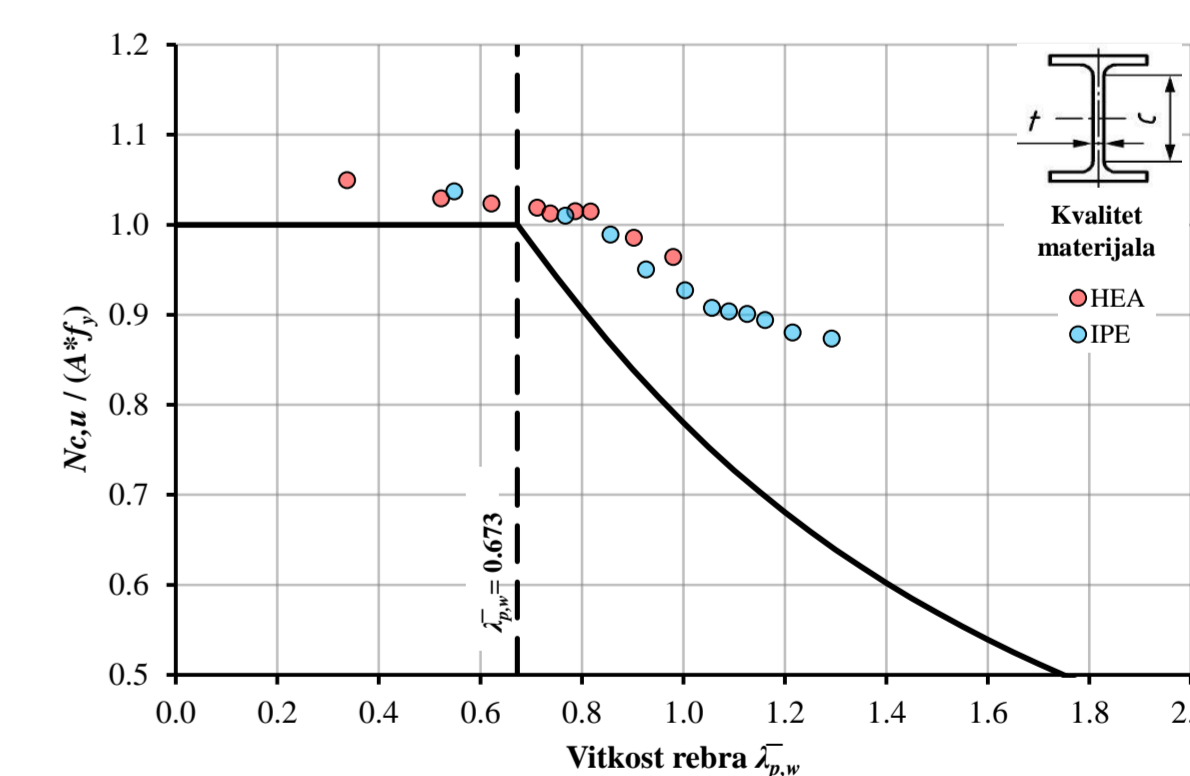
Slika 12: Granica za klasu 3 konzolno oslonjenih delova poprečnog preseka (nožice) kod vrućevaljanih profila (IPE i HEA)



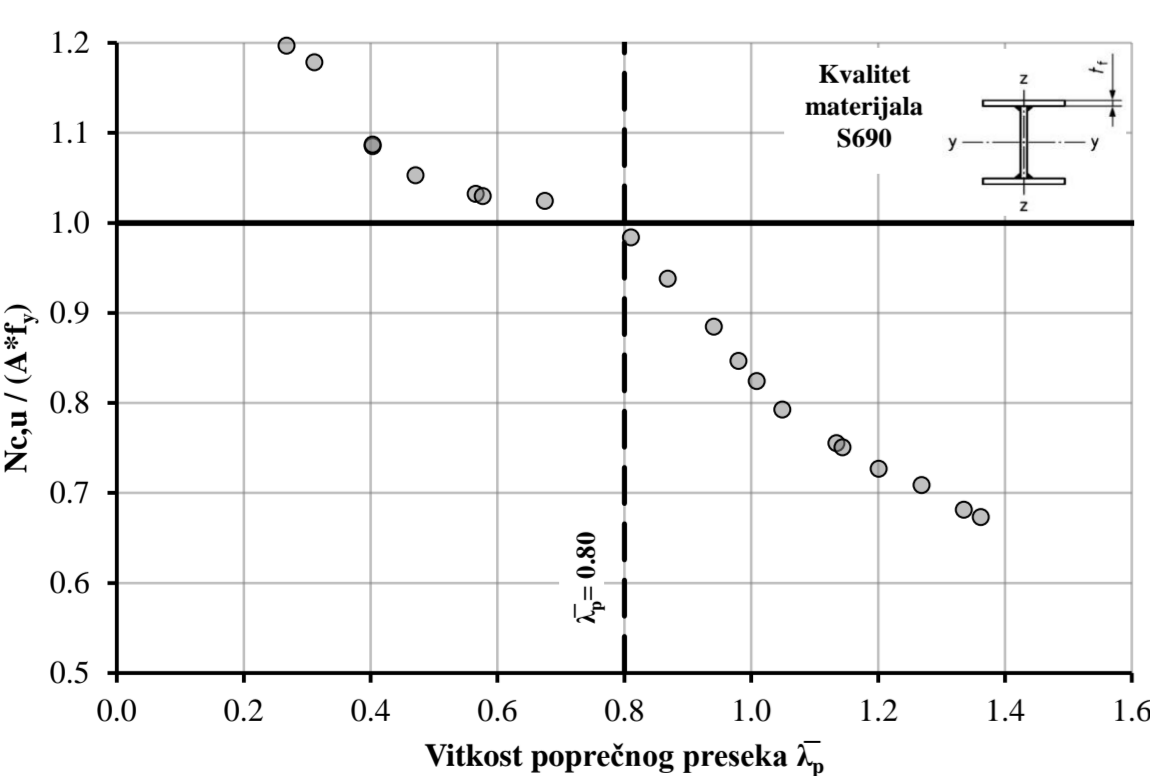
Slika 14: Granica za klasu 3 unutrašnjih delova poprečnog preseka (rebra) kod vrućevaljanih profila (IPE i HEA)



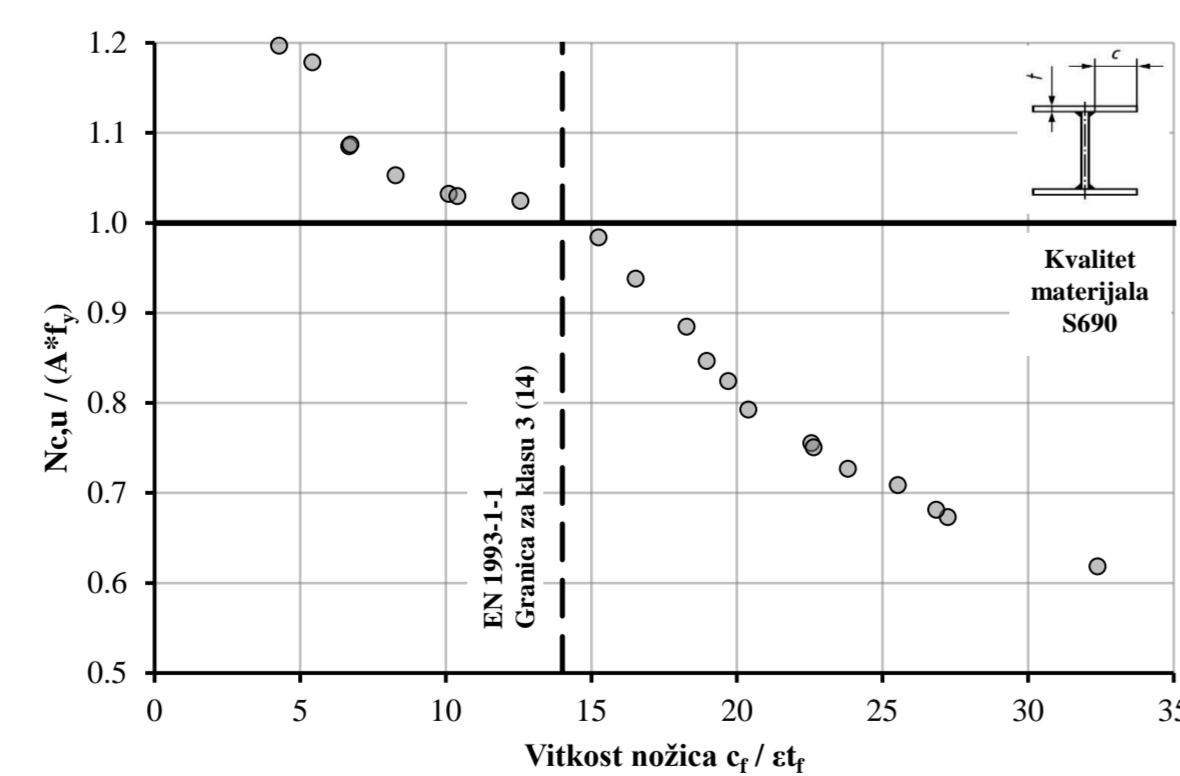
Slika 16: Provera analitičke funkcije za koeficijent redukcije p konzolno oslonjenih delova poprečnog preseka (nožice) kod vrućevaljanih profila (IPE i HEA)



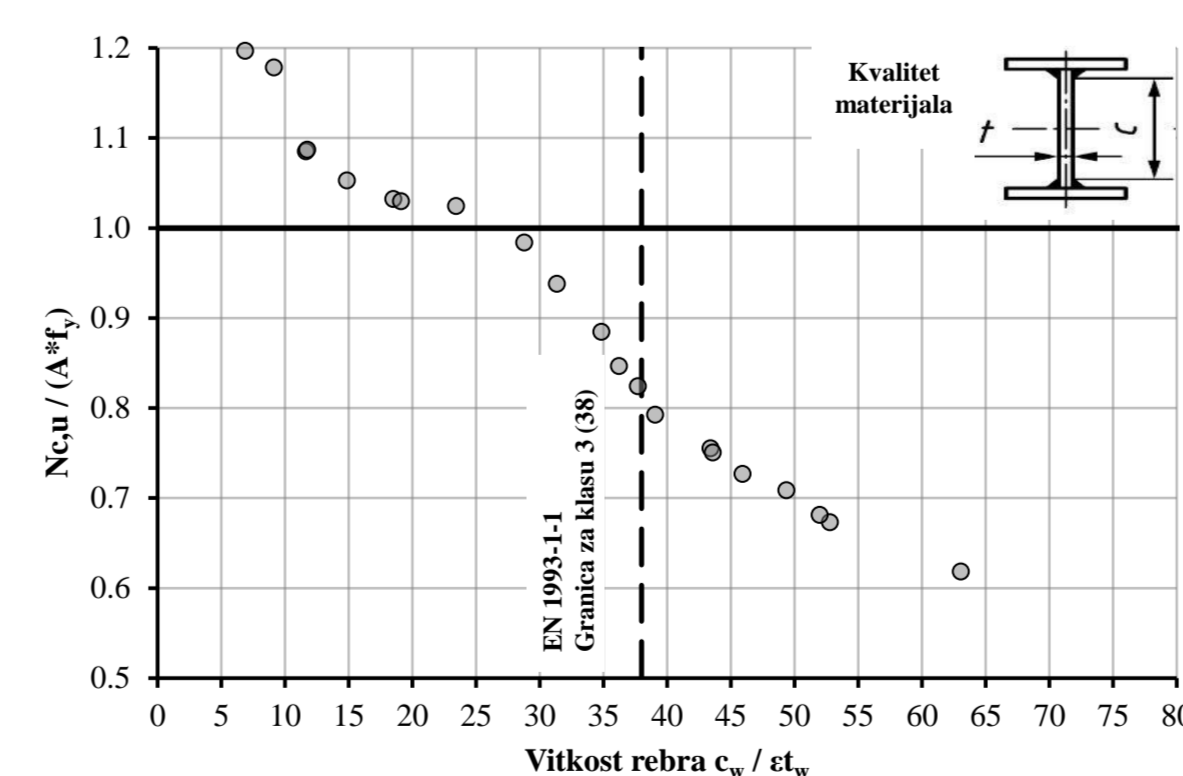
Slika 18: Provera tačnosti analitičke funkcije za koeficijent redukcije p unutrašnjih delova poprečnog preseka (rebra) kod vrućevaljanih profila (IPE i HEA)



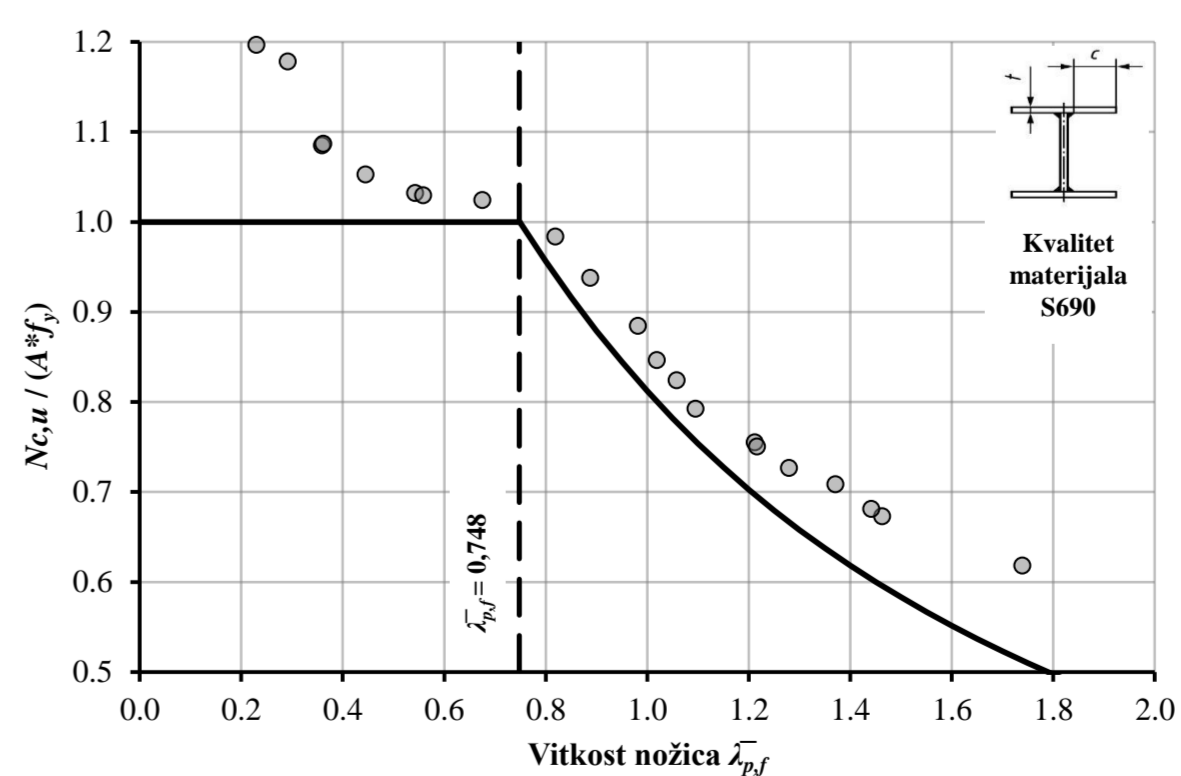
Slika 11: Dijagram promene odnosa N_{cu}/N_{pred} u odnosu na vitkost za zavarene I-preseke



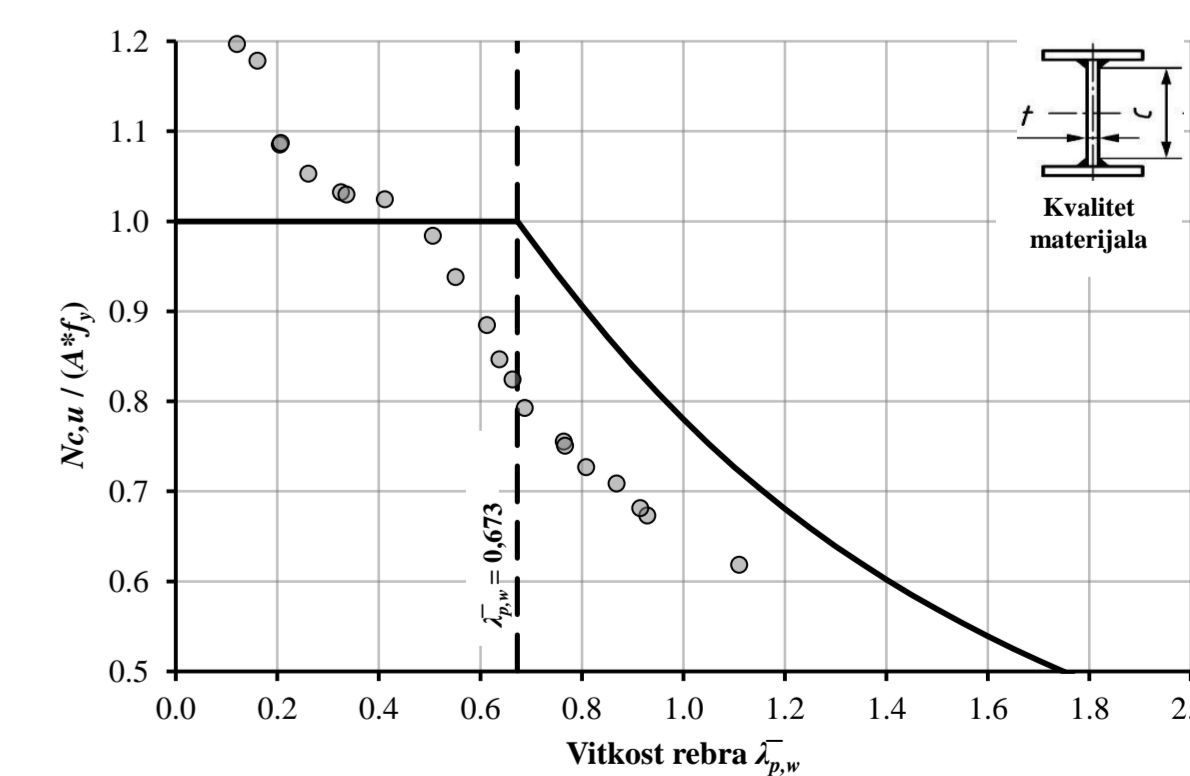
Slika 13: Granica za klasu 3 konzolno oslonjenih delova poprečnog preseka (nožice) kod zavarenih I-preseka



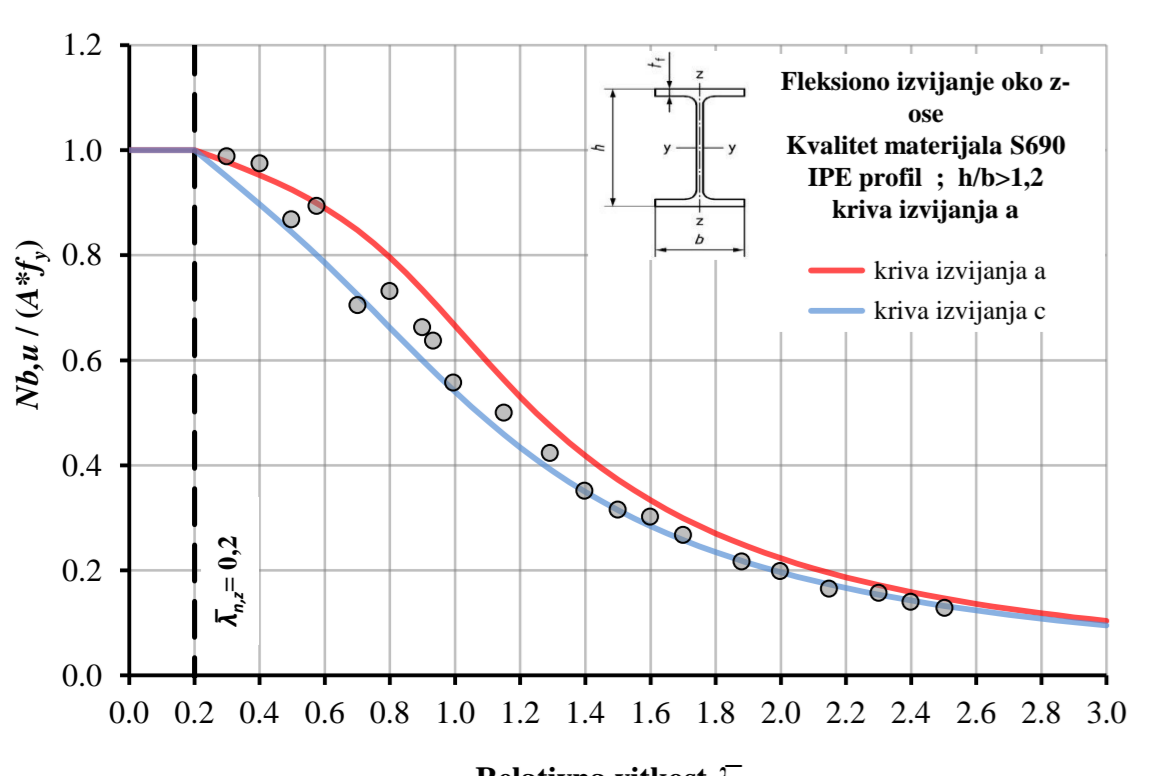
Slika 15: Granica za klasu 3 unutrašnjih delova poprečnog preseka (rebra) kod zavarenih I-preseka



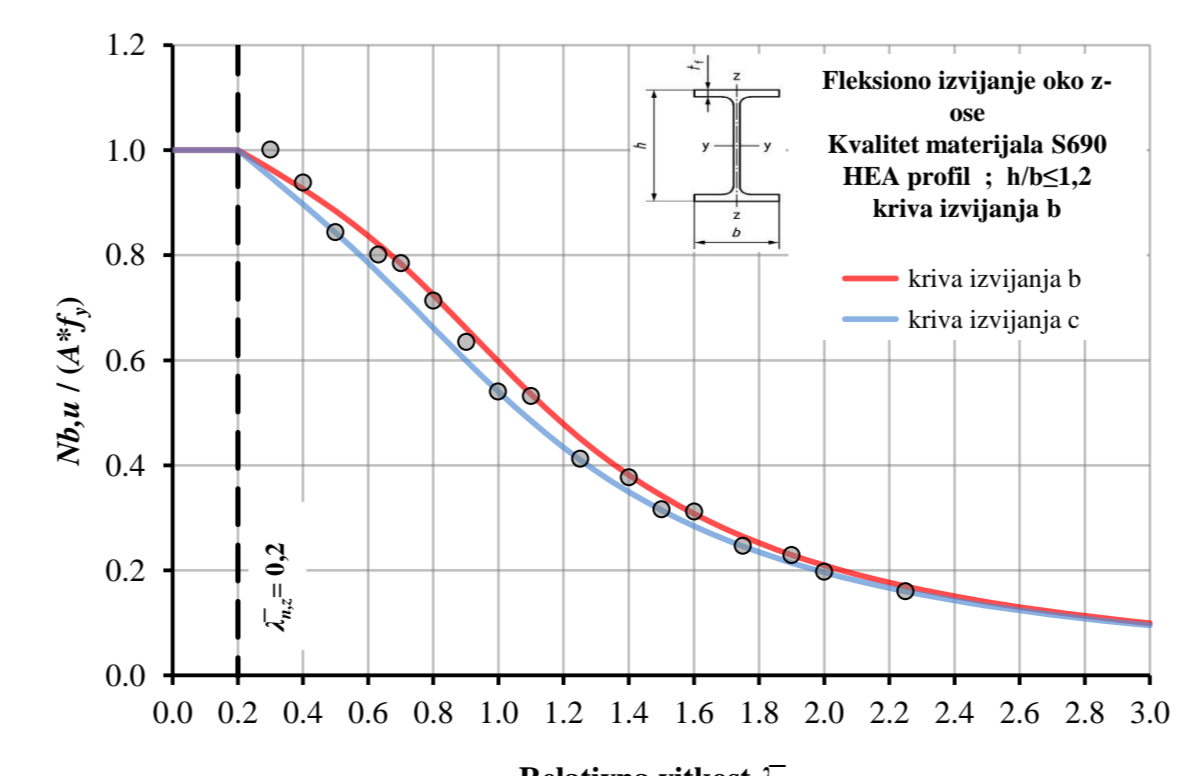
Slika 17: Provera tačnosti analitičke funkcije za koeficijent redukcije p konzolno oslonjenih delova poprečnog preseka (nožice) kod zavarenih I-preseka



Slika 19: Provera tačnosti analitičke funkcije za koeficijent redukcije p unutrašnjih delova poprečnog preseka (rebra) kod zavarenih I-preseka



Slika 20: Provera tačnosti analitičke krive izvijanja a preporučene za I profile odnosa $h/b > 1,2$ sa numeričkim rezultatima



Slika 21: Provera tačnosti analitičke krive izvijanja b preporučene za I profile odnosa $h/b \leq 1,2$ sa numeričkim rezultatima

Ivan Nackov