

Gradjevinski fakultet
Univerziteta u Beogradu

Nonad G. Marković

IZVOĐAVANJE LIMENIH NOSAČA
POD DEJSTVOM LOKALNOG OPTEREĆENJA

Doktorska disertacija

Beograd, 2008

10 = 26 96 4055

14/18203
GRADJEVINSKI FAKULTET UNIVERZITETA U BEOGRADU

NENAD G. MARKOVIĆ

IZBOČAVANJE LIMENIH NOSAČA
POD DEJSTVOM LOKALNOG OPTEREĆENJA

DOKTORSKA DISERTACIJA

Beograd, septembra 2003

И. Бр. 121088



Mentori : Akademik prof. dr Nikola Hajdin
Srpska akademija nauka i umetnosti
Beograd

Prof. dr Branislav Ćorić
Gradjevinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Beograd

Datum odbrane :

IZBOČAVANJE LIMENIH NOSAČA POD DEJSTVOM LOKALNOG OPTEREĆENJA

Rezime

Predmet rada je pojava izbočavanja u zoni unošenja opterećenja kod limenih nosača (zavarenih čeličnih I nosača) pod dejstvom lokalizovanog opterećenja u ravni rebra na jednom pojasu kada u preseku u kome deluje sila ne postoji poprečno (vertikalno) ukrućenje rebra, ali postoji podužno (horizontalno) ukrućenje rebra u blizini opterećenog pojasa. Razmatra se uticaj dužine pojasa po kojoj deluje opterećenje na ponašanje nosača i njihovu graničnu nosivost.

Ova problematika se intenzivno izučava u svetu poslednjih decenija, ali nisu dobijena sva potrebna rešenja na zadovoljavajući način, posebno za kvantitativno prikazivanje uticaja dužine na kojoj deluje opterećenje i uticaja podužnih ukrućenja. Potrebna su zbog toga dalja i dodatna istraživanja, kako teorijska tako i eksperimentalna, a posebno u vezi sa radom na donošenju usaglašenih evropskih propisa za proračun konstrukcija.

U radu se razmatra ponašanje ovih nosača kao i određivanje njihove granične nosivosti, (koja se manifestuje pojavom izbočavanja u zoni unošenja opterećenja), a u zavisnosti od različitih parametara.

Osnova razmatranja su vlastita eksperimentalna istraživanja kao i rezultati istraživanja drugih autora. Na osnovu ovih razmatranja formulišu se izrazi za određivanje granične nosivosti pogodni za praktičnu primenu. Pri tome je težište na određivanju uticaja dužine raspodeljenog opterećenja kod nosača sa i bez podužnih ukrućenja.

Rad se sastoji iz sedam poglavlja. U prvom poglavlju se daje uvod u razmatranu problematiku, precizira oblast kojom se bavi ovaj rad i daje pregled upotrebljenih oznaka.

U drugom poglavlju se daje pregled dosadašnjih istraživanja relevantnih za problematiku ovog rada.

Vlastita eksperimentalna istraživanja se prikazuju u trećem delu. Najvažniji rezultati istraživanja i njihova analiza se daje u četvrtom delu.

U petom delu se daju teorijska razmatranja, koja uključuju analizu dosadašnjih poznatih rezultata. Predloženo je rešenje za graničnu nosivost zasnovano na modifikovanom mehanizmu loma za nosače sa podužnim ukrućenjima. Daje se i predlog izraza za uzimanje u obzir uticaja dužine raspodeljenog opterećenja kada postoje podužna ukrućenja.

Zaključci se iznose u šestom delu, a literatura je data u sedmom delu.

Ključne reči : gradjevinarstvo, čelične konstrukcije, tankozidni nosači, stabilnost, granična nosivost, lokalno opterećenje, lokalno izbočavanje, eksperimentalno istraživanje

BUCKLING OF THE PLATE GIRDERS UNDER THE ACTION OF PATCH LOADING

Summary

The paper is dealing with the local buckling in the zone of load introduction for the plate girders (welded I girders) under the action of localized (patch) loading on a flange in the plane of the web. Girders without vertical (transversal) stiffeners in this zone, but with horizontal (longitudinal) stiffeners are considered. Influence of the length of the patch loading on the behaviour of the girders and their carrying capacities are analyzed.

This subject is intensively studied in the world during last decades, but all necessary answers are not obtained in a satisfactory way, especially for quantitative expression of the influence of the length of the patch loading and of the longitudinal stiffeners. Further and additional research is needed, experimental as well as theoretical, and especially in connection with the work on unified European standards for the design of civil engineering structures – Eurocodes.

The behaviour of described girders and their ultimate loads or carrying capacity (that is manifesting as local buckling in the zone of load introduction), under the influence of different parameters is analyzed.

Author's own research as well as the research of other authors makes a basis for the analysis. Expressions for the ultimate load, suitable for the use in practice are formulated, based on the analysis. The central point is the influence of the loading length for the girders with and without longitudinal stiffeners.

The paper is divided into seven chapters. In the first chapter introduction is given to the general problem and especially to the subject of this paper. Also used symbols are given.

Review of the earlier investigations is given in the second chapter.

Author's own experimental research is presented in the third chapter. The most important results from this research and their analysis are given in the fourth part.

Theoretical considerations, including analysis of the results of previous investigations are presented in the fifth part. Determination of the ultimate load based on use of failure mechanism adapted for the case of girders with longitudinal stiffeners is given. Expression for taking into account influence of the length of patch load for girders with longitudinal stiffeners is proposed.

Conclusions are given in the sixth part and literature is given in the seventh part.

Key words : civil engineering, steel structures, thin-walled girders, stability, ultimate load, patch load, local buckling, experimental investigation

ZAHVALNICA

Ovaj rad, odnosno pre svega njegov eksperimentalni deo kao najvažniji deo, ne bih mogao realizovati u postojećim uslovima bez pomoći velikog broja ljudi, od kojih je svako u nekom važnom trenutku pružio dragocenu pomoć. Zato izražavam veliku zahvalnost:

Akademiku Nikoli Hajdinu, za veliku podršku i pomoć u raznim fazama rada na doktorskoj disertaciji, počevši od omogućavanja studijskog boravka u Kardifu, kada praktično počinje moje bavljenje ovom problematikom, zatim definisanja teme doktorske disertacije u okviru međunarodne saradnje sa prof. M. Škaloudom, omogućavanja kontakata sa istraživačima u inostranstvu, do velike pomoći u realizaciji eksperimentalnog dela istraživanja i to kako na finansijskoj pomoći iz više projekata bez koje se istraživanje ne bi moglo realizovati, tako i na stalnoj brizi i obezbeđenju uslova da do realizacije dodje.

Prof. dr Miroslavu Škaloudu, za izbor aktuelne problematike za predmet doktorske disertacije, za omogućavanje korišćenja rezultata istraživanja koje je sprovodio u Pragu sa svojim saradnicima, na koje se rezultati ove disertacije nadovezuju, za interesovanje i podstrek.

Prof. dr Branislavu Čoriću, za podršku i saradnju u radu na disertaciji.

Doc. dr Dušku Lučiću, dugujem posebnu i veliku zahvalnost na izuzetnoj, prijateljskoj pomoći u realizaciji eksperimentalnog dela istraživanja, na obezbeđenju korišćenja prostora i savremene opreme Građevinskog fakulteta u Podgorici, i obezbeđenju saradnika sa Građevinskog fakulteta iz Podgorice za profesionalno i savesno izvršenje eksperimenata, što je rezultiralo u veoma pouzdanim rezultatima.

Posebnu zahvalnost dugujem i saradnicima na eksperimentu sa Građevinskog fakulteta u Podgorici

Draganu Čaliću, Zoranu Aleksiću i Marku Osmajiću, za visoko profesionalan i savestan rad pri pripremi i na vršenju eksperimenata, kao i za pouzdane rezultate merenja, a posebno na spremnosti da pored svojih redovnih obaveza uklape izvršenje eksperimenata u za mene bitne termine, kao i za predan rad u često veoma teškim i nepovoljnim uslovima.

Vladimiru Kaporu, na prijateljskoj pomoći na obezbeđenju savremene foto opreme i na dragocenom dokumentovanju izvodjenja eksperimenata u Podgorici.

Ratku Pestiću, za izradu rama za ispitivanje u Beogradu, za saradnju na izradi specijalnog rama, na bojenju nosača i drugim važnim poslovima pri spremanju postavke ispitivanja u Beogradu, kao i za stalno interesovanje i podršku.

Vladi Vasiću, za izradu dve verzije rama za merenje deformacija, za izradu elemenata za opterećivanje, za obradu merne letve, za izradu epruveta i njihovo ispitivanje.

Milošu Cimeši, za pomoć u raznim fazama eksperimentalnog dela istraživanja, za rad na merenju dimenzija i dragocenu pomoć pri obeležavanju nosača, kao i na obradi rezultata eksperimenata.

Smiljani Cimeši, za dragoceni i pouzdani rad na geodetskim merenjima i na vođenju zapisnika tokom pripremnog dela.

Nebojši Rančiću, za rad na geodetskim merenjima i pripremi nosača za transport.

Dušanu Nešiću, za rad u pripreмној фази eksperimentalnog dela na registrovanju početnih deformacija i povremeno vođenje zapisnika.

Prof. dr Slobodanu Ašaninu, za organizovanje nivelmanskog merenja i za samo merenje.

Asistentu Mr Branku Milovanoviću, za prijateljsku pomoć, za nivelmansko merenje i pouzdane rezultate

Milanu Boškoviću, za vođenje zapisnika i drugu pomoć u pripremnom delu eksperimenata.

Radi Raduloviću, za pravljenje snimaka u Beogradu.

Za dragoceno priskakanje u pomoć u pripremnom delu Zorici Cimeši, Biljani Deretić-Stojanović i Radi Radulović za vođenje zapisnika, kao i Biljani Šćepanović na snimanju jednog broja fotografija u Podgorici.

Draganu Cimeši, za organizaciju transporta i pomoć pri pripremi i transportu nosača za Podgoricu.

Gospodji Vidi Zorić, iz "Feršpeda", na efikasnoj realizaciji transporta nosača za Podgoricu.

Dekanu i prodekanima Građevinskog fakulteta u Beogradu: prof. dr Aleksandru Cvetanoviću, Milošu Staniću, Zoranu Radiću, Milanu Komatini, za obezbeđenje finansijske podrške i regulisanje izvršenja eksperimenata u Podgorici.

Dekanu i prodekanima Građevinskog fakulteta u Podgorici, za omogućavanje izvršenja eksperimenata u Podgorici.

FINANSIJSKA POMOĆ JE OBEZBEDJENA ZAHVALJUJUĆI SLEDEĆIM INSTITUCIJAMA

Gradjevinsko preduzeće " Mostogradnja " Beograd : izrada čeličnih nosača po ceni koja je pokrila samo troškove materijala.

Srpska akademija nauka i umetnosti – Institut tehničkih nauka – naučni projekti "Stabilnost i plastičnost metalnih konstrukcija i njihov uticaj na savremeno projektovanje i izvodjenje" i "Teorijska i eksperimentalna istraživanja metalnih konstrukcija i njihov uticaj na savremeno projektovanje i izvodjenje". Finansijska podrška u raznim fazama eksperimentalnog dela od izrade nosača, troškova osoblja, nabavke potrebnog materijala.

Gradjevinski fakultet u Podgorici : omogućavanje izvršenja eksperimenata u Laboratoriji za ispitivanje i materijale i odobravanje angažovanja saradnika za realizaciju eksperimenata.

Gradjevinski fakultet u Beogradu

(Naučno istraživački projekti u okviru Republičke zajednice za nauku : Plastičnost i stabilnost metalnih konstrukcija i Fond za nabavku opreme) - nabavka membranih traka i drugih materijalnih sredstava

(Naučno istraživački projekti Republike Srbije) – troškovi pripreme nosača i realizacije eksperimenata

(centralna sredstva): finansijska podrška iz centralnih sredstava za putne troškove, transport nosača i pokriće dela materijalnih troškova

PREDGOVOR

Problemi ponašanja i naprezanja čeličnih konstrukcija i elemenata, njihove stabilnosti i granične nosivosti predstavljaju značajne oblasti istraživanja u građevinarstvu. Mnogo toga je objašnjeno, ali sa razvojem novih vrsta čelika, sa primenom sve složenijih i smelijih konstrukcija (i kao posledicom toga pojavom nekoliko velikih havarija velikih objekata u svetu), sa stalnom potrebom osavremenjavanja i usaglašavanja propisa za projektovanje radi ekonomičnog i sigurnog gradjenja kao krajnjeg cilja, došlo je do intenzivnih istraživanja poslednjih decenija u svetu.

Pored drugih, problem lokalnog opterećenja po pojasevima sandučastih i I nosača a u ravni rebra koji za krajnju posledicu može da ima lokalno izbočavanje u zoni unošenja opterećenja, uočen je još sredinom 19. veka u Belgiji [10.1]. Ubot (Hubotte) je ispitujući I nosače sa neukrućenim vertikalnim limom, primenom koncentrisane sile u sredini, ustanovio da je u svim slučajevima do sloma dolazilo usled lokalnog izvijanja lima u blizini napadne tačke primenjene spoljne sile [10.2]. Nakon toga posle povremenog bavljenja problemom elastične kritične sile tridesetih i pedesetih godina, krajem šezdesetih godina 20. veka počinje intenzivno bavljenje ovom problematikom. Značajna istraživanja se obavljaju pre svega u Velikoj Britaniji, Švedskoj, Čehoslovačkoj i Nemačkoj, a zatim i u Francuskoj, Švajcarskoj, Japanu, Brazilu i drugim zemljama. Veoma je važno istaći da se ova istraživanja praktično od sedamdesetih godina obavljaju u okviru međunarodne saradnje i koordinacije i pri tome se međusobno dopunjuju. To je, ustvari, veoma bitno jer, kako će u sledećem poglavlju biti prikazano, radi se o veoma složenom problemu, koji zahteva veoma obimna i skupa istraživanja da bi se došlo do sveobuhvatnih rešenja.

Poslednjih nekoliko godina rad na ovoj problematici povezan je i sa izradom usaglašenih propisa za projektovanje Evrokodova odnosno Evrokoda 3 koji se odnosi na čelične konstrukcije.

Trenutno su u toku istraživanja u Švedskoj i Nemačkoj.

I u Srbiji i Crnoj Gori istraživanje ove problematike počelo je u okviru međunarodne saradnje. U okviru saradnje ustanovljene između akademika Nikole Hajdina i prof. K.C. Rocky-a sa University College iz Kardifa prvo je Branislav Čorić 1979 učestvovao u eksperimentima izvršenim u Kardifu na nosačima sa većim rasponom, a zatim je i autor 1980 učestvovao u eksperimentima u Kardifu na nosačima sa malim rasponom. Nakon toga sledi uglavnom teorijski rad na ovoj problematici. Krajem osamdesetih u okviru saradnje Srpske i Čehoslovačke akademije nauka i umetnosti i saradnje akademika Nikole Hajdine i profesora Miroslava Škalouda dolazi i do saradnje u oblasti istraživanja problematike lokalnog opterećenja. U okviru te saradnje definisan je i ovaj rad. Krajem devedestih u Podgorici Duško Lučić obavlja obimna eksperimentalna ispitivanja centrično i ekscentrično napregnutih I nosača. Ova istraživanja u Podgorici 2002 nastavlja Biljana Šćepanović. Nastavljaju se i teorijska istraživanja. Kao rezultat svih pomenutih istraživanja publikovan je značajan broj radova i saopštenja u međunarodnim kao i u domaćim časopisima i na međunarodnim i domaćim konferencijama.

Pošto su u Pragu, pod rukovodstvom profesora M. Škalouda izvršena veoma obimna istraživanja sa variranjem velikog broja (ali ne i svih) parametara, dogovoreno je da se u okviru saradnje u Beogradu nastavi sa dodatnim istraživanjima koja bi se nadovezala na praška. Deo tih istraživanja predstavlja i proučavanje uticaja dužine raspodeljenog opterećenja kod I nosača sa podužnim ukrućenjima opterećenim po gornjem pojasu. Da bi se došlo do odgovarajućih teorijskih rešenja zaključeno je da su potrebna i dodatna eksperimentalna istraživanja. Eksperimentalna i teorijska ispitivanja ove problematike predstavljaju sadržinu ovog rada i prikazana su u narednim poglavljima.

SADRŽAJ

1.	Uvod	1
1.1	Uvod u problematiku lokalnog opterećenja I nosača	1
1.1.1.	Mogući problemi, slučajevi i uticaji	1
1.1.2.	Načini rešavanja	5
1.2.	Problematika kojom se bavi ovaj rad	6
1.3.	Obeležavanje	7
2.	Dosadašnja istraživanja ponašanja nosača pod dejstvom lokalnog opterećenja po pojasu	9
2.1	Opšte	9
2.1.1.	Odredjivanje napona	9
2.1.2	Odredjivanje elastične kritične sile izbočavanja	10
2.1.3	Odredjivanje granične nosivosti	12
2.1.4	Odredjivanje granične nosivosti - rešenje preko parametra vitkosti	13
2.2	Dosadašnja istraživanja uticaja dužine na kojoj deluje opterećenje	15
2.2.1	Eksperimentalna istraživanja	15
2.2.1.1	Nosači bez podužnih ukrućenja	15
2.2.1.2	Nosači sa podužnim ukrućenjima	17
2.2.2	Teorijska istraživanja	26
2.3	Dosadašnja vlastita istraživanja ponašanja nosača pod dejstvom lokalnog opterećenja I nosača	27
3.	Vlastita eksperimentalna istraživanja	29
3.1	Opšte	29
3.2	Planiranje eksperimenata i izbor karakteristika nosača	31
3.3.	Priprema za ispitivanje	33
3.3.1	Izrada nosača	33
3.3.2	Merenja dimenzija	33
3.3.3	Odredjivanje karakteristika materijala	34
3.3.4	Obeležavanje nosača	36
3.3.5	Priprema rama za ispitivanje i postavke eksperimenta u Beogradu i specijalnog rama za merenje deformacija rebra	27
3.3.6	Merenja početnih deformacija	39
3.3.6.1	Merenja početnih deformacija pomoću rama	39
3.3.6.2	Merenje početnih deformacija geodetskim putem- nivelmanom	40
3.4	Neposredna priprema za ispitivanje	43
3.5	Tok eksperimenata	49
3.6	Pregled izvršenih eksperimenata	51
4	Rezultati eksperimenata	53
4.1.	Konturne linije	60
4.2	Početne deformacije, deformacije pod najvećom silom, rezidualne deformacije srednjeg vertikalnog preseka rebra	68
4.3.	Rezidualne deformacije opterećenog pojasa	72
4.4.	Vertikalni preseki rebra pri početnoj i rezidualnoj deformaciji	74
4.5.	Početne i rezidualne deformacije - horizontalni preseki rebra	80
4.6.	Početne i rezidualne deformacije - horizontalni preseki rebra u zoni unošenja opterećenja	84
4.7	Pomeranja tačaka u srednjem vertikalnom profilu sa porastom sile	90

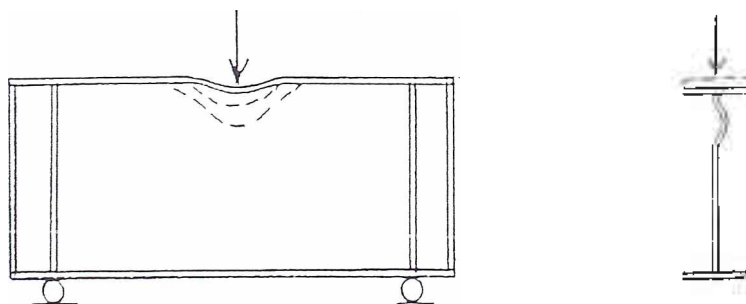
4.8	Dijagrami sila – pomeranje karakteristične tačke rebra	95
4.9	Rezultati dobijeni pomoću mernih traka	99
4.10	Sračunati naponi	105
4.11	Fotografije nosača za vreme i posle ispitivanja	108
4.12	Analiza rezultata ispitivanja	112
4.12.1	Ponašanje nosača tokom ispitivanja	112
5.	Teorijska razmatranja	118
5.1	Analiza dosadašnjih rezultata	118
5.2	Predlog mehanizma loma	118
5.3	Predlog za uzimanje u obzir uticaja dužine opterećenja	123
6.	Zaključci	124
7.	Literatura	126
	Biografija	137

1. UVOD

1.1 UVOD U PROBLEMATIKU LOKALNOG OPTEREĆENJA I NOSAČA

Slučaj dejstva koncentrisanog opterećenja ili opterećenja raspodeljenog po maloj dužini na pojasu tankozidnih nosača ispod koga se nalazi rebro (slika 1.1.1) je čest slučaj opterećenja. Pri tome ako sila ima relativno veliku vrednost, a poznat je njen položaj, problem se najčešće rešava postavljanjem vertikalnih (poprečnih) ukrućenja rebra na mestu dejstva sile. Međutim, s jedne strane tendencija je u projektovanju smanjenje broja poprečnih ukrućenja, a s druge strane nije uvek ni poznat položaj dejstva sile koja deluje ili se on menja. Pored primera kranskih staza, jedan od najkarakterističnijih primera je slučaj montiranja mostovskih konstrukcija prevlačenjem preko privremenih ili stalnih oslonaca do definitivnog položaja. Pri tome reakcije ovih oslonaca koje deluju na donji pojas predstavljaju slučaj lokalizovanog opterećenja kome je izložen tokom postupka svaki presek nosača. Za pojedine položaje tokom prevlačenja reakcije mogu imati znatne vrednosti, a da deluju na preseke koji u definitivnom položaju neće biti tako opterećeni. Tako da slučaj montaže može da postane merodavan za dimenzionisanje, što može da dovede do neracionalnih rešenja konstrukcije. Takodje, ukoliko se na pravi način ne vodi računa o ovom slučaju može da dodje i do havarija, za šta ima primera u literaturi.

Zbog navedenog, ponašanje I nosača (ili sandučastih nosača) pod dejstvom lokalnog opterećenja po pojasu (koncentrisanog opterećenja i opterećenja raspodeljenog na maloj dužini pojasa) u ravni rebra predstavlja jedan od problema u inženjerskoj praksi koji je odavno uočen.



Slika 1.1.1 I-nosač izložen dejstvu koncentrisanog opterećenja po pojasu

Osnovni problemi koji se ovde mogu razmatrati su naponsko stanje, problem stabilnosti i problem granične nosivosti. Svi ovi problemi, za razliku od ostalih uobičajenih vrsta naprezanja, predstavljaju složene slučajeve kojima se istraživači bave već nekoliko decenija, a još nisu dobijena sva rešenja i tumačenja na zadovoljavajući način. Pri tome težnja je da se rešenja daju u oblicima koji će biti pogodni za praktičnu primenu, odnosno, za unošenje u propise.

1.1.1. MOGUĆI PROBLEMI, SLUČAJEVI I UTICAJI

Mogu se uočiti sledeći problemi, slučajevi i uticaji:

- slučajevi I – nosača i sandučastih nosača
- problem naprezanja
- problem stabilnosti (odredjivanje kritične sile)
- problem granične nosivosti
- slučaj valjanih i zavarenih nosača
- slučaj nosača različitih vitkosti
- uticaj osnovnih dimenzija nosača i njihovih odnosa

- uticaj dužine nosača
 - uticaj položaja vertikalnih (poprečnih) ukrućenja rebra
 - uticaj položaja horizontalnih (podužnih) ukrućenja rebra
 - vrsta i karakteristike horizontalnih (podužnih) ukrućenja rebra
 - uticaj dužine pojasa po kojoj deluje opterećenje
 - uticaj vrste naprezanja (momenta savijanja, transverzalne sile)
 - uticaj početnih deformacija (imperfekcija)
 - način na koji dolazi do lokalnog opterećenja
 - način unošenja opterećenja
 - karakter opterećenja (statičko ili dinamičko)
 - vrsta dinamičkog opterećenja
- položaj na nosaču
- uticaj ekscentriciteta opterećenja u odnosu na ravan rebra

Detaljni prikaz pojedinih od ovih problema dat je u magistarskom radu autora [11.3]. U daljem će biti kratko prikazani najvažniji detalji.

I – nosači i sandučasti nosači

Dosadašnja istraživanja su se uglavnom bavila ispitivanjima na I nosačima, ali postoje, pored načelno istog problema, kod I nosača i sandučastih nosača i određene specifičnosti. Potrebne su i dodatne analize i ispitivanja da bi se rešenja mogla primeniti i na sandučaste nosače.

problem naprezanja

Naprezanje rebra ispod pojasa na koji deluje lokalizovano opterećenje može se za idealizovan slučaj idealno ravnog rebra odrediti rešavanjem ravnog problema – diferencijalne jednačine uz korišćenje funkcije napona. Potrebno je uzeti u obzir sadejstvo ploča rebra i pojasa kao i drugih parametara koji mogu da utiču na vrednosti napona, tako da ovo predstavlja složen problem koji nije jednostavno rešiti u praktičnim zadacima.

Zbog složenosti određivanja tačnog rasporeda naprezanja pribegava se približnim postupcima od kojih je najčešće primenjuje određivanje širine rasprostiranja opterećenja do određenog položaja (visine) u rebru, gde se onda određuje prosečan napon.

Drugi način je korišćenje analogije sa gredom na elastičnoj podlozi, gde postoji problem određivanja koeficijenta elastičnosti podloge – rebra.

problem stabilnosti (određivanje kritične sile)

Određivanje kritične sile, uobičajeno za pritisnute elemente, javlja se i kod lokalnog opterećenja rebra. S jedne strane pokušalo se da se ova vrednost dovede u vezu sa nosivosti nosača, ali se pokazalo da pri široj promeni parametara koji utiču na problem ne može doći do zadovoljavajućeg rešenja.

Danas se ponovo javlja potreba za preciznijim određivanjem elastične kritične sile u funkciji različitih parametara u vezi sa najnovijim pristupom određivanju granične nosivosti pod dejstvom lokalnog opterećenja, primenjenom posebno u najnovijim verzijama Evrokoda 3. Tu se radi ujednačavanja sa postupcima kod drugih pritisnutih elemenata definiše vitkost, koja zavisi od elastične kritične sile i sile tečenja, a onda se na osnovu krive izbočavanja dolazi do nosivosti.

problem granične nosivosti

Problem određivanja granične nosivosti pojavio se, naravno, od uočavanja pojave lokalnog izbočavanja, ali poseban značaj dobija sa savremenim pristupima projektovanju i principima na kojima se zasnivaju propisi gde granična nosivost predstavlja važan element.

Pokušaji da se dodje do jednostavnog rešenja koje će važiti za širok raspon parametara nisu u potpunosti uspeali, tako da su u svetu i dalje u toku intenzivna istraživanja različitih segmenata ovog problema. Dalje će biti pomenuti najvažniji slučajevi i uticaji koji su od značaja.

slučaj valjanih i zavarenih nosača

Razlika u ponašanju između valjanih i zavarenih nosača je u velikoj meri povezana i sa oblastima vitkosti karakterističnih za jednu i drugu grupu nosača, a što je u vezi i sa načinom i mogućnostima njihove izrade i njihovom specifičnom upotrebom kod raznih konstrukcija ili delova konstrukcija. Recimo, upotreba valjanih nosača kod manjih raspona, upotreba u visokogradnji, a upotreba zavarenih kod različitih mostovskih i drugih konstrukcija većih raspona. Tu su od uticaja i specifičnosti njihove izrade (valjanje ili zavarivanja), obrade, naknadnih uticaja i drugo.

slučaj nosača različitih vitkosti

Pokazalo se da pri različitim vitkostima pojedini parametri na različit način utiču na ponašanje ovih nosača. Tako, na primer, uočeno je da visina rebra nakon nekih vrednosti više ne utiče značajno jer se sve promene kod viših nosača dešavaju samo u zoni unošenja opterećenja. Tu se pokazalo značajnim pitanje određivanja granične vitkosti koja razdvaja ove vrste ponašanja.

uticaj osnovnih dimenzija nosača i njihovih odnosa

Utvrđeno je da najveći uticaj na vrednost graničnog opterećenja ima debljina rebra (praktično sva istraživanja pokazuju da je granična nosivost proporcionalna kvadratu debljine rebra). Sledeći parametar od značaja je debljina pojasa, jer ona utiče na dužinu oblasti rebra koja je izložena izbočavanju. Širina pojasa, ako je u uobičajenim granicama, ne predstavlja znatan uticaj. Visina rebra, kako je napred rečeno, sem kod nosača veoma male vitkosti praktično nema većeg uticaja. Ne samo apsolutne vrednosti pojedinih dimenzija, već i njihov odnos ima uticaja na ponašanje nosača. Na primer, za male odnose debljina pojasa i rebra, lokalno izbočavanje obuhvata manju okolinu mesta dejstva sile nego za veće. Pri tome dolazi i do promene u načinu kako dolazi do loma. U prvom slučaju izraženija je plastifikacija, a u drugom stabilnost.

uticaj dužine nosača

Kod dužih nosača, sem lokalnog izbočavanja, postaju aktuelni i problemi globalne stabilnosti, pre svega problem bočnog torzionog izvijanja. Pitanje je kada je koji problem merodavan, a moguće je da dodje do interakcije ove dve vrste gubitka stabilnosti i time uticaja na nosivost.

uticaj položaja vertikalnih (poprečnih) ukrućenja rebra

Vertikalna ukrućenja na više načina utiču na ponašanje nosača. S jedne strane, ograničavaju oblast u kojoj može da dodje do izbočavanja, odnosno smanjuju mogućnost deformacija rebra van njegove ravni (i početne deformacije). S druge strane, vertikalna ukrućenja daju oslonac pojasi. I kod pojaseva relativno većih debljina mogu da uslove dužinu mogućeg mehanizma loma, koji tada ne može prirodno da se razvija i time može da dodje do znatnog povećanja nosivosti. Takođe, ona pružaju i oslonac horizontalnim ukrućenjima, ako postoje. Na taj način može da dodje do prenošenja određenog dela opterećenja preko rama koji se formira ka osloncima, odnosno do povećanja nosivosti.

uticaj položaja horizontalnih (podužnih) ukrućenja rebra

Horizontalna ukrućenja, zbog lokalnog karaktera pojave, imaju uticaja samo ako su u neposrednoj blizini opterećenog pojasa, a to znači u većoj meri ako su udaljena do četvrtine visine rebra, s još izvesnim uticajem do $0.4 h_w$. Njihov položaj može da utiče i na oblik loma, odnosno da li će izraženije biti tečenje ili izvijanje.

vrsta i karakteristike horizontalnih (podužnih) ukrućenja rebra

Zatvorena ukrućenja, zbog svoje torzione krutosti više utiču na povećanje nosivosti. Povećanje krutosti na savijanje ukrućenja takodje povećava nosivost, ali samo do određene mere. kada dalje povećanje krutosti ukrućenja više praktično ne utiče na povećanje nosivosti.

uticaj dužine pojasa po kojoj deluje opterećenje

Dužina pojasa po kojoj deluje opterećenje ima uticaja na nosivost. Sa povećanjem dužine može se znatno povećati granična nosivost. Ovaj uticaj nije posebno sistematski istraživan, iako postoji nekoliko predloga za njegovo uzimanje u obzir.

uticaj početnih deformacija

U dosadašnjim istraživanjima se pokazalo da početne deformacije nemaju suviše veliki značaj, ali mogu da budu od uticaja, pogotovu, ako odgovaraju ili ako su suprotne od karakterističnog oblika izbočavanja za koji odgovara konkretnim parametrima.

način na koji dolazi do lokalnog opterećenja

Može biti direktno opterećenje spoljnim silama, to mogu da budu reakcije oslonaca (posebno važan u praksi slučaj prevlačenja mostovske konstrukcije preko privremenih oslonaca do definitivnog položaja) ili može biti opterećenje usled drugih delova konstrukcije. Opterećenje može da bude direktna, upravna sila na pojas (koncentrisana ili raspodeljena na određenoj dužini) ili deo momenta koji se realizuje preko pritisnutog i zategnutog dela (na primer, kod veze stuba i grede).

način unošenja opterećenja

Način unošenja je povezan sa prethodnim, pa to onda mogu da budu slobodni elementi ili kruto ili elastično spojeni sa pojasom. Mogu da u zavisnosti od uzroka sprečavaju ili uslovljavaju pomeranja pojasa upravno na ravan rebra.

karakter opterećenja (statičko ili dinamičko)

Kod dinamičkog opterećenja može doći do pojave prslina u zoni lokalnog izbočavanja, što može da utiče na nosivost, ali su dosadašnja istraživanja pokazala da za razmatrane opsege nije bilo značajnog smanjenja nosivosti.

vrsta dinamičkog opterećenja

Dinamička opterećenja mogu biti različitih svojstava. Razmatrani su slučajevi cikličnih opterećenja sa malom i velikom učestanošću, i pokazalo se da kod velike učestanosti je manji uticaj na sniženje nosivosti.

položaj na nosaču

Najčešći je slučaj dejstva sile na jednom pojasu između oslonaca, ali se pokazuje da se i slučajevi dejstva obostranog (na oba pojasa) međusobno uravnoteženog sistema i dejstva sile na kraju nosača mogu da se razmatraju istim postupkom.

deo širine pojasa na kojoj deluje opterećenje

Do sada, veći deo istraživanja se bavi opterećenjem po punoj širini pojasa, ali koncentrisanije opterećenje može da bude povezano sa aktiviranom dužinom rebra u primanju opterećenja, a takodje i sa pitanjem ekscentriciteta u odnosu na ravan rebra.

uticaj ekscentriciteta opterećenja u odnosu na ravan rebra

Kod malih ekscentriciteta pogotovu ako se opterećenje prenosi preko krutog elementa koji prelazi preko rebra pokazalo se da nema promene nosivosti. Nakon određenih vrednosti ekscentriciteta (i ako je celo opterećenje samo sa jedne strane rebra) može doći do znatnog sniženja nosivosti uz promenu načina i oblika loma. Ovde se postavlja pitanje utvrđivanja tog graničnog ekscentriciteta i definisanja mehanizma loma za slučaj sa većim ekscentricitetima.

Mnogi od ovih slučajeva se javljaju u različitim kombinacijama, sa različitim odnosima vrednosti parametara koji sudeluju u pojavi. Pri tome neke veličine mogu povoljno da deluju, a druge nepovoljno. Pokazalo se da je veoma teško u takvim slučajevima razdvojiti i proceniti uticaj pojedinih dejstava. Zbog toga veliki deo istraživača se u pojedinim istraživanjima koncentriše na analizu manjeg broja parametara, kako bi se bolje objasnio i definisao njihov uticaj.

1.1.2. NAČINI REŠAVANJA

U rešavanju navedenih problema mogu se koristiti sledeći načini rešavanja

- teorijsko- analitički
- eksperimentalni
- teorijsko- numerički
- teorijsko - empirijski

Teorijsko analitički način rešavanja problema koji polazi od osnovnih relacija teorije elastičnosti i teorije plastičnosti predstavlja normalan pristup rešavanju većine problema. Medjutim specifičnosti ovog problem o kojima je napred bilo reči dovele su do toga da se praktično nije moglo ovim načinom doći do zadovoljavajućih konačnih rešenja. Naravno, dobijen je ovim putem uvid u uticaj mnogih parametara, ali nije uvek mogao biti kvantifikovan. Teorijski je rešavano pitanje rasporeda napona, stabilnosti (elastične kritične sile) i pitanje granične nosivosti korišćenjem mehanizama loma.

Medjutim, ne dolaženje do zadovoljavajućih rešenja uputilo je mnoge istraživače na **eksperimentalni** put. Do danas je obavljeno skoro hiljadu testiranja, medjutim zbog napred navedenog broja različitih uticaja i njihovih kombinacija, još uvek veći deo pitanja nije zadovoljavajuće razjašnjen.

Kako su eksperimenti obično skupi, u poslednje vreme sa razvojem i dostupnošću računara i sve složenijih i moćnijih programa koji omogućavaju i rešavanje nelinearnih problema, veoma su zastupljene **numeričke** parametarske **analize**. Korišćena je i metoda konačnih razlika, ali glavna je primena metode konačnih elemenata.

Bilo da se koriste eksperimentalne metode ili numeričke simulacije problema korisno je doći do analitičkih izraza koji uključuju uticaj pojedinih parametara. Dobijaju se **empirijski** izrazi koristeći postupke teorije verovatnoće i matematičke statistike.

Načini rešavanja se često i prepliću, tako što se, na primer, u teorijsko analitički postupak uvede neki elemenat koji je određen eksperimentalno ili se do empirijske formule dolazi polazeći od elemenata dobijenih teorijsko-analitičkim postupkom, a onda se iz statističke obrade rezultata eksperimenata dobijaju korekcije ili konačan oblik. Takođe u novije vreme uobičajeno je dobijanje empirijskih formula na osnovu numeričkih simulacija eksperimenata.

1.2. PROBLEMATIKA KOJOM SE BAVI OVAJ RAD

Iz uvida u dosadašnja istraživanja uočava se da na sistematski način nije u dovoljnoj meri istraživana uticaj dužine unošenja opterećenja. Posebno veoma malo ima istraživanja u kojima se ovaj uticaj istražuje kod nosača sa podužnim ukrućenjima. Koncipirano je istraživanje koje bi dalo doprinos razmatranju i razjašnjavanju ove problematike.

Predmet rada je izbočavanje limenih nosača u zoni unošenja lokalnog opterećenja, razmatranje naprezanja, problema stabilnosti i granične nosivosti, posebno analiza uticaja pojedinih do sada nedovoljno istraživanih parametara, kao što su uticaj podužnih ukrućenja, kao i uticaj dužine rasprostiranja opterećenja.

Cilj rada je razmatranje stabilnosti posmatranih nosača kao i njihove granične nosivosti koja se manifestuje pojavom izbočavanja u zoni unošenja opterećenja, a u zavisnosti od parametara koji određuju njihovo ponašanje. Cilj je i formulisanje izraza za određivanje granične nosivosti pogodnih za praktičnu primenu sa težištem na uticaju dužine raspodeljenog opterećenja kada postoje podužna ukrućenja.

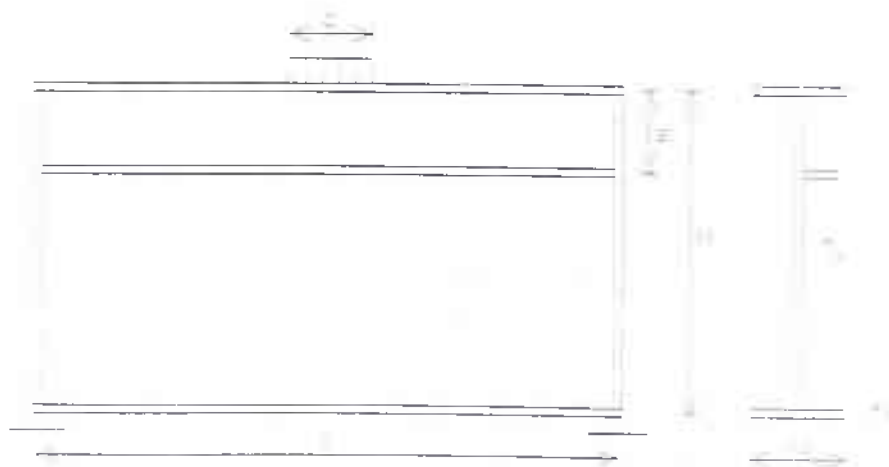
Polazi se od pretpostavki o složenom problemu stabilnosti i granične nosivosti. Pri dostizanju granične nosivosti uzima se u obzir složeno elastoplastično ponašanje nosača. Nosač se posmatra kao sadejstvujući sistem ploča pojasa i rebra.

Radi verifikacije teorijskih razmatranja primeniće se eksperimentalna metoda kao osnova istraživanja na određenom broju modela, uz primenu numeričkih postupaka za omogućavanje daljih parametarskih analiza. Analiziraće se sopstveni eksperimentalni rezultati kao i rezultati drugih autora i primeniti statističke metode njihove obrade radi dobijanja što ispravnijih rešenja. Eksperimenti se planiraju kao nastavak i deo veoma obimnih istraživanja koja su sprovedena u Institutu za tehničku i primenjenu mehaniku Češke akademije nauka u okviru kojih je razmatran znatan broj parametara, ali je potrebno rezultate upotpuniti uticajem dužine raspodeljenog opterećenja podužno ukrućenih limenih nosača.

1.3. OBELEŽAVANJE

Obeležavanja koja se najčešće koriste u radu su (slika 1.3.1) :

- d - visina rebra
- t_w - debljina rebra
- b - širina pojasa
- t_f - debljina pojasa
- l - raspon nosača
- a - rastojanje vertikalnih ukrućenja
- s - položaj (udaljenje od opterećenog pojasa) podužnih ukrućenja
- b_s - širina horizontalnog ukrućenja
- t_s - debljina podužnog ukrućenja
- c - dužina pojasa po kojoj deluje opterećenje (c=0 za koncentrisano opterećenje)
- E - modul elastičnosti
- P_{cr} - kritična sila
- P_u - granična vrednost sile
- P_{ex} - granična vrednost sile dobijena eksperimentalno
- σ_y - napon tečenja (napon razvlačenja)
- σ_{yw} - napon tečenja (napon razvlačenja) rebra
- σ_{yf} - napon tečenja (napon razvlačenja) pojasa



Slika 1.3.1



2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA PONAŠANJA NOSAČA POD DEJSTVOM LOKALNOG OPTEREĆENJA PO POJASU

2.1 OPŠTE

Poslednjih nekoliko decenija u okviru ostalih istraživanja stabilnosti tankozidnih nosača uopšte, a posebno I nosača i sandučastih nosača, brojna su istraživanja dejstva lokalnog opterećenja po pojasevima ovih nosača, uticaja koje ono izaziva i posebno vrednosti granične nosivosti.

Intenzivna istraživanja sprovedjena su poslednjih decenija pre svega u Švedskoj koja su prikazana u radovima Bergfelta i saradnika, Edlunda i Höglunda od [3.1] do [3.12], kao i poslednjih godina od strane Johanssona, Lagerqvista, Granatha, Graciana i Edlunda – radovi od [8.27] do [8.36].

U Velikoj Britaniji značajna su istraživanja Rockya i Roberta i saradnika – radovi od [2.1] do [2.18].

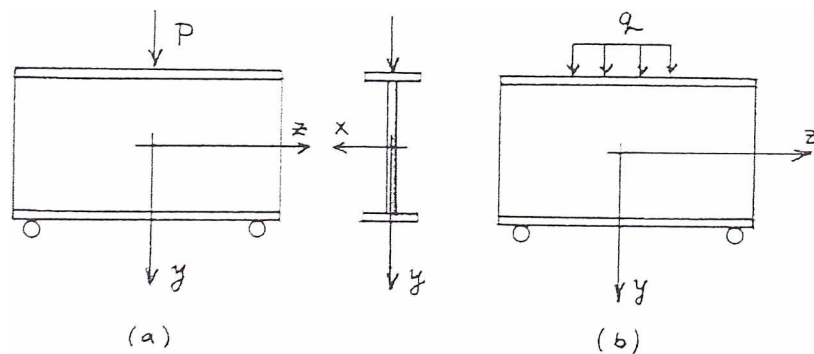
U Češkoj su obimna istraživanja Škalouda i Kutmanove i saradnika – radovi od [4.1] do [4.24], Drdackva – radovi od [5.1] do [5.13], Kratene - radovi od [5.14] do [5.24]; i u Slovačkoj istraživanja Ravingera – radovi [5.25] i [5.26].

U Nemačkoj su se ovim problemom bavili brojni autori, radovi od [6.1] do [6.45], a u poslednje vreme se istraživanja sprovode u Štutgartu – radovi Kuhlmann i Seitza [6.29] i [6.30].

Istraživanja u Francuskoj i Švajcarskoj (Dubasa i Tschampera) su prikazana u radovima od [7.1] do [7.14] i [8.8] do [8.15].

U Japanu su u poslednjoj deceniji obavljena značajna istraživanja posebno Shimizua - radovi od [8.1] do [8.7].

Istraživanja autora iz Srbije i Crne Gore prikazana su u radovima od [9.1] do [9.32] Hajdina, Čorića, Lučića i Šćepanović, kao i drugih istraživača i od [11.1] do [11.13] radovi autora ovog istraživanja.



Slika 2.1.1 Opterećenje I-nosača

Nosači opterećeni lokalizovanim opterećenjem predstavljaju složen sistem ploča pojasa i rebra. Može se govoriti o tri aspekta ponašanja u okviru kojih su se i sprovodila istraživanja:

- naponi u rebro
- elastična kritična sila rebra
- granična nosivost

Cilj istraživanja ove problematike, kao uostalom većine drugih istraživanja, je da omogući sigurno i ekonomično projektovanje korišćenjem, po mogućstvu što jednostavnijih, izraza koji uzimaju u obzir na zadovoljavajući način sve relevantne uticaje za posmatrani problem.

Sprovedena istraživanja su pokazala da je teško doći do jednostavnih rezultata po ovim pitanjima i da ponašanje posmatranih nosača pod opterećenjem zavisi od niza geometrijskih i fizičkih karakteristika, odnosno parametara, često na medjusobno povezan način. Sem posebno

posmatranih uticaja: debljine i visine rebra, dimenzija pojasa, rastojanja vertikalnih ukrućenja, položaja i broja horizontalnih ukrućenja, napona tečenja rebra i pojasa, modula elastičnosti, načina nanošenja opterećenja, dužine na kojoj ono deluje, ponašanje zavisi i od odnosa pojedinih od ovih veličina, naprimer od vitkosti rebra, odnosa krutosti pojasa i rebra, odnosa rastojanja poprečnih ukrućenja i krutosti pojasa, odnosa poprečnih i podužnih ukrućenja i drugih.

Posebna pažnja se posvećuje graničnoj nosivosti nosača naročito u poslednje vreme sa široko prihvaćenim konceptom proračuna po graničnim stanjima, od kojih granično stanje nosivosti često služi kao osnova za dimenzionisanje.

U početku su istraživanja elastične kritične sile bila preduzimana sa očekivanjem da će se granična nosivost moći povezati sa ovom silom. Kako eksperimentalna istraživanja nisu pokazala da se može uspostaviti direktna veza, nisu nastavljena značajnija istraživanja u ovom pravcu. Dalja istraživanja su bila usmerena ka direktnom određivanju granične nosivosti, često empirijskim ili poluempirijskim putem, odnosno direktnim korišćenjem teorije plastičnosti.

Medjutim, najnoviji predlozi da se i za ovaj problem upotrebi savremeni koncept razmatranja ponašanja pritisnutih elemenata, odnosno njihove stabilnosti ili granične nosivosti, korišćenjem koeficijenta vitkosti (koji predstavlja odnos naprezanja koja dovode do plastifikacije i elastične kritične sile) aktuelizovan je problem određivanja kritične sile.

Odredjivanje kritične sile izbočavanja u direktnoj je vezi sa rešenjem rasporeda napona u rebro usled koncentrisanog opterećenja, pa će prvo ukratko ovaj problem biti razmatran. Glavni deo razmatranja se odnosi na mogućnost primene različitih postupaka za odredjivanje elastične kritične sile i na pregled do sada dobijenih rezultata različitih autora, kao i na njihovo uopštavanje. Zatim će se razmotriti odredjivanje sile koja dovodi do plastifikacije. Na kraju će biti prikazati postojeća rešenja po navedenom konceptu za odredjivanje nosivosti.

2.1.1. ODREDJIVANJE NAPONA

Osnovni problem je raspodela naprezanja u rebro. Tankozidni I- nosač opterećen prema slici 2.1.1 predstavlja složen sistem ploča pojasa i rebra. Osnovno naprezanje za koje se vrši proračun napona je savijanje i tu se obično u praktičnim proračunima primenjuje elementarna teorija savijanja za odredjivanje napona σ_z i τ_{xy} . Kod nosača čija je visina približna rasponu ili veća raspodela podužnih normalnih i smičućih napona u rebro znatno odstupa od raspodele prema elementarnoj teoriji tako da je potrebno odrediti tačnije rešenje. Medjutim, značajno je, takodje, posebno u zoni unošenja opterećenja i poznavanje σ_v napona u rebro. Za njihovo odredjivanje obično se primenjuju različiti približni postupci. Tačno odredjivanje ovih napona kao rešenje ravnog problema predstavlja složen zadatak..

Za odredjivanje elastične kritične sile rebra bilo putem rešavanja diferencijalne jednačine bilo korišćenjem energetske metode potrebno je poznavanje rasporeda svih komponentalnih napona u rebro. Poželjno je analitičko rešenje koje bi omogućilo dalji opštiji pristup odredjivanju kritične sile, medjutim, kako je to obično veoma komplikovano to se često pristupa primeni numeričkih postupaka.

Rebro se može posmatrati ili kao izdvojena ploča ili kao deo sistema pojaseva i rebra.

Ako se rebro posmatra kao izdvojena ploča, za idealno ravnu ploču rebra naponi pre početka izbočavanja mogu se dobiti rešenjem ravnog problema, uvodjenjem funkcije napona i rešavanjem homogene diferencijalne jednačine četvrtog reda (2.1) uz zadovoljenje konturnih uslova, a naponi se odredjuju iz izraza (2.2).

$$\frac{\partial^4 \Phi}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \Phi}{\partial y^4} = 0 \quad (2.1) \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \quad \sigma_x = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \quad \tau_{xy} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} \quad (2.2)$$

Tačno odredjivanje ovih napona kao rešenja ravnog problema za rebro predstavlja složen zadatak, pa se za njihovo odredjivanje obično primenjuju različiti približni postupci. Sama priroda konturnih uslova pri lokalizovanom opterećenju već onemogućava jednostavno analitičko rešenje. a

pored toga pri sadejstvu pojasa i rebra od njihovih karakteristika zavisi kako će se rasprostrirati spoljašnje opterećenje na rebro. Ovim su se bavili Timošenko [10.3], Girkman [10.4], i drugi. Uticaj krutosti pojasa se može uzeti u obzir i polazeći od analogije sa gredom na elastičnoj podlozi. Primenu ove analogije na I nosač prikazao je Bergfelt [3.2].

Pojedini autori koji su se bavili određivanjem elastične kritične sile su na različite načine vršili određivanje raspodele napona u rebro

2.1.2 ODREĐJIVANJE ELASTIČNE KRITIČNE SILE IZBOČAVANJA

Određivanju kritične sile izbočavanja rebra obično se prilazilo kao nezavisnom problemu stabilnosti ploča za određeno ivično opterećenje, dok su načini kako simultano uzeti i uticaj pojasa i njegove krutosti na rasprostiranje opterećenja na rebro, manje istraživani. Uobičajeno je da se elastična kritična sila prikazuje u obliku sličnom onom koji se koristi i kod drugih slučajeva opterećenja ploča u zavisnosti od osnovnih geometrijskih karakteristika.

Problemi stabilnosti ploča mogu se razmatrati polazeći od diferencijalne jednačine izbočene površine ploče (2.3) zajedno sa graničnim (ivičnim) uslovima.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{1}{D} \cdot \left(\sigma_x t \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \sigma_y t \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2 \tau_{xy} t \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \quad (2.3)$$

Tako je dobijeno rešenje npr. za ploču opterećenu duž dve naspramne ivice jednako podeljenim silama pritiska. Međutim u mnogim praktično važnim slučajevima nemoguće je dobiti tačno rešenje diferencijalne jednačine uzimajući u obzir sve ivične uslove ili tačnu raspodelu napona u ploči. Približna rešenja se mogu dobiti ili korišćenjem iste diferencijalne jednačine, ali tako da neki od ivičnih uslova budu samo približno zadovoljeni ili korišćenjem numeričkog postupka za rešavanje diferencijalne jednačine, npr. diferencnog postupka.

Za približno rešenje se mnogo češće koristi energetska metoda uz korišćenje Rayleigh-Ritzove metode. Polazi se od uslova da promena potencijalne energije (2.4)

$$U = \frac{D}{2} \cdot \iint \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \cdot \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy + \quad (2.4)$$

$$\frac{t}{2} \iint \left\{ \sigma_x \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \sigma_y \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2 \tau_{xy} \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \frac{\partial w}{\partial y} \right\} dx dy$$

u stanju kritične ravnoteže ima stacionarnu vrednost. Pretpostavlja se deformisani oblik preko izraza koji predstavljaju kombinacije funkcija koje zadovoljavaju granične uslove i nepoznatih koeficijenata, kao naprimer:

$$w(x, y) = \sum_m \sum_k A_{mk} \cdot \sin \frac{m\pi y}{h} \cdot \cos \frac{k\pi x}{L} \quad (2.5)$$

Nakon unošenja u izraz za potencijalnu energiju i sprovedjenja integracija ona se posmatra kao kvadratna funkcija nepoznatih koeficijenata. Postavljanjem uslova o stacionarnosti potencijalne energije dobija se sistem homogenih linearnih algebarskih jednačina koje nepoznati koeficijenti moraju da zadovoljavaju. Konačno se, iz uslova da determinanta sistema mora da bude jednaka nuli da bi postojalo netrivialno rešenje, određuje tražena vrednost kritičnog opterećenja. Relativno jednostavno su dobijena rešenja na ovaj način za slučaj linearno promenljivih napona na dvema ivicama ili jednako podeljenih napona smicanja na svim ivicama.

Razlika u odnosu na neke osnovne probleme stabilnosti ploča i teškoća u rešavanju problema stabilnosti usled dejstva lokalizovanog opterećenja, bilo da se koristi diferencijalna jednačina, bilo energetska metoda, je u promenljivosti naponskog stanja po ploči čiji se tačan raspored može dobiti rešenjem ravnog problema i to uz uslov da je tačno definisan granični uslov na opterećenoj ivici ploče (rebra).

U novije vreme sa upotrebom računara i sa njima proširenom primenom numeričkih postupaka koristi se i metoda konačnih elemenata radi dobijanja približnog rešenja primenom energetske metode i za prethodno određivanje raspodele napona. Kritična sila je određivana i korišćenjem metode konačnih traka takodje sa primenom energetske metode.

Osim energetske metode može se koristiti i modifikovana energetska metoda gde se umesto izraza (2.4) za potencijalnu energiju koristi izraz (2.6) prema radovima Alfutova i Balabukha [1.20], [1.21].

$$\begin{aligned}
 U = & \iint \frac{D}{2} \cdot \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \cdot \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy + \\
 & + \iint \frac{t}{2} \cdot \left\{ \sigma_x^* \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \sigma_y^* \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\tau_{xy}^* \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \frac{\partial w}{\partial y} \right\} dx dy - \\
 & - \iint \frac{t}{E} \cdot (\sigma_x^* + \sigma_y^*) \cdot \nabla^2 \Phi dx dy
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

$$\text{ili } U = U^{(B)} + U^{(1)} + U^{(2)} \tag{2.7}$$

Ovde se umesto stvarnog naponskog stanja koje može biti relativno složeno, koristi neko moguće, jednostavnije, naponsko stanje i Φ funkcija napona koja odgovara stanju nakon izbočavanja, a koja mora da zadovolji Karmanovu jednačinu (2.8) i granične uslove (2.9).

$$\nabla^4 \Phi = E \cdot \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] \tag{2.8} \quad \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \tag{2.9}$$

Moguće naponsko stanje mora da zadovolji samo uslove ravnoteže (2.10) i granične uslove po silama.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \sigma_x^*}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}^*}{\partial y} &= 0 \\
 \frac{\partial \sigma_{xy}^*}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y^*}{\partial y} &= 0
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

Određivanje kritične elastične sile obično se sastoji iz dva dela. U prvom delu se određuje raspodela napona u rebro za posmatrani slučaj opterećenja. U drugom delu se tako određeni naponi primenjuju u okviru izabranog kriterijuma stabilnosti.

Uticao krutosti pojasa na rasprostiranje nanetog opterećenja može se uzeti u obzir ako se nosač (rebro i pojasevi) posmatra kao celina, a to omogućava metoda konačnih elemenata.

Radovi koji se odnose na problem stabilnosti odnosno određivanja elastične kritične sile su od [1.1] do [1.29].

Prvi je problem određivanja kritičnog opterećenja pri dejstvu lokalizovanog opterećenja pojasa I nosača proučavao Girkman [1.21]. On posmatra rebro jednog I nosača i uočava dve mogućnosti: prvu, kada je ili pojas male krutosti ili vertikalna ukrućenja toliko udaljena da ne utiču na izbočavanje, i drugu, kada se dejstvo vertikalnih ukrućenja odražava na povećanje kritične sile



bilo zbog znatne krutosti pojasa, bilo zbog blisko postavljenih vertikalnih ukrućenja. Girkman koristi energetska metodu i uvodi nešto uprošćenu analizu naprezanja.

Sledeći je Zetlin [1.12] određivao elastičnu kritičnu silu same ploče pod dejstvom delimičnog jednoliko raspodeljenog opterećenja na jednoj ivici ploče koristeći energetska metodu na sličan način kao Girkman, međutim, za razliku od Girkmana, koji polazi od delimičnog jednoliko raspodeljenog opterećenja koje deluje na I nosač, tako da uzima u obzir uticaj krutosti pojasa na rasprostiranje opterećenja na rebro, Zetlin polazi od razmatranja izolovane ploče

Modifikovanu energetska metodu su koristili Khan, Walker, Johns i Hayman radi parametarskog razmatranja problema izbočavanja. U radu Khana i Walkera [1.14] dato je jedno jednostavnije rešenje, a u radovima [1.15] i [1.16] Khana, Johnsa i Haymana prikazano je nešto kompleksnije rešenje koje omogućava proučavanje izbočavanja pod kombinovanim opterećenjem : lokalnog ivičnog opterećenja, savijanja i smicanja.

Zbog matematičkih teškoća u dobijanju analitičkog rešenja diferencijalne jednačine sa promenljivim koeficijentima, White i Cottingham [1.21] su prišli rešavanju diferencijalne jednačine problema stabilnosti diferencnom metodom (metodom konačnih razlika).

Rockey i Bagchi [2.16] su koristili metod konačnih elemenata za određivanje naponskog stanja pre izbočavanja i za određivanje elastične kritične sile uz korišćenje energetske metode i pri tome su analizirali i izolovanu ploču i ploču kao rebro I nosača.

Kritična sila se određuje iz uslova da je druga varijacija ukupne energije sistema jednaka nuli pri gubitku stabilnosti odnosno izbočavanju.

Graves Smith i Sridharan [1.17] su prikazujući prednosti korišćenja Metode konačnih traka pri razmatranju uticaja različitih vrsta opterećenja na sisteme koji se sastoje od ploča pokazali mogućnost njenog korišćenja i za određivanje kritične sile pri dejstvu lokalizovanog opterećenja na I nosač. Graves Smith i Gierlinski su primenili Metod konačnih traka kod I nosača sa podužnim ukrućenjima [1.18] i analizirali uticaj karakteristika ukrućenja (njihove krutosti na savijanje, torzione i aksijalne krutosti) na vrednost kritične sile. Istaknute su prednosti Metode konačnih traka u odnosu na Metodu konačnih elemenata pri primeni na posmatranu klasu problema.

2.1.3 ODREĐIVANJE GRANIČNE NOSIVOSTI

Eksperimentalna ispitivanja koja su vršili pojedini autori, medju njima i Zetlin [1.12], da bi proverili teoretska razmatranja, pre svega određivanja kritične sile izbočavanja, pokazala su da teorijski određena elastična kritična sila ne karakteriše, odnosno nije merodavna za ponašanje tankozidnih I nosača pod dejstvom koncentrisanog, odnosno lokalizovanog opterećenja. Pokazalo se da uglavnom postoji znatno veća granična nosivost od elastične kritične sile i da do loma dolazi usled lokalnog izbočavanja u zoni unošenja opterećenja, kao rezultat složenog elasto-plastičnog ponašanja, gde je od uticaja veći broj parametara.

U radovima [1.7], [1.8] prikazani su različiti postupci za određivanje granične nosivosti koji su ili zasnovani na teoriji plastičnosti ili empirijskog odnosno poluempirijskog karaktera. Pri tome rezultati se dobijaju u zatvorenom obliku ili kao rezultat numeričkih postupaka uz primenu računara.

Neki od poznatijih izraza za određivanje granične nosivosti se prikazuju na sledećoj slici:

(1)	$P_u = 9 t_w^2$	Granhölm
(2)	$P_u = \sigma_w t_w^2 / 0.03$	Bergfelt
(3)	$P_u = t_w^2 \sqrt{E \sigma_w}$	Bergfelt
(4)	$P_u = 1.15 t_w^2 \sigma_w^{0.6} E^{0.4} (1 + 0.4 t_f / t_w)$	Bergfelt
(5)	$P_u = 0.6 t_w^2 \sqrt{E \sigma_w} (1 + 0.4 t_f / t_w)$	Bergfelt
(6)	$P_u = 0.8 t_w^2 \sqrt{E \sigma_w} \sqrt{t_f / t_w}$	Bergfelt
(7)	$P_u = 0.68 t_w^2 \sqrt{E \sigma_w} (t_f / t_w)^{0.6}$	Bergfelt
(8)	$P_u = 0.5 t_w^2 \sqrt{E \sigma_w} \sqrt{t_f / t_w}$	Dubas i Gehri
(9)	$P_u = 0.5 t_w^2 (E \sigma_w t_f / t_w)^{0.5} (1 + 3c/d (t_w / t_f))^{1.5}$	Roberts
(10)	$P_u = 2(4 M_f \sigma_w t_w)^{0.5} + \sigma_w t_w c$	Roberts
(11)	$P_u = 0.55 t_w^2 \sqrt{E \sigma_w} \sqrt{t_f / t_w} (0.9 + 1.5c/d)$	Škaloud
(12)	$P_u = 11.6 \sigma_w t_w^2 (1 + 0.004 c / t_w) (I_f / t_w^4)^{0.153}$	Drdacky
(13)	$P_u = 19.54 \sigma_w t_w^2 (1 + 0.004 c / t_w) (I_f / t_w^4)^{0.1}$	Drdacky
(14)	$P_u = 10 t_w^2 \left[1.2 + \frac{5}{4} \frac{I_f}{t_w} \frac{d}{t_w} \left(1 + \frac{c}{d} \right)^2 \left(0.85 + \frac{b}{100 d} \right) \right]$	Herzog

Slika 2.1.3.1 Važniji izrazi za određivanje granične nosivosti

Pored ovih koristi se također i formula Škalouda

$$P_u = 8.7 t_w^2 \cdot \sigma_w \cdot (1 + 0.004 \cdot \frac{c}{t_w}) \cdot \left[\left(\frac{I_f}{t_w^4} \right) \cdot \sqrt{\frac{\sigma_f}{240}} \right]^{0.132} \quad (2.11)$$

U Evrokodu 3 deo 1 [10.19] za proračun čeličnih nosača primenjen je izraz Roberta za određivanje granične nosivosti (9) koji je zasnovan na gornjoj graničnoj teoremi teorije plastičnosti ali je modifikovan radi uprošćenja i slaganja sa postojećim eksperimentalnim rezultatima.

Poslednjih godina, u vezi sa izradom Evrokodova, aktuelan je potpuno nov pristup određivanju granične nosivosti, odnosno postupak usaglašen sa pristupom drugim problemima stabilnosti koji je predviđen da posluži kao osnova za Evrokod 3, deo 2. [10.21], a koga su prikazali Johansson i Lagerqvist [8.27], [8.28]. Zbog njegove aktuelnosti biće prikazan u sledećem odeljku.

2.1.4 ODREĐJIVANJE GRANIČNE NOSIVOSTI - REŠENJE PREKO PARAMETRA VITKOSTI

Polazeći od elastične kritične sile i nosivosti pri plastifikaciji, uvodi se parametar vitkosti λ , i definiše funkcija $\chi = f(\lambda)$ između parametra vitkosti i nosivosti.

ELASTIČNA KRITIČNA SILA

Elastična kritična sila je prikazana u obliku (2.11) gde je k_f prikazan na osnovu napred prikazanih postupaka.

$$F_{cr} = k_F \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^3}{h_w} \quad (2.12)$$

$$k_{F_f} = 2.1 \cdot \alpha + 1.2 \cdot \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 + \left(\frac{s_f}{h_w}\right)^2 \cdot \left[0.4 + 2.0 \cdot \left(\frac{h_w}{a}\right)^2\right] \quad \text{za } \frac{s_f}{h_w} \leq 1 \quad (2.13)$$

gde je α uzet u obzir uticaj pojasa preko povećane dužine unošenja opterećenja i torzione krutosti pojasa

$$\alpha = 1 + \left(\frac{l}{s_f}\right)^{1.8} + \left(\frac{2 \cdot b_f \cdot t_f^2}{h_w \cdot t_w^3}\right)^{1.8} \quad \text{sa } l = \sqrt{\frac{4 \cdot h_w \cdot l_f}{t_w}} \quad (2.14)$$

NOSIVOST PRI PLASTIFIKACIJI

Za razliku od nekih drugih problema stabilnosti gde je moguće jednostavnije i pouzdanije definisati plastičnu nosivost pri dejstvu delimično podeljenog opterećenje to postaje dodatni problem.

Ovde se polazi se od modela koji je razvio Roberts i nosivost pri plastifikaciji na osnovu mehanizma loma je data izrazom

$$F_y = \sigma_w \cdot t_w \cdot (s_s + s_f) \quad (2.15)$$

a gde je

$$s_s = 2 \cdot t_f \cdot \sqrt{\frac{\sigma_f \cdot b_f}{\sigma_w \cdot t_w} + 100 \cdot \varepsilon^2 \cdot \left(\frac{t_w}{t_f}\right)^2} \quad \text{uz ograničenje } s_s \geq 2 \cdot t_f \quad (2.16)$$

PARAMETAR VITKOSTI I FUNKCIJA χ

$$\text{Parametar vitkosti je:} \quad \lambda = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} \quad (2.17)$$

Na osnovu analize eksperimentalnih rezultata izabrana je funkcija za χ :

$$\chi = 0.05 + \frac{0.22}{\lambda} + \frac{0.21}{\lambda^2} \leq 1.0 \quad (2.18)$$

$$\text{nosivost je} \quad F_r = \chi \cdot F_y \quad (2.19)$$

Za slučaj momenta savijanja većeg od 0.6 momenta nosivosti empirijska interakciona formula glasi:

$$\frac{F_s}{F_r} = 1.25 \frac{M_1}{M_r} = 1.75 \quad (2.20)$$

2.2 DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA UTICAJA DUŽINE NA KOJOJ DELUJE OPTEREĆENJE

Istraživanja uticaja dužine nanošenja opterećenja odvijaju se praktično od početka razmatranja problema lokalnog izbočavanja i to kako eksperimentalno tako i teorijski.

2.2.1 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Na ponašanje nosača utiče veliki broj parametara pa su pojedini istraživači u svojim istraživanjima obično razmatrali promenu ograničenog broja parametara. U manjem broju istraživanja je razmatran uticaj dužine opterećenja i praktično nema istraživanja sa sistematskom analizom ovog uticaja, odnosno većim rasponom promene ovog parametra, već su obično razmatrane po dve vrednosti ovog parametra. Detaljnija ispitivanja nalaze se samo kod Ravingera [5.25] i [5.26] i Tschampera [6.18]. Takodje je i sam uticaj podužnih ukrućenja razmatran u ograničenom broju istraživanja.

Podaci o analizi uticaja dužine opterećenja kod nosača sa podužnim ukrućenjima jedino se mogu naći u ograničenom obimu u istraživanjima Bergfelta [3.10], Tschampera [6.18] i kod Skalouda i saradnika [4.13].

Pri razmatranju dužine na kojoj deluje opterećenje, kao uostalom i kod razmatranja drugih parametara dešava se da nosači sa istim prikazanim karakteristikama imaju različitu nosivost. Razlog za to može da bude razlika u nekim detaljima koji nisu saopšteni u dostupnoj literaturi, kao recimo, početna deformacija. U takvim slučajevima će se za osnovno uporedjenje uzimati najmanje nosivosti koje odgovaraju nekom odredjenom c , ali će biti navedene i vrednosti koje se dobijaju pri drugačijim poredjenjima. Pretpostavka je da kod ostalih nosača postoji neki povoljan element koji podiže vrednost nosivosti, ali ne mora da bude prisutan i kod drugih nosača. Biće navedeni i rezultati poredjenja pri ostalim kombinacijama. Gde je moduće, biće komentarisano verovatni razlog za odstupanje.

Istraživanja koja će nadalje biti komentarisana često su namenjena različitim analizama i ona neće biti opisana u potpunosti, ali će pažnja biti usmerena na uticaj dužine opterećenja i na detalje koji su direktno ili indirektno sa tim u vezi. Biće navedena literatura u kojoj se mogu naći detaljnije informacije.

Da bi se dobio uvid isključivo u uticaj dužine delovanja opterećenja razmatraće se u okviru pojedinih istraživanja samo grupe nosača kod koji su sve ostale karakteristike (dimenzije i svojstva materijala) iste ili u nekim slučajevima skoro iste.

Iz detaljne baze podataka od 673 nosača, koja pokriva razmatranu oblast, izdvojeno je skoro 100 grupa nosača u okviru 17 raznih istraživanja različitih autora, a u kojima je varirana dužina nanošenja opterećenja.

2.2.1.1 NOSAČI BEZ PODUŽNIH UKRUĆENJA

Prva istraživanja u kojima se pored drugih parametara pojavljuje i promena dužine na kojoj deluje opterećenje su istraživanja Bergfelta i Hövika [3.1] iz 1968. Ove nosače karakteriše velika dužina raspona. Iz jedne od ispitivanih serija nosača mogu se naći dve grupe po dva nosača koji imaju skoro jednake karakteristike, način opterećivanja i položaj sile, a primenjena je dužina opterećenja 0 ili 180 mm. Medjutim kod jedne grupe već po dva nosača svih istih karakteristika imaju međusobno graničnu nosivost za 11% odnosno 4% različitu, pri čemu jedan od nosača sa manjim c ima veću nosivost od nosača sa većim c . Odnosi nosivosti pri većem i manjem c su od 0.97 i 1.03 do 1.08 i 1.13, u proseku $\Sigma P_{100} / \Sigma P_0$ je 1.04.

U drugoj seriji u kojoj je uglavnom menjani raspon, visina nosača i dimenzije pojasa postoje dva para identičnih nosača koji su bili ispitivani sa $c=0$ i $c=180$ mm. Kod para raspona 2900 mm

i visine 600mm P_{180} / P_0 je 1.14, ali kod para raspona 3500 mm i visine 700 mm taj odnos je svega 0.98.

U narednom istraživanju [3.2] **Bergfelt i Hövik** su posebnu pažnju obratili uticaju dužine dejstva opterećenja, ali se za uporedjenje mogu koristiti samo rezultati za **tri nosača**: za dužinu 0 (poluobljica) i dužine 100 i 200 mm preko pravougaonih pločica. I ovde se radi o nosačima velikog raspona 9.8 m, ali koji su opterećivani bliže osloncu (na 1.5 m). Odnos nosivosti za navedene dužine je 1 : 1.03 : 1.08.

Sledeće detaljno istraživanje **Bergfelta i Lindgrena** prikazano u radu [3.9] obuhvatilo je promenu dimenzija rebra i pojasa kao i vrste čelika, a svaka kombinacija karakteristika ispitivana je jednom sa dužinom $c=0$ (opterećenje preko poluobljice) i drugi put sa dužinom $c=100$ mm (preko pločice) kroz dva ciklusa na istom mestu. Pošto je svaka kombinacija karakteristika ispitivana na dva mesta, na jednom mestu bi u prvom ciklusu bila prvo primenjena jedna dužina, a na drugom mestu prvo druga dužina. Pošto su na svakom mestu vršena dva opita nije se išlo do loma odnosno iscrpljenja nosivosti, već veoma blizu. Zbog toga ovi rezultati će se koristiti samo da bi se uočio trend, ali ne i kao merodavne vrednosti za statističku obradu. Analizirano je **37 ovakvih parova** rezultata i za većinu sa debljinom rebra od oko 3mm odnos P_{100} / P_0 se kreće između 1.03 i 1.12. Pri debljini oko 6 mm taj odnos se znatno povećava i kreće se između 1.12 i 1.40. Takodje se uočava da se vrednost odnosa P_{100} / P_0 kreće oko 1.00 kod nosača velikog raspona (oko 10 m) posebno kad su opterećeni daleko od vertikalnih ukrućenja.

Bergfelt je u radu [3.10] prikazao istraživanje koje je pored ostalih imalo za cilj i da ispita uticaj dužine unošenja opterećenja. Razmatrane su različite kombinacije osnovnih dimenzija, ispitano je i **8 parova identičnih nosača** gde je jedan bio opterećivan sa dužinom $c=40$ mm, a drugi sa $c=120$ mm. Dva para nosača imala su i horizontalna ukrućenja. Kod nosača sa debljinom rebra 2 mm odnos P_{120} / P_{40} je bio veći od 1.13, sem u jednom slučaju kada je bio 1.00. Sa rebrom 3 mm je bilo tri para nosača. Kod jednog para bez horizontalnih ukrućenja odnos P_{120} / P_{40} je bio svega 1.02, a kod parova sa horizontalnim ukrućenjima taj odnos je bio 1.04 i 1.09, a pri tome veći odnos je bio kod nosača kod kojih je rebro dalje od pojasa.

U istraživanju **Bagchija i Rockyja** za koje su podaci dati u radu [11.4] kod dva nosača čije su sve veličine bile iste sem što su se visina i raspon razlikovali za po 30% primenjene su dužine opterećenja 50 mm kod manjeg i 75 mm kod većeg nosača. Odnos P_{120} / P_{40} je 1.14.

Autor je za vreme stručnog boravka u Kardifu učestvovao u ispitivanju tri serije nosača za koje su rezultati objavljeni u radovima [2.10] i [11.3]. U **dve serije od po četiri nosača** sa debljinom rebra 6 i 10 mm kod nosača sa svim ostalim karakteristikama istim menjana je samo dužina opterećenja i to $c=0$ (preko poluobljice) i $c=50$ mm i $c=100$ mm preko krute ploče. Kod nosača manje debljine bilo je veće povećanje nosivosti sa većom dužinom dejstva opterećenja. Kod nosača debljine rebra 10 mm odnos P_{50} / P_0 u jednom slučaju bio je samo 0.97, a u drugom 1.03, dok je odnos P_{100} / P_0 bio 1.10. Kod debljine rebra 6 mm odnos P_{50} / P_0 bio je 1.13 i 1.24, a odnos P_{100} / P_0 bio je 1.31.

Iz ispitivanja **Škalouda i Novaka** [4.4] mogu se izdvojiti **pet grupa nosača** u kojima je dužina opterećenja ili 100 mm ili 200 mm. Odnosi P_{200} / P_{100} kreću se između 1.07 do 1.27. S tim što i ovde treba naglasiti veliko rasipanje rezultata između u svemu (i po dužini opterećenja) identičnih nosača. Bilo je među ovim nosačima četiri para potpuno identičnih nosača za koje su se vrednosti nosivosti razlikovale međusobno između 11% i 15%.

U istraživanju **Drdackya i Novotnyja** [5.2] menjano je više parametara, a među njima i dužina opterećenja: primenjene su dužine 30mm, 45mm i 60 mm. Postoje tri grupe sa identičnim ostalim karakteristikama, a u okviru kojih se menja c . U dve grupe primenjene su sve tri vrednosti za c a u jednoj $c=45$ mm i $c=60$ mm. I ovde se javlja slučaj da su u okviru jedne grupe po dva potpuno identična nosača kod kojih se nosivosti razlikuju za 6% do 13%. Odnos P_{45} / P_{30} se kreće oko 1.15 (uz jednu vrednost 1.02). Odnos P_{60} / P_{30} se kreće od 1.12 do 1.24 a odnos P_{60} / P_{45} od 0.97 do 1.13.

Ravinger [5.25] [5.26] je ispitivao niz nosača svih približno istih dimenzija, a sa dva različita raspona i sa dužinama opterećenja 50, 100, 150 i 250 mm za jedan raspon i dužinama samo 100 i 150 mm za drugi raspon. I ovde ima razlike među potpuno identičnim nosačima u okviru

pojedinih grupa, ali je većina između 0% i 9%, a samo u po jednom slučaju te razlike su 12% i 24%. U ovim ispitivanjima se i najjasnije vidi trend sa povećanjem dužine opterećenja. Dobijeni su sledeći odnosi. Kod nosača manjeg raspona P_{100}/P_{50} se kreće između 1.09 i 1.15, P_{150}/P_{50} se kreće između 1.12 i 1.21, a P_{250}/P_{50} se kreće od 1.35 do 1.38. Kod nosača većeg raspona se odnos P_{150}/P_{100} se kreće od 0.92 do 1.14, dok se taj isti odnos u prethodnoj grupi kreće između 1.03 i 1.11.

Shimizu [8.1] je istraživao uticaj većih dužina opterećenja. Na nosačima velikog raspona (6 i 9 m), ali sa vertikalnim ukrućenjima na razmaku 0.6 ili 1.0 m primenjivana je dužina opterećenja 180 mm, 300 mm i 500 mm. Kod ovih nosača postojalo je podužno ukrućenje, ali u zoni neopterećenog pojasa. Za par nosača većeg raspona i je odnos P_{500}/P_{300} jednak 1.10, a za par nosača manjeg raspona je taj odnos 1.36. Odnos P_{300}/P_{180} u sledećoj grupi je 1.19 odnosno 1.28.

Istraživanje **Scheera i saradnika** [6.17] obuhvatalo je i analizu uticaja momenata savijanja. Među tridesetak nosača moglo je da se uoči pet grupa sa nosačima koji se mogli da se porede a unutar kojih je dužina opterećenja bila ili 140 mm ili 280 mm. Nosači su velikog raspona (10 m) i sa velikim rastojanjem vertikalnih ukrućenja (2.3 m većinom). Odnos P_{280}/P_{140} kreće se između 0.99 i 1.18.

Tschamper [6.18] je u velikom istraživanju sa 60 testiranja ispitivao uticaj sadejstva lokalnog opterećenja i momenta savijanja, uticaj otvorenih i zatvorenih ukrućenja i uticaj dužine dejstva opterećenja. Opterećenje je nanošeno kao jednostruko dužine 40 mm, dvostruko kao dve sile na rastojanju 200 mm gde sile pojedinačno deluju na dužini 40 mm (ovaj slučaj se tretira kao raspodeljeno opterećenje na dužini $20+200+20 = 240$) i četverostruko kao četiri sile na međusobnim rastojanjima po 200 mm, a svaka od njih na dužini 40 mm (ovaj slučaj se tretira kao raspodeljeno opterećenje na dužini $20+3 \times 200+20 = 640$). Među ovim nosačima moguće je izdvojiti Deset parova identičnih nosača bez podužnih ukrućenja i dve grupe nosača sa podužnim ukrućenjima unutar kojih je menjana samo dužina opterećenja. Ovo ispitivanje predstavlja jedno sa najmanjim rasipanjem rezultata. U slučajevima potpuno istih nosača (i dužina opterećenja) razlike se kreću od 0% do 6% u 10 slučajeva i samo u jednom razlika je 12%. Odnosi P_{240}/P_{40} se kreću između 1.31 i 1.43 za nosače bez podužnih ukrućenja i između 1.39 i 1.60 za nosače sa podužnim ukrućenjima. Odnosi P_{640}/P_{40} se kreću od 1.73 do 1.80 kod nosača bez podužnih ukrućenja.

Jedna od serija nosača iz istraživanja **Johne** [15.30] sastojala se iz šest nosača velikog raspona, približno istih svih karakteristika sem dužine opterećenja koja je iznosila 10, 40 i 70 mm. Odnosi P_{40}/P_{10} su iznosili 1.01 i 1.03, a odnosi P_{70}/P_{10} su iznosili 0.98 i 1.01.

U seriji nosača koju je ispitivao **Lagerqvist** [8.28] nalazi se jedan par nosača istih karakteristika od koji je jedan opterećen na dužini pojasa 40 mm, a drugi na dužini 80 mm. Odnos P_{80}/P_{40} iznosi 1.07.

Höglund [8.27] je ispitao dva nosača: jedan sa $c=0$ i drugi sa $c=170$. Odnos P_{170}/P_0 iznosi 1.12.

Elgaaly i Salkar [8.27] su ispitivali seriju valjanih nosača koju čine pet grupa od po tri skoro ista nosača koji su bili opterećivani sa tri različite dužine opterećenja. Najmanje c bilo je različito za svaku grupu, a druga dva opterećenja su bila dvostruko i trostruko veća. Odnos P_{2c}/P_c je između 0.92 i 1.29, a odnos P_{3c}/P_c je između 0.92 i 1.68.

Granath u radu [8.34] daje podatke za nekoliko ispitanih nosača, među kojima se mogu naći dva para istih nosača. U jednom paru dužine opterećenja su 37.5 i 75 mm, a u drugom 0 i 120 mm. U oba slučaja nosač sa manjom dužinom opterećenja ima veću nosivost.

2.2.1.2 NOSAČI SA PODUŽNIM UKRUCENJIMA

Bergfelt je u napred prikazanom istraživanju [3.10] ispitao 2 para nosača sa ukrućenjima a sa dužinama opterećenja $c=40$ mm i $c=120$ mm.

U obimnom istraživanju **Škalouda i saradnika** [4.12], [4.13] ispitivan je uticaj podužnih ukrućenja sa različitim kombinacijama parametara, ali se što se tiče dužine unošenja opterećenja jedino mogu naći dve serija koje su u određenoj meri direktno uporedive. U jednoj seriji su rasponi i dužine opterećenja dva puta veći nego u drugoj (tako da je očuvan odnos a/c), a druge

karakteristike su varirane tako da postoje odgovarajući nosači u jednoj i drugoj seriji . Mogu se uslovno uporedjivati rezultati parova odgovarajućih nosača vodeći računa da su osim dužine opterećenja povećani i rasponi. Sedam grupa odgovarajućih nosača čine po jedan nosač sa $c=50$ mm i jedan nosač sa $c=100$ mm, a tri grupe čine po dva nosača sa $c=50$ mm i dva nosača sa $c=100$ mm. U ove poslednje tri grupe, kao i u drugim istraživanjima, po dva potpuno identična nosača (i sa istom dužinom opterećenja) pokazuju razliku u graničnoj nosivosti od 8% do 20%, u jednom slučaju i 29%. To naravno komplikuje uporedjenje, ali kada se primeni na početku definisan način za uporedjenje odnos P_{100} / P_{50} se kreće od 0.83 do 1.13 (nosači sa većom dužinom opterećenja imaju i veći raspon). Pri tome nema direktne veze sa ostalim parametrima kada se koji odnos pojavljuje.

Istraživanja **Tschampera** [6.18] prikazana su u prethodnom odeljku . Ponovićemo samo da se odnosi P_{240} / P_{40} kreću između 1.39 i 1.60 za nosače sa podužnim ukrućenjima.

R.D.	GR	OZNAKA	L	B	D	TW	BF	TF	C	SW	ST	E	HIS	TS	SS	S	Pex	Pi/P1min	P1/P12	P1/P12	stred	P11/P12
Bergfelt i Håvika																						
5	I/1	4/7	9800	6800	590	3	200	8	0	255	255	205	0	0	0	0	82.9					
10	I/2	4/14	9800	6800	590	3	200	8	100	255	255	205	0	0	0	0	85.3	1.03				
7	I/11	4/9	9800	4800	590	3	200	8	0	255	255	205	0	0	0	0	96.1		1.11			
8	I/12	4/10	9800	4800	590	3	200	8	0	255	255	205	0	0	0	0	86.3					
6	I/21	4/8	9800	4800	590	3	200	8	100	255	255	205	0	0	0	0	93	1.08	0.97			
9	I/22	4/13	9800	4800	590	3	200	8	100	255	255	205	0	0	0	0	97.1	1.13	1.01	1.04		
17	I/4	B17	2900	2900	600	2	100	12	0	294	294	205	0	0	0	0	54.2					
18		B18	2900	2900	600	2	100	12	180	294	294	205	0	0	0	0	61.6	1.14				
19	5	B19	3500	3500	700	2	100	15	180	294	294	205	0	0	0	0	55.4	0.98				
20		B20	3500	3500	700	2	100	15	0	294	294	205	0	0	0	0	56.4					
22	I/11	B21 2	9800	3000	700	3.4	250	10	0	295	275	200	0	0	0	0	112.8					
26	I/21	B22 6	9800	3000	700	3.4	250	10	100	295	275	200	0	0	0	0	116.5	1.03				
27	I/31	B22 7	9800	3000	700	3.4	250	10	200	295	275	200	0	0	0	0	121.4	1.08			1.04	
Bergfelt i Lindgreen																						
73	1	IA BE2	2400	2400	700	3.26	150	6.1	0	326	347	205	0	0	0	0	95.2					
28		IA BP1	2400	2400	700	3.26	150	6.1	100	326	347	205	0	0	0	0	105.9	1.11				
30	2	IA CE1	2400	4600	700	3.26	200	8.5	0	326	235	205	0	0	0	0	109.9				1.09	
74		IA CP2	2400	4600	700	3.26	200	8.5	100	326	235	205	0	0	0	0	121.6	1.11	1.20			
75	3	IA FE2	2400	7000	700	3.26	200	8.5	0	326	235	205	0	0	0	0	101					
31		IA FP1	2400	7000	700	3.26	200	8.5	100	326	235	205	0	0	0	0	101	1.00	0.92			
76	4	IA CU2	2400	4600	700	3.26	250	10.1	0	326	243	205	0	0	0	0	120.7				1.00	
32		IA CU1	2400	4600	700	3.26	250	10.1	100	326	243	205	0	0	0	0	134.4	1.11				
33	5	IA GU1	2400	4600	700	3.26	250	10.1	0	326	243	205	0	0	0	0	120.7					
77		IA GU2	2400	4600	700	3.26	250	10.1	100	326	243	205	0	0	0	0	131.5	1.09				
78	6	IA DE2	2400	7000	700	3.26	250	11.9	0	326	232	205	0	0	0	0	116.7					
34		IA DP1	2400	7000	700	3.26	250	11.9	100	326	232	205	0	0	0	0	99.1	0.85				
35	7	IA GE1	2400	4600	700	3.26	250	11.9	0	326	232	205	0	0	0	0	135.4				1.16	
79		IA GP2	2400	4600	700	3.26	250	11.9	100	326	232	205	0	0	0	0	139.3	1.03	1.19			
80	8	IA EE2	2400	9400	700	3.26	300	15.3	0	326	305	205	0	0	0	0	153					
36		IA EP1	2400	9400	700	3.26	300	15.3	100	326	305	205	0	0	0	0	155	1.01	1.01			
37		IA HC1	2400	2400	700	3.26	300	15.3	0	326	305	205	0	0	0	0	151.1					
38	9	IA H21	2400	2400	700	3.26	300	15.3	0	326	305	205	0	0	0	0	150.1					
81		IA H22	2400	2400	700	3.26	300	15.3	100	326	305	205	0	0	0	0	157.9	1.05	1.05			
82	10	IA BU2	9400	2400	700	3.26	250	10.1	0	326	243	205	0	0	0	0	117.7					
39		IA BU1	9400	2400	700	3.26	250	10.1	100	326	243	205	0	0	0	0	128.5	1.09	1.26			
40	11	IA EU1	9400	9400	700	3.26	250	10.1	0	326	243	205	0	0	0	0	102					
83		IA EU2	9400	9400	700	3.26	250	10.1	100	326	243	205	0	0	0	0	117.7	1.15	1.00			
53	12	II 7E1	2400	2400	700	2.9	100	2.9	0	589	589	205	0	0	0	0	55.4					
91		II 7P2	2400	2400	700	2.9	100	2.9	100	589	589	205	0	0	0	0	59.8	1.08				

RB	GR	LOZNAK	L	B	D	DW	BF	TF	C	SW	SI	E	IIS	TS	SS	S	Pex	Pi/P1/min	De/P12	P11/P12	sred	P31/P21
92	13	II 7B2	400	400	700	3.01	100	2.9	0	310	589	205	0	0	0	0	63.3					
93	11	II 7B2	400	400	700	3.03	100	2.9	100	310	589	205	0	0	0	0	80.9	1.28				
90	14	II 3E1	2400	7200	700	3.08	151	6.8	0	299	773	205	0	0	0	0	67.7					
86	11	II 3P2	2400	7200	700	3.08	151	6.8	100	299	773	205	0	0	0	0	70.6	1.04				
51	15	II 4E1	2400	9600	700	2.9	152	6.8	0	589	773	205	0	0	0	0	112.8					
87	11	II 4P2	2400	9600	700	2.9	152	6.8	100	589	773	205	0	0	0	0	126.3	1.12				
85	16	II 2E2	2400	4800	700	3.08	200	8.2	0	200	692	205	0	0	0	0	78.5					
49	11	II 2P1	2400	4800	700	3.08	200	8.2	100	299	692	205	0	0	0	0	83.4	1.06				
52	17	II 5E1	2400	7200	700	2.9	200	8.1	0	589	692	205	0	0	0	0	135.4					
88	11	II 5P2	2400	7200	700	2.9	200	8.1	100	589	692	205	0	0	0	0	140.3	1.04				
48	18	II 1E1	2400	2400	700	3.05	251	12.1	0	301	800	205	0	0	0	0	106.9					
84	11	II 1P2	2400	2400	700	3.05	251	12.1	100	301	800	205	0	0	0	0	107.9	1.01				
89	19	II 6E2	2400	4800	700	2.9	250	12.1	0	589	109	205	0	0	0	0	149.1					
90	11	II 6P2	2400	4800	700	2.9	250	12.1	100	589	109	205	0	0	0	0	157.9	1.06				
54	20	III 1E1	2400	2400	500	2.11	151	3.94	0	348	283	205	0	0	0	0	39.7					
97	11	III 1P2	2400	2400	500	2.11	151	3.94	100	348	283	205	0	0	0	0	45.1	1.14				
102	21	III 6E2	2400	4800	500	2.12	151	3.94	0	348	283	205	0	0	0	0	43.2					
59	11	III 6P1	2400	4800	500	2.12	151	3.94	100	348	283	205	0	0	0	0	53.5	1.24				
57	22	III 4E1	2400	9600	500	2.09	151	5.86	0	348	277	205	0	0	0	0	47.6					
100	11	III 4P2	2400	9600	500	2.09	151	5.86	100	348	277	205	0	0	0	0	52.5	1.10				
104	23	III 8E2	2400	2400	500	2.11	151	5.9	0	348	277	205	0	0	0	0	40.2					
61	11	III 8P1	2400	2400	500	2.11	151	5.9	100	348	277	205	0	0	0	0	59.8	1.49				
105	24	III 9E2	9600	9600	500	2.09	150	5.88	0	348	277	205	0	0	0	0	39.7					
62	11	III 9P1	9600	9600	500	2.09	150	5.88	100	348	277	205	0	0	0	0	40.7	1.03				
63	25	III 101	9600	9600	500	2.12	151	5.98	0	348	277	205	0	0	0	0	41.7					
106	11	III 102	9600	9600	500	2.12	151	5.98	100	348	277	205	0	0	0	0	43.9	1.05				
55	26	III 2E1	2400	4800	500	2.11	203	8.58	0	348	322	205	0	0	0	0	57.9					
98	11	III 2P2	2400	4800	500	2.11	203	8.58	100	348	322	205	0	0	0	0	59.8	1.03				
101	27	III 5E2	2400	7200	500	2.12	203	8.62	0	348	317	205	0	0	0	0	56.9					
58	11	III 5P1	2400	7200	500	2.12	203	8.62	100	348	317	205	0	0	0	0	63.3	1.11				
56	28	III 3E1	2400	7200	500	2.09	253	9.83	0	348	264	205	0	0	0	0	66.7					
99	11	III 3P2	2400	7200	500	2.09	253	9.83	100	348	264	205	0	0	0	0	69.7	1.04				
103	29	III 7E2	2400	2400	500	2.1	253	9.98	0	348	264	205	0	0	0	0	58.9					
60	11	III 7P1	2400	2400	500	2.1	253	9.98	100	348	264	205	0	0	0	0	63.8	1.08				
64	30	IV 1E1	2400	2400	700	5.83	151	5.93	0	323	283	205	0	0	0	0	178.5					
107	11	IV 1P2	2400	2400	700	5.83	151	5.93	100	323	283	205	0	0	0	0	240.3	1.35				
108	11	IV 1E2	2400	2400	700	5.83	151	5.93	0	323	283	205	0	0	0	0	168.7					
65	31	IV 2E1	2400	4800	700	5.83	203	8.66	0	323	322	205	0	0	0	0	244.3					
109	11	IV 2P2	2400	4800	700	5.83	203	8.66	100	323	322	205	0	0	0	0	293.3	1.20				

R.B.	GR	OZNAKA	L	B	D	TW	HE	FE	C	SW	SF	E	IIS	FS	SS	S	Pex	Pi/P1	min	Pi/P12	Pi/P12	stred	P31/P21
112	32	IV 5E2	2400	7200	700	5.83	202	8.69	0	323	322	205	0	0	0	0	0	214.8					
68		IV 5P1	2400	7200	700	5.83	202	8.69	100	323	322	205	0	0	0	0	0	291.4	1.36				
69	33	IV 3E1	2400	7200	700	5.83	251	11.6	0	323	243	205	0	0	0	0	0	279.6					
110		IV 3P2	2400	7200	700	5.83	251	11.6	100	323	243	205	0	0	0	0	0	323.7	1.16				
113	34	IV 142	2400	2400	700	5.83	251	11.7	0	323	243	205	0	0	0	0	0	273.7					
71		IV 141	2400	2400	700	5.83	251	11.7	100	323	243	205	0	0	0	0	0	356.1	1.30				
113	35	IV 6E2	2400	4800	700	5.83	253	11.3	0	323	243	205	0	0	0	0	0	235.4					
69		IV 6P1	2400	4800	700	5.83	253	11.7	100	323	243	205	0	0	0	0	0	343.3	1.46				
67	36	IV 4E1	2400	9600	700	5.83	355	17.7	0	323	258	205	0	0	0	0	0	363					
111		IV 4P2	2400	9600	700	5.83	355	17.7	100	323	258	205	0	0	0	0	0	375.7	1.03				
114	37	IV 7E2	2400	2400	700	5.83	350	18.3	0	323	269	205	0	0	0	0	0	372.8					
70		IV 7P1	2400	2400	700	5.83	350	18.3	100	323	269	205	0	0	0	0	0	416.9	1.12				
Bergfelt																							
152	6	G325	900	900	300	1.96	100	6.1	40	207	277	210	0	0	0	0	0	34.1					
153		G326	900	900	300	1.96	100	6.1	120	207	277	210	0	0	0	0	0	38.4	1.13				
155	7	G625	900	900	600	1.95	100	6.1	40	206	284	202	0	0	0	0	0	31					
156		G626	900	900	600	1.95	100	6.1	120	206	284	202	0	0	0	0	0	37.5	1.21				
158	8	G425	1100	1100	400	1.97	100	12.2	40	205	278	204	0	0	0	0	0	36.9					
159		G426	1100	1100	400	1.97	100	12.2	120	205	278	204	0	0	0	0	0	42.1	1.14				
161	9	G825	1100	1100	800	1.99	100	12.1	40	205	277	204	0	0	0	0	0	40.5					
162		G826	1100	1100	800	1.99	100	12.1	120	205	277	204	0	0	0	0	0	46.5	1.15				
164	10	G828	1100	1100	800	1.99	250	12.3	40	206	273	202	0	0	0	0	0	41.4					
165		G829	1100	1100	800	1.99	250	12.3	120	206	273	202	0	0	0	0	0	41.4	1.00				
167	11	G838	1100	1100	800	3.02	250	12	40	215	268	212	0	0	0	0	0	90.7					
168		G839	1100	1100	800	3.02	250	12	120	215	268	212	0	0	0	0	0	92.5	1.02				
170	12	G732	1100	1100	735	3	250	12.1	40	252	275	207	60	6	0	250	92.4						
171		G733	1100	1100	735	3	250	12.1	120	252	275	207	60	6	0	250	101	1.09					
173	13	G735	1100	1100	735	3	250	12.1	40	252	275	207	60	6	0	150	101.8						
174		G736	1100	1100	735	3	250	12.1	120	252	275	207	60	6	0	150	106.3	1.04					
Bagelji i Rocky																							
176	14	BR2	864	864	635	3.25	152	12.7	50	250	250	205	0	0	0	0	0	124					
175		BR1	660	660	635	3.25	152	12.7	75	250	250	205	0	0	0	0	0	141.2	1.14				
Robert s Markovic																							
207	15	E0011	500	500	500	9.95	150	10.1	0	222	240	205	0	0	0	0	0	716					
208		E0012	500	500	500	9.95	150	10.1	50	222	240	205	0	0	0	0	0	698	0.97				
210		E0022	500	500	500	9.95	150	10.1	50	247	250	205	0	0	0	0	0	738	1.03			1.00	
209		E0021	500	500	500	9.95	150	10.1	100	247	250	205	0	0	0	0	0	787	1.10				
211	16	F6011	500	500	500	6	150	10.1	0	253	250	205	0	0	0	0	0	304					
212		F6012	500	500	500	6	150	10.1	50	253	250	205	0	0	0	0	0	378	1.24				
214		E6022	500	500	500	6	150	10.1	50	253	250	205	0	0	0	0	0	344	1.13				

R.B.	GR	OZNAK.	I	H	D	TW	BF	TF	C	SW	SI	I	HS	TS	SS	S	P _{ex}	P _{31/P1min}	P _{1/P12}	P _{11/P12}	stred	P31/P21
213		E6021	500	500	500	6	150	10.1	100	253	237	205	0	0	0	0	399	1.11				1.06
Šalabud i Novak																						
229	17	TG6A	2000	2000	1000	2.9	160	6.29	100	290	294	205	0	0	0	0	77.5					
230		TG6B	2000	2000	1000	2.9	160	6.38	100	290	294	205	0	0	0	0	86.33		1.11			
236		TG11A	2000	2000	1000	2.9	160	6.32	200	290	294	205	0	0	0	0	98.1	1.27	1.14			
237		TG11B	2000	2000	1000	2.9	160	6.28	200	290	294	205	0	0	0	0	88.29	1.14	1.02			
231	18	TG7	2000	2000	1000	2.9	200	10	100	297	253	205	0	0	0	0	98.1					
238		TG12	2000	2000	1000	2.9	200	10.3	200	297	253	205	0	0	0	0	117.72	1.20				
232	19	TG8	2000	2000	1000	2.9	200	16.6	100	308	266	205	0	0	0	0	117.72					
239		TG13	2000	2000	1000	2.9	200	16.4	200	308	266	205	0	0	0	0	132.43	1.12				
233	20	TG9	2000	2000	1000	2.9	199	19.8	100	300	231	205	0	0	0	0	125.57					
240		TG14	2000	2000	1000	2.9	199	19.7	200	300	231	205	0	0	0	0	152.05	1.21				
234	21	TG10A	2000	2000	1000	2.9	251	29.9	100	299	261	205	0	0	0	0	137.34					
235		TG10B	2000	2000	1000	2.9	250.9	30	100	299	261	205	0	0	0	0	156.96		1.14			
241		TG15A	2000	2000	1000	2.9	250.8	30.1	200	299	261	205	0	0	0	0	168.73	1.23	1.07			
242		TG15B	2000	2000	1000	2.9	250.9	30	200	299	261	205	0	0	0	0	147.15	1.07	0.94			
Draacky i Novotny																						
255	22	TTG1	300	300	300	3.97	49.4	10	30	285	269	205	0	0	0	0	130					
256		TTG2	300	300	300	4	50.5	9.9	30	270	258	205	0	0	0	0	147.5		1.13			
263		TIG11	300	300	300	3.97	49.4	10	45	285	269	205	0	0	0	0	150	1.15	1.02			
264		TIG12	300	300	300	4	50.5	9.9	60	270	258	205	0	0	0	0	146	1.12	0.99			0.97
258	23	TTG4	450	450	450	3.97	49.3	10	45	267	267	205	0	0	0	0	120					
266		TIG14	450	450	450	3.97	49.3	10	60	267	267	205	0	0	0	0	136					
248	24	TTG17	600	600	600	3.57	50.5	10	30	257	274	205	0	0	0	0	119					
269		TIG14	600	600	600	3.63	49.5	10.1	45	282	279	205	0	0	0	0	138	1.16				
260		TIG7	600	600	600	3.57	50.5	10	60	257	274	205	0	0	0	0	140	1.18				1.01
261		TIG8	600	600	600	3.63	49.5	10.1	60	282	279	205	0	0	0	0	148	1.24	1.06			1.06
Skaloud																						
271	25	T0	505	505	500	2	50	5	50	212	439	205	0	0	0	0	31					
284		T10-0	1005	1005	500	2	50	5	100	216	269	205	0	0	0	0	32	1.03				
272	26	T11-1	505	505	500	2	50	5	50	236	439	205	12	5	377	250	30					
275		T11-1	1005	1005	500	2	50	5	100	191	293	205	12	5	428	250	32	1.07				
273	27	T12	505	505	500	2	50	5	50	239	439	205	20	5	480	250	35					
286		T11-2	1005	1005	500	2	50	5	100	210	472	205	20	5	434	250	34	0.97				
274	28	T13	505	505	500	2	50	5	50	231	453	205	30	5	310	250	33.5					
287		T11-3	1005	1005	500	2	50	5	100	215	476	205	30	5	434	250	37.5	1.12				
275	29	T2-1	505	505	500	2	50	5	50	234	453	205	12	5	416	100	36.5					
288		T12-1	1005	1005	500	2	50	5	100	204	295	205	12	5	426	100	32.5	0.89				
276	30	T2-2	505	505	500	2	50	5	50	232	440	205	20	5	467	100	35.6					
289		T12-2	1005	1005	500	2	50	5	100	218	461	205	20	5	435	100	38	1.07				

R.B.	GR	OZNAKA	L	B	D	TW	BF	TF	C	SW	SI	E	IIS	TS	SS	S	Pex	Pi/Ptmin	Pi/P12	Pi/P2	sted	P31/P21
277	31	T2-3	505	505	500	2	50	5	50	233	458	205	30	5	304	100	41					
290		T2-3	1005	1005	500	2	50	5	100	218	470	205	30	5	282	100	18.2	0.93				
278	32	T3-11	505	505	500	2	50	5	50	236	485	205	12	5	405	50	35					
279		T3-12	505	505	500	2	50	5	50	234	466	205	12	5	437	50	42			1.20		
291		T13-11	1005	1005	500	2	50	5	100	191	103	205	12	5	393	50	29	0.83	0.69			
292		T13-12	1005	1005	500	2	50	5	100	204	293	205	12	5	414	50	31	0.94	0.79	1.14		
280	33	T3-21	505	505	500	2	50	5	50	239	467	205	20	5	457	50	39					
281		T3-22	505	505	500	2	50	5	50	232	471	205	20	5	442	50	42			1.08		
293		T13-21	1005	1005	500	2	50	5	100	210	475	205	20	5	412	50	41	1.13	1.05	1.29		
294		T13-22	1005	1005	500	2	50	5	100	218	469	205	20	5	433	50	34	0.87	0.81			
282	34	T3-31	505	505	500	2	50	5	50	231	461	205	30	5	285	50	47.5			1.12		
283		T3-32	505	505	500	2	50	5	50	233	481	205	30	5	314	50	42.5					
295		T13-31	1005	1005	500	2	50	5	100	215	478	205	30	5	308	50	43	1.01	0.91	1.08		
296		T13-32	1005	1005	500	2	50	5	100	218	473	205	30	5	306	50	40	0.94	0.84			
		Ravine I																				
440	35	R3 3A1	1650	1650	1100	6.09	198.7	10.1	50	327.7	239.5	205	0	0	0	0	340					
424		P3 2B	1650	1650	1100	6.11	198.9	10.1	50	327.7	241.2	205	0	0	0	0	340			1.00		
437		P3 3A2	1650	1650	1100	6.56	199.1	10.2	50	331.8	238.4	205	0	0	0	0	370			1.09		
435		P3 2A1	1650	1650	1100	6.11	198.9	10.1	100	323.7	241.2	205	0	0	0	0	370	1.09				
428		C3 3B	1650	1650	1100	6.32	198.9	10.1	100	326.8	234.5	205	0	0	0	0	390	1.15		1.05		
429		P3 3A	1650	1650	1100	6.56	199.1	10.2	100	331.8	238.4	205	0	0	0	0	370	1.09		1.00		
433		R3 1B1	1650	1650	1100	6.06	198.4	10	150	323.1	239.5	205	0	0	0	0	410	1.21		1.08		1.11
431		R3 3A	1650	1650	1100	6.09	198.7	10.1	150	327.7	239.5	205	0	0	0	0	390	1.15		1.03		1.05
432		R3 3B	1650	1650	1100	6.09	198.7	10.1	150	327.7	239.5	205	0	0	0	0	380	1.12		1.00		1.03
427		C3 3A	1650	1650	1100	6.32	198.9	10.1	150	326.8	234.5	205	0	0	0	0	400	1.18		1.05		1.08
439		C3 3A1	1650	1650	1100	6.32	198.9	10.1	150	326.8	234.5	205	0	0	0	0	390	1.15		1.03		1.05
436		P3 2B1	1650	1650	1100	6.11	198.9	10.1	250	323.7	241.2	205	0	0	0	0	460	1.35				
430		P 3B	1650	1650	1100	6.56	199.1	10.2	250	331.8	238.4	205	0	0	0	0	470	1.38		1.02		
438	36	C3 2B1	2200	2200	1100	6.42	199.2	10.2	100	331.1	227.7	205	0	0	0	0	370					
423		C3 2A	2200	2200	1100	6.42	199.2	10.2	150	331.1	227.7	205	0	0	0	0	380	1.03		1.12		
425		R3 2A	2200	2200	1100	5.99	198.5	10	150	328.5	229.8	205	0	0	0	0	340	0.92		1.00		
426		R3 2B	2200	2200	1100	5.99	198.5	10.1	150	328.5	229.8	205	0	0	0	0	370	1.00		1.09		
434		C3 1B1	2200	2200	1100	6.3	198.7	10	150	327.1	234.8	205	0	0	0	0	420	1.14		1.24		
		Shimizu																				
441	37	A1.1	9000	1000	1000	6	300	9	300	319	235.2	202.5	80	6	0	0	800					
442		A1.2	9000	1000	1000	6	300	9	500	320.5	235.2	204.5	80	6	0	0	800	1.10				
443	38	AS1	6000	1000	1000	6	300	9	300	320	235.2	215	80	6	0	0	800					
444		AS2	6000	1000	1000	6	300	9	500	325	235.2	209	80	6	0	0	800	1.36				
445	39	BU.1	9000	600	1000	6	300	9	180	340	235.2	205	80	6	0	0	800					

IB.	GR	OZNAKA	L	B	D	PW	BI	TR	C	SW	SI	F	HS	IS	SS	S	Pex	Pi/P1min	Pi/P12	Pi1/P12	sted	P31/P21
446		BI2	9000	600	1000	3	300	0	300	405	235.2	221	80	0	0	800	352.4	1.28		1.08	0.99	
447		BI2C	9000	600	1000	6	300	0	300	365	215.2	218	100	0	0	800	326.4	1.19			0.92	
448		BS1	6000	600	1000	6	300	0	180	320	215.2	205	80	0	0	800	355.5					
		Scheer																				
455	40	A16	10000	2300	800	3.74	200	20.3	140	341	363	205	0	0	0	0	178.3					
451		A11	10000	2300	800	3.72	200	20.2	280	341	363	205	0	0	0	0	176.3	0.99				
454		A15	10000	2300	800	4.14	199	20.3	280	352	363	205	0	0	0	0	217	1.22				
456	41	A17	10000	2300	800	3.73	199	20.3	140	341	363	205	0	0	0	0	201.4					
452		A13	10000	2300	800	3.73	201	20.3	280	341	363	205	0	0	0	0	227.8	1.11				
463	42	A27	10000	2300	800	4.14	299	30.1	140	352	329	205	0	0	0	0	258.4					
458		A22	10000	2300	800	3.77	300	30.2	280	341	329	205	0	0	0	0	263.7	1.02				
462	43	A26	10000	2300	800	3.74	299	30.4	140	341	329	205	0	0	0	0	238.3					
459		A23	10000	2300	800	3.75	301	30.1	280	341	329	205	0	0	0	0	244.3	1.03				
465	44	B12	10000	1700	800	5.97	201	20.4	140	328	335	205	0	0	0	0	397.4					
464		B11	10000	1700	800	6.27	201	20.4	280	329	335	205	0	0	0	0	439.4	1.11				
466		B13	10000	2700	800	6.13	201	20.2	280	325	327	205	0	0	0	0	469	1.18				
		Tschamper																				
496	45	VT01-2	1760	1760	1000	3.8	150	8.35	240	369	293	210	0	0	0	0	146					
497		VT01-3	1760	1760	1000	3.8	150	8.35	240	369	293	210	0	0	0	0	193	1.32		1.01		
500		VT01-6	1760	1760	1000	3.8	150	8.45	240	369	327	210	0	0	0	0	146			1.00		
499		VT01-5	1760	1760	1000	3.8	150	8.45	240	369	327	210	0	0	0	0	191	1.31				
507	46	VT03-2	1760	1760	1000	5.2	150	12	240	305	286	210	0	0	0	0	259			1.12		
508		VT03-3	1760	1760	1000	5.2	150	12	240	305	286	210	0	0	0	0	353	1.36		1.06		
509		VT03-5	1760	1760	1000	5.2	150	12	240	305	277	210	0	0	0	0	231					
510		VT03-6	1760	1760	1000	5.2	150	12	240	305	277	210	0	0	0	0	333	1.44				
512	47	VT04-2	1760	1760	1000	5.2	150	12	240	300	279	210	0	0	0	0	241				1.05	
513		VT04-3	1760	1760	1000	5.2	150	12	640	300	279	210	0	0	0	0	421	1.73				
515		VT04-5	1760	1760	1000	5.2	150	12	240	300	284	210	0	0	0	0	246			1.01	1.06	
516		VT04-6	1760	1760	1000	5.2	150	12	640	300	284	210	0	0	0	0	427	1.74		1.01		
518	48	VT05-2	1760	1760	800	5	150	8.4	240	292	300	210	0	0	0	0	179					
519		VT05-3	1760	1760	800	5	150	8.4	240	292	300	210	0	0	0	0	250	1.40				
520		VT05-5	1760	1760	800	5	150	8.4	240	292	305	210	0	0	0	0	187			1.04		
521		VT05-6	1760	1760	800	5	150	8.4	240	292	305	210	0	0	0	0	255	1.36		1.02		
523	49	VT06-2	1760	1760	800	5	150	12	40	301	291	210	0	0	0	0	211					
524		VT06-3	1760	1760	800	5	150	12	240	301	286	210	0	0	0	0	266	1.26				
526		VT06-5	1760	1760	800	5	150	12	240	301	286	210	0	0	0	0	216			1.02		
527		VT06-6	1760	1760	800	5	150	12	640	301	291	210	0	0	0	0	388	1.80				
529	50	VT07-5	1760	1760	1000	3.8	150	8.35	240	375	281	210	90	6	0	200	165					
530		VT07-6	1760	1760	1000	3.8	150	8.35	240	375	281	210	90	6	0	200	170			1.03		
532		VT08-5	1760	1760	1000	3.8	150	8.3	240	358	328	210	90	6	0	200	229	1.39				

R.B.	GR	OZNAKA	L	B	D	TW	BF	TF	C	SW	SI	E	IIS	IS	SS	S	Pex	Pi/P1min	Pi/P12	Pj1/Pj2	sred	P31/P21
533		VT08-6	1760	1760	1000	3.8	150	8.3	240	358	328	210	90	0	0	200	235	1.02		1.03		
535	51	VT09-5	1760	1760	1000	3.8	150	12.40	40	371	283	210	90	0	0	150	184					
536		VT09-6	1760	1760	1000	3.8	150	12.40	40	371	283	210	90	0	0	150	180					
538		VT10-5	1760	1760	1000	3.8	150	12.240	240	380	275	210	90	0	0	150	275	1.53				
539		VT10-6	1760	1760	1000	3.8	150	12.210	210	380	275	210	90	0	0	150	288	1.60				
Johne																						
550	52	5.5	40000	40000	574.8	4.2	249.6	13.9	10	252	304	205	0	0	0	0	177			1.02		
551		5.6	40000	40000	572	4.4	250	13.8	10	260	300	205	0	0	0	0	174					
548	53	5.3	40000	40000	571.3	4.4	248.8	13.9	10	238	306	205	0	0	0	0	178.5	1.03	1.01	1.02		
549	53	5.3	40000	40000	570.2	4.4	252.8	13.8	10	275	300	205	0	0	0	0	175	1.01	0.99			
546	52	5.2	40000	40000	570.7	4.4	250.7	14	70	277	299	205	0	0	0	0	175.5	1.01	0.99	1.03		
547	54	5.4	40000	40000	571.9	4.3	249.2	13.7	70	268	300	205	0	0	0	0	170	0.98	0.96			
Lagerqvist																						
555	53	A13p	1008	1008	239.8	3.8	118.5	12	40	830	841	205	0	0	0	0	323					
556		A14p	1004	1004	239.8	3.8	118.5	12	80	830	841	205	0	0	0	0	346	1.07				
Högland																						
565	54	5	3150	3150	830	4.9	200	10	0	422	355	205	0	0	0	0	224					
564	1	1	3150	3150	830	4.9	200	10	170	422	355	205	0	0	0	0	250	1.12				
Elgally i Salkar																						
589	55	1	482	482	295.5	5.11	103.7	5.36	61	347	347	205	0	0	0	0	362					
590	2	2	482	482	295.5	5.11	103.7	5.36	121	347	347	205	0	0	0	0	331.4	0.92				
591	3	3	479	479	292.6	5.03	103.2	5.31	182	368	368	205	0	0	0	0	334.7	0.92				
592	56	4	562	562	332.2	6.2	129.9	8.49	70	356	356	205	0	0	0	0	395.9					
593	5	5	562	562	332.2	6.2	129.9	8.49	140	356	356	205	0	0	0	0	431.5	1.09				
594	6	6	559	559	332.5	5.77	129.8	8.36	210	320	320	205	0	0	0	0	383.7	0.97				
595	57	7	644	644	383	6.71	139.8	10.9	81	380	380	205	0	0	0	0	498.2					
596	8	8	644	644	383	6.71	139.8	10.9	162	389	389	205	0	0	0	0	645	1.29				
597	9	9	644	644	382.9	6.76	143.2	11	243	363	363	205	0	0	0	0	754	1.31				
598	58	10	717	717	428.8	7.72	153.9	11	90	331	331	205	0	0	0	0	480.3					
599	11	11	717	717	428.8	7.72	153.9	11	180	331	331	205	0	0	0	0	556	1.14				
600	12	12	721	721	429	7.34	154.2	10.9	270	421	421	205	0	0	0	0	822.9	1.68				
601	59	13	840	840	505.1	8.92	168.8	13.4	106	399	399	205	0	0	0	0	863					
602	14	14	840	840	505.1	8.92	168.8	13.4	213	399	399	205	0	0	0	0	1032	1.20				
603	15	15	840	840	505.1	8.97	168.6	13.4	319	392	392	205	0	0	0	0	1316.7	1.53				
Granath																						
654	60	2001	1840	1840	558	8	150	16	375	305	427	205					652					
655		2002	1840	1840	558	8	150	16	75	305	427	205					610	0.94				
659	61	2007	8000	8000	580	4.6	180	9	0	275	343	205					178					
658		2006	8000	8000	580	4.6	180	9	120	275	343	205					170	0.96				

2.2.2 TEORIJSKA ISTRAŽIVANJA

Uticaj dužine opterećenja razmatrali su Bergfelt i Hövik u radu [3.2] polazeći od pretpostavke o rasprostiranju opterećenja preko pojasa pod uglom od 45° na rebro i nalaženju napona po formuli

$$\sigma_y = P / (t_w \cdot l_y)$$

gde je l_y dužina rasprostiranja opterećenja u rebro i u sebi sadrži linearan uticaj dužine c .

Drugi pristup razmatranja pojasa kao grede na elastičnoj podlozi Bergfelt i Hövik su primenili u istom radu prvi put, a kasnije i Bergfelt u radu [3.3].

Ni jedan pristup nije dao dobro slaganje sa rezultatima dobijenim eksperimentom.

Bergfelt na osnovu analize pojasa kao grede na elastičnoj podlozi dolazi 1976 [3.7], [3.8] do izraza za uticaj dužine delovanja opterećenja u obliku :

$$f(c) = \frac{c/2L}{1 - e^{-c/2L} \cdot \cos(c/2L)} \quad \text{gde je } L \text{ elastična dužina i}$$

$$L = \sqrt[4]{4 \cdot I_y \cdot d_w / t_w} \quad \text{i koja se može uzeti približno kao } L \approx 6.7 \cdot t_y$$

Bergfelt je kasnije, u radu [3.9], na osnovu eksperimentalnih istraživanja dao analizu uticaja dužine delovanja opterećenja. Umesto prethodno predloženog izraza Bergfelt je predložio novi izraz

$$f(c) = 1 + 40 \cdot \frac{c}{a} \cdot \frac{t_w}{d_w} ; \quad f(c) \leq 1.4$$

gde a predstavlja položaj krajnjih plastičnih zglobova u pojasu i određuje se prema postupku u radu [3.9].

Drdacky je u izraz za određivanje granične nosivosti uključio uticaj dužine raspodeljenog opterećenja na sledeći način :

$$P_u = A \cdot \sigma_{ym} \cdot d^2 \cdot (1 + 0.004 \cdot c / d_w) \cdot (I_y / d_w^4)^B$$

gde se konstante A i B određuju empirijski iz rezultata eksperimenata

U okviru Robertsove formule uticaj dužine opterećenja obuhvaćen je izrazom

$$\left[1 + \frac{3c}{d} \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right]$$

Drugi primenjivani izrazi za ovaj uticaj su i

$$[0.9 + 1.5 \cdot c / d] \quad ; \quad \left[1 + \frac{c + 2tf}{d} \right] \quad ; \quad [1 + 0.0025(c/t_w)(I_y/(t_w^4))^{-1}]$$

2.3 DOSADAŠNJA VLASTITA ISTRAŽIVANJA PONAŠANJA NOSAČA POD DEJSTVOM LOKALNOG OPTEREĆENJA I NOSAČA

Autor je istraživanja razmatranog problema počeo u okviru studijskog boravka u Kardifu, gde su pod vodjstvom T.M. Robertsa, nakon K.C. Rockeya sprovedjena obimna istraživanja krajem sedamdesetih godina. Rezultati istraživanja dve grupe nosača - nosača male vitkosti i nosača sa podužnim ukrućenjima publikovani su u više radova : [11.1], [11.3] i drugima.

U magistarskom radu autora [11.3] "Prilog analizi plastičnog ponašanja tankozidnih nosača" detaljno se razmatraju problemi lokalnog opterećenja. Dat je detaljan pregled dotadašnjih istraživanja, kao i analiza eksperimenata iz Kardifa.

Saznanja i iskustva iz proučavanja lokalnog izbočavanja rezimirana su u poglavlju: Lokalno izbočavanje čeličnih I nosača pod dejstvom koncentrisanog opterećenja, u monografiji "Teorija konstrukcija-savremeni problemi nelinearne analize".

U okviru pripremnog dela rada na disertaciji izvršena je analiza dotadašnjih eksperimentalnih i teorijskih rezultata. Rezultati su publikovani u radovima [11.6], [11.8]. Razmatrano je 13 grupa rezultata istraživanja pojedinih autora, koje sadrže podatke o 451 testiranju, od toga 318 za nosače bez podužnih ukrućenja i 133 za nosače sa podužnim ukrućenjima.

Pojedine karakteristike se menjaju u sledećem rasponu: vitkost nosača (odnos visine i debljine rebra) od 50 do 505; debljina rebra od 1 do 10 mm, odnos debljina pojasa ai rebra od 1 do 12; dužina dejstva opterećenja od koncentrisanog do 0.5 d.

Granična nosivost, odnosno sila loma je sračunata za sve nosače prema različitim formulama. Takođe su izvršene dodatne analize uzimanjem u obzir samo pojedinih ili većeg broja korekcionih faktora i to u različitim predloženim oblicima.

Kako bi se omogućila procena pouzdanosti pojedinih izraza na osnovu statističke analize, određene su vrednosti odnosa predviđene sile loma prema svim korišćenim izrazima i eksperimentalno određene vrednosti nosivosti za sve nosače.

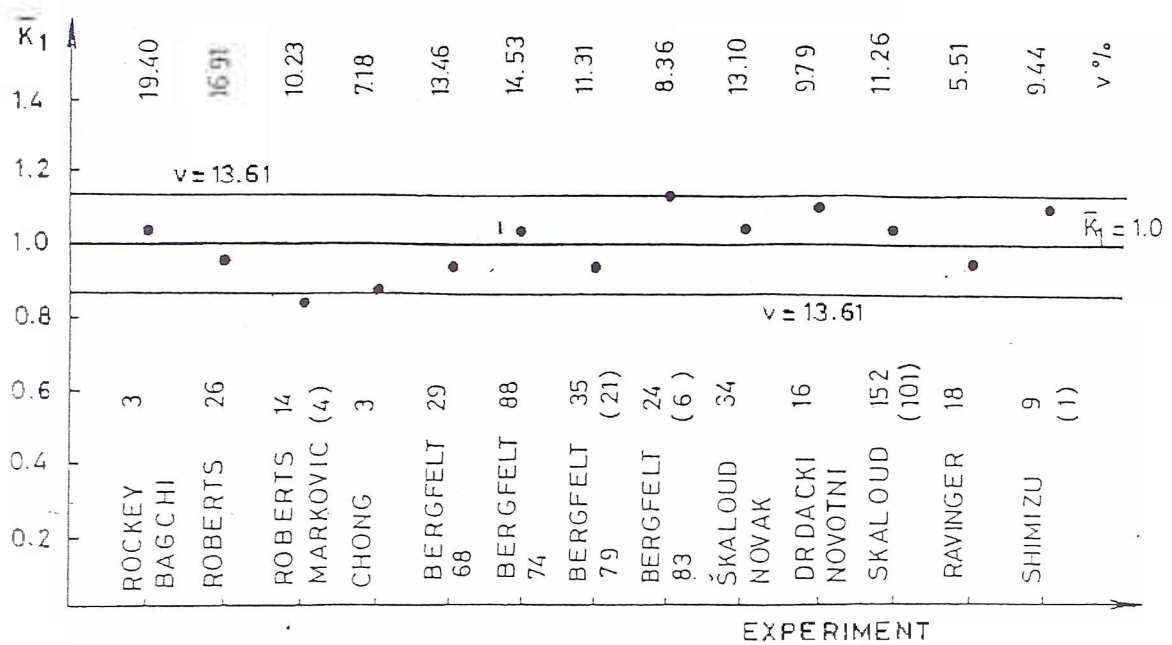
$$k_i = \frac{P_{pr}}{P_{ex}}$$

$$\bar{k} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i}{n}$$

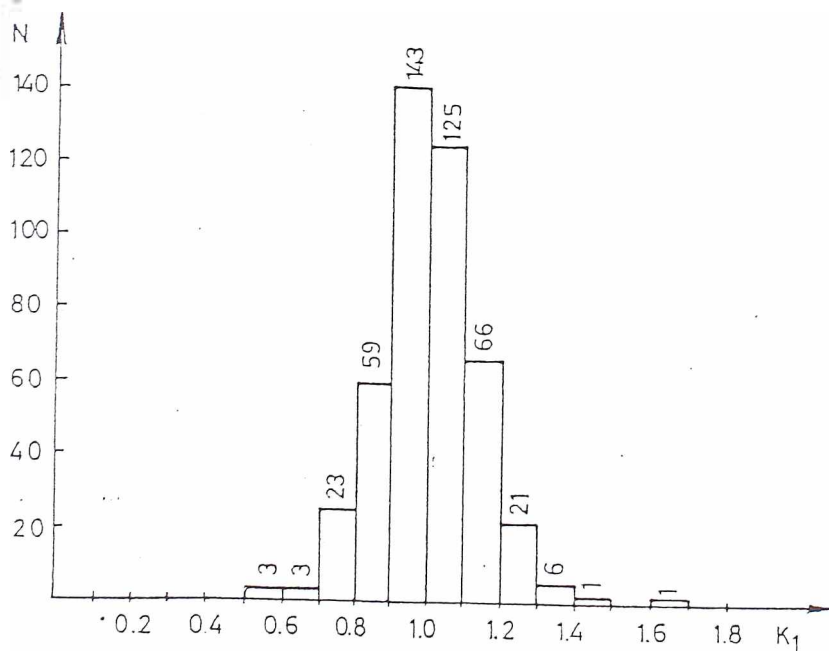
$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_i - \bar{k})^2}{n}}$$

$$v = \frac{\delta}{\bar{k}}$$

Dalje su sračunate karakteristične statističke veličine: srednja vrednost \bar{k} , standardna devijacija δ i koeficijent varijacije v za svaki od primenjenih izraza. Na lici 2.3.1. su prikazani rezultati po pojedinim grupama eksperimenata dobijeni sa Robertsovom formulom (formula (9) sa slike 2.1.3.1), a na slici 2.3.2. je dat dijagram raspodele koeficijenata k_i koji odgovaraju toj formuli.



Slika 2.3.1. Pregled normalizovanih srednjih vrednosti po grupama istraživanja



Slika 2.3.2 dijagram raspodele koeficijenta k_1

Kao rezultat celokupne analize, kako statističkih rezultata, tako i dostupnih rezultata različitih eksperimenata predloženo je rešenje kojim se na jednostavan način uzima u obzir uticaj podužnih ukrućenja.

$$f(s) = 1.28 - 0.7 \cdot s/d \quad \text{za } 0.1 < s/d < 0.4$$

Predloženo rešenje je prihvaćeno u najnovijoj verziji britanskih standarda za proračun čeličnih konstrukcija [10.22].

3 VLASTITA EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

3.1 OPŠTE

Dosadašnja eksperimentalna ispitivanja ne obuhvataju u dovoljnoj meri uticaj dužine po kojoj deluje opterećenje, pa su radi dobijanja potpunijeg uvida u razmatranu problematiku pripremljena sopstvena eksperimentalna istraživanja.

Osnovni cilj je praćenje uticaja dužine raspodeljenog opterećenja na graničnu nosivost, kada postoje podužna ukrućenja u zoni unošenja opterećenja, ali se takodje vrši i poredjenje sa slučajem kada nema podužnih ukrućenja.

Ova istraživanja su predviđena i da se nadovežu na veoma obimna istraživanja uticaja podužnih ukrućenja na graničnu nosivost koja su sprovedena između 1978 i 1988 godine u Pragu od strane prof. dr Miroslava Škalouda i njegovih saradnika. Tu su bili analizirani mnogi parametri koji utiču na ponašanje nosača i njihovu graničnu nosivost, ali uticaj dužine delovanja opterećenja praktično nije bio sistematski analiziran. Stoga su u dogovoru sa prof. dr M. Škaloudom izabrane dimenzije i karakteristike nosača kako bi se rezultati eksperimenata mogli uklopiti u prethodna istraživanja.

Predviđene su dve serije nosača: glavna serija A - raspona 500 mm sa 14 testova i serija B – raspona 1000 mm sa 6 testova. U obe serije ima nosača bez podužnih ukrućenja i sa podužnim ukrućenjima na rastojanju od opterećene nožice jednakom petini visine rebra.

Predviđeno je opterećivanje po dužinama 0 (preko poluobljice), 25, 50, 75, 100, 125 i 150 mm (preko krutih pločica), a po celoj širini gornjeg pojasa. Radi analize uticaja krutosti ploče za prenošenje opterećenja predviđeno je i za slučaj dužine 150 mm dodatno ispitivanje preko posebnog sistema koji omogućava ravnomerno raspoređivanje opterećenja po celoj predviđenoj dužini nanošenja.

Ostale dimenzije su iste za sve nosače: visina rebra 500 mm, debljina rebra 4 mm, širina pojasa 120 mm, debljina pojasa 8 mm, širina horizontalnog ukrućenja 30 mm i njegova debljina 8 mm.

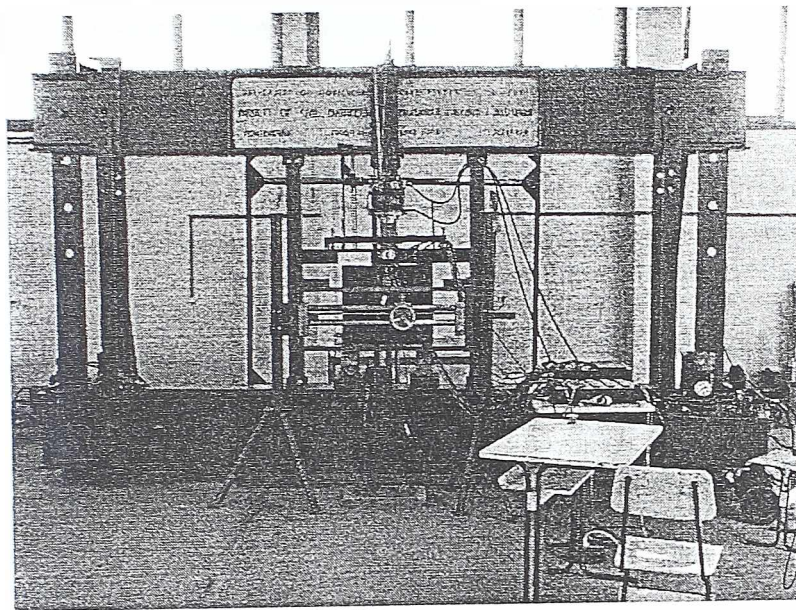
Planirano je da se nosači nakon prvog ispitivanja opterećivanjem po gornjem pojasu, ispitaju u okrenutom položaju, gde bi bio opterećivan prethodno neopterećen pojas. Ovakav način ispitivanja je uobičajen u svetu za ovu vrstu ispitivanja.

Planirano je da se eksperimenti obave na Građevinskom fakultetu u Beogradu, pa je pripremljen zatvoren ram za nanošenje opterećenja i ram za merenje deformacija rebra van njegove ravni. Medjutim svi potrebni ostali uređaji za izvršenje eksperimenata se nisu mogli kompletirati i na Građevinskom fakultetu u Beogradu je izvršena samo priprema nosača i merenje početnih deformacija.

Eksperimenti su izvršeni u Laboratoriji za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta u Podgorici, Univerziteta Crne Gore, pošto se tu raspolagalo sa svom potrebnom opremom kao i osobljem sa iskustvom u prethodnim sličnim istraživanjima koje su sprovodili dr Duško Lučić i mr Biljana Šćepanović.

Nosači su ispitivani u specijalno konstruisanom zatvorenom ramu korišćenom u prethodnim ispitivanjima. Postavka uređaja se vidi na slici 3.1

Nosači su opterećivani tako što je sila nanošena preko prese, povezane sa hidrauličkom pumpom. Sila je registrovana preko merača sile koji se nalazio između prese i bloka za prenošenje opterećenja na gornji pojas. Sila je povećavana u početku sa većim inkrementima, a kasnije sa manjim inkrementima. U toku ispitivanja registrovani su bočno pomeranje u karakterističnoj tački rebra i ugibi u sredini gornjeg i donjeg pojasa i kod nosača sa membranim trakama dilatacije u nizu odabranih tačaka na rebu i pojasu nakon svakog inkrementa opterećenja. Nakon većine inkremenata izvršena su registrovanja bočnog pomeranja rebra po srednjem profilu u 14 tačaka i registrovanja ugiba u 11 tačaka opterećenog pojasa.



Slika 3.1.1

Opterećenje je povećavano do dostizanja njegove granične vrednosti, koje se ogledalo u nemogućnosti daljeg povećavanja sile uz istovremeno progresivno povećanje registrovanih deformacija rebra i pojasa i dilatacija, pri održavanju opterećenja i pojavi vidljivog izbočenja na rebu u zoni unošenja opterećenja. Nakon izvesnog održanja sile (različitog u pojedinim optima) radi isticanja ostvarene deformacije nosači su rasterećivani i merene su rezidualne deformacije rebra i pojasa. Za rebro merene su deformacije van rebra na istoj mreži od 11 X 11 tačaka A serije (ili 11 x 21 tačka B serije), na kojoj su merene i početne deformacije, a takodje još u dodatnom broju tačaka u zoni izraženog deformisanja rebra koji je zavisio od konkretnog oblika deformacije. Rezidualne deformacije pojasa su registrovane u istih 11 tačaka u kojima su vršena merenja i tokom opterećivanja.

3.2 PLANIRANJE EKSPERIMENATA I IZBOR KARAKTERISTIKA NOSAČA

Na osnovu analiza prethodnih istraživanja je utvrđeno da ne postoji dovoljno sistematskih istraživanja uticaja dužine raspodeljenog opterećenja i da bi za detaljnija teorijska razmatranja ovog problema bili potrebni dodatni eksperimentalni rezultati. Kako se radi, kako je pokazano u prethodnim poglavljima, o veoma složenoj pojavi obim eksperimentalnog istraživanja se mora racionalno definisati kako bi se u postojećim finansijskim uslovima i sa dostupnom opremom moglo uspešno obaviti, i kako bi rezultati mogli korisno da se upotrebe. U tom smislu je važna mogućnost nadovezivanja na istraživanja drugih autora. Kako je dogovorena saradnja sa prof M. Škaloudom u ovoj oblasti pošlo se od njegovih istraživanja. U okviru veoma obimnog istraživanja koje je delimično opisano u poglavlju 2 razmatrana je promena većeg broja parametara, kao što su debljina rebra, debljina pojasa, položaj ukrućenja, karakteristike ukrućenja. Detaljnom analizom vrednosti parametara i rezultata došlo se do zaključka da treba varirati osnovni parameter dužinu opterećenja u granicama koje su bitne za dati problem, a da treba izabrati reprezentativne vrednosti ostalih parametara.

Pošto u praškom istraživanju h_w visina nije varirana, usvojena je primenjena visina 500 mm. Pošto je i raspon l u 85 % testiranja bio stalan: 500 mm, usvojena je ta, kao osnovna vrednost raspona. Pošto su vertikalna ukrućenja primenjena samo iznad oslonaca to je istovremeno i rastojanje vertikalnih ukrućenja a .

Debljina rebra je u praškom istraživanju varirana izmedju 2 i 6 mm, pa je kao reprezentativna vrednost izabrana vrednost debljine rebra 4 mm, takodje i zbog toga što su pri toj vrednosti bile vršeni dodatni testovi sa promenom i nekih drugih parametara.

Od primenjivanih dimenzija pojasa izabrane su one koje manje omogućavaju uključivanje drugih uticaja, a dovoljno su karakteristične i realne. Širina pojasa odabrana je da bude 120 mm, a debljina pojasa 8 mm. Pri tome odnos debljine pojasa i rebra kao jedna od relevantnih karakteristika ima vrednost 2.

Na položaj horizontalnih ukrućenja mogu da utiču i drugi faktori sem lokalnog opterećenja, pa je o tome vodjeno računa kada je kao reprezentativna vrednost izabran položaj rastojanju od opterećenog pojasa jednakom petini visine rebra odnosno 100 mm.

Za dimenzije ukrućenja izabrane su dimenzije za koje je iz prethodnih istraživanja utvrđeno da su racionalne, u smislu da su dovoljne da dovedu do porasta nosivosti, a da njihovo dalje povećanje više bitno ne utiče na nosivost. Izabrane dimenzije su debljina 8 mm i širina 30 mm.

Dužina delovanja opterećenja može se prvo izraziti u apsolutnoj vrednosti, a drugo u relativnoj vrednosti prema visini rebra ili prema rastojanju vertikalnih ukrućenja ili prema debljini rebra. Granice variranja prema tome zavise i od tih drugih dimenzija. Opterećenje je u praškom istraživanju bilo nanošeno preko krute pločice koja je imala širinu pojasa a dužina opterećenja c na nosačima sada izabranih dimenzija je bila stalna i iznosila 50 mm (pri tome je $a/c = 0.1$). Drugi istraživači su često koristili i opterećenje preko poluobljice koje bi uslovno imalo dužinu $c=0$.

Odućeno je da kao realna donja granica bude opterećenje preko pločice $c = 25$ mm i da se kao kontrolno ispitivanje upotrebi i opterećenje preko poluobljice. Da bi se rezultati ispitivanja mogli nadovezati na praška, primeniće se i $c=50$ mm i dalje dužine će se povećavati za po 25 mm do 150 mm. Ovo dimenzija je izabrana za gornju granicu jer nakon dužina opterećenja većih od trećine rastojanja izmedju vertikalnih ukrućenja može da dodje do uključanja i drugih parametara na promenu ponašanja. Prema tome odnos c/a se kreće za opterećenje preko krutih pločica izmedju 0.05 i 0.30.

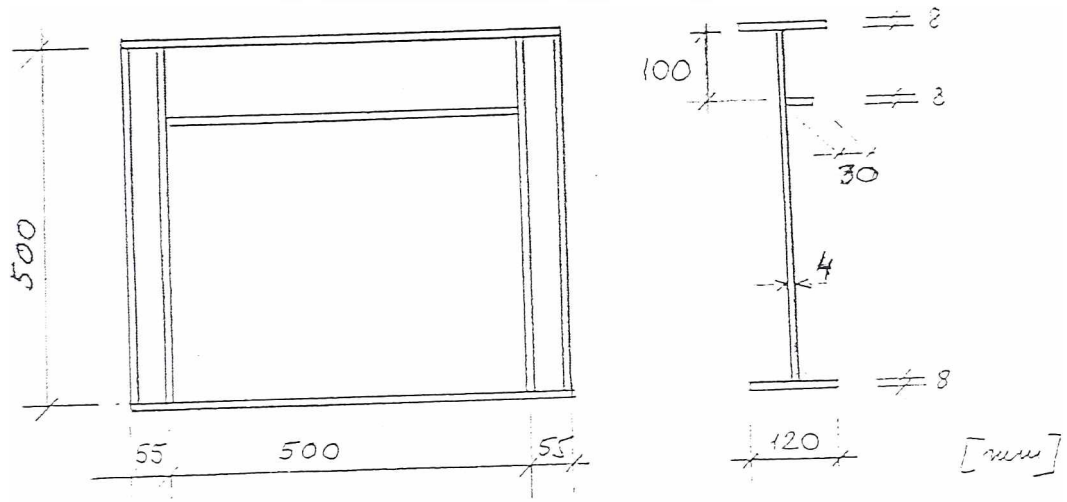
Odlučeno je da se ispita i kontrolna serija sa rasponom od 1000 mm, a sa navedenim dužinama opterećenja kako bi se utvrdilo kakav značaj ima ova promena, odnosno da li promena nosivosti više zavisi od apsolutne vrednosti c ili od relativne vrednosti c/a (uz istu vrednost c/h_w).

Takodje je odlučeno da se ispituju i kontrolni nosači bez podužnih ukrućenja kako bi se ispitalo da li promena dužine opterećenja na isti ili različit način utiče kod nosača sa i bez podužnih ukrućenja. Pri tome broj ovih nosača bi bio manji od onih sa ukrućenjima i bile bi ispitane samo granične i srednja vrednost dužine opterećenja.

U dosadašnjim istraživanjima i ostalih autora odnos c/a se kreće obično u granicama od 0 do 0.1 .

Za material je izabran čelik Č361 koji ima slične nominalne karakteristike kao upotrebljeni čelik u češkom istraživanju.

Prema tome ispitivani nosači serije A (raspona 500 mm) imaju dimenzije prikazane na slici 3.2.1 . nosači serije B se razlikuju samo po rasponu jednakom 1000



Slika 3.2.1 Dimenzije nosača serije A

3.3. PRIPREMA ZA ISPITIVANJE

3.3.1 IZRADA NOSAČA

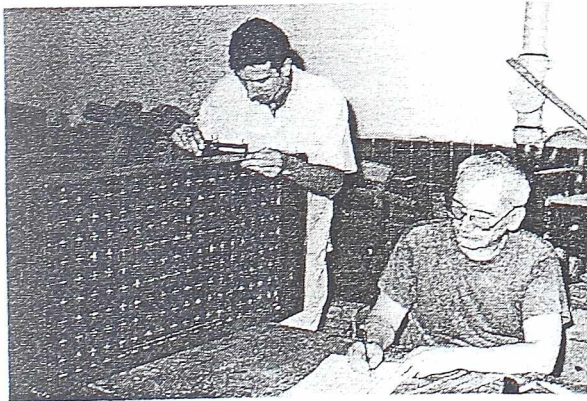
Nosači su prema projektu - specifikaciji autora napravljeni u građevinskom preduzeću Mostogradnja u Beogradu u pogonu u Batajnici februara 1990. Uz izradjene nosače priložen je i Elaborat tehničke kontrole br 1950 (87) u kome se u izveštaju službe tehničke kontrole konstatuje:

Pre ulaza materijala u fazu sečenja izvršena je ulazna kontrola materijala. Utvrđeno je da izabrani materijal odgovara zahtevima iz projekta i JUS-a C.BO.500. Izvršen je pregled veznog materijala po zahtevima iz opštih propisa, materijala za zavarivanje i JUS-u C.H3.011. U toku izrade vršena je kontrola zavarivačkih radova. Memom kontrolom je utvrđeno da zavareni spojevi imaju odgovarajuću debljinu. Vizuelnom kontrolom je utvrđeno da su zavari kontinualni i bez grešaka na licu šava. Na osnovu mernog i vizuelnog pregleda službe tehničke kontrole zaključeno je da je konstrukcija izradjena po tehničkoj dokumentaciji i opštim tehničkim propisima za ovu vrstu proizvoda. Antikorozivna zaštita je uradjena na sledeći način: izvršeno je peskarenje (sačmarenje) osnovnog materijala do stepena SA 2,5 po SIS standardima. 1 premaz pomolin, 1 osnovni premaz sa minijumom, 1 premaz zoraluks emajl braon. Na osnovu izvršenih pregleda i kontrola, zaključeno je da je konstrukcija izradjena po crtežima.

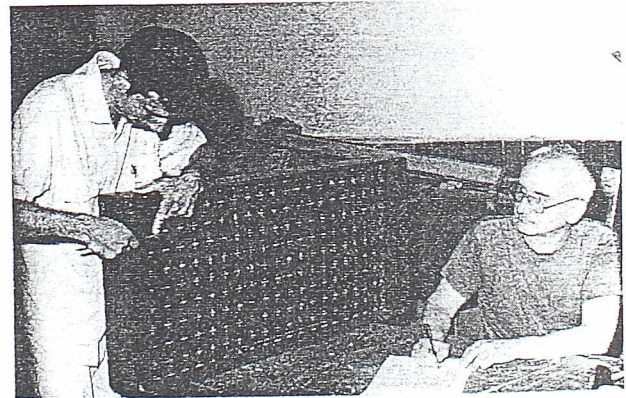
Nosači serije A su naknadno obojeni belom bojom sa jedne strane (na kojoj nisu ukrućenja) radi lakšeg isortavanja i bolje uočljivosti mreže tačaka u kojima će se vršiti merenja.

3.3.2 MERENJA DIMENZIJA

Pre početka ispitivanja izvršeno je merenje svih dimenzija nosača na Građevinskom fakultetu u Beogradu u hali za ispitivanje konstrukcija. Na merenju dimenzija radio je Miloš Cimeša, zapisnik je vodio autor. (slike 3.3.2.1 i 3.3.2.2)



Slika 3.3.2.1 Merenje dimenzija



Slika 3.3.2.2 Merenje dimenzija

Debljine i širine pojaseva i debljine podužnih ukrućenja merene su u po 5 tačaka, a debljine i širine svakog vertikalnih ukrućenja u po dve tačke.

Debljina lima kontrolisana je na kontrolnom limu, koji je takodje isporučen sa izradjenim nosačima. Srednje vrednosti ovih dimenzija za svaki nosač su date u tabeli 3.3.2.1 .

		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
	izbocenje	ispred	iza	ispred	iza	iza	iza	iza
UF(flange)								
gornji pojas	b	11.90	11.77	11.90	11.87	11.76	11.80	11.68
	t	0.82	0.81	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
BF(flange)								
donji pojas	b	11.77	11.71	11.79	11.72	11.88	11.76	11.85
	t	0.83	0.82	0.83	0.82	0.83	0.83	0.83
HS(stiffener)								
	t			0.83	0.83	0.84	0.84	0.83

		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
	izbocenje	ispred	ispred- iza	iza	ispred	iza	ispred	ispred
UF(flange)								
gornji pojas	b	11.85	11.88	11.80	11.89	11.83	11.79	11.88
	t	0.84	0.83	0.83	0.84	0.84	0.83	0.83
BF(flange)								
donji pojas	b	11.76	11.85	11.82	11.63	11.85	11.80	11.95
	t	0.83	0.83	0.83	0.84	0.83	0.84	0.84
HS(stiffener)								
	t			0.81	0.82	0.82	0.81	0.82
udaljenje	s							
od gor	1			11.51	11.48	11.76	11.58	11.59
pojava	2			11.68	11.74	11.59	11.63	11.46
	3			11.55	11.85	11.62	11.63	11.25
	4			11.75	11.92	11.53	11.68	11.50
	5			11.62	11.83	11.58	11.71	11.71
								min=11.18

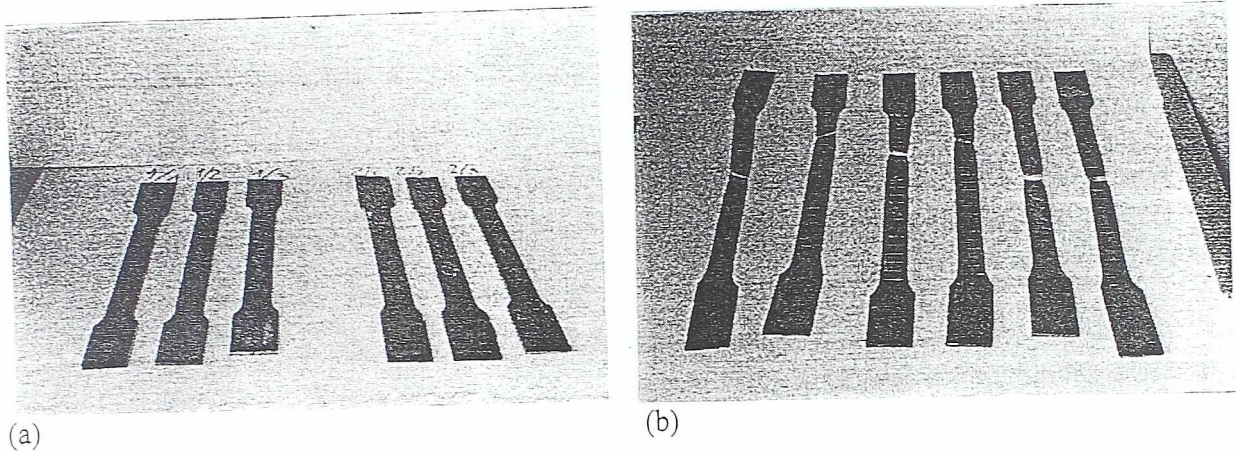
Tabela 3.3.2.1 Merene dimenzije nosača – srednje vrednosti

3.3.3 ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKA MATERIJALA

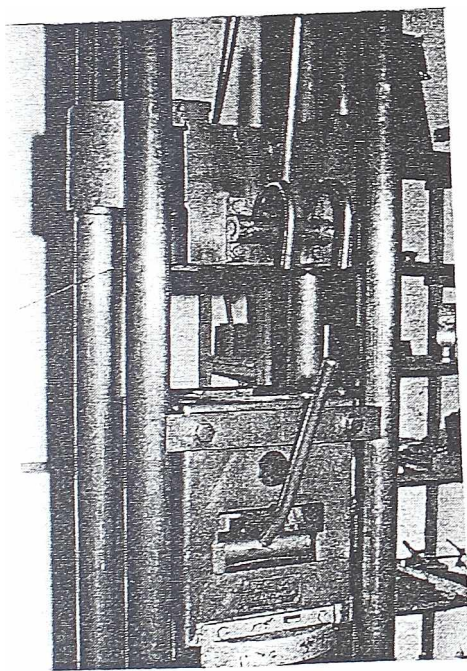
U pomenutom elaboratu tehničke kontrole date su i potvrde proizvođača čelika iz Skoplja i Jesenica o kvalitetu i karakteristikama čelika.

Pored toga iz kontrolnog lima rebra napravljene su po tri epruvete u podužnom i poprečnom pravcu (slika 3.3.3.1) pomoću kojih su u Institutu za ispitivanje materijala Građevinskog fakulteta u Beogradu određena svojstva materijala koja se daju u tabeli 3.3.3.1. Izradu i merenje obavio je Vlada Vasić.

Za ispitivanje epruveta u Institutu za materijale i konstrukcije na Građevinskom fakultetu Beogradu korišćena je kladica (slika 3.3.3.2 i slika 3.3.3.3)



Slika 3.3.3.1 Epruvete (a) pre i (b) posle ispitivanja



Slika 3.3.3.2 Kidalica



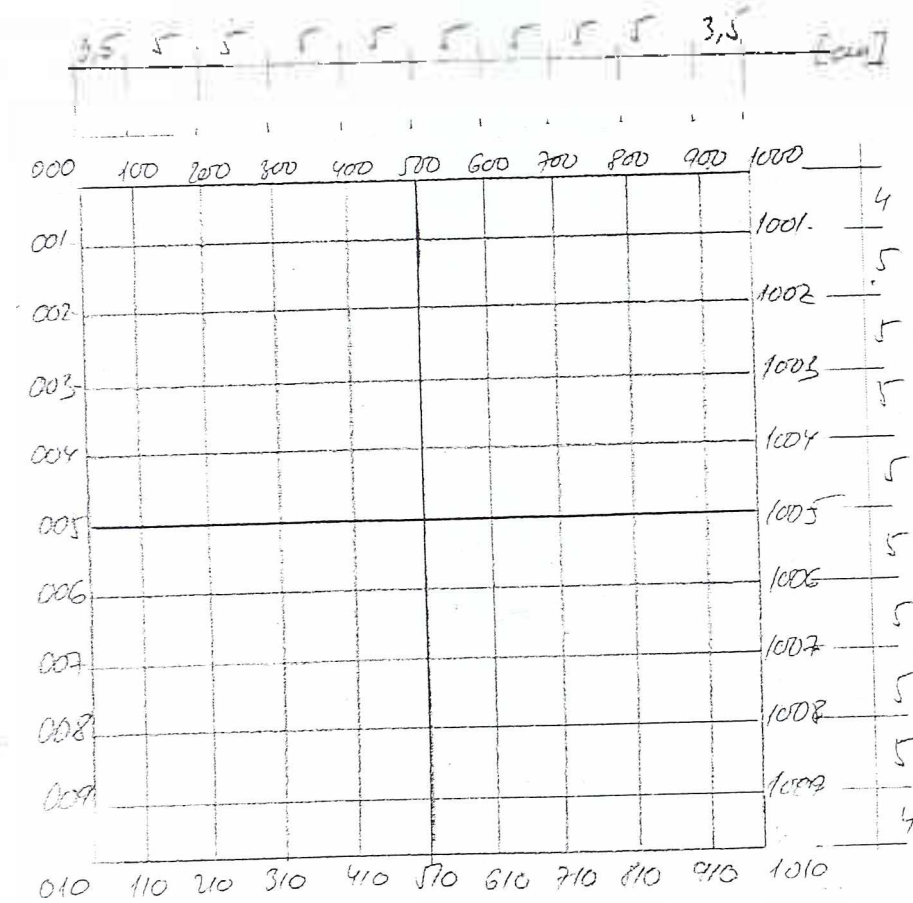
Slika 3.3.3.3 Ispitivanje epruveta

	b	t	l ₀	l ₁	b ₁	l ₁	F	F'	F _y	σ _y	F _z	σ _z	d ₁₀	psi
oznaka/jednica	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	N	N/mm ²	N	N/mm ²		
1/1 poduzna	26	4	100	129	19.0	1.8	104.0	34.2	27959	268.8	37278	358.4	0.29	0.33
1/2 poduzna	26	4	100	134	18.0	2.0	104.0	36.0	27959	268.8	37082	356.6	0.34	0.35
1/3 poduzna	26	4	100	132	17.7	2.0	104.0	35.4	27959	268.8	37278	358.4	0.32	0.34
srednje										268.8		357.8		
2/1 poprečna	26	4	100	132	18.0	2.0	104.0	36.0	27468	264.1	37278	358.4	0.32	0.35
2/2 poprečna	26	4	100	136	17.8	2.0	104.0	35.6	27468	264.1	37278	358.4	0.36	0.34
2/3 poprečna	26	4	100	134	18.0	1.9	104.0	34.2	27272	262.2	37278	358.4	0.34	0.33
srednja										263.5		358.4		
srednje ukupno										266.2		358.1		
odklonjenost										280.0				

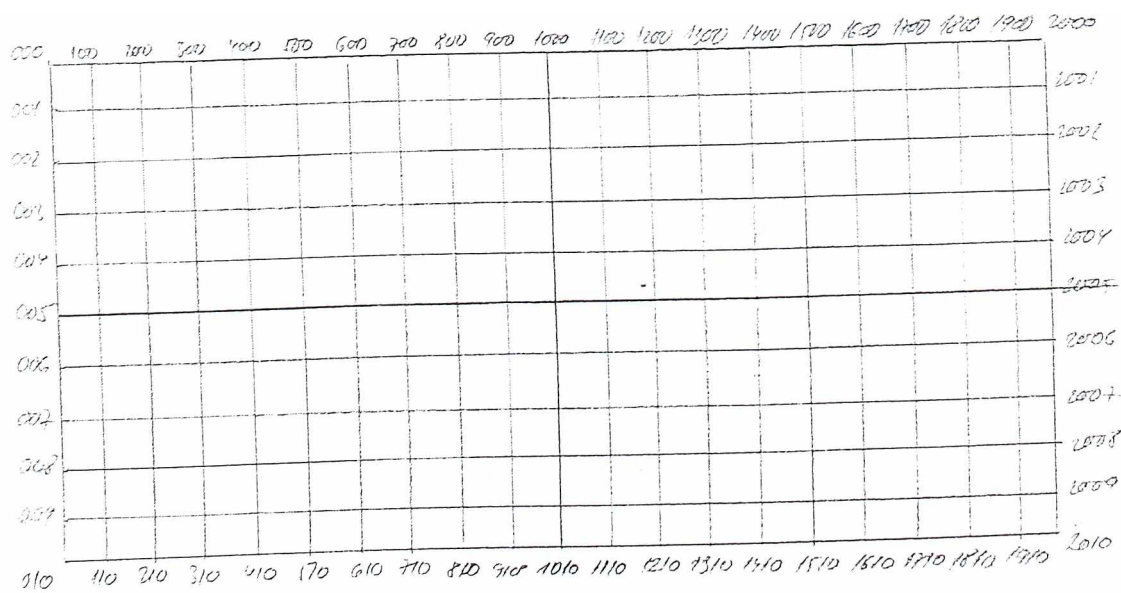
Tabela 3.3.3.1 Rezultati ispitivanja karakteristika materijala rebra

3.3.4 OBELEŽAVANJE NOSAČA

Na nosačima je obeležena mreža tačaka u kojima se mere deformacije rebra. U nosačima serije A mreža ima $11 \times 11 = 121$ tačku, a u seriji B mreža ima $11 \times 21 = 231$ tačku.



Slika 3.3.4.1 Mreža tačaka na rebru nosača serije A u kojima se mere deformacije rebra

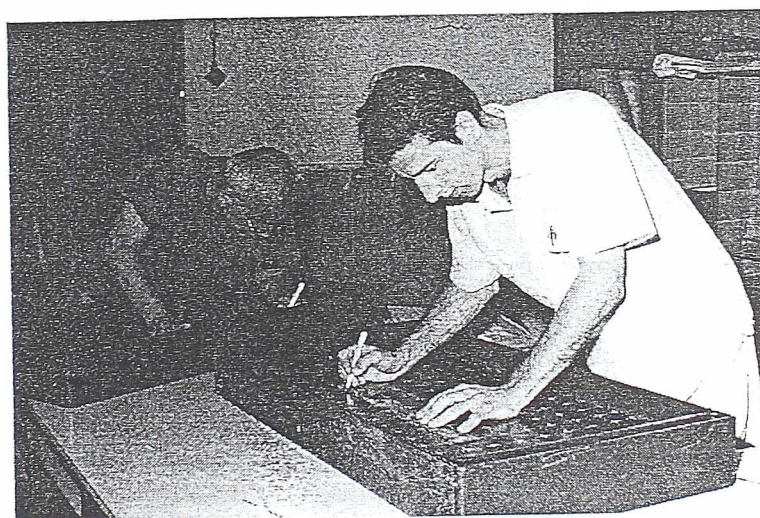


Slika 3.3.4.2 Mreža tačaka na rebru nosača serije B u kojima se mere deformacije rebra

Tačke se nalaze na jednakim međusobnim rastojanjima od 5 cm u oba pravca, osim u poslednjim horizontalnim i vertikalnim redovima gde je zbog zavarenih šavova i mogućnosti pristupa elektronskog ugibomera to rastojanje 4 odnosno 3.5 cm. Na slikama 3.3.4.1 i 3.3.4.2 su prikazane mreže i upotrebljene oznake tačaka koje će biti korišćene i kasnije u radu.

Na obeležavanju nosača radili su Miloš Cimeša i autor (slika 3.3.4.3 i slika 3.3.4.4). Mreža je obeležena sa strane na kojoj nema horizontalnih ukrucenja zbog pristupa ugibomera i tačke su označene krstićima dobijenih presekom horizontalnih i vertikalnih linija. Korišćeni su flomasteri permanent crne i plave boje za nosače A serije, koji su bili bele boje na obeležavanoj strani i flomasteri bele boje za nosače serije B, koji su bili braon boje.

Poseban problem predstavlja odluka o definisanju sredine visine i raspona odnosno položaju osnovnih linija, zbog geometrijskih odstupanja i nepravilnosti po obe glavne dimenzije i odstupanja od upravnosti vertikalnih (osloničkih) ukrucenja u toku izrade nosača. Korišćenjem šablona od čvrstog crtaćeg papira i njegovim uklapanjem u raspoloživi prostor između pojaseva i vertikalnih ukrucenja i dodatnim odmeravanjima problem je zadovoljavajuće rešen. Dobijena odstupanja od idealnih pravaca nemaju značaja za interpretaciju dobijenih rezultata.

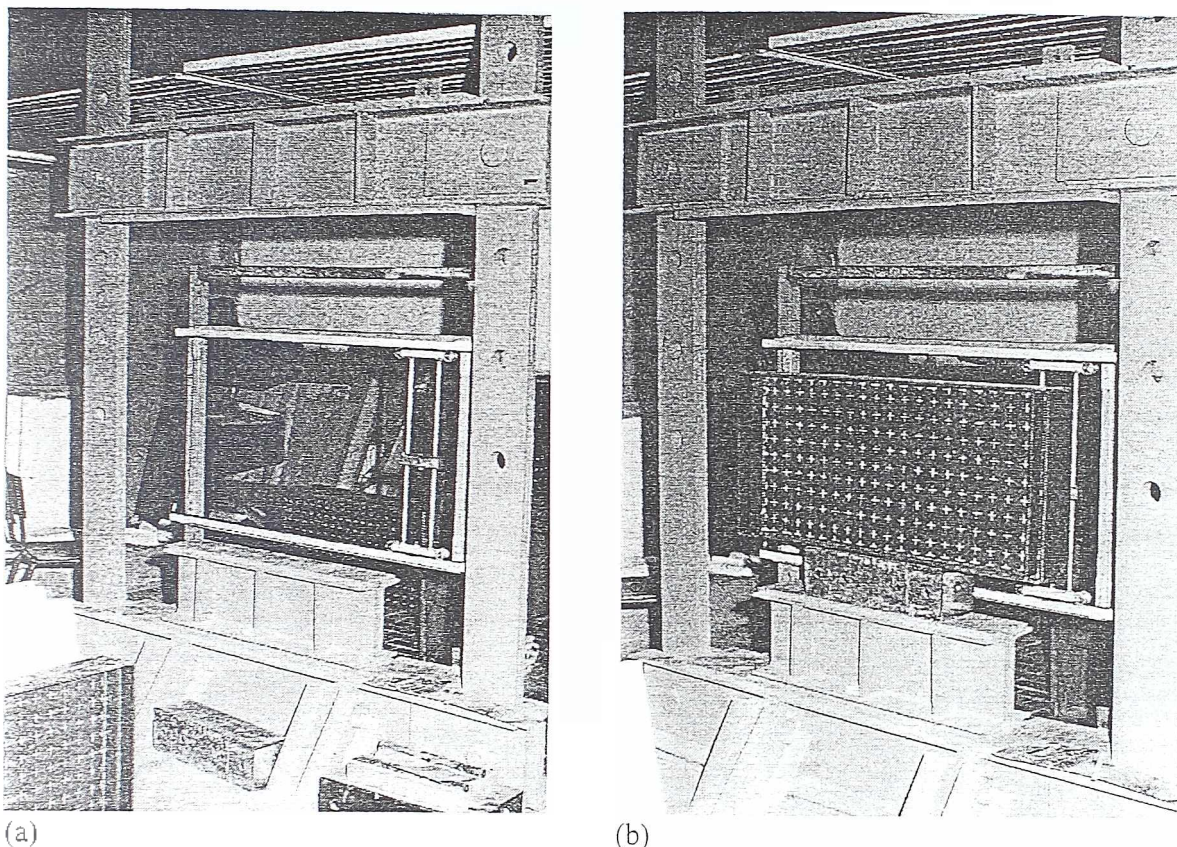


Slika 3.3.4.3 Obeležavanje nosača Slika 3.3.4.4 Obeležavanje nosača

Osim osnovne mreže u zoni u kojoj se očekuje pojava lokalnog izbočavanja je obeležena progušćena mreža dobijena deljenjem osnovnih polja na četiri dela, što znači da su tačke na rastojanju 1.25 cm. Poslednje rastojanje uz pojas, zbog pomerene poslednje linije zbog šava, je 1 cm. Ova mreža je korišćena kasnije za preciznije predstavljanje deformisanih vertikalnih preseka rebra i za crtanje preciznijih konturnih linija u ovoj oblasti nosača.

3.3.5 PRIPREMA RAMA ZA ISPITIVANJE I POSTAVKE EKSPERIMENTA U BEOGRADU I SPECIJALNOG RAMA ZA MERENJE DEFORMACIJA REBRA

U okviru priprema za ispitivanje u Hali za ispitivanje modela na Građevinskom fakultetu u Beogradu konstruisan je zatvoren ram za nanošenje opterećenja (slika 3.3.5.1) u saradnji sa Ratkom Pestićem, koji je takodje obavio dodatno bojenje nosača i učestvovao u pripremi rama za merenje početnih deformacija i pripremi nosača. Ram je trebalo da bude kompletiran sa presom, meračem sile, elementima za unošenje opterećenja, osloncima.



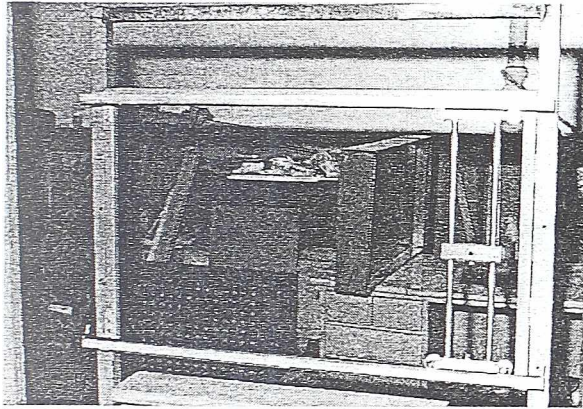
Slika 3.3.5.1 Ram za ispitivanje (Beograd) sa ramom za merenje deformacija rebra

U toku planiranja eksperimenta radi dobijanja boljeg uvida u početne deformacije (prikazivanje konturnih linija i željenih preseka rebra za šta je potrebno dobijanje deformacija za veliki broj tačaka u okviru određene mreže), radi efikasnog praćenja deformacije tokom opterećivanja i efikasnog izvodjenja eksperimenta, kao i radi registrovanja rezidualnih deformacija (takodje, prikazivanje konturnih linija i željenih preseka rebra), a pošto do sada nisu postojala ispitivanja ovog tipa pa ni odgovarajuća prateća oprema na Gradjevinskom faklutetu u Beogradu odlučeno je da se konstruiše specijalan ram za merenje deformacija rebra van njegove ravni

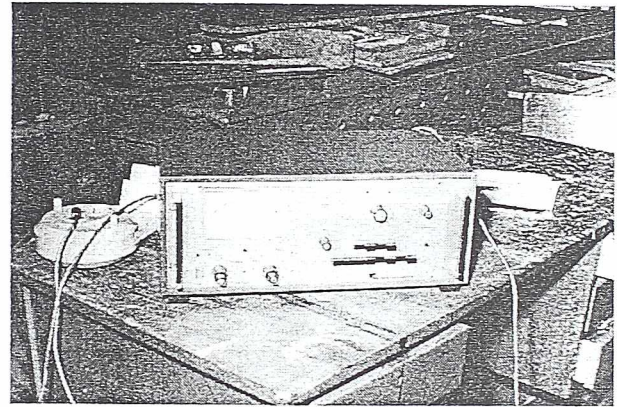
Slični ramovi su konstruisani i za istraživanja nekoliko istraživanja iz ove oblasti u svetu (Prag, Bratislava, Kardif). U Švedskoj i Čehoslovačkoj je za ovu svrhu korišćena i stereofotogrametrijska metoda. Rešenje je trebalo prilagoditi domaćim tehničkim i finansijskim uslovima izrade. Ram je prema zamisi i zahtevu autora napravio Vlada Vasić iz Instituta za materijale i konstrukcije Gradjevinskog fakulteta u Beogradu uz originalno rešenje pojedinih detalja. Ram se sastoji od dve horizontalne vodjice po kojima se kreće kotrljanjem sistem od kruto spojene dve vertikalne vodjice po kojima se klizanjem kreće nosač elektronskog ugibomera koji je spojen sa odgovarajućim uređajem za registrovanje pomeranja. Rešenje je moralo da obezbedi kretanje nosača ugibomera po idealnoj vertikalnoj ravni od koje bi bila registrovana rastojanja posmatranih tačaka na rebru. U pomenutim postojećim ograničenim mogućnostima na Gradjevinskom fakultetu u Beogradu bilo je teško obezbediti rečeni zahtev. Takodje je trebalo obezbediti nezavisan kontrolni metod u istim uslovima. Dostupna mogućnost je bila korišćenjem geodetskih postupaka. Prva verzija rama nije dala zadovoljavajuće rezultate nakon poredjenja sa geodetskim merenjima i moralo se pristupiti pravljenju nove verzije prikazane na slici 3.3.5.2. Sa ovim ramom dobijeni su relativno zadovoljavajući rezultati. Nakon poredjenja sa geodetskim merenjima vidi se da se dobijaju u potpunosti identični oblici kako krivih tako i konturnih linija sa izvesnim, čini se, sistemskim odstupanjem od 5 do 10 % za koje nije bilo uslova da se utvrde razlozi ili da se otklone.

Iako je u početku ideja bila da se realizuje automatsko kontinualno registrovanje položaja tačaka po određenim pravcima, odnosno linijama ili po pojedinim tačkama u Beogradu nije bilo moguće ostvariti takvo rešenje i stoga je odlučeno da se sa raspoloživim uređajima vrši diskretno "ručno" očitavanje i "ručno" beleženje podataka koje je mnogo zahtevnije u pogledu utrošenog vremena, rada, a podložno je u većoj meri greškama usled ljudskog faktora.

Za merenje pomeranja korišćen je elektronski ugibomer Hottinger W20 TK a za njihovo registrovanje korišćen je pojačivač KWS/3S-5 (slika 3.3.5.3), koji zahteva ručno prebacivanje preklopnika i očitavanje podataka sa odgovarajuće skale.



Slika 3.3.5.2. Ram za merenje deformacija



Slika 3.3.5.3. Pojačivač KWS / 3S -5

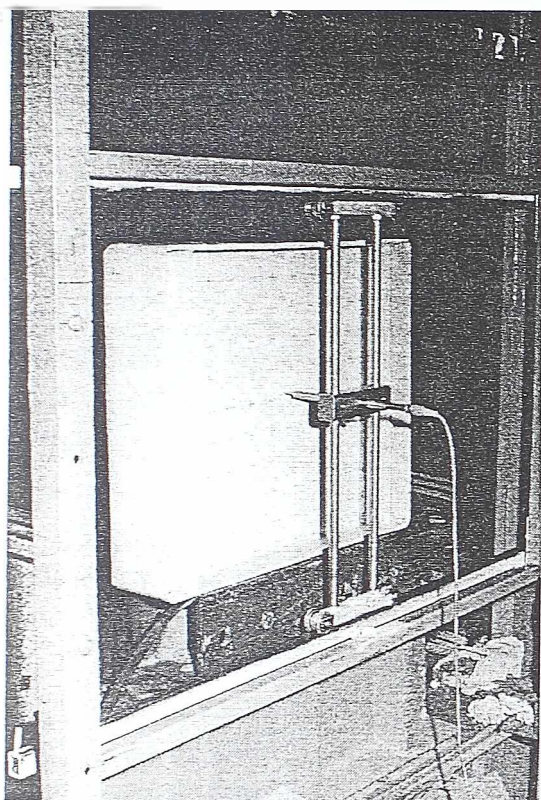
3.3.6 MERENJA POČETNIH DEFORMACIJA

Izvršena su merenja početnih deformacija na dva načina: pomoću rama projektovanog za izvršenje planiranih eksperimenata i geodetski. Cilj ovakvog pristupa je bio pouzdanost rezultata kao i provera rama.

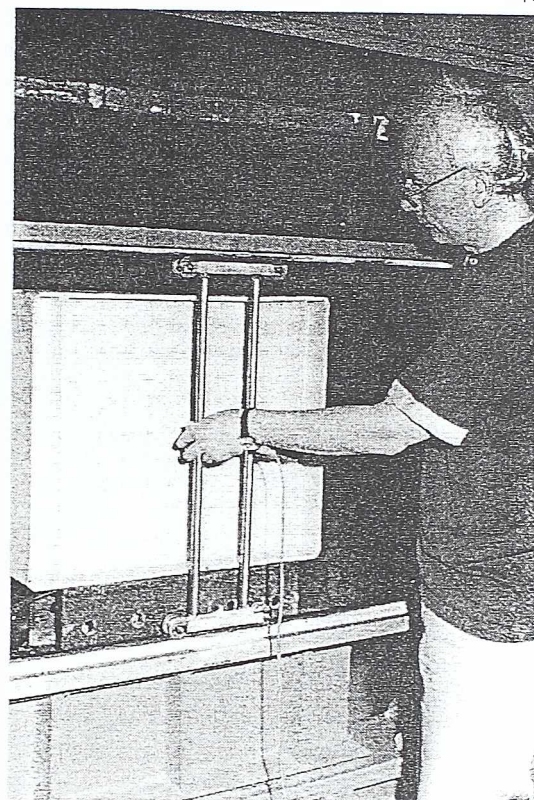
3.3.6.1 MERENJA POČETNIH DEFORMACIJA POMOĆU RAMA

Merenje početnih deformacija je vršeno pomoću posebnog rama. Na merenju početnih deformacija radili su : sa specijalnim ramom autor, sa elektronskim uređajima Dušan Nešić, a zapisnik su vodili Smiljana Cimeša, Milan Bošković, Zorica Cimeša i Biljana Deretić-Stojanović.

Ugibomer je dovodjen u željeni položaj tačke na mreži na rebru. Čitanje je očitavano sa skale pojačivača KWS / 3S -5 po potrebi nakon prebacivanja određenih preklopnika i od strane zapisničara zapisivano. Čitanja su obavljena po vertikalama po redu od tačke 000 do tačke 1010 prema šemi za nosače serije A, odnosno do tačke 2010 za nosače serije B. Nakon prvog ciklusa očitavanja, obavljan je drugi ciklus čitanja od prve do poslednje tačke. Eventualne uočene nepravilnosti su proveravane dodatnim čitanjima. Za tri nosača su zbog uočenih nepravilnosti nakon interpretacije rezultata ponovljena kompletna čitanja. Korišćenje ovog postupka osim posebne pažnje u ručnom navodjenju ugibomera (dovodjenja u zahtevani položaj) zahteva i posebnu koncentraciju saradnika koji vrši očitavanje sa elektronskog uređaja, zbog nekoliko mogućih skala, ali i pažnju saradnika koji vrši zapisivanje.



Slika 3.3.6.1.1 Ram i ugibomer



Slika 3.3.6.1.2 Dovodjenje ugibomera na određene tačke



Slika 3.3.6.1.3 Očitavanje i beleženje deformacija

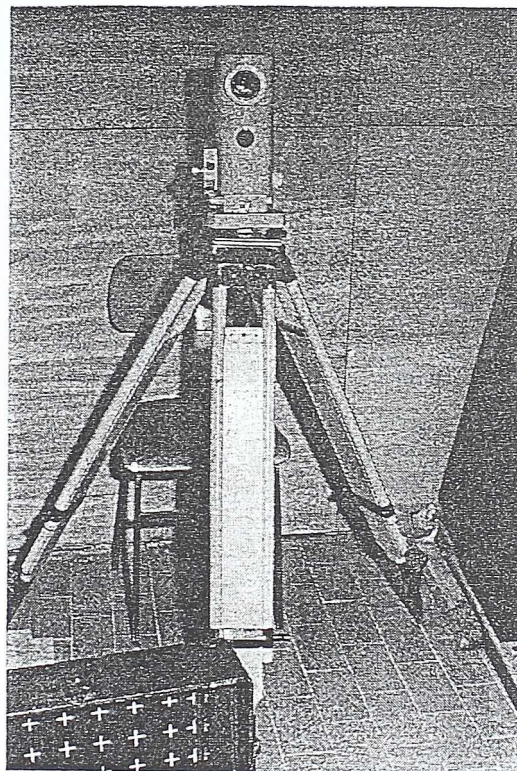
3.3.6.2 MERENJE POČETNIH DEFORMACIJA GEODETSKIM PUTEM- NIVELMANOM

Radi kontrole rama koji je trebalo da bude korišćen i tokom vršenja eksperimenta bilo je potrebno izvršiti kontrolno merenje nezavisnim načinom. Autor je želeo da to bude stereofotogrametrijskom metodom, ali to iz više razloga nije moglo da se ostvari. Inače stereofotogrametrijskom metodom bi bilo moguće registrovati i rezidualne deformacije i pod određenim uslovima i deformacije u toku ispitivanja.

Kontrolno merenje je ostvareno geodetskim putem –primenom metode preciznog nivelmana. Da bi se primenio postupak umesto stvarne mernе letve sa kojom nije moguće pristupiti tačkama uz pojaseve i vertikalna ukrućenja, a i radi praktičnosti rada u uslovima rada na malom prostoru po ideji profesora Slobodana Ašanina konstruisana je mema letva odgovarajućih malih dimenzija (slika 3.3.6.2.1). Memu letvu su uz saradnju autora pripremili Vlada Vasić i asistent Mr Branko Milovanović. Ona se sastoji od metalnog štapa dimenzija 10 mm x 10 mm x 500 mm na koji je učvršćen metalni lenjir sa milimetarskom podelom i sa kružnom libelom na vrhu koja služi za dovodjenje letve u vertikalni položaj.



Slika 3.3.6.2.1 Mema letva



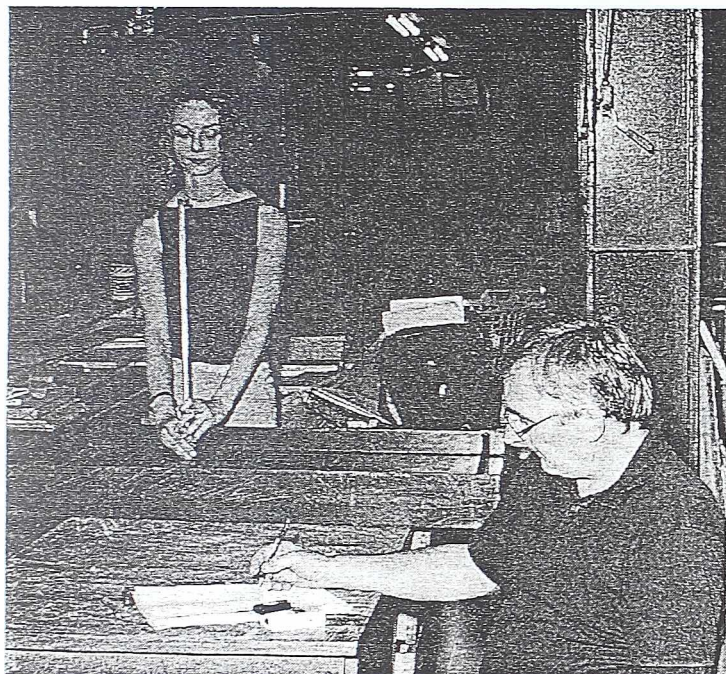
Slika 3.3.6.2.2 Nivelir Koni 007

Geodetska merenja su pomoću instrumenta Koni 007 (slika 3.3.6.2) izvršili asistent Mr Branko Milovanović i prof Dr Slobodan Ašanin. Kao figurant, odnosno sa mernom letvom su radili Smiljana Cimeša i Nebojša Rančić. Na zapisniku su pored Branka Milovanovića radili i Milan Bošković i Rada Radulović

Nosači su postavljeni tako da je rebro bilo u horizontalnom položaju (slika 3.3.6.2.2). Na obeležene tačke postavljana je letva, dovodjena u vertikalni položaj, a onda je sa instrumenta očitavano merenje i upisivano u zapisnik. Ovde je veoma važan rad sa mernom letvom koji zahteva veliku koncentraciju, sigurnost i zbog uloženog napora može da se obavlja samo ograničeno vreme u kontinuitetu.

Čitanja su obavljana samo jednom, sa proverom nekoliko nasumice odabranih tačaka. Potrebno je obezbediti potpunu nepomerljivost nosača za vreme merenja, pa su merenja za dva nosača ponovljena radi kontrole.

Merenja početnih deformacijama su ovim putem obavljena za sve nosače serije A i serije B.



Slika 3.3.6.2.3. Rad sa mernom letvom i vodjenje zapisnika



Slika 3.3.6.2.4. Očitavanje vrednosti

3.4 NEPOSREDNA PRIPREMA ZA ISPITIVANJE

Zbog nemogućnosti kompletiranja svih potrebnih uređaja za ispitivanje na Gradjevinskom fakultetu u Beogradu, a uz obezbeđenje svih uslova za vršenje eksperimenata na Gradjevinskom fakultetu u Podgorici, od opreme i najmodernijih uređaja do iskusnih saradnika odlučeno je da se eksperimenti izvrše na Gradjevinskom fakultetu u Podgorici.

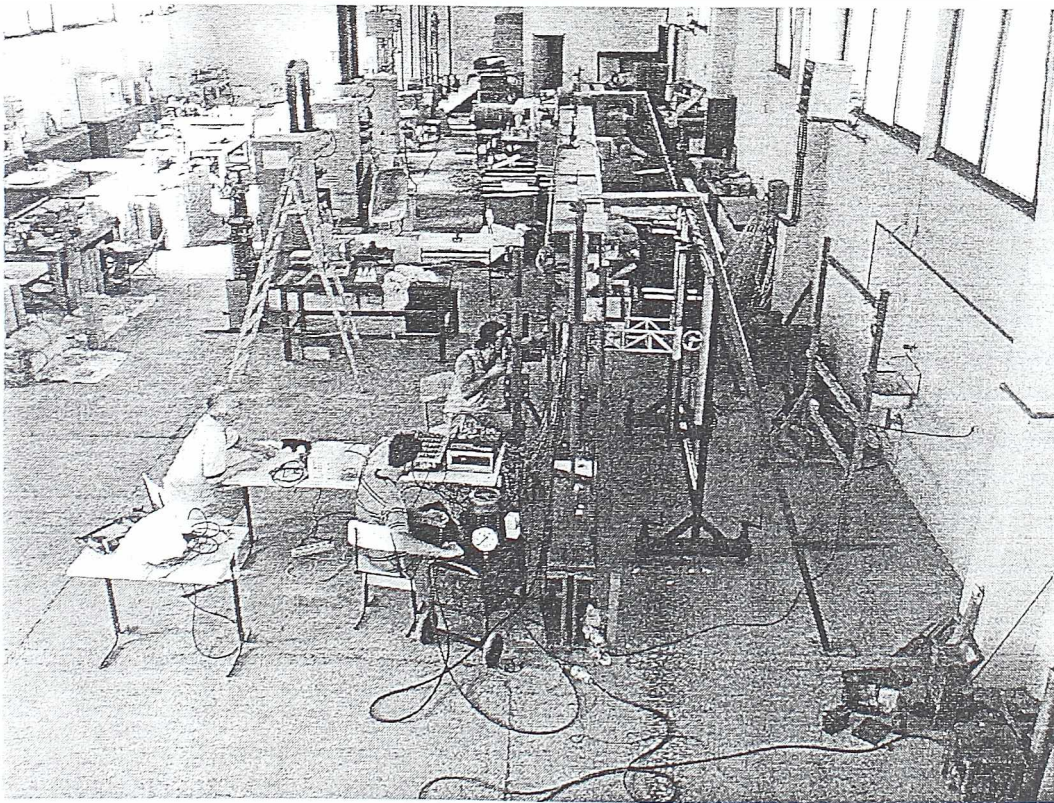
Na Gradjevinskom fakultetu u Podgorici sem ispitivanja u drugim oblastima, u skorije vreme su izvršena dva značajna i uspešna eksperimentalna ispitivanja u istoj oblasti kojom se bavi ovaj rad.

U okviru rada na doktorskoj disertaciji Duško Lučić je uradio obimno ispitivanje nekoliko serija centrično i ekscentrično napregnutih I nosača, a Biljana Šćepanović ispitivanje dve serije ekscentrično napregnutih nosača.

Gradjevinski fakultet u Podgorici raspolaže modernom opremom što je jedan od važnih uslova za dobijanje korisnih rezultata, a sa druge strane obučanim i iskusnim saradnicima za vršenje eksperimenata od čega u velikoj meri zavisi dobijanje pouzdanih rezultata.

Nosači su transportovani vozom do Podgorice, a sami eksperimenti su vršeni u nekoliko puta.

Eksperimenti su izvršeni u Laboratoriji za ispitivanje konstrukcija i materijala na Gradjevinskom fakultetu u Podgorici (slika 3.4.1)



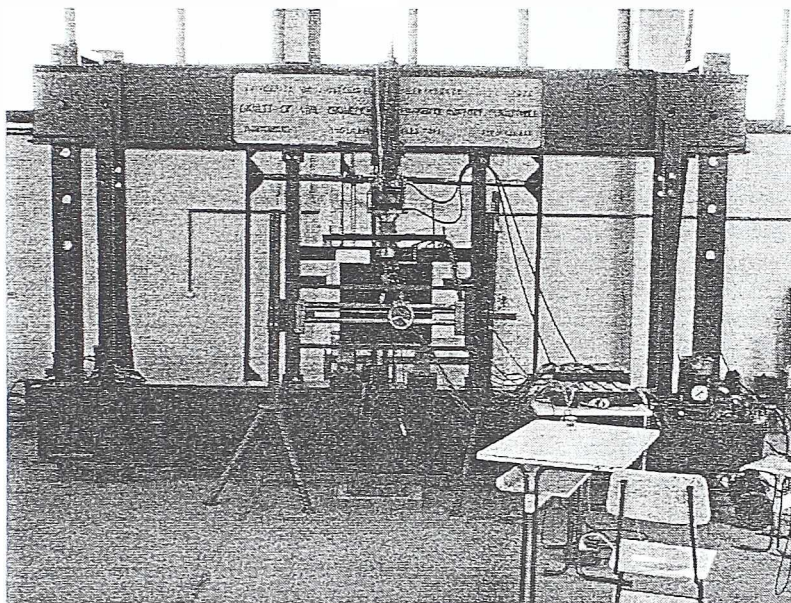
Slika 3.4.1

U izvršenju eksperimenata su učestvovali Dragan Čalić, Zoran Aleksić i Marko Osmajić sa Gradjevinskog fakulteta u Podgorici.

Fotografije su sa digitalnim foto aparatom Epson načinili Vladimir Kapor, Dragan Čalić i Biljana Šćepanović sa Gradjevinskog fakulteta u Podgorici i autor. Tehničku pomoć u radu sa fotoaparatom i fotografijama obezbedio je Vladimir Kapor.

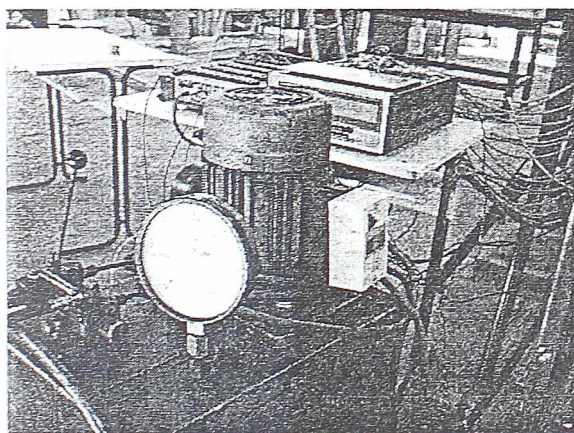
Pre izvršenja eksperimenata izvršene su pripreme rama za ispitivanje kao i dodatne pripreme nosača za samo ispitivanje.

Za samo ispitivanje nosača u Podgorici korišćen je postojeći zatvoreni ram, koji je korišćen u prethodnim sličnim ispitivanjima D.Lučića i B.Šćepanović, uz prilagodjavanje dimenzijama nosača u ovom ispitivanju (slika 3.4.2).

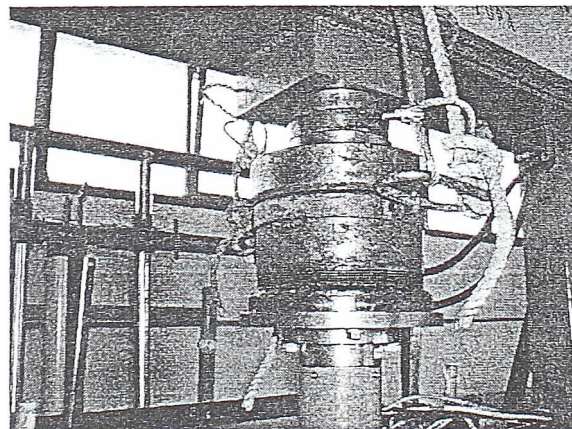


Slika 3.4.2. Postavka uredjaja za ispitivanje

Za nanošenje opterećenja korišćena je presa kapaciteta 800 kN (slika 3.4.3.b), povezana sa hidrauličkom pumpom (slika 3.4.3. a).



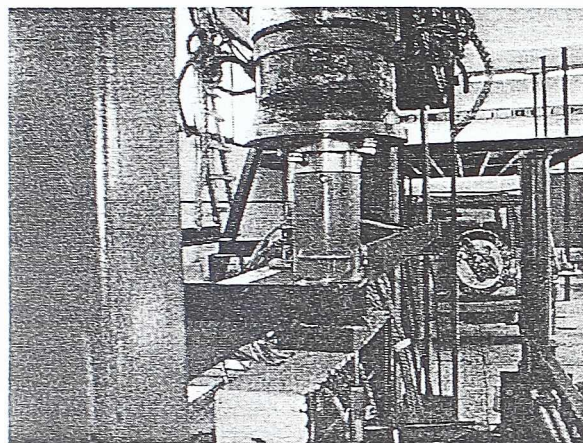
(a)



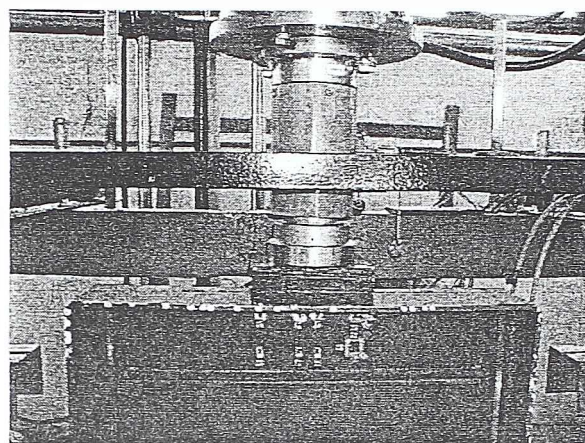
(b)

Slika 3.4.3 Hidraulička pumpa (a) i presa za nanošenje opterećenja (b)

Za merenje sile korišćen je TML-ov merač sile CLP-1MNB, sa kapacitetom 1000 kN i tačnošću 0.3 kN (slika 3.4.4)



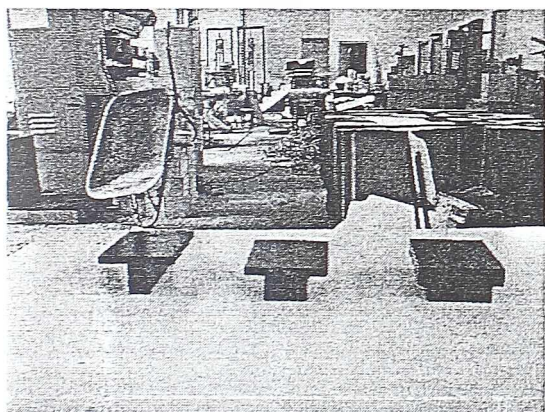
(a)



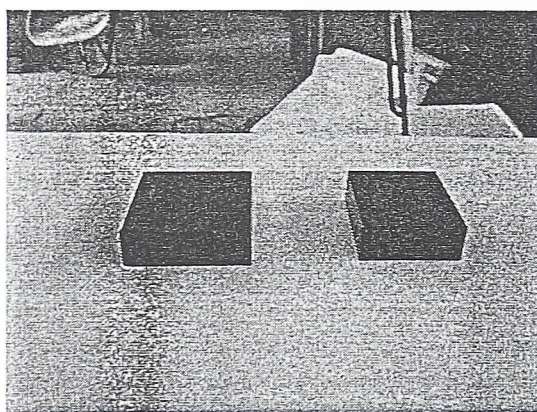
(b)

Slika 3.4.4 (a) i (b) Merač sile

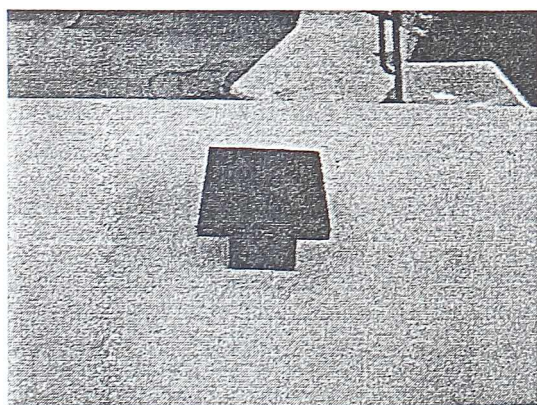
Za prenošenje opterećenja na pojas korišćeni su kruti blokovi širine jednake širini pojasa 12 cm, debljine 4 – 5 cm a promjenljive dužine u zavisnosti od opita i to od 2.5 do 15 cm (slika 3.4.5)



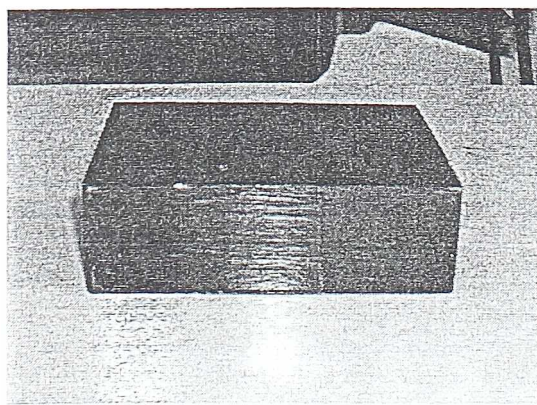
(a)



(b)



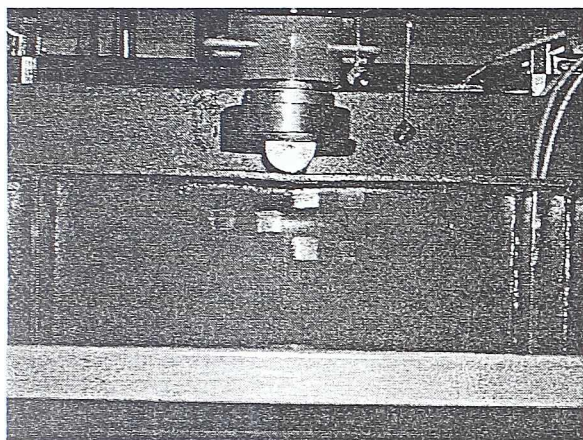
(c)



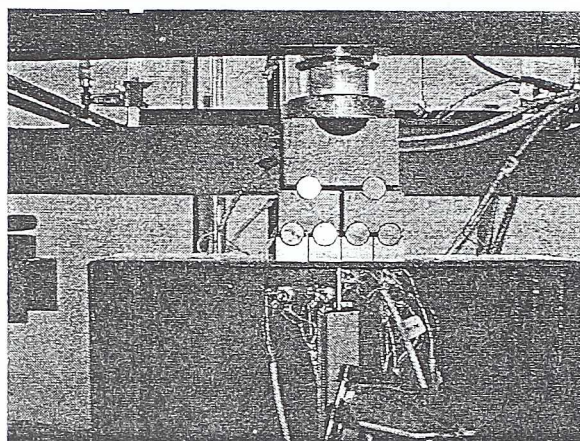
(d)

Slika 3.4.5 Blokovi za nanošenje opterećenja (a) 2.5, 5, 7.5; (b) 10, 12.5 cm; (c) 5 cm; (d) 15 cm

Pored toga korišćena je i poluoblica za opterećenje $c=0$, a radi ispitivanja uticaja načina unošenja opterećenja korišćen je za dužinu $c=150$ mm specijalan blok za unošenje (distribuciju) opterećenja koji je koristio Duško Lučić u svojim eksperimentima a koji treba da obezbedi ravnomerno unošenje sile po celoj dužini c .



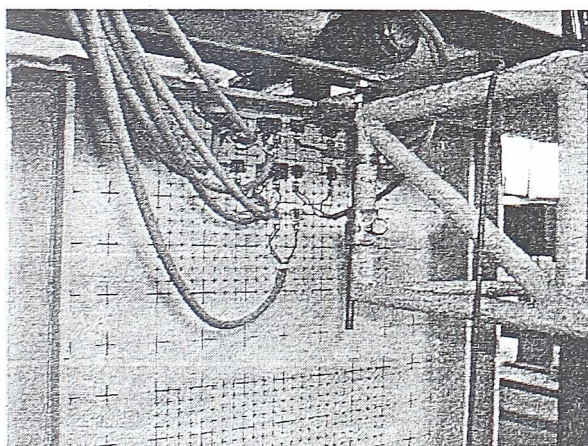
Slika 3.4.6 Poluoblica za unošenje opterećenja



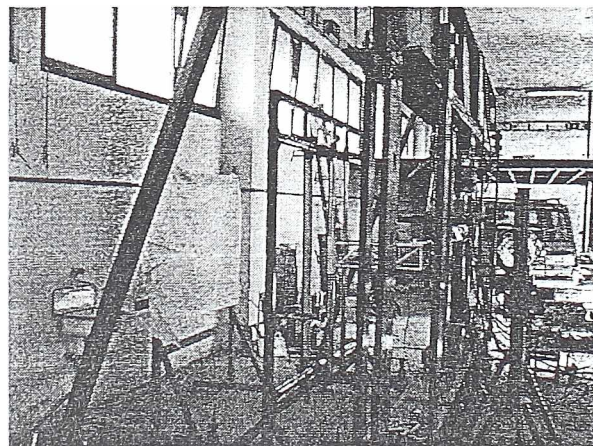
Slika 3.4.7 Blok za distribuciju opterećenja

Za merenje ugiba korišćena su tri TML-ova ugibomera SDP-100C, sa hodom od 100 mm i tačnošću 0.01 mm (slika 3.4.7, slika 3.4.8).

Za merenje bočnih pomeranja rebra korišćen je jedan ugibomer postavljen na vertikalni ram koji je konstruisao D. Lučić, korišćen pri ranijim sličnim ispitivanjima (slika 3.4.9).

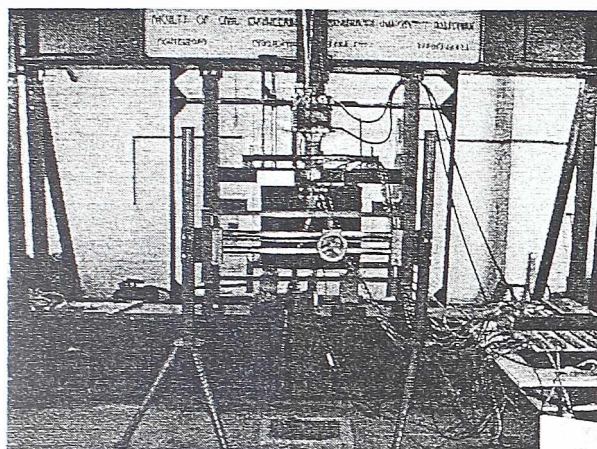


Slika 3.4.8 Ugibomer

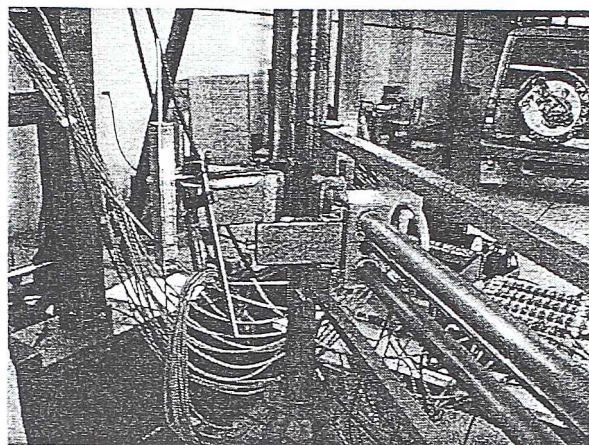


Slika 3.4.9 Ram sa ugibomerom

Za merenja ugiba pojasa korišćen je takodje specijalno konstruisan uređaj, korišćen u ranijim ispitivanjima, koji ima horizontalni klizač po kome se kreće platforma sa ugibomerom. Projektanti konstrukcije B.Pajović i D.Lučić (slika 3.4.10).



(a)



(b)

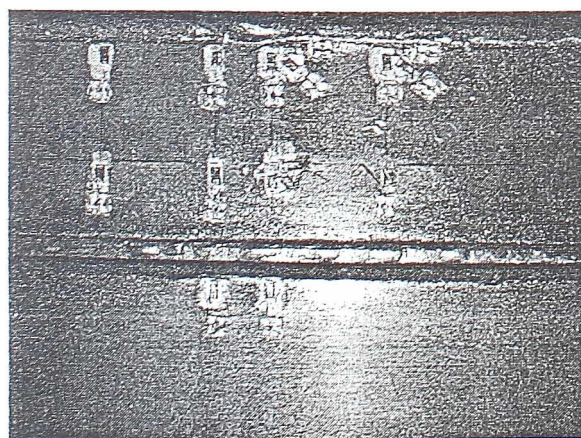
Slika 3.4.10 (a) Uređaj za merenje ugiba nožice (b) platforma sa ugibomerom

Za registrovanje merenja merača sile, ugibomera i memih traka korišćen je TML-ov statički memi most TDS-303 Data Logger (slika 3.4.11). Sva čitanja su registrovana u fajlovima na disketi. Tokom testiranja na monitoru su praćeni pojedini izabrani rezultati i to veličina sile sa merača sile, veličina pomeranja rebra van njegove ravni u izabranoj karakterističnoj tački i veličina pomeranja sredine opterećenog pojasa.



Slika 3.4.11 Statički memi most

Za merenje dilatacija korišćene su većinom Hottinger pojedinačne merni trake i odredjen broj rozeta pod 45° (slika 3.4.12). Za lepljenje memih traka je korišćen Hottinger brzovezujući lepak X-60.



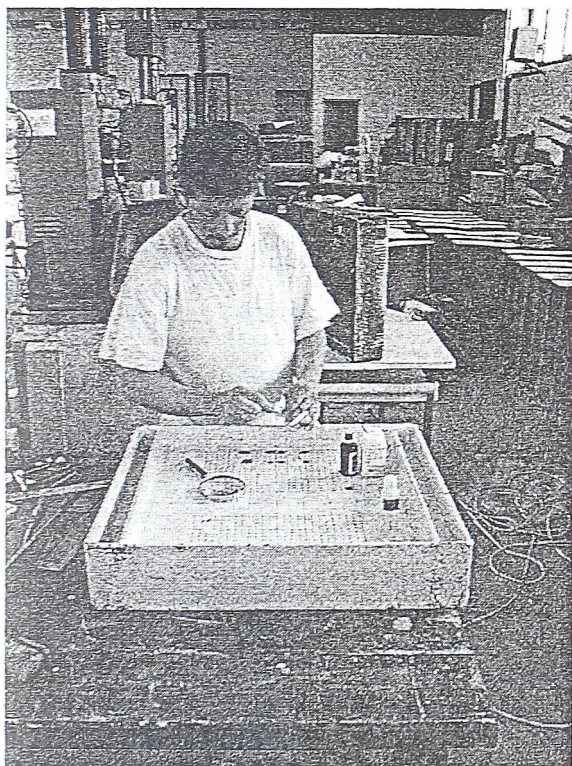
Slika 3.4.12. Merni trake na nosaču

Kod pojedinih nosača je predviđeno samo merenje pomeranje, dok su kod većine nosača merene i dilatacije u određenim tačkama.

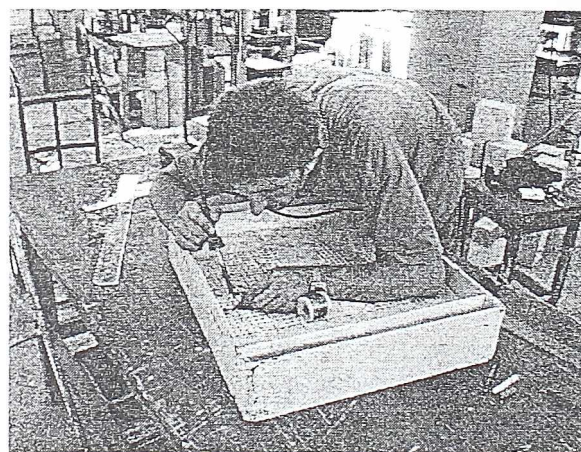
U okviru priprema nosača za ispitivanje izvršeno je dodatno obeležavanje položaja mernih traka na rebru i pojasu kod nosača kojih je predviđena upotreba mernih traka. Pri tome morao se obezbediti što preciznije položaj parova mernih traka na prednjoj i zadnjoj strani rebra koje je trebalo da odgovaraju jedna drugoj.

Uglavnom su korišćene pojedinačne meerne trake (na rebru vertikalna, a na pojasu horizontalne u pravcu pružanja pojasa. Karakteristični raspored mernih traka za pojedine nosače dat je na slikama .

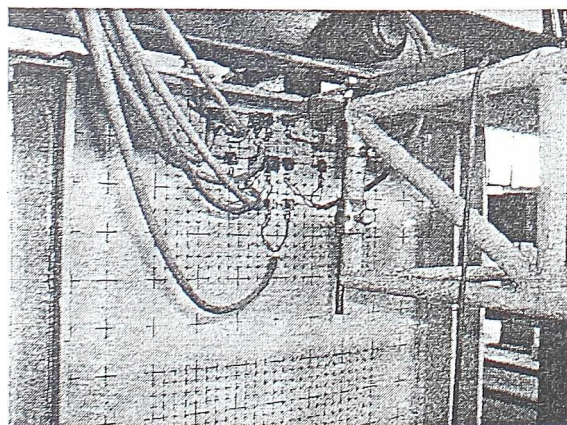
Lepljenje mernih traka je obavio Zoran Aleksić (slika 3.4.13) , njihovo povezivanje sa terminalima (slika 3.4.14), kao i povezivanje sa kablovima i statičkim mernim mostom (slika 3.4.15) obavio je Dragan Čalić.



Slika 3.4.13 Lepljenje mernih traka



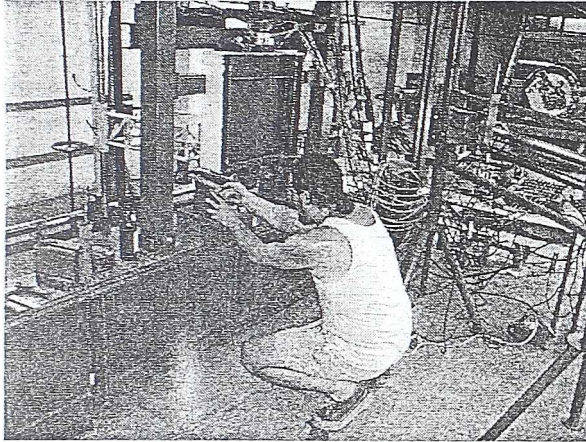
Slika 3.4.14 povezivanje mernih traka sa terminalima



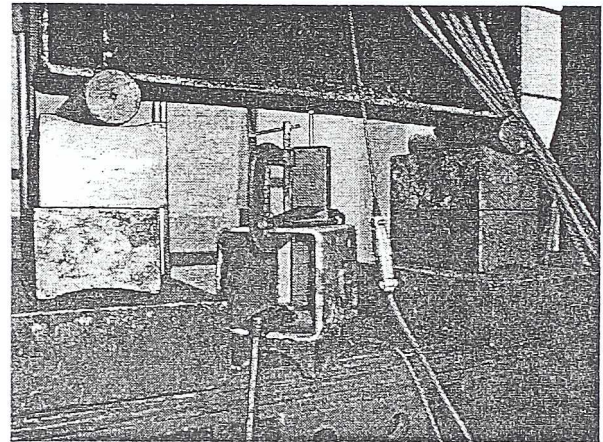
Slika 3.4.15 Merne trake povezane sa kablovima

3.5 TOK EKSPERIMENATA

Nakon pripreme nosača, oni su postavljeni u ram za ispitivanje (slika 3.5.1) gde su podešavani svi detalji: položaj oslonaca (slika 3.5.2), prese, merača sile, pločice za unošenje opterećenja (slika 3.5.3). Ovo su obavljali Marko Osmajić i Dragan Čalić.

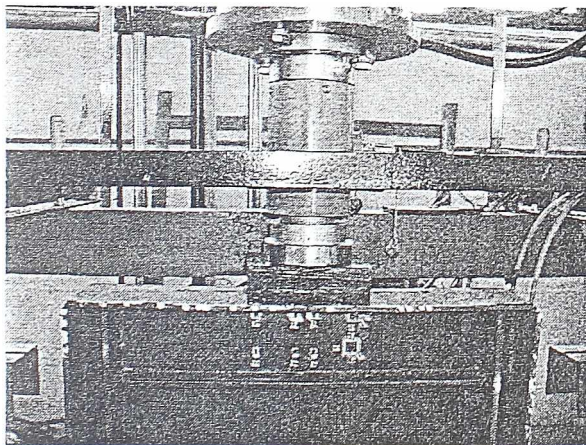


Slika 3.5.1 Postavljanje nosača u ram

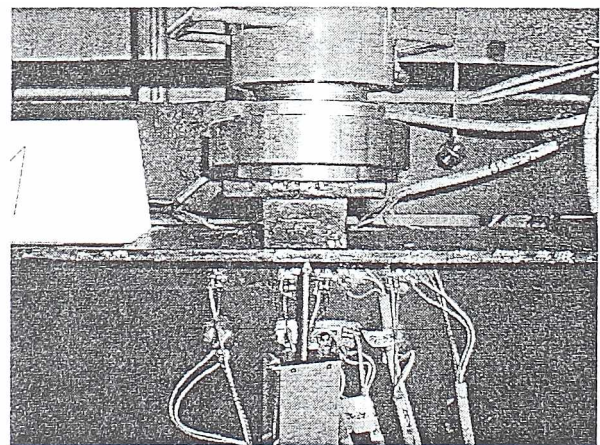


Slika 3.5.2 Oslonci nosača

Nakon toga povezivane su mernе trake sa kablovima koji vode do statičkog mernog mosta (slika 3.5.4) i postavljeni ugibomeri za praćenje ugiba gornjeg (slika 3.5.4) i donjeg pojasa (slika 3.5.5) i ugibomer za praćenje deformacija rebra (slika 3.5.6).



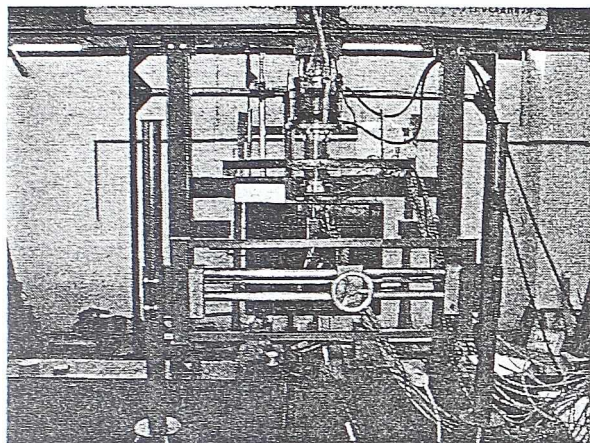
Slika 3.5.3 Priprema nosača u ramu



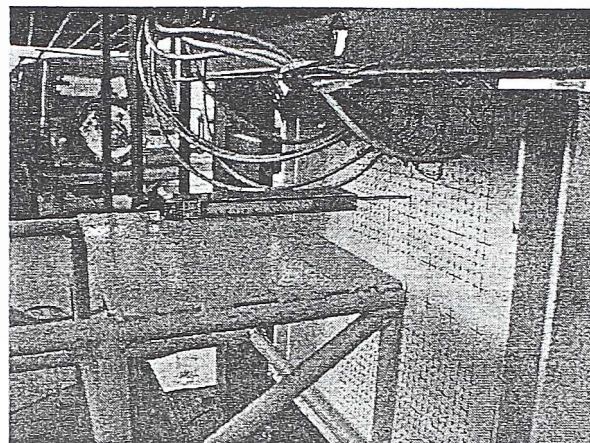
Slika 3.5.4 Povezani kablovi i postavljen ugibomer

Ugibomer na donjem pojasu je bio fiksiran na sredini raspona i postavljen ispod rebra. Ugibomer za praćenje ugiba gornjeg pojasa bio je postavljen na specijalni ram, sa zadnje strane nosača, koji je preko specijalnog sistema omogućavao pomeranje ugibomera i očitavanje ugiba u više izabranih tačaka, za koje vreme sila nije menjana.

Ugibomer za merenje pomeranja rebra van njegove ravni nalazio se na drugom specijalnom ramu sa prednje strane nosača i preko dva sistema vodjica (horizontalnih i vertikalnih) omogućavao je dovodjenje ugibomera do željene tačke na rebru.



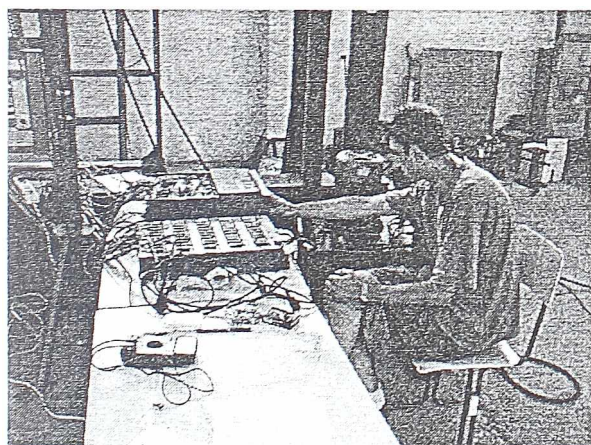
Slika 3.5.5 Postavljanje nosača u ram



Slika 3.5.6 Ugibomer za merenje pomeranja rebra upravno na njegovu ravan

Merač sile, ugibomeri i merne trake su bile povezane sa statičkim mernim mostom. U željenom trenutku se vrši automatsko očitavanje svih povezanih elemenata, što traje desetak sekundi. Podaci se automatski zapisuju na disketu. Pri tome je odabrana opcija da svako novo očitavanje bude zapisano u novi fajl.

Pre početka nanošenja opterećenja i pre svakog inkrementa opterećenja ugibomeri na rebru i gornjem pojasu su postavljan u izabrane tačke (na rebru: tačka na srednjem preseku 5 cm ispod gornjeg pojasa; na gornjem pojasu : tačka na sredini raspona 2 cm od ivice pojasa) radi dobijanja podataka za isto mesto pri automatskom učitavanju



Slika 3.5.7 Očitavanje podataka

Nakon provere svih elemenata počinalo je ispitivanje tako što je naneta veoma mala sila, nekoliko KN da bi došlo do uklinjavanja sistema i tada se izvrši prvo očitavanje, a nakon toga se sila povećava u definisanim inkrementima.

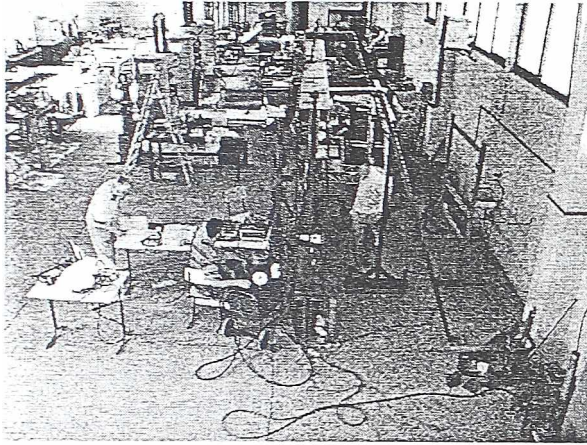
Sistemom za nanošenje sile i statičkim mernim mostom je upravljao Dragan Čalić (slika 3.5.7).

Nakon prvog nanošenja sile i nakon svih narednih inkremenata uvek se prvo izvrši automatsko čitanje svih povezanih elemenata u sistem.

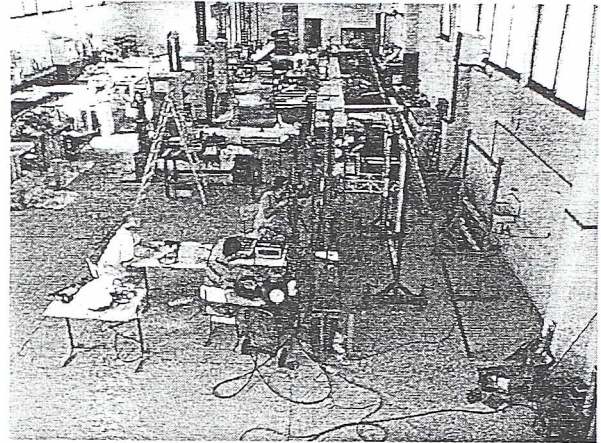
Posle toga se nakon odabranih inkremenata, pri konstantnoj sili, vrše očitavanja pomeranja u nizu tačaka rebra i gornjeg pojasa na sledeći način:

Izvrši se očitavanje podataka za 14 izabranih tačaka na srednjem preseku rebra, tako što se pomoću specijalnog rama ugibomer pomera do željene tačke i vrši automatsko očitavanje i beleženje podataka. Pri tome se automatski učitavaju podaci sa svih mernih mesta što može da služi za kontrolu stabilnosti sistema pri odredjenom nivou sile. Nakon toga se pomoću ugibomera na gornjem pojasu očitaju podaci u 11 izabranih tačaka, tako što se pomoću njegovog sistema za

navodjenje ugibomer dovede do tih tačaka i izvrši automatsko očitavanje i beleženje podataka. Sa ugibomerima je radio Marko Osmajić (slika 3.5.8 a i b).



Slika 3.5.8a Očitavanje ugiba na rebu



Slika 3.5.8b Očitavanje ugiba na pojasu

Pošto na statičkom mernom mostu postoji displej na kome je moguće pratiti vrednosti merenja sa odabranih mernih mesta, praćene su vrednosti sile i čitanja ugibomera na rebu i pojasu.

Sila je povećavana u početku u većim inkrementima. Pošto je očekivana vrednost granične sile bila preko 130 kN, do sile od 100 kN inkrementi su bili po 20 kN, nakon toga prvo po 10 kN, a onda u zavisnosti od slučaja opterećenja po 5 kN. Detaljna očitavanja su vršena obično posle svakog drugog inkrementa sile.

Dostizanje granične vrednosti sile se manifestovalo tako što se sila nije mogla više povećavati dok su se registrovane deformacije rebra i pojasa i dilatacija progresivno povećavale pri održavanju opterećenja i istovremeno je došlo do pojave vidljivog izbočenja na rebu u zoni unošenja opterećenja koje se takodje progresivno povećavalo.

Nakon izvesnog održanja sile (različitog u pojedinim opitima) radi isticanja ostvarene deformacije nosači su rasterećivani i merene su rezidualne deformacije rebra i pojasa.

Merenja su se vršila na isti način kao i u toku opterećenja, pomeranjem odgovarajućeg ugibomera do svake od predviđenih tačaka i automatskim očitavanjem i zapisivanjem na disketu. Za rebro su merene deformacije van rebra na istoj mreži od 11 X 11 tačaka A serije (ili 11 x 21 tačka B serije), na kojoj su merene i početne deformacije, a takodje još u dodatnom broju tačaka u zoni izraženog deformisanja rebra koji je zavisio od konkretnog oblika deformacije. Rezidualne deformacije pojasa su registrovane u istih 11 tačaka u kojima su vršena merenja i tokom opterećivanja.

3.6 PREGLED IZVRŠENIH EKSPERIMENATA

Ispitivanje nosača A1, A3, A5 i A7 obavljeno je u periodu od 5.7.2003 do 7.7.2003. Laboratorijski uslovi su bili : temperatura između 29° i 30°, a vlažnost vazduha između 42% i 52%.

Na nosačima A1, A3 i A7 su bile postavljene mernе trake prema rasporedu koji je dat u sledećem poglavlju. Na rebu su trake postavljane sa obe strane rebra, a na gornjem pojasu s gornje i donje strane na odgovarajućim mestima, kako bi se mogle razdvojiti dilatacije koje potiču od ravnog stanja naprežanja (membranske) i dilatacije od savijanja

Sam tok eksperimenta trajao je između 1 čas i 15 minuta do 1 čas i 45 minuta, a merenje rezidualnih deformacija rebra i pojasa još jedan čas.

Ispitivanje nosača A2, A4, A6, A11, A12, A13 i A15, B1, B3 i B7 obavljeno je u periodu od 3.9.2003 do 7.9.2003. Laboratorijski uslovi su bili : temperatura između 25° i 27°, a vlažnost vazduha između 35 i 50 %.

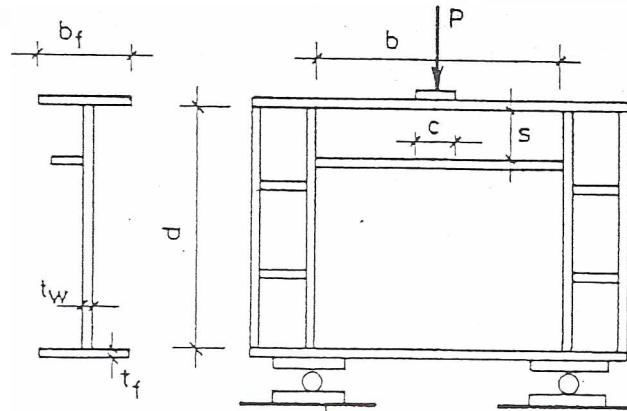
Na nosačima A2, A13 i B1 bile su postavljene merne trake prema rasporedu koji je dat u sledećem poglavlju, na način objašnjen za prvu grupu nosača. Sam tok eksperimenata trajao je između 40 minuta i 1 sat i 30 minuta, a merenje rezidualnih deformacija rebra i pojasa još od 35 do 55 minuta.

Ispitivanje nosača B2, B5 i B17, A14, A16 i A17 obavljeno je između 19.9.2003 i 21.9.2003. Laboratorijski uslovi su bili : temperatura između 25° i 29°, a vlažnost vazduha između 50 i 58 %.

Na nosačima B2, B5 i A17 bile su postavljene merne trake prema rasporedu koji je dat u sledećem poglavlju, na način objašnjen za prvu grupu nosača. Sam tok eksperimenata trajao je između 45 minuta i 1 sat, a merenje rezidualnih deformacija rebra i pojasa još od 30 do 45 minuta.

4 REZULTATI EKSPERIMENATA

U toku eksperimenata ukupno je izvršeno 20 testiranja. Pregled oznaka, dimenzija, načina opterećivanja i vrednosti dobijene granične nosivosti date su na slici 4.1 i u tabeli 4.1.



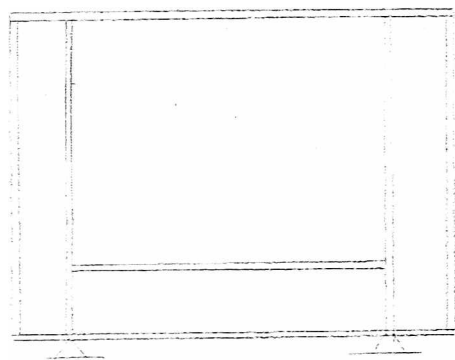
Slika 4.1 Osnovne oznake nosača

R.B.	OZN.	B	D	TW	BF	TF	C	SW	SF	E	HS	TS	SS	S	Pex
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(MPa)	(MPa)	(Gpa)	mm	mm	MPa	mm	(KN)
1	A1	500.00	500.00	4.00	120.00	8.00	50.00	280.00	283.00	205.00	0	0.0	283	0	165.00
2	A2	500.00	500.00	4.00	120.00	8.00	150.00	280.00	283.00	205.00	0	0.0	283	0	215.00
3	A3	500.00	500.00	4.00	120.00	8.00	50.00	280.00	283.00	205.00	30	8.0	283	100	183.00
4	A4	500.00	500.00	4.00	120.00	8.00	25.00	280.00	283.00	205.00	30	8.0	283	100	180.00
5	A5	500.00	500.00	4.00	120.00	8.00	100.00	280.00	283.00	205.00	30	8.0	283	100	225.00
6	A6	500.00	500.00	4.00	120.00	8.00	125.00	280.00	283.00	205.00	30	8.0	283	100	259.00
7	A7	500.00	500.00	4.00	120.00	8.00	150.00	280.00	283.00	205.00	30	8.0	283	100	255.00
8	A11	500.00	500.00	4.00	120.00	8.00	100.00	280.00	283.00	205.00	30	8.0	283	0	199.00
9	A12	500.00	500.00	4.00	120.00	8.00	25.00	280.00	283.00	205.00	30	8.0	283	0	154.60
10	A13	500.00	500.00	4.00	120.00	8.00	R150.00	280.00	283.00	205.00	30	8.0	283	0	230.00
11	A14	500.00	500.00	4.00	120.00	8.00	0.00	280.00	283.00	205.00	30	8.0	283	100	165.90
12	A15	500.00	500.00	4.00	120.00	8.00	0.00	280.00	283.00	205.00	30	8.0	283	0	143.30
13	A16	500.00	500.00	4.00	120.00	8.00	R150.00	280.00	283.00	205.00	30	8.0	283	100	244.60
14	A17	500.00	500.00	4.00	120.00	8.00	75.00	280.00	283.00	205.00	30	8.0	283	100	194.30
15	B1	1000.00	500.00	4.00	120.00	8.00	50.00	280.00	283.00	205.00	0	0.0	283	0	140.00
16	B2	1000.00	500.00	4.00	120.00	8.00	150.00	280.00	283.00	205.00	0	0.0	283	0	179.00
17	B3	1000.00	500.00	4.00	120.00	8.00	50.00	280.00	283.00	205.00	30	8.0	283	100	165.00
18	B5	1000.00	500.00	4.00	120.00	8.00	100.00	280.00	283.00	205.00	30	8.0	283	100	200.00
19	B7	1000.00	500.00	4.00	120.00	8.00	150.00	280.00	283.00	205.00	30	8.0	283	100	244.00
20	B17	1000.00	500.00	4.00	120.00	8.00	150.00	280.00	283.00	205.00	30	8.0	283	100	234.60

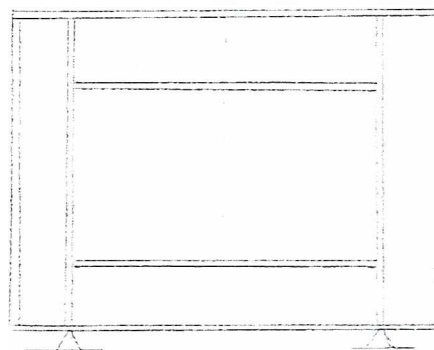
Tabela 4.1. Podaci o ispitivanim nosačima

Nosači sa jednocifrenom oznakom A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 i B1, B2, B3, B5 i B7 su nosači koji su prvi put bili ispitivani u prethodno neopterećenom stanju. Nosači označeni "bold" oznakama su nosači bez podužnih ukrućenja. Ostali nosači su imali podužna ukrućenja na 100 mm od opterećenog pojasa. Svi nosači serije A i jedan nosač serije B su još jednom ispitivani u okrenutom položaju tako da je sada opterećivana prethodno neopterećeni pojas, a zona unošenja opterećenja praktično je bila nedeformisana nakon prvog eksperimenta. Ovaj postupak se primenjuje redovno u istraživanjima ovog problema u svetu, a opravdanost toga može se potvrditi i

iz rezultata ovog istraživanja. Nosači ovako ispitivani su označeni dvocifrenim oznakama pri čemu je druga cifra oznaka nosača pri prvom testiranju. To su nosači A11, A12, A13, A14, A15, A16, A17 i B17. Pri tome nosači A11 i A12 nisu uopšte imali podužna ukrućenja. Nosači A13 i A15 (slika 4.2.a) nisu imali podužna ukrućenja u zoni unošenja opterećenja, blizu opterećenog pojasa, već kako su to originalni nosači A3 i A5, imali su u ovom testiranju podužna ukrućenja blizu neopterećenog pojasa, pa su u ovom slučaju tretirani kao nosači bez podužnih ukrućenja. Nosači A14, A16, A17 (slika 4.2.b) i B17 imali su sem ukrućenja u donjoj zoni (kako su to originalni nosači A4, A6, A7 i B7) koja ne utiču bitno na ponašanje nosača i naknadno dodata ukrućenja u zoni unošenja opterećenja blizu opterećenog pojasa i predstavljaju prema tome nosače sa podužnim ukrućenjima.



Slika 4.2.a Nosači A13 i A15



Slika 4.2.b Nosači A14, A16 i A17

Radi praćenja rezultata daje se pregled oznaka nosača (slika 4.3) povezan sa njihovim karakteristikama, odnosno da li su sa podužnim ukrućenjem ili ne i koja je dužina opterećenja, a ujedno su date i vrednosti granične nosivosti.

serija/ duž. opt	0	25	50	75	100	125	150	150 rasp
A bez ukruć	A15	A12	A1		A11		A2	A13
	143.3	154.6	165.0		199.0		215.0	230.0
A sa ukruć	A14	A4	A3	A17	A5	A6	A7	A16
	165.9	180.0	183.0	194.3	225.0	259.0	255.0	244.6
B bez ukruć			B1				B2	
			140.0				179.0	
B sa ukruć			B3		B5		B7	
			165.0		200.0		244.0	
B sa ukruć							B17	
							234.6	

Tabela 4.2 Pregled oznaka nosača i njihove nosivosti

Da bi se dobilo dovoljno podataka na osnovu koji bi mogli da se donose valjani zaključci odlučeno je da se mere sledeće veličine :

u pripremnoj fazi :

početne deformacije (imperfekcije) pomoću specijalnog rama u Beogradu i geodetskim putem – nivelmanom celog rebra,

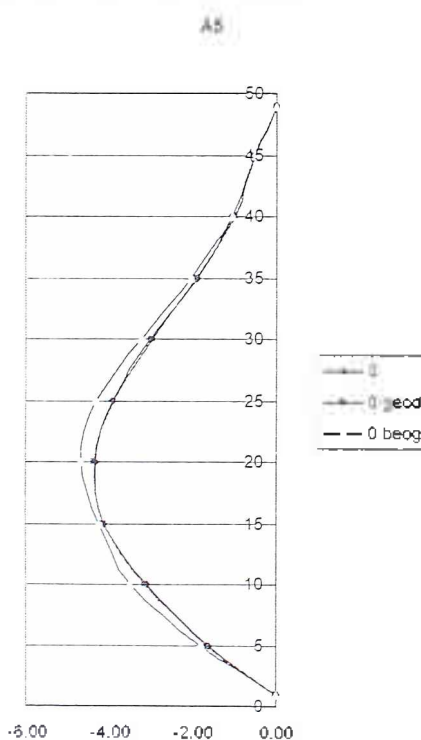
za vreme eksperimenata :

za svaki inkrement sile bočno pomeranje karakteristične tačke u srednjem profilu rebra (na 50 mm ispod opterećenog pojasa), vertikalno pomeranje tačke na sredini raspona na ivici gornjeg i na sredini donjeg pojasa i kod nosača koji su imali mernu traku dilatacije mernih traka, posle određenih izabranih inkremenata još su merena horizontalna pomeranja u 14 tačaka srednjeg profila rebra kako bi se dobio uvid u deformaciju celog profila od gornjeg do donjeg pojasa, zatim deformacije gornjeg pojasa u 9 ili 11 tačaka u njegovim ivičnim tačkama zavisno od dužine bloka za opterećenje.

posle eksperimenata :

rezidualne deformacije celog rebra i opterećenog pojasa u tačkama u kojima je mereno vertikalno pomeranje u toku eksperimenta i naknadno po sredini opterećenog pojasa na celom rasponu.

Veoma značajno u pripremi eksperimenata bilo je korišćenje dva nezavisna postupka za merenje početnih deformacija, kako bi se proverila pouzdanost merenja konstruisanog specijalnog rama za merenje deformacija rebra koji je svoju glavnu ulogu trebalo da ima za vreme odvijanja eksperimenata, odnosno kako bi se poredjenjem dve nezavisne metode obezbedila potpuna



pouzdanost podataka. Ovo je bilo važno zbog toga što istraživanja ovog tipa nisu ustaljena (uobičajena) na Građevinskom fakultetu u Beogradu i nije postojala odgovarajuća oprema. Ovo je i omogućilo i poboljšanje i korekciju prvobitne verzije rama, ali zbog nedostataka drugih pogodnih mernih instrumenata nije do kraja izvršeno njegovo završenje. Ustanovljeno je da se javlja razlika u merenim vrednostima do 10 % za koju se čini da ima sistemski karakter, ali pravi razlog nije utvrđen, pogotovu kada je nakon nemogućnosti kompletiranja cele postavke u Beogradu, odlučeno da se nastavi sa eksperimentima u Podgorici. Posle početka eksperimenata u Podgorici utvrđeno je skoro idealno poklapanje merenja koja su tamo vršena pomoću takođe posebno konstruisanog rama, koji je korišćen i u drugim eksperimentima, i rezultata geodetskih merenja u Beogradu. Kao primer ovih analiza daje se u tabeli 4.1 i na slici 4.1 prikaz rezultata merenja početnih imperfekcija srednjeg profila nosača A5 na tri načina.

napomena : dimenzije nosača na svim dijagramima su u cm a veličine deformacija u mm.

Slika 4.3 Poredjenje merenja deformacija

ASE												
tacka	1	3	5	7	8	9	10	11	12	13	14	
sila \ y	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	49	
0 podg	0.00	-0.54	-1.04	-1.88	-3.00	-3.92	-4.30	-4.12	-3.12	-1.60	0.00	
0 geod	0.00	-0.54	-0.98	-1.92	-2.96	-3.90	-4.34	-4.13	-3.12	-1.66	0.00	
0 beog	0.00	-0.52	-1.05	-2.03	-3.23	-4.30	-4.67	-4.24	-3.49	-1.80	0.00	

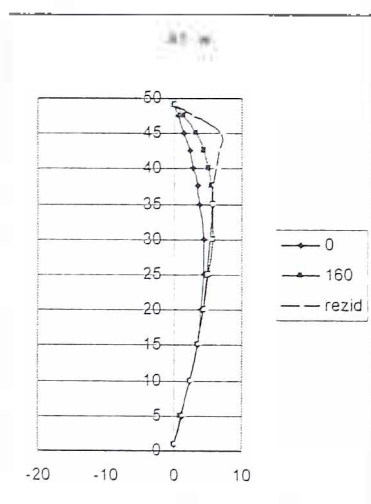
Tabela 4.3 Poredjenje vrednosti merenja deformacija

U sledećim delovima ovog poglavlja biće dati prikazi karakterističnih rezultata merenja koji ilustruju ponašanje nosača.

U poglavlju 4.1 su prikazane konturne linije koje odgovaraju početnim deformacijama i rezidualnim deformacijama, a zatim je dat dijagram koji predstavlja njihovu razliku, odnosno priraštaj deformacija usled opterećenja, što omogućava jasan uvid u ponašanje nosača pod opterećenjem. Ovde će biti ponovljeni ti dijagrami za nosač A1 (slika 4.4) kao primer. Dijagrami nisu dati redom po oznakama nosača već su tako raspoređeni da omogućavaju direktno određena poredjenja, a u legendi su dati podaci o dužini opterećenja i da li ima horizontalnih ukrućenja.



Slika 4.4. Konturne linije nosača A1

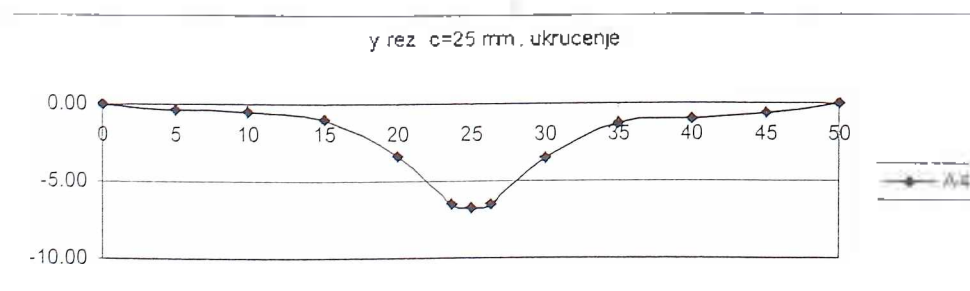


Slika 4.5 Srednji profil rebra

U poglavlju 4.2. su za karakteristične nosače prikazani vertikalni srednji profili rebra pri početnoj deformaciji, poslednji registrovani profil pre dostizanja loma i rezidualni profil.

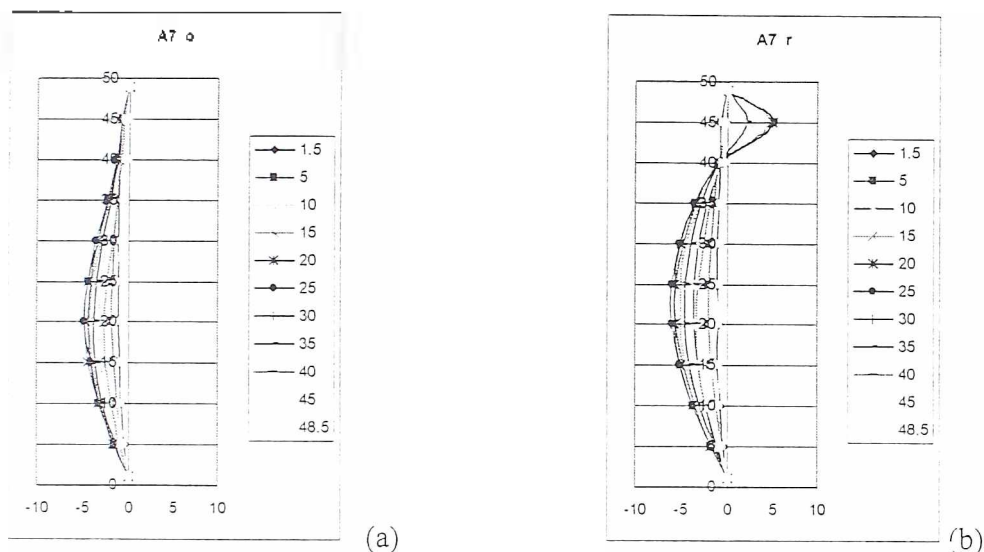
Ovi dijagrami ukazuju na karakter deformacije poprečnog preseka. Kao primer, ponavlja se dijagram za nosač A1 kao slika 4.5. U legendi je brojna vrednost najveće sile pri kojoj je registrovan poslednji profil.

U poglavlju 4.3 su prikazane rezidualne deformacije pojasa, prvo za nosače sa ukrućenjima, a onda i za nosače bez ukrućenja. Ovi dijagrami, kao i prethodni daju uvid u formiranje mehanizma loma. Dijagram za nosač A4 je ponovljen kao slika 4.6.



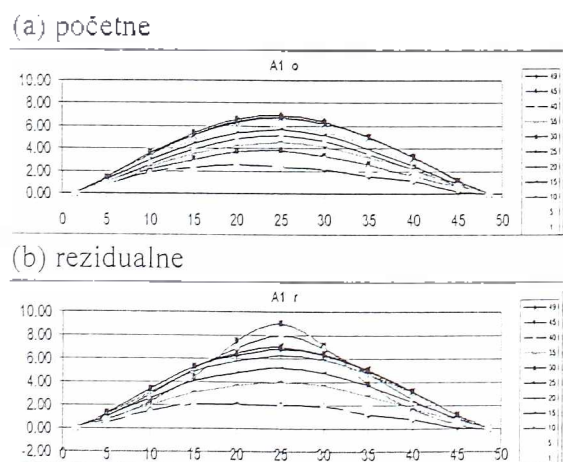
Slika 4.6. Rezidualne deformacije pojasa nosača A4

U poglavlju 4.4 je za jedan broj nosača prikazano po 10 vertikalnih profila koji obuhvataju ceo raspon nosača na po dve slike (pri početnoj deformaciji na jednoj i rezidualnoj deformaciji na drugoj). Radi ilustracije kao slika 4.7. biće ponovljeni dijagrami za nosač A7. Ovi dijagrami uz dijagrame konturnih linija pružaju uvid u prostiranje deformacije, kako po visini tako i po dužini rebra.

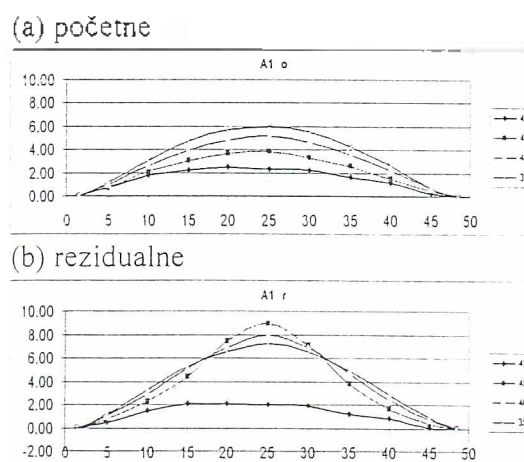


Slika 4.7 Nosač A7 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – vertikalni preseki rebra

U poglavlju 4.5 je prikazano po 10 horizontalnih preseka rebra koji obuhvataju celu visinu rebra pri početnoj i rezidualnoj deformaciji za jedan broj nosača, a u poglavlju 4.6 samo su izdvojeni horizontalni profili u zoni unošenja opterećenja. Ovi dijagrami ukazuju na rasprostiranje izbočenja po dužini rebra. Prikazani su ovde na slikama 4.8 i 4.9 kao primer dijagrami za nosač A1.



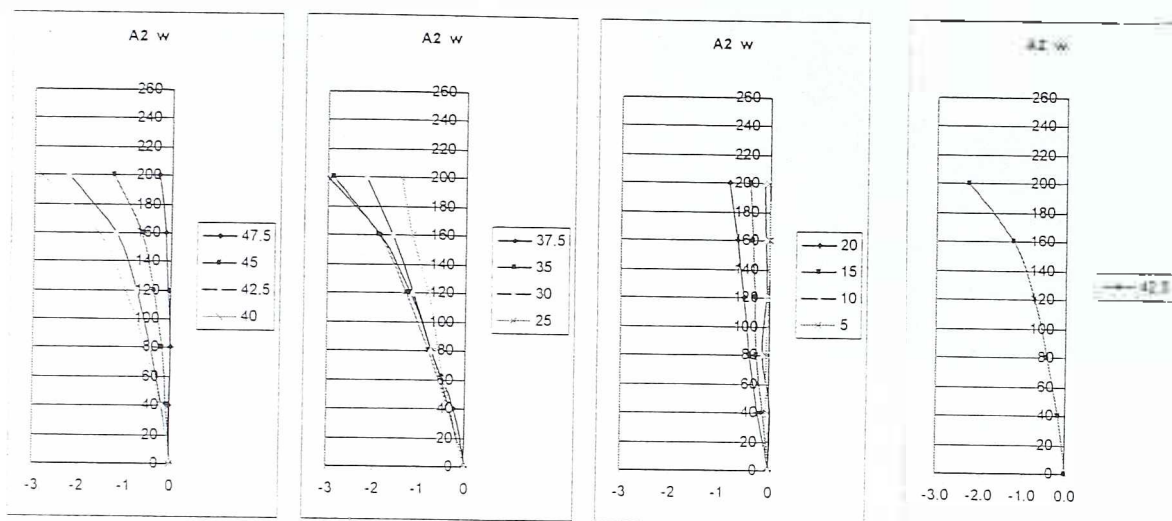
Slika 4.8 Nosač A1 deformacije
- horizontalni preseki rebra



Slika 4.9. Nosač A1 deformacije
- horizontalni preseki rebra u zoni
unošenja opterećenja

Uobičajeno je da se ponašanje nosača za vreme opterećenja ilustruje dijagramima tipa sila-ugib koji ukazuju na linerno odnosno nelinearno ponašanje nosača. U slučaju lokalnog izbočavanja gde nije unapred poznato gde će se pojaviti karakteristična deformacija izbor tačke može da predstavlja problem. Međutim kako je napred navedeno da je za niz inkremenata sile registrovan ugib u 14 tačaka srednjeg preseka rebra, to su u poglavlju 4.7 prikazani na po tri dijagrami za svih 14 tačaka odnosi sila-pomeranje, tokom porasta sile. A u poglavlju 4.8 su izdvojeni dijagrami za

karakterističnu tačku koji najbolje ukazuju na karakter ponašanja nosača. Kao ilustracija na slici 4.10 i 4.11 su prikazani navedeni dijagrami za nosač A 2. U legendi je data oznaka tačke preko njenog rastojanja od donje ivice rebra u cm.

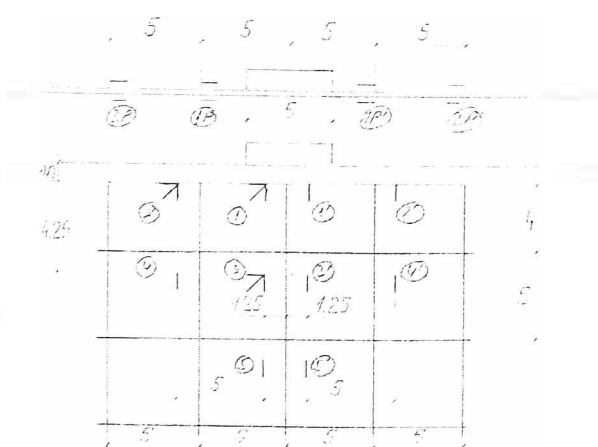


Slika 4.10 Nosač A2: pomeranja tačaka u srednjem vertikalnom profilu sa porastom sile

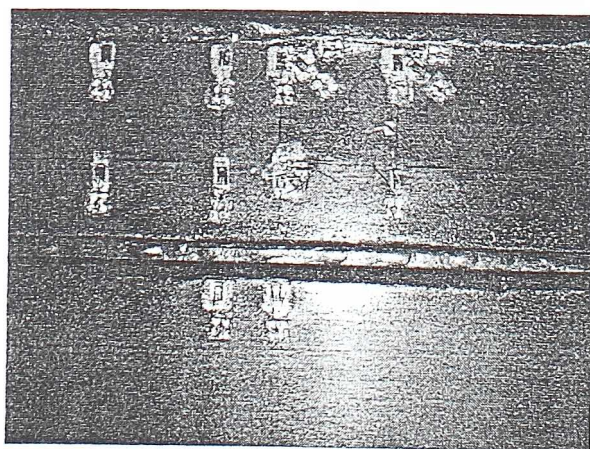
Slika 4.11 pomeranje tačke 42.5 sa porastom sile

Na jednom broju nosača za vreme ispitivanja bile su postavljene merne trake radi praćenja dilatacija i određivanja napona u pojedinim tačkama rebra i pojasa. Merne trake su bile postavljene na više mesta u zoni unošenja opterećenja na rebru u vidu pojedinačnih traka ili rozeta sastavljenih od pojedinačnih membranih traka. Na jednom mestu su bile postavljene i gotove rozete.

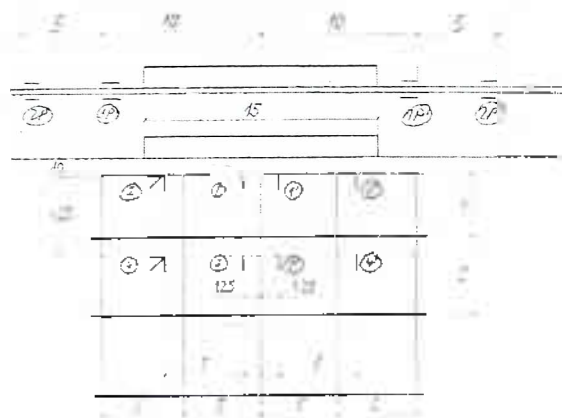
Neki karakteristični rasporedi su prikazani na sledećim slikama. Merne trake su bile postavljene sa obe strane rebra kako bi se razdvojile membranske od deformacija savijanja. Na prvih nekoliko nosača rozete su bile postavljene samo na jednoj polovini rebra, a na drugoj polovini su na odgovarajućim mestima bile postavljene pojedinačne merne trake radi kontrole simetrije. Nakon što je na osnovu prvih rezultata uočeno da postoji potpuna pravilnost u vrednostima, na ostalim nosačima su na dve polovine bile postavljene merne trake u različitim položajima po visini rebra kako bi se dobio potpuniji uvid u promenu napona u rebru.



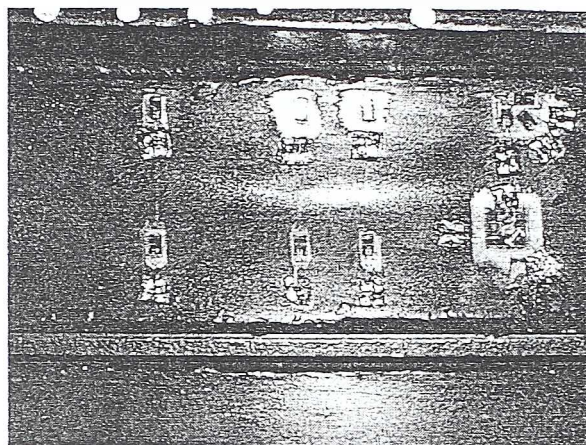
Slika 4.12 Raspored membranih traka na nosačima A1 i A3 sa prednje strane



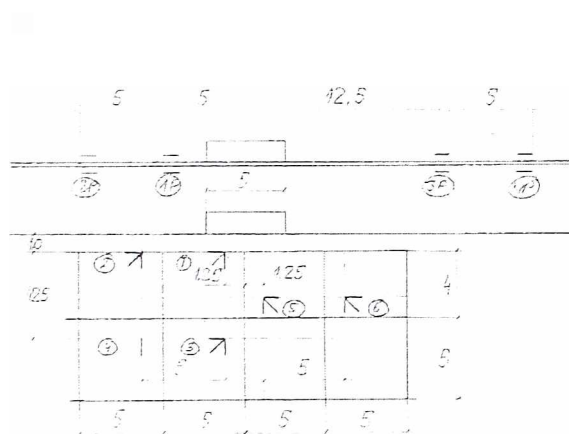
Slika 4.13 Merne trake na nosaču A3 sa zadnje strane



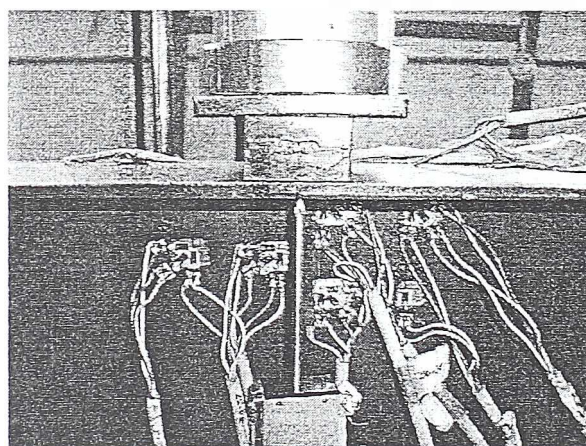
Slika 4.14 Raspored mernih traka na nosaču A7 sa prednje strane



Slika 4.15 Merne trake na nosaču A7 sa zadnje strane



Slika 4.16 Raspored mernih traka na nosaču B1 sa prednje strane



Slika 4.17 Merne trake na nosaču B1 sa zadnje strane

Na pojasu su mernе trake bile postavljene u zoni očekivanih deformacija (savijanja pojasa) kako bi se pratio eventualni razvoj plastičnih zglobova u pojasu. Mernе trake su bile postavljene sa gornje i donje strane pojasa kako bi se i ovde mogli razdvojiti membranski naponi od napona savijanja.

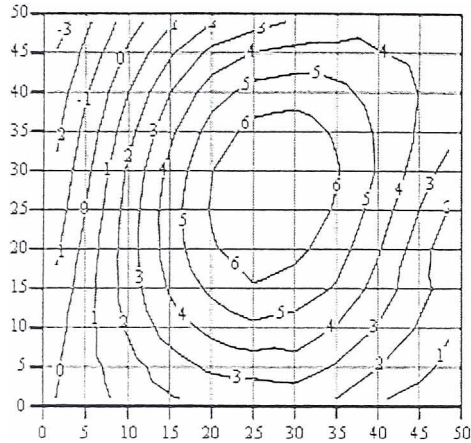
U odeljku 4.9 su prikazani neki karakteristični rezultati merenih dilatacija pomoću mernih traka

U odeljku 4.10 su prikazani naponi sračunati na osnovu podataka sa mernih traka. Naponi su razdvojeni i na membranski deo i deo koji potiče od savijanja, a prikazani su i glavni naponi pritiska na mestima pojedinih rozeta.

napomena: dimenzije nosača na svim dijagramima su u cm a veličine deformacija u mm.

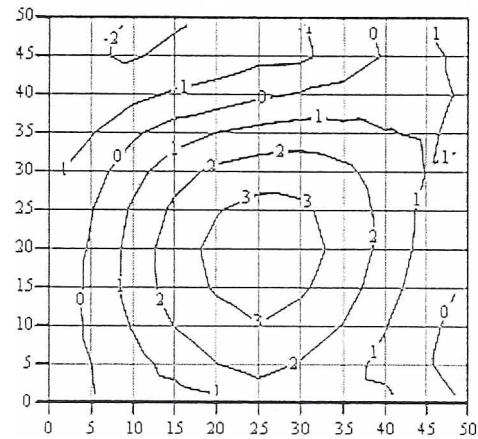
4.1. KONTURNE LINIJE

A1 $c = 50$ mm bez horizontalnog ukrućenja

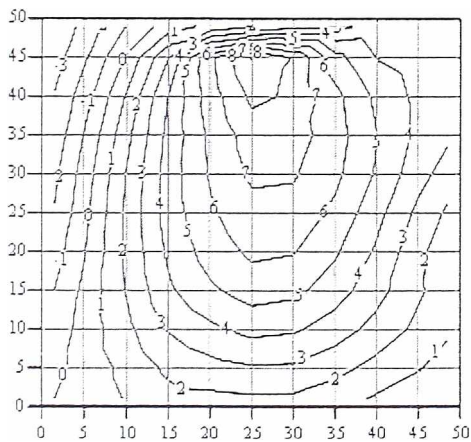


Slika 4.1.1 a. A1 početne deformacije

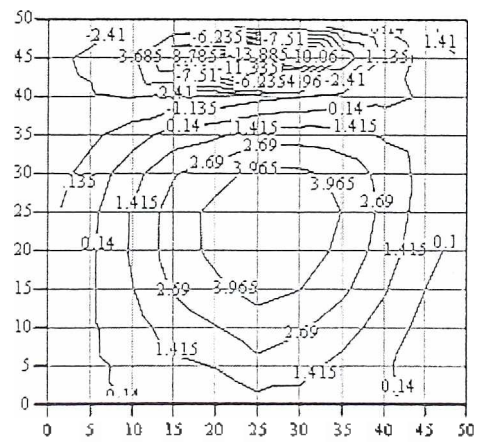
A3 $c = 50$ mm sa horizontalnim ukrućenjem



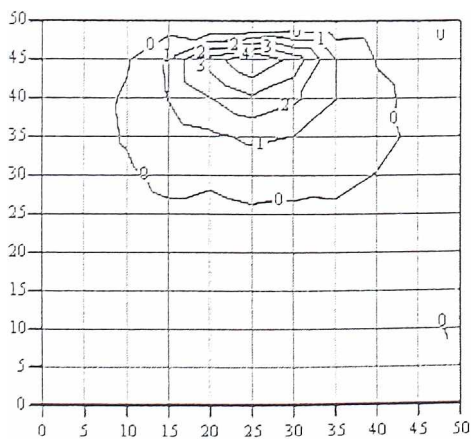
Slika 4.1.2 a. A3 početne deformacije



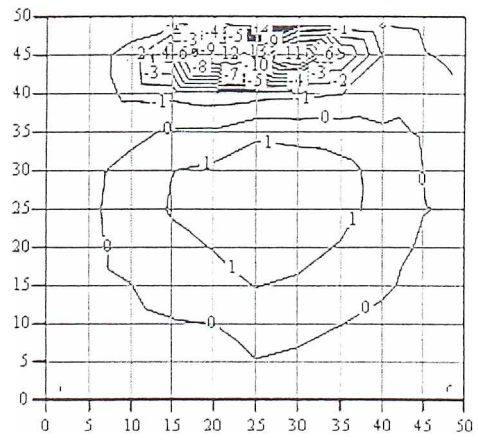
Slika 4.1.1 b. A1 rezidualne deformacije



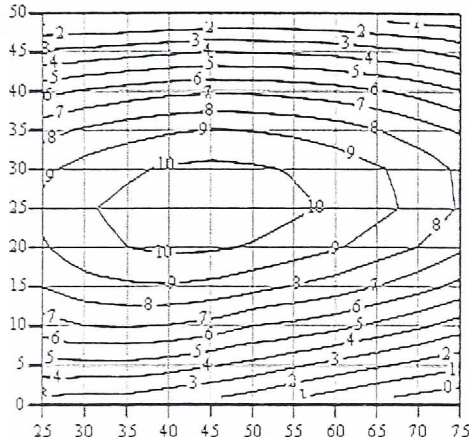
Slika 4.1.2 b. A3 rezidualne deformacije



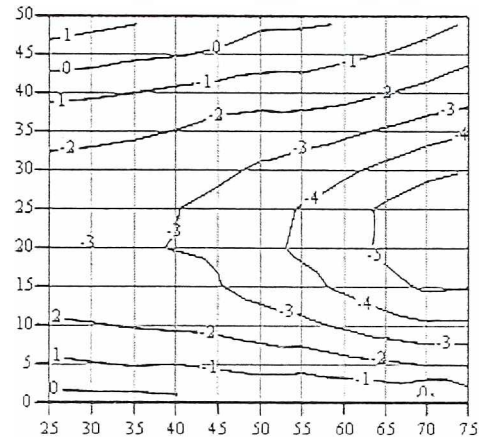
Slika 4.1.1 c. A1 priraštaj deformacija



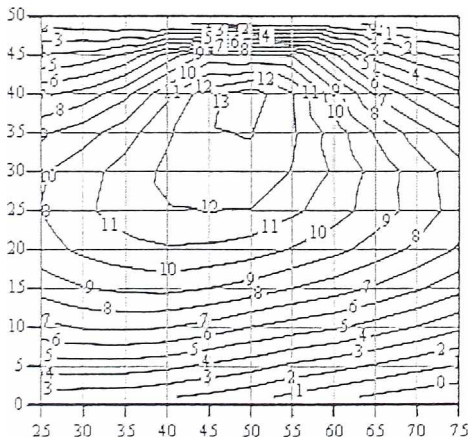
Slika 4.1.2 c. A3 priraštaj deformacija

B1 $c = 50$ mm bez horizontalnog ukrućenja

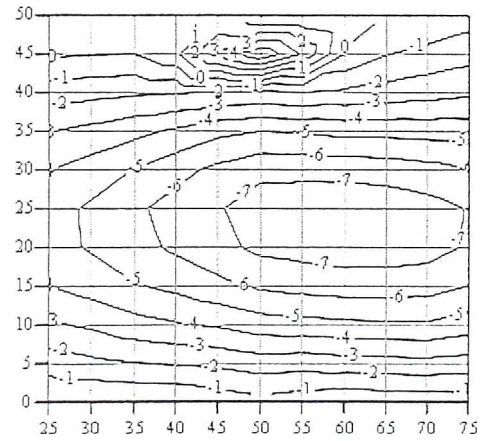
Slika 4.1.3 a. B1 početne deformacije

B3 $c = 50$ mm sa horizontalnim ukrućenjem

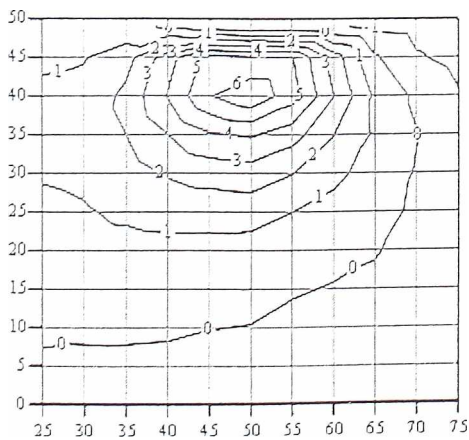
Slika 4.1.4 a. B3 početne deformacije



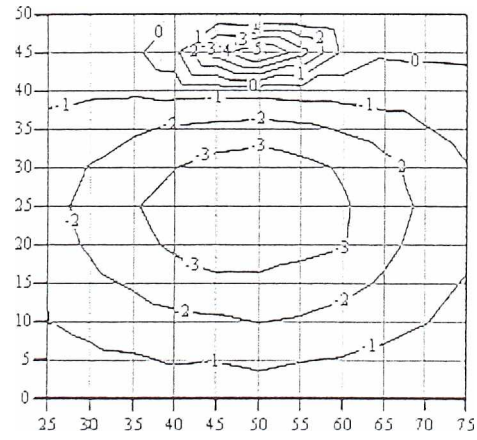
Slika 4.1.3 b. B1 rezidualne deformacije



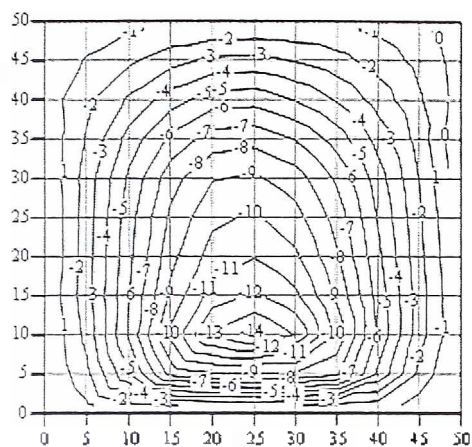
Slika 4.1.4 b. B3 rezidualne deformacije



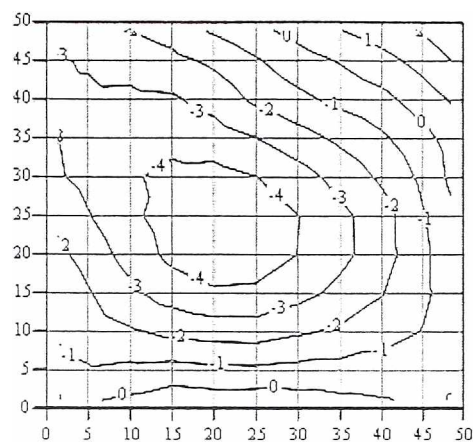
Slika 4.1.3 c. B1 priraštaj deformacija



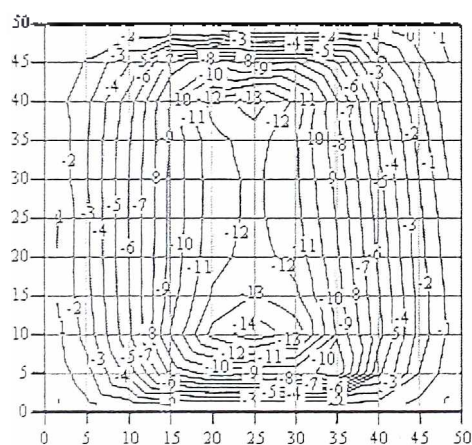
Slika 4.1.4 c. B3 priraštaj deformacija

A12 $c = 25$ mm bez horizontalnog ukućenja

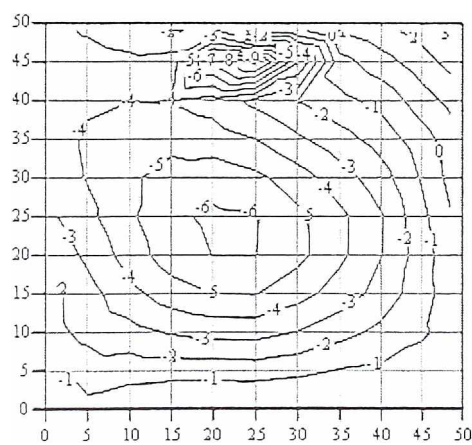
Slika 4.1.5 a. A12 početne deformacije

A4 $c = 25$ mm sa horizontalnim ukućenjem

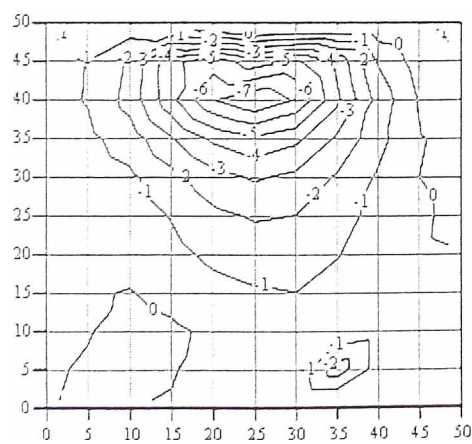
Slika 4.1.6 a. A4 početne deformacije



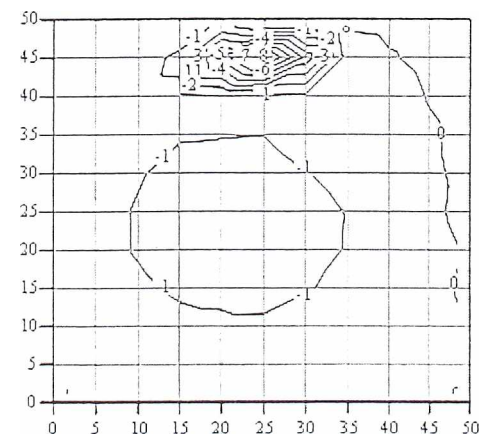
Slika 4.1.5 b. A12 rezidualne deformacije



Slika 4.1.6 b. A4 rezidualne deformacije

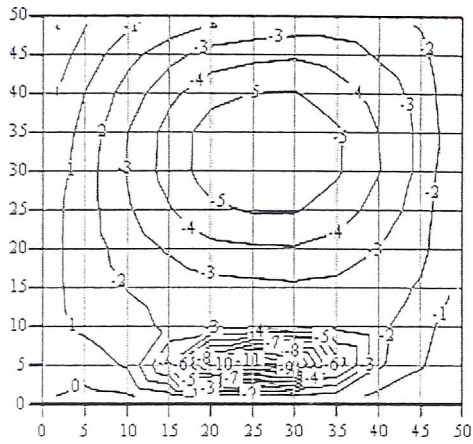


Slika 4.1.5 c. A12 priraštaj deformacija

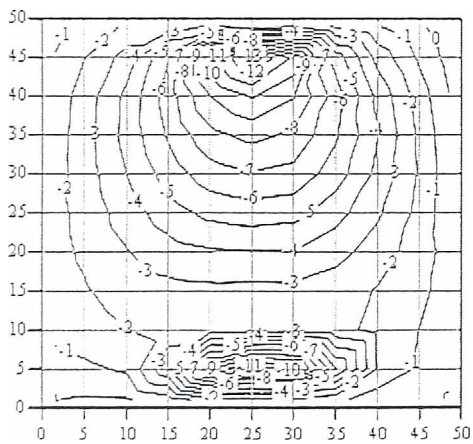


Slika 4.1.6 c. A4 priraštaj deformacija

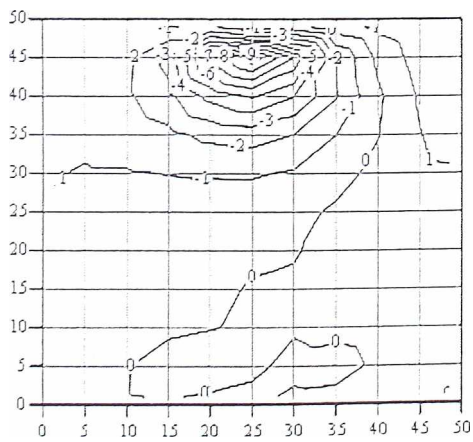
A15 $c = 0$ mm bez horizontalnog ukrucenja



Slika 4.1.7 a. A15 početne deformacije

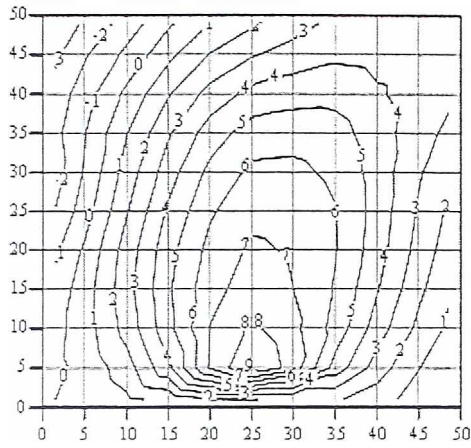


Slika 4.1.7 b. A15 rezidualne deformacije



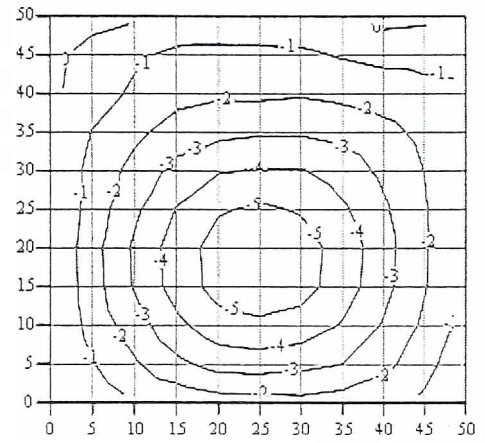
Slika 4.1.7 c. A15 priraštaj deformacija

A11 $c = 100$ mm bez horizontalnog ukrućenja

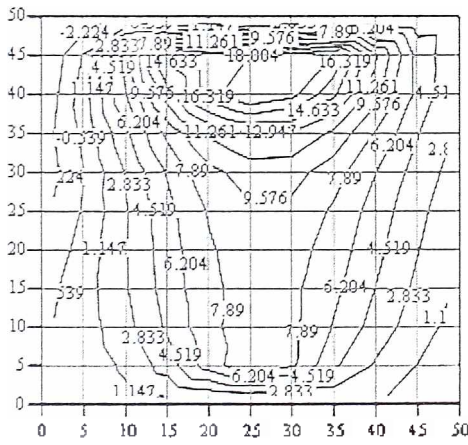


Slika 4.1.8 a. A11 početne deformacije

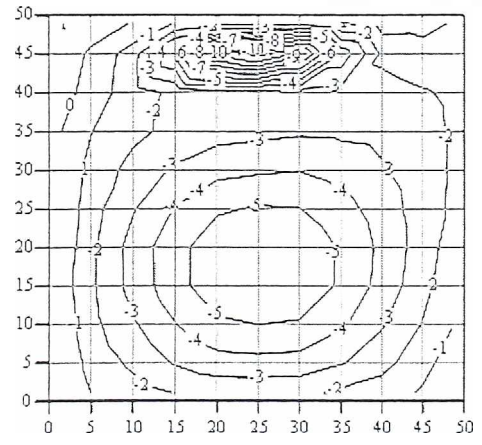
A5 $c = 100$ mm sa horizontalnim ukrućenjem



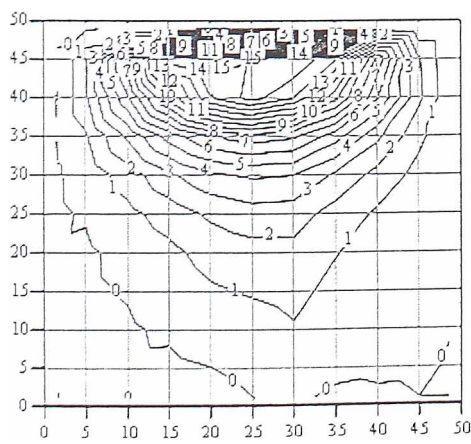
Slika 4.1.9 a. A5 početne deformacije



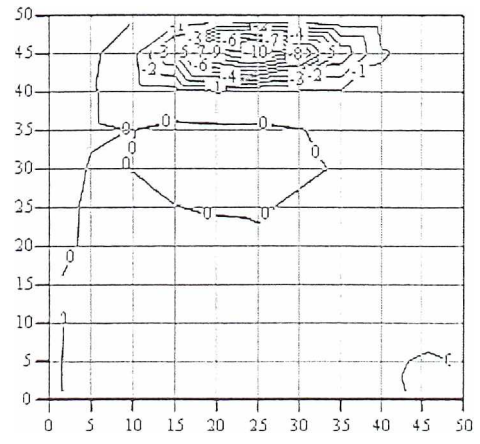
Slika 4.1.8 b. A11 rezidualne deformacije



Slika 4.1.9 b. A5 rezidualne deformacije

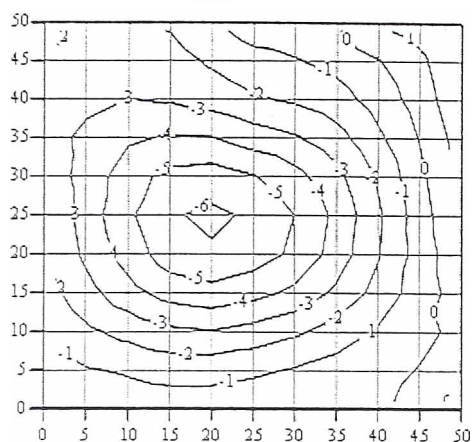


Slika 4.1.8 c. A11 priraštaj deformacija

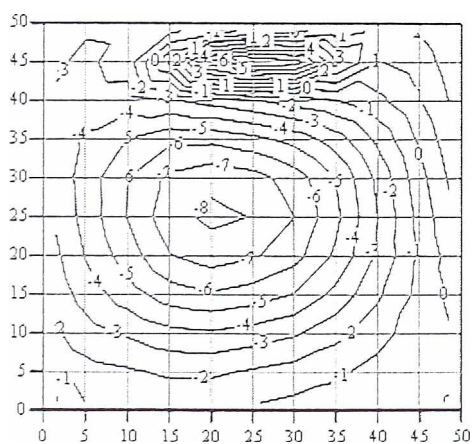


Slika 4.1.9 c. A5 priraštaj deformacija

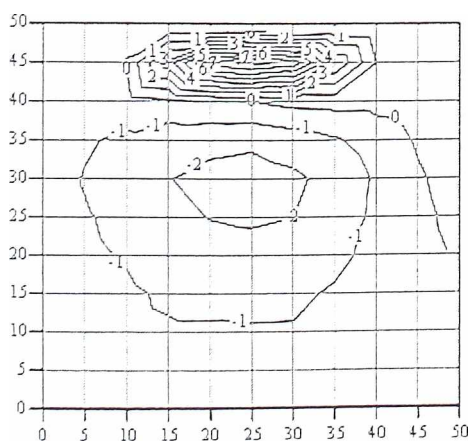
A6 $c = 125$ mm sa horizontalnim ukrucenjem



Slika 4.1.10 a. A6 početne deformacije

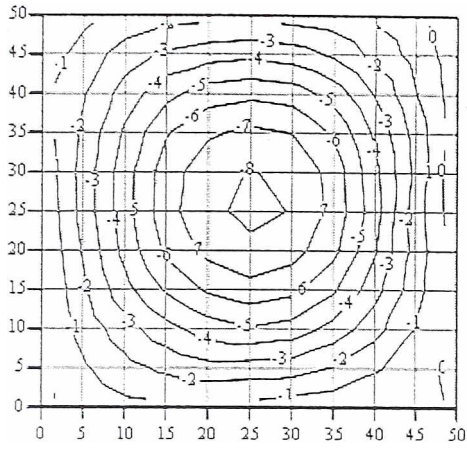


Slika 4.1.10 b. A6 rezidualne deformacije



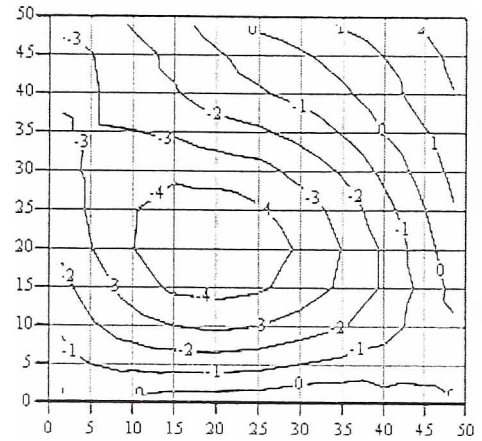
Slika 4.1.10 c. A6 priraštaj deformacija

A2 $c = 150$ mm bez horizontalnog ukrućenja

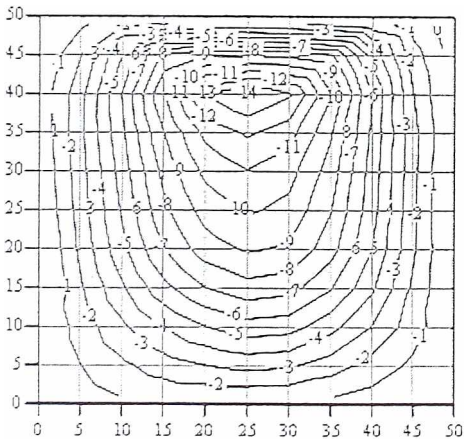


Slika 4.1.11 a. A2 početne deformacije

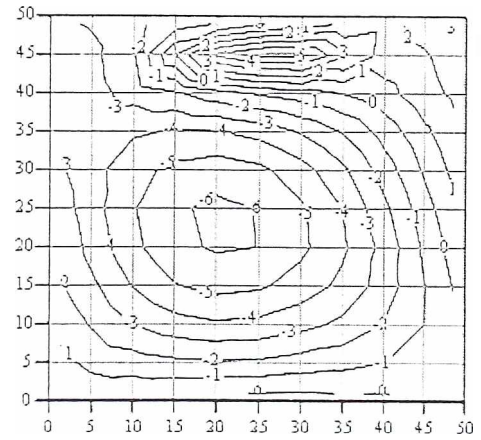
A7 $c = 150$ mm sa horizontalnim ukrućenjem



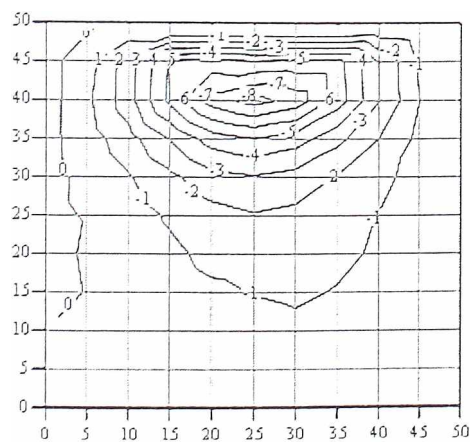
Slika 4.1.12 a. A7 početne deformacije



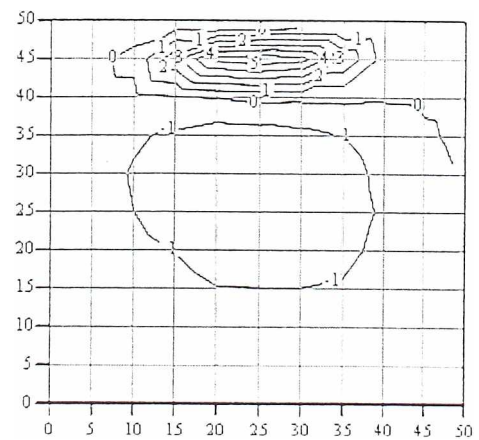
Slika 4.1.11 b. A2 rezidualne deformacije



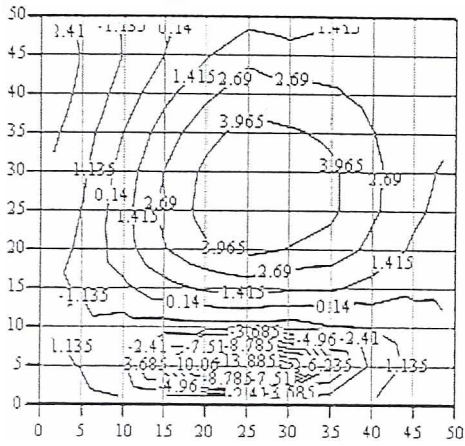
Slika 4.1.12 b. A7 rezidualne deformacije



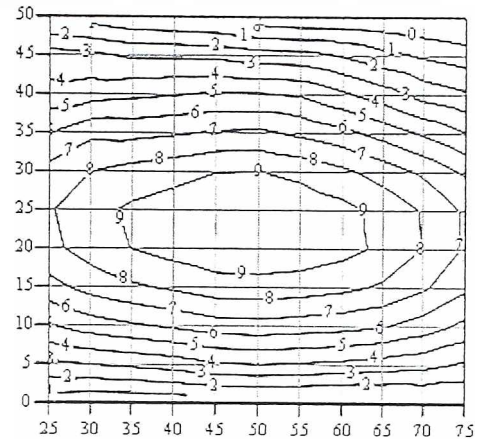
Slika 4.1.11 c. A2 priraštaj deformacija



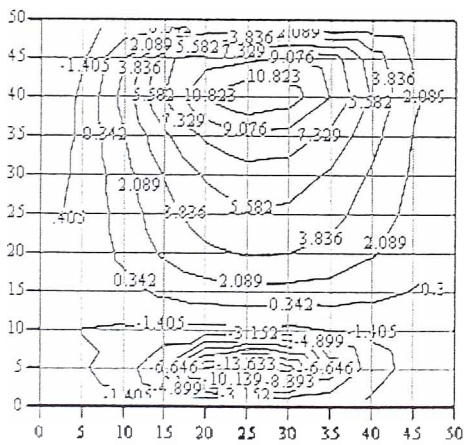
Slika 4.1.12 c. A7 priraštaj deformacija

A13 $c = 150$ mm (rasp.) bez hor. ukućenjaB7 $c = 150$ mm sa horizontalnim ukućenjem

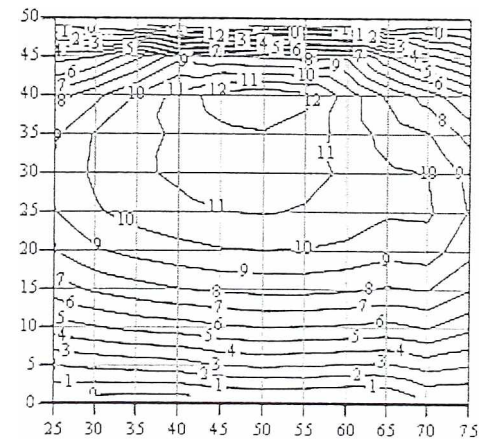
Slika 4.1.13 a. A13 početne deformacije



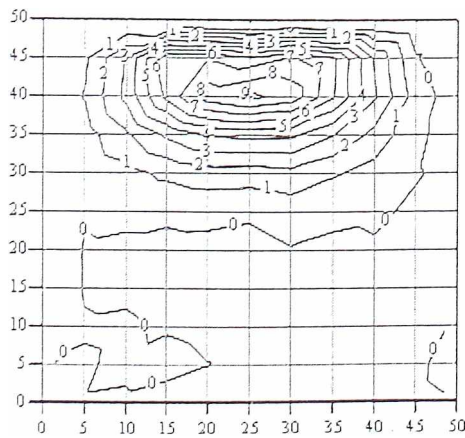
Slika 4.1.14 a. B7 početne deformacije



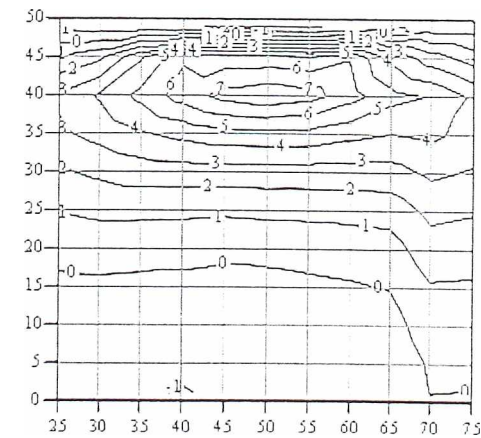
Slika 4.1.13 b. A13 rezidualne deformacije



Slika 4.1.14 b. B7 rezidualne deformacije



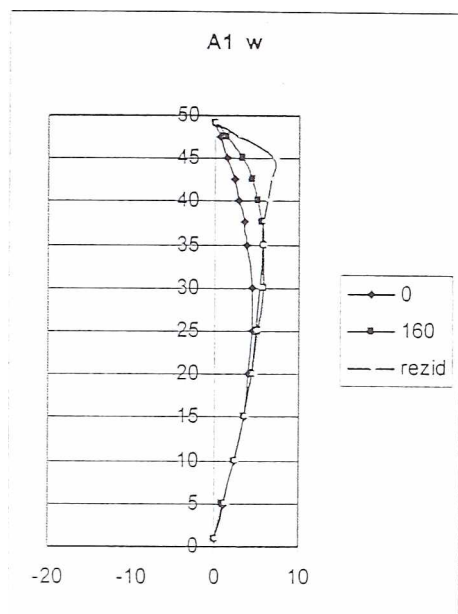
Slika 4.1.13 c. A13 priraštaj deformacija



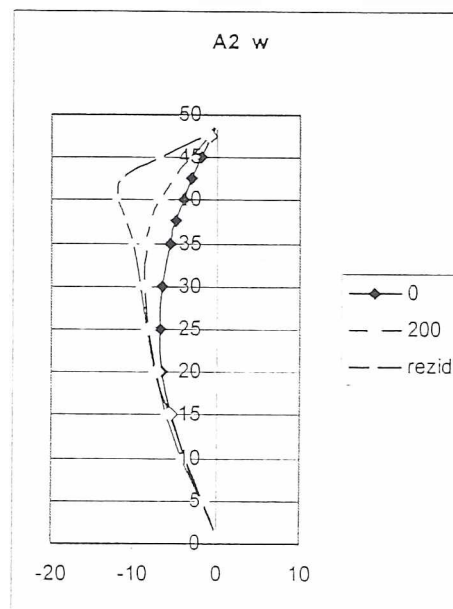
Slika 4.1.14 c. B7 priraštaj deformacija

napomena : dimenzije nosača na svim dijagramima su u cm a veličine deformacija u mm.

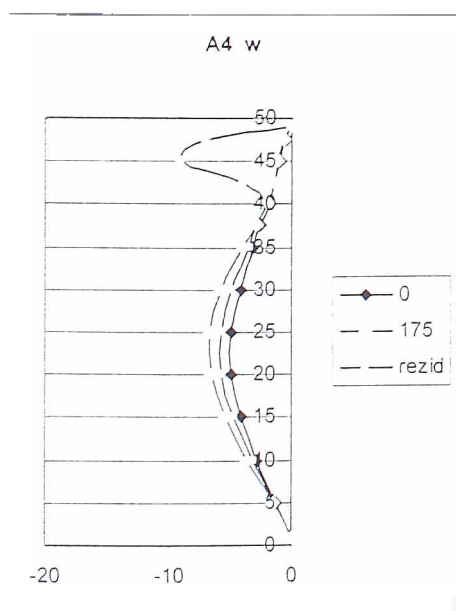
4.2 POČETNE DEFORMACIJE, DEFORMACIJE POD NAJVEĆOM SILOM, REZIDUALNE DEFORMACIJE SREDNJEG VERTIKALNOG PRESEKA REBRA



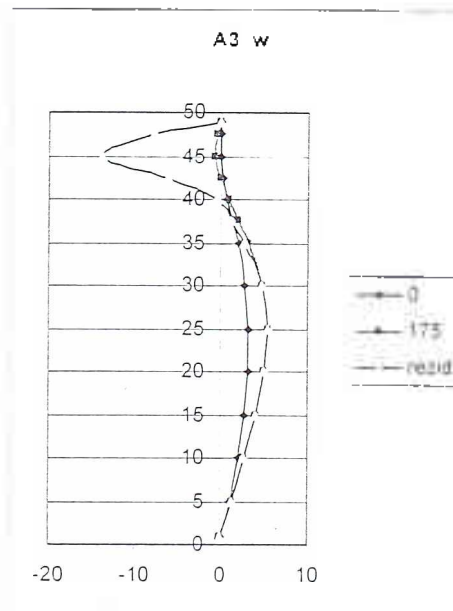
Slika 4.2.1.



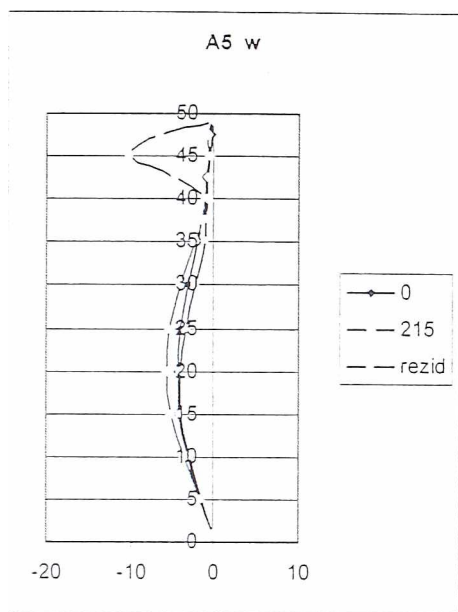
Slika 4.2.2.



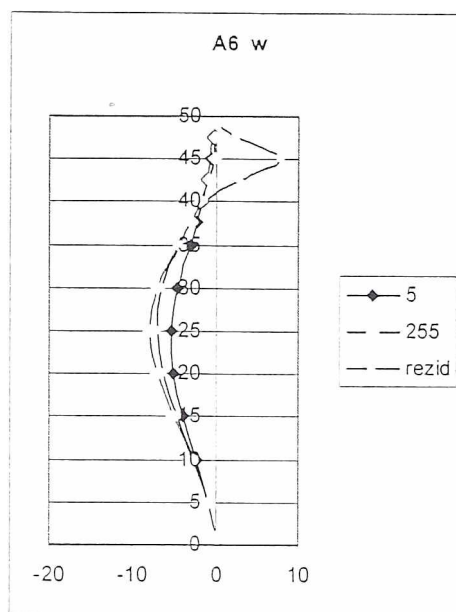
Slika 4.2.3.



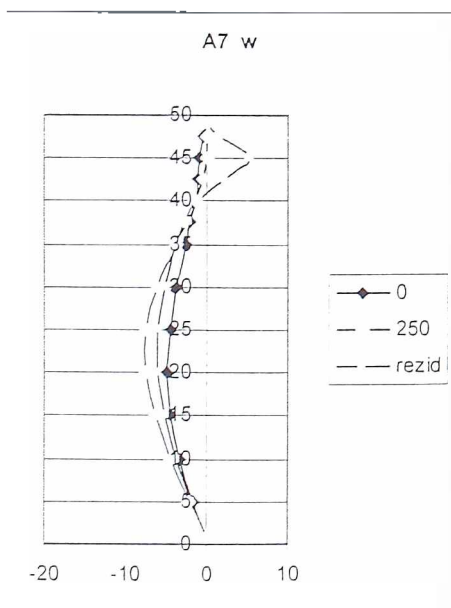
Slika 4.2.4.



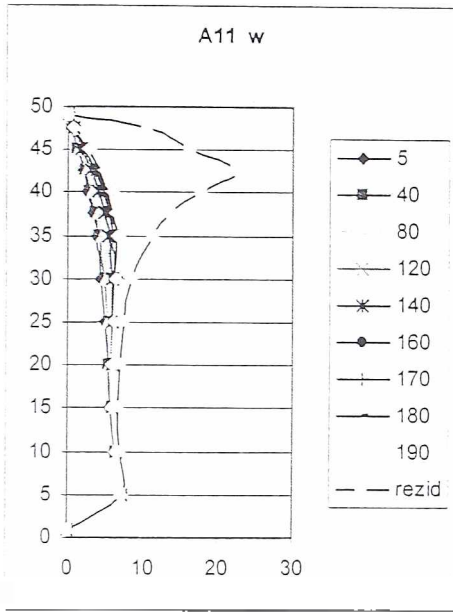
Slika 4.2.5.



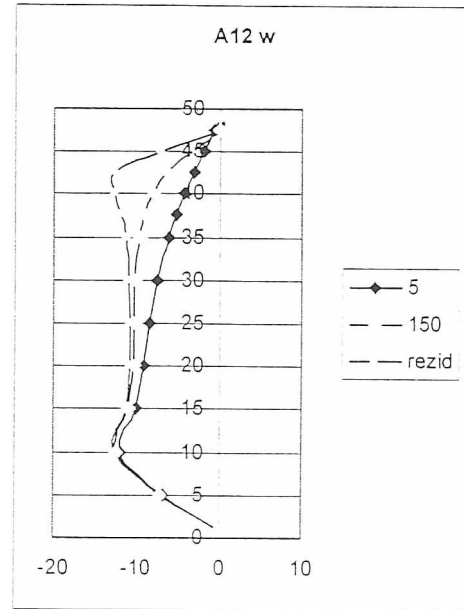
Slika 4.2.6.



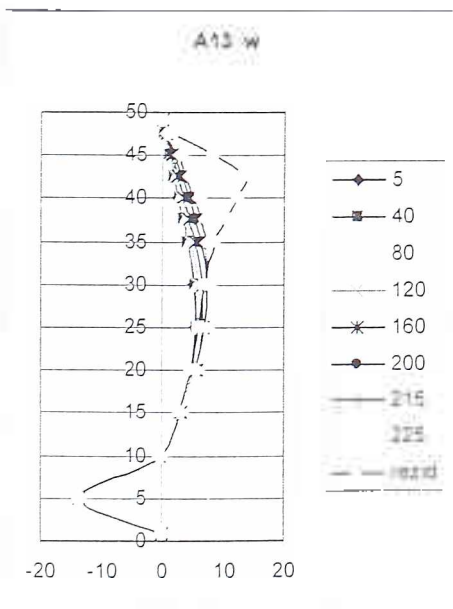
Slika 4.2.7.



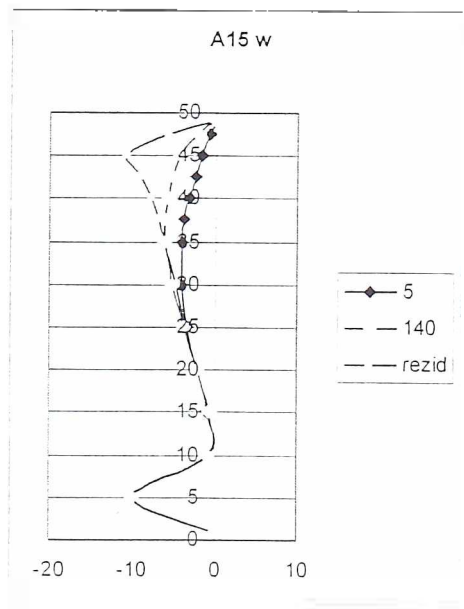
Slika 4.2.8.



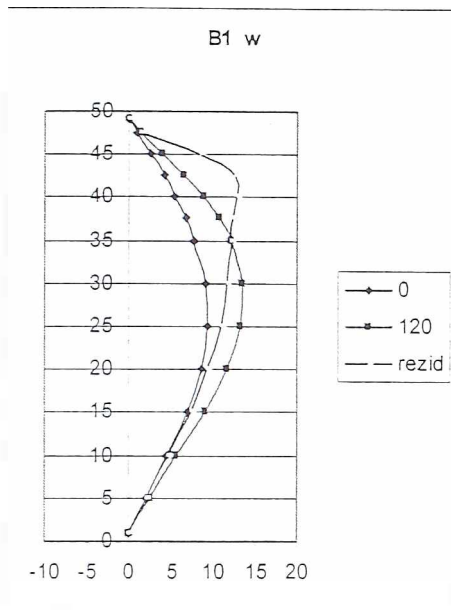
Slika 4.2.9.



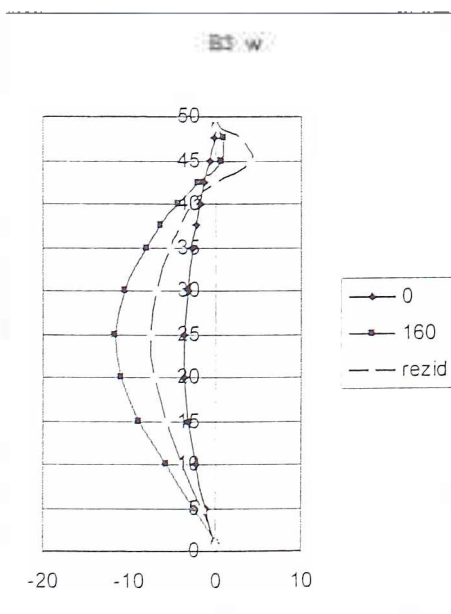
Slika 4.2.10.



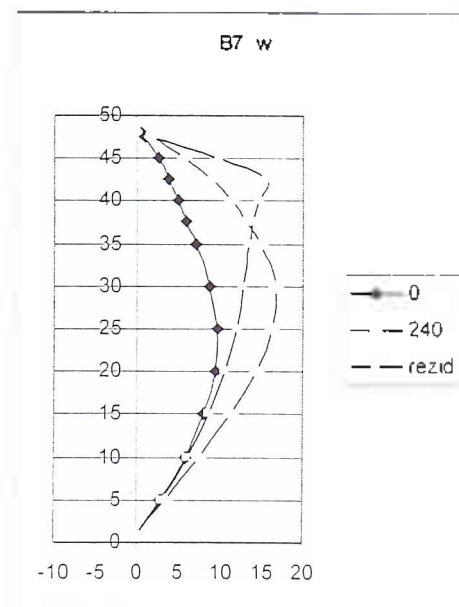
Slika 4.2.11.



Slika 4.2.12.



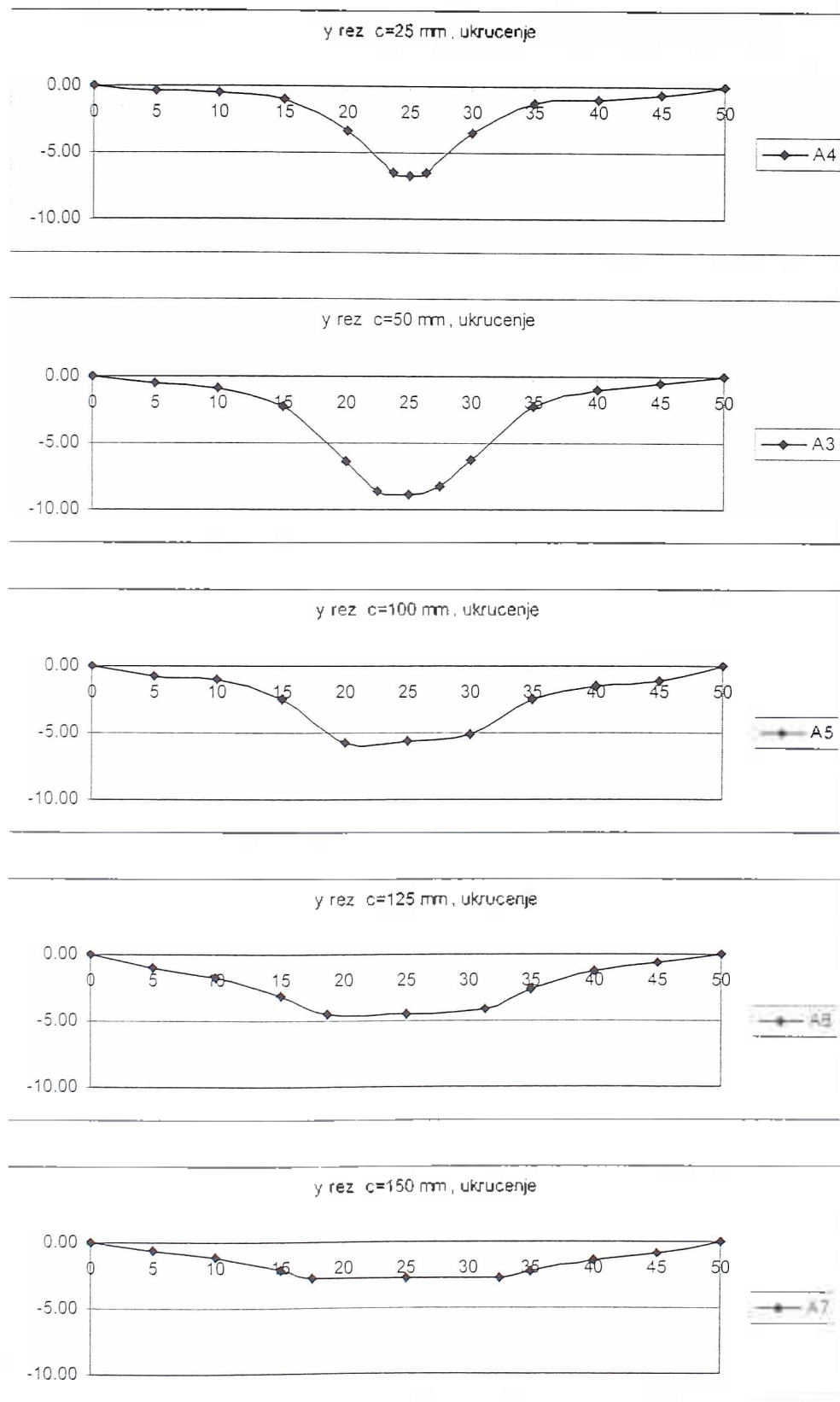
Slika 4.2.13.



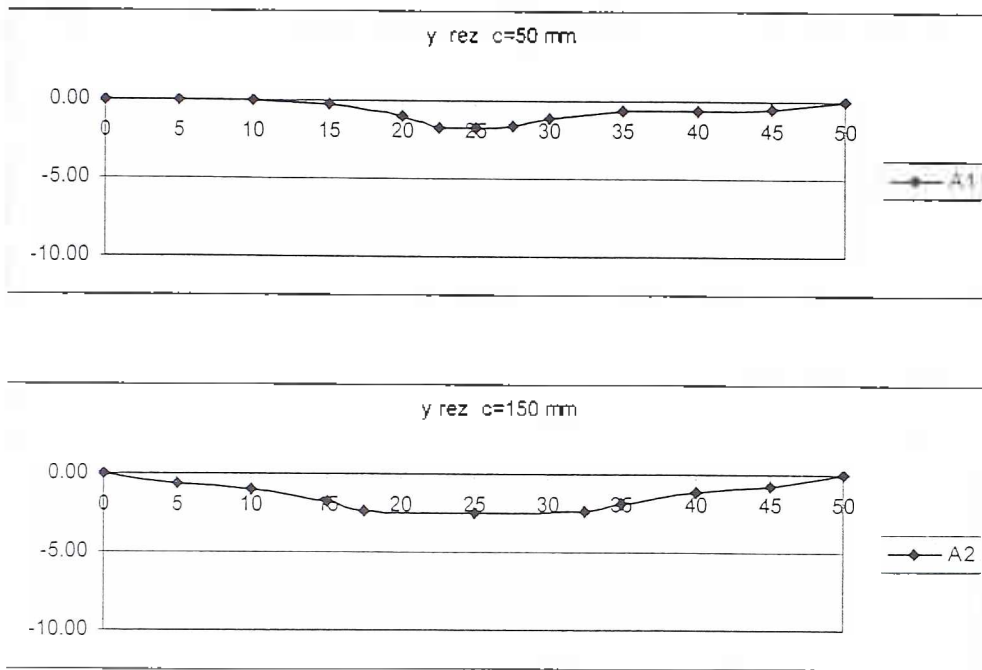
Slika 4.2.14.

napomena : dimenzije nosača na svim dijagramima su u cm a veličine deformacija u mm.

4.3. REZIDUALNE DEFORMACIJE OPTEREĆENOG POJASA



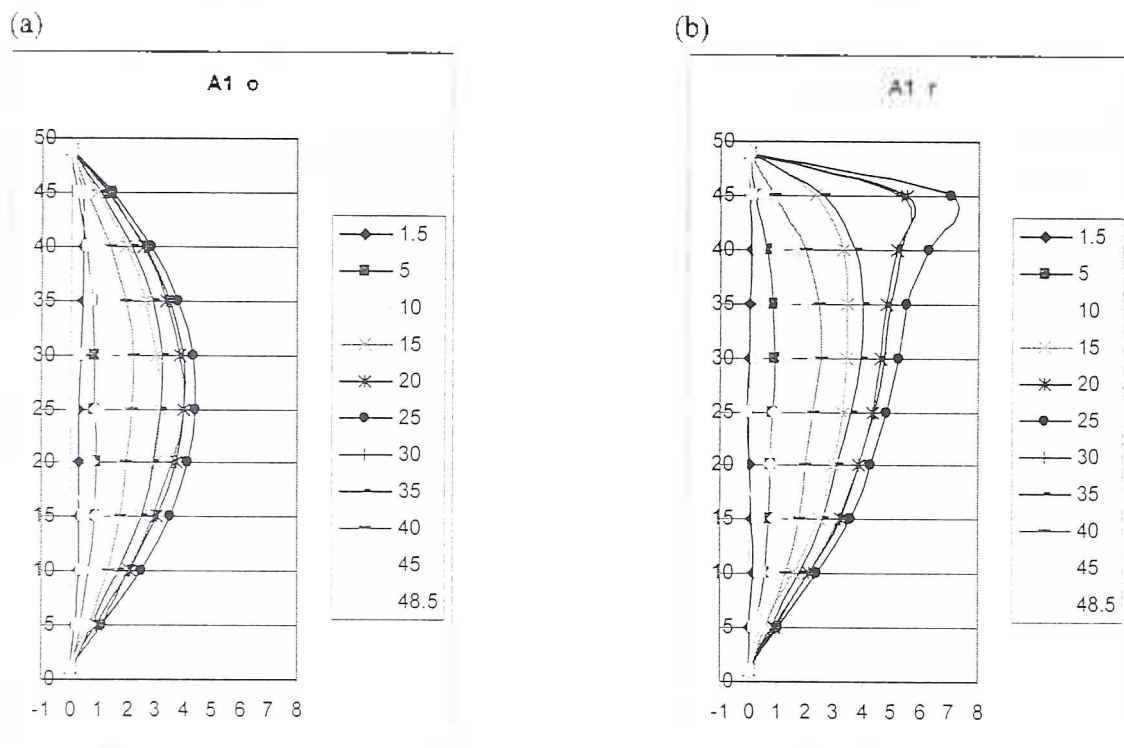
Slika 4.3.1 Rezidualne deformacije pojasa nosača sa ukrućenjima



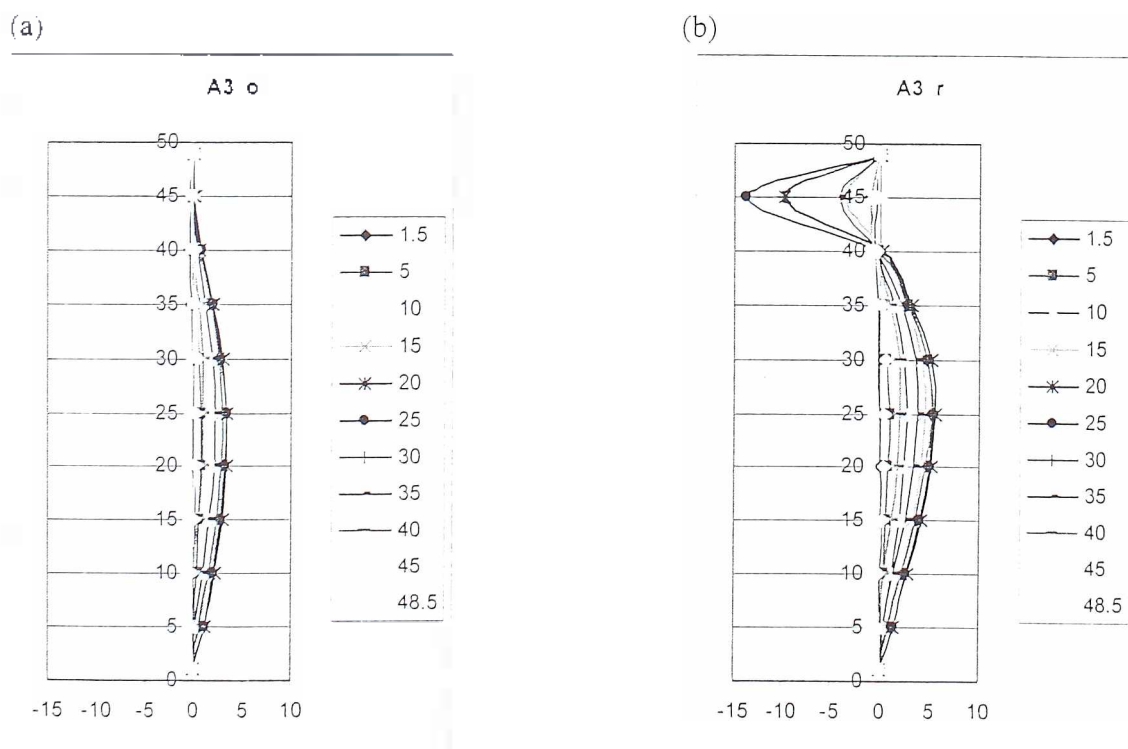
Slika 4.3.2 Rezidualne deformacije pojasa nosača bez ukrućenja

napomena : dimenzije nosača na svim dijagramima su u cm a veličine deformacija u mm.

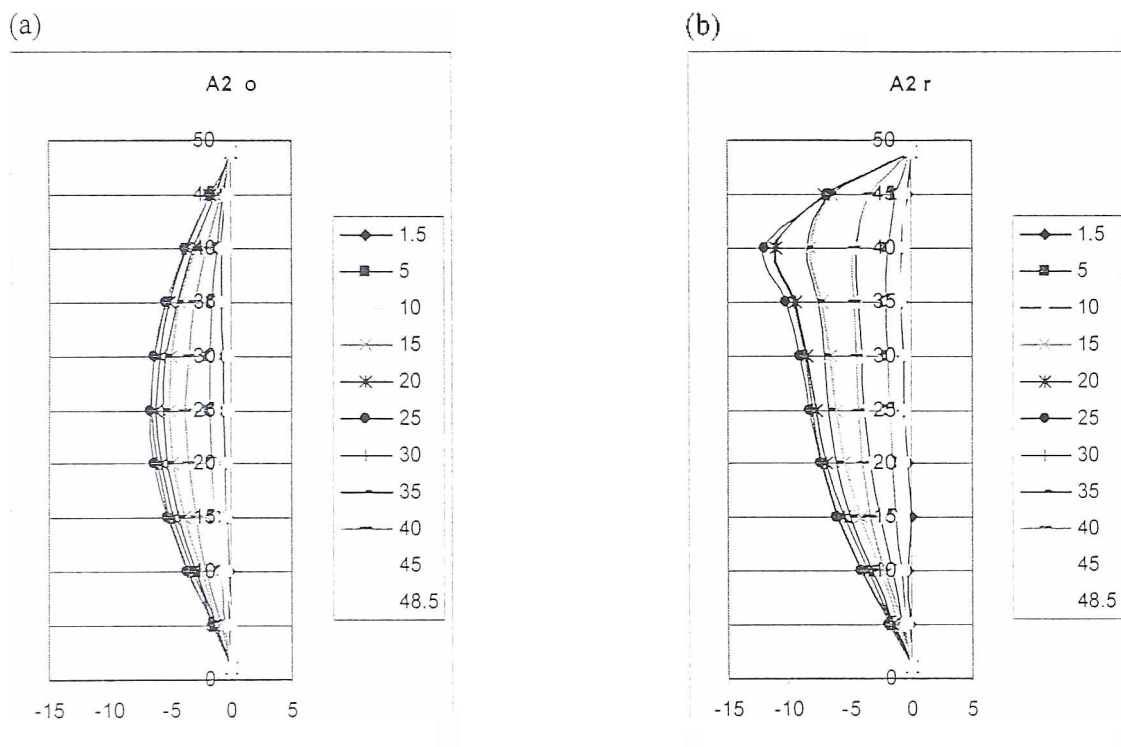
4.4. VERTIKALNI PRESECI REBRA PRI POČETNOJ I REZIDUALNOJ DEFORMACIJI



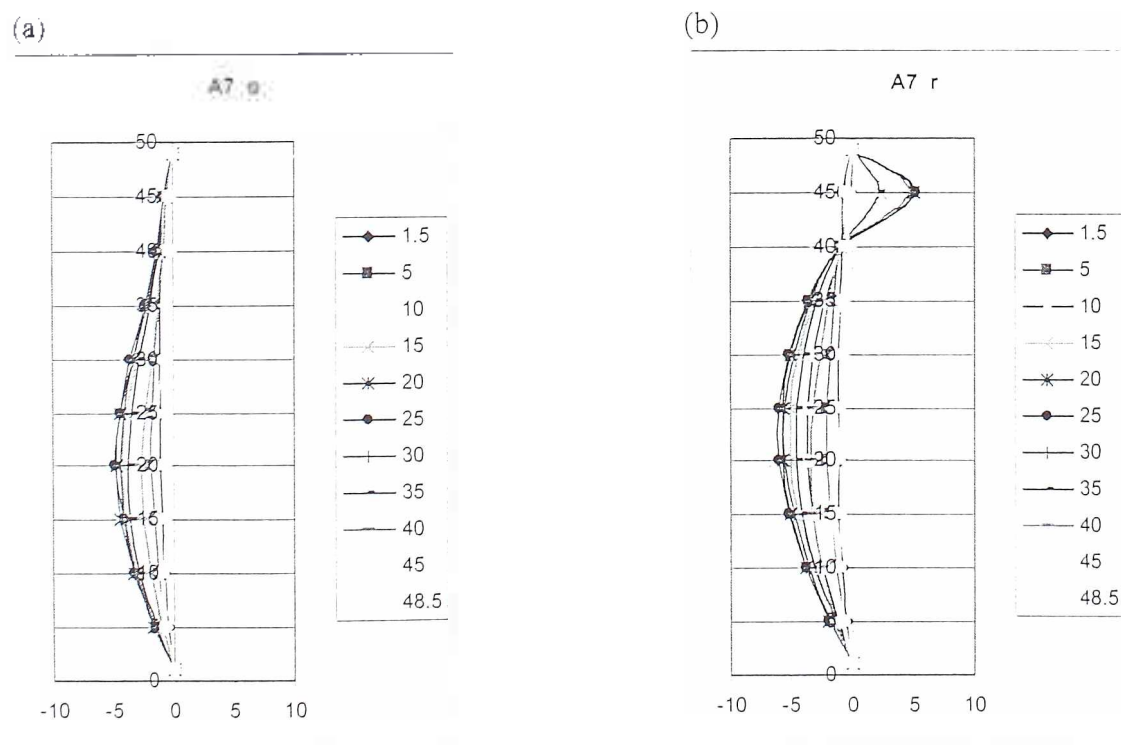
Slika 4.4.1 Nosač A1 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – vertikalni preseki rebra



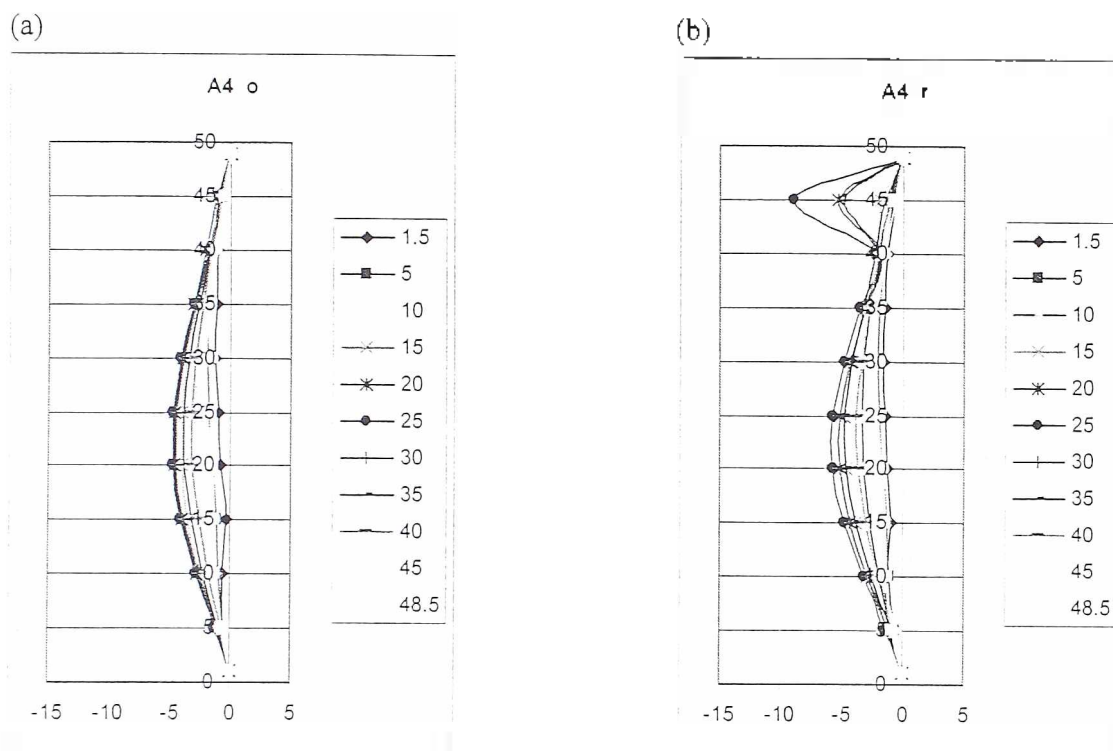
Slika 4.4.2 Nosač A3 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – vertikalni preseki rebra



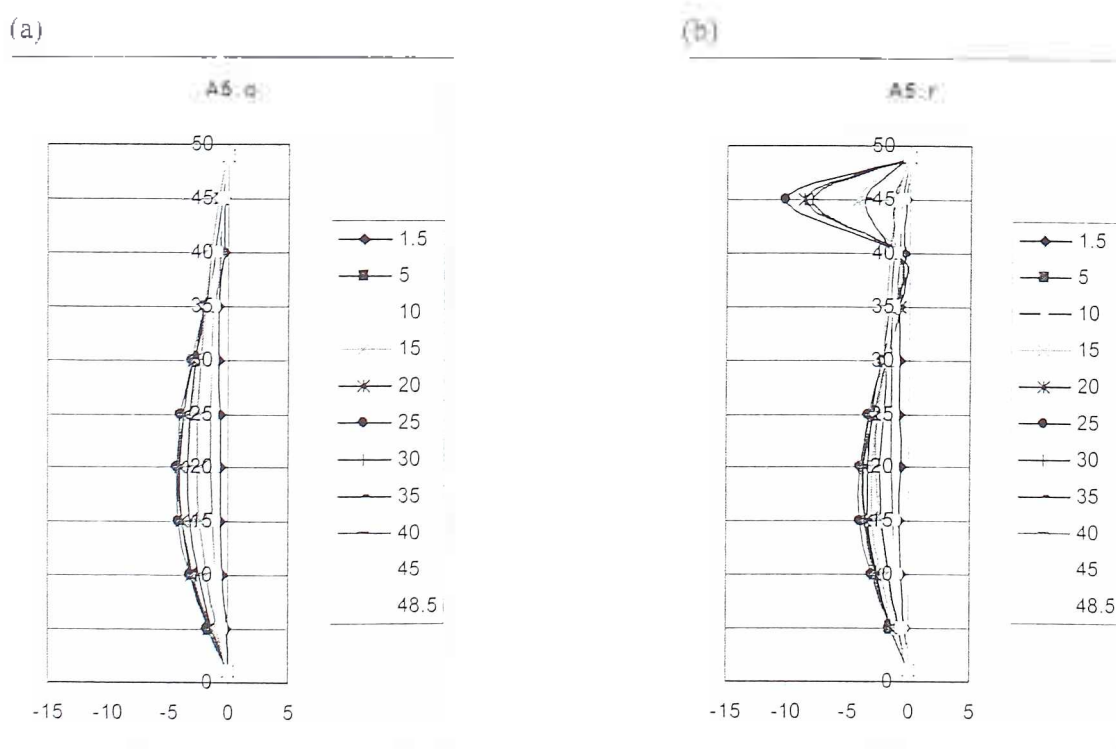
Slika 4.4.3 Nosač A2 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – vertikalni preseki rebra



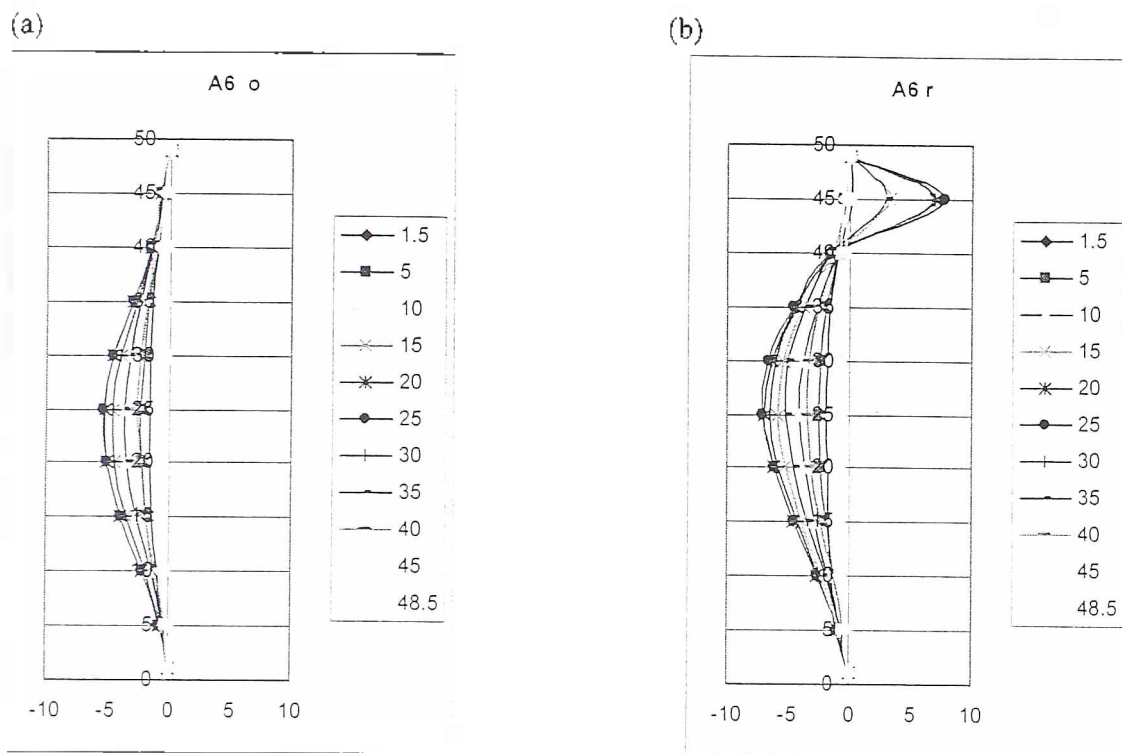
Slika 4.4.4 Nosač A7 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – vertikalni preseki rebra



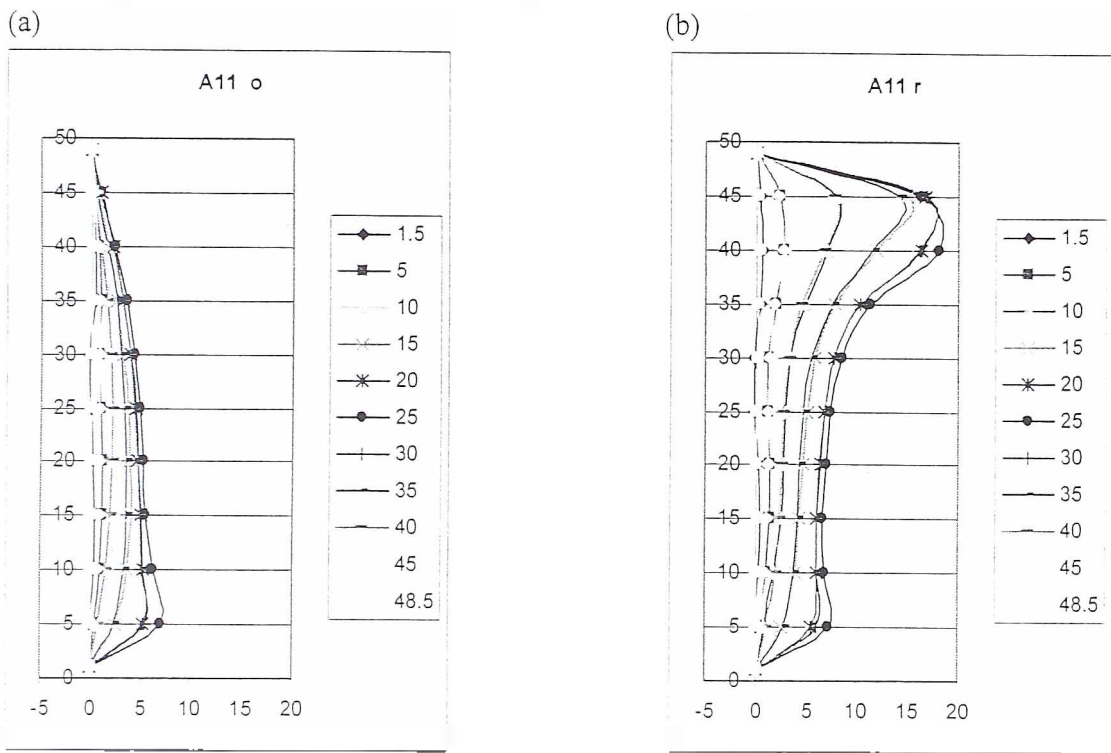
Slika 4.4.5 Nosaç A4 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – vertikalni preseki rebra



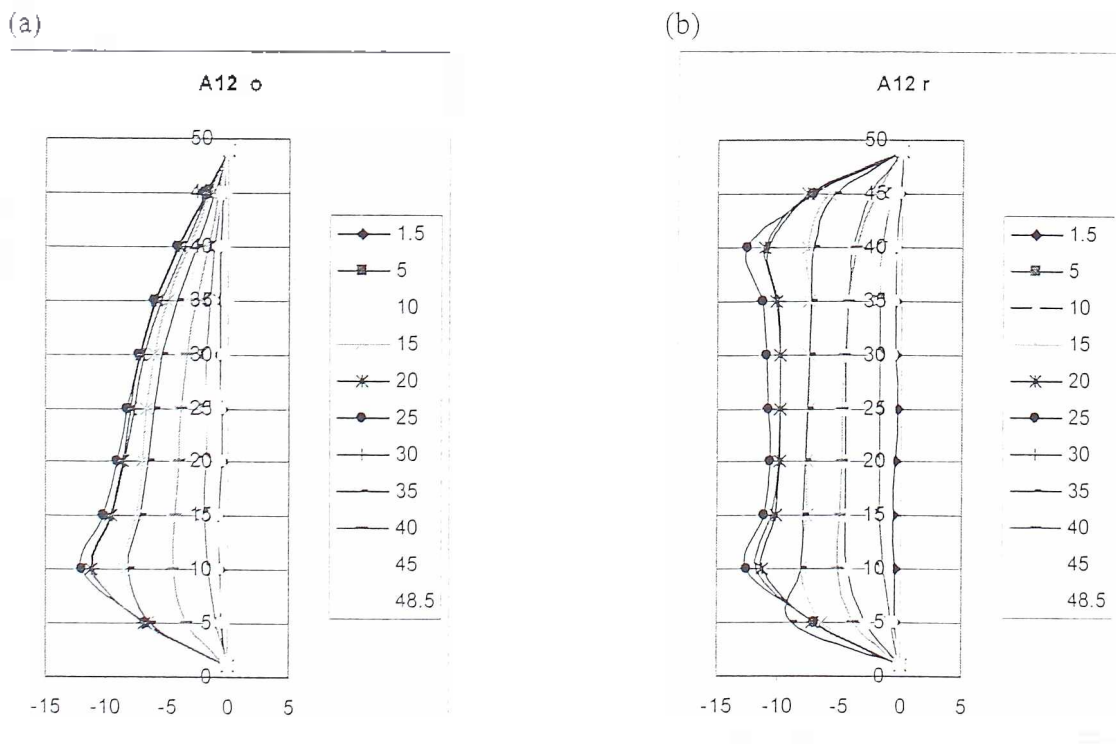
Slika 4.4.6 Nosaç A5 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – vertikalni preseki rebra



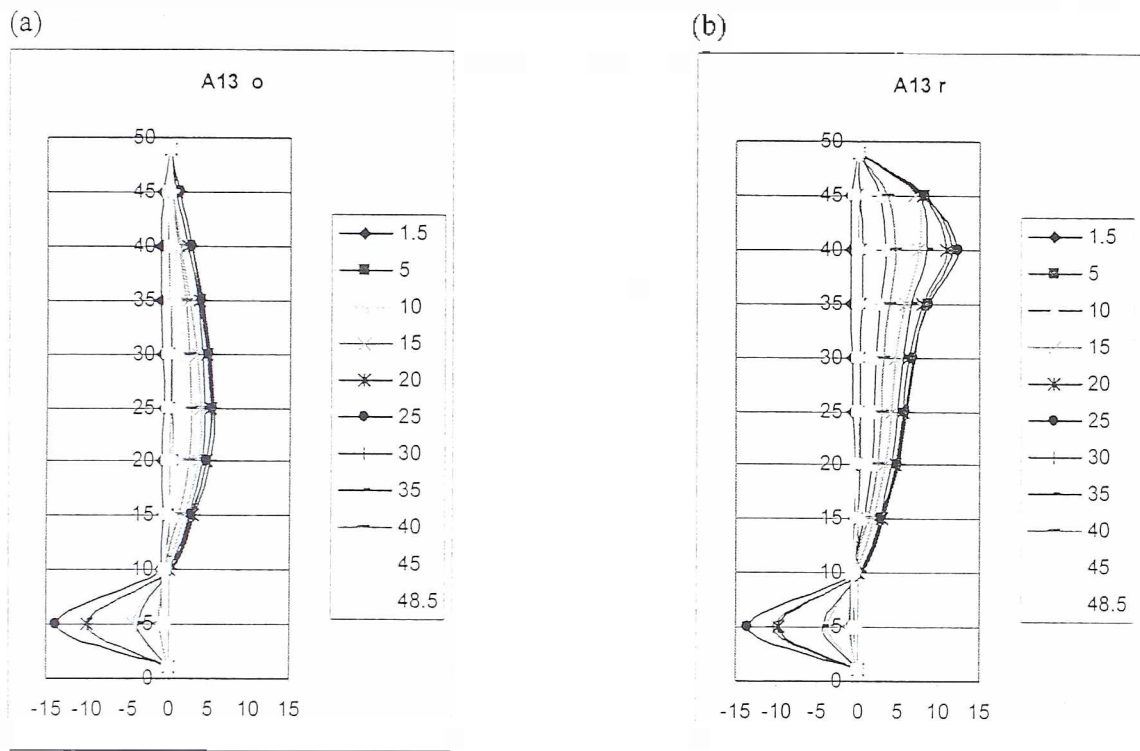
Slika 4.4.7 Nosač A6 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – vertikalni preseki rebra



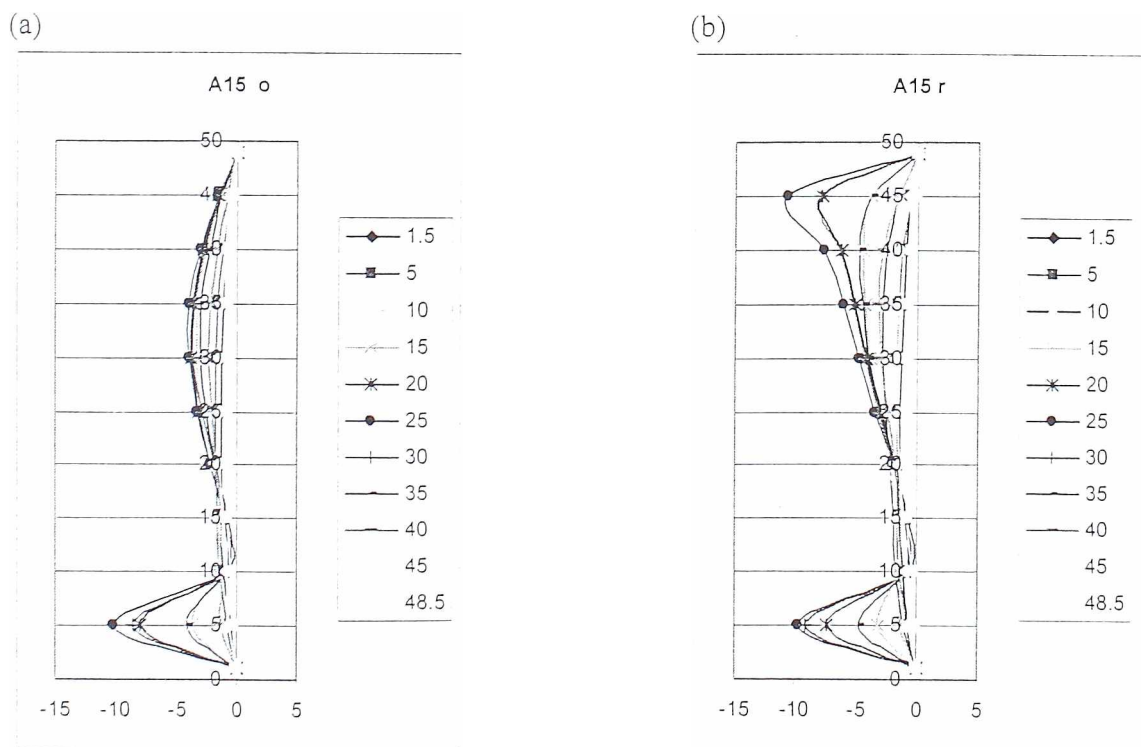
Slika 4.4.8 Nosač A11 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – vertikalni preseki rebra



Slika 4.4.9 Nosač A12 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – vertikalni preseki rebra



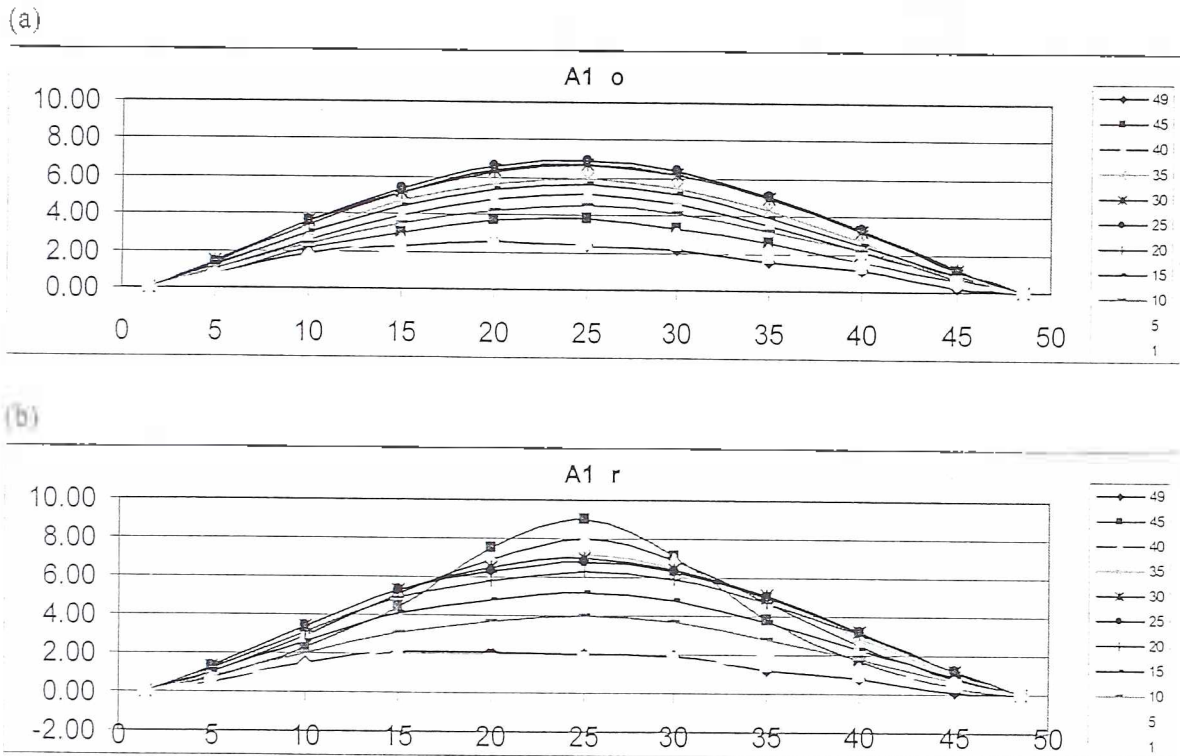
Slika 4.4.10 Nosač A13 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – vertikalni preseki rebra



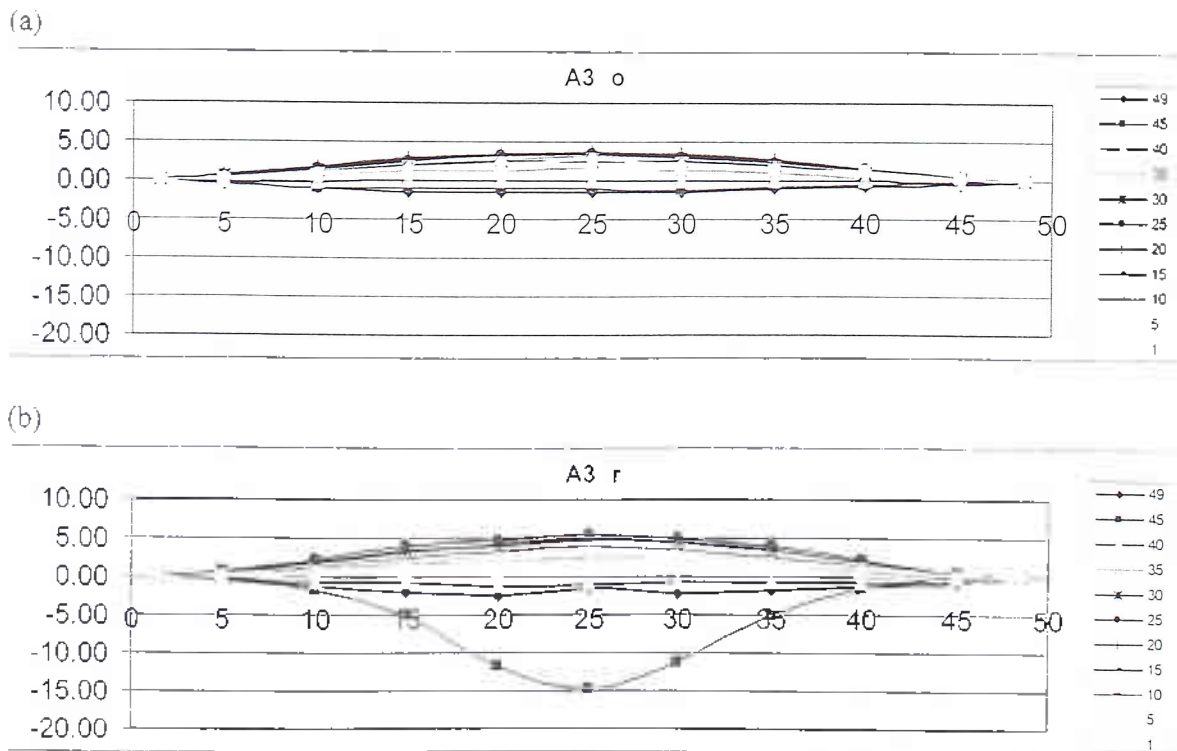
Slika 4.4.11 Nosač A15 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – vertikalni preseki rebra

napomena : dimenzije nosača na svim dijagramima su u cm a veličine deformacija u mm.

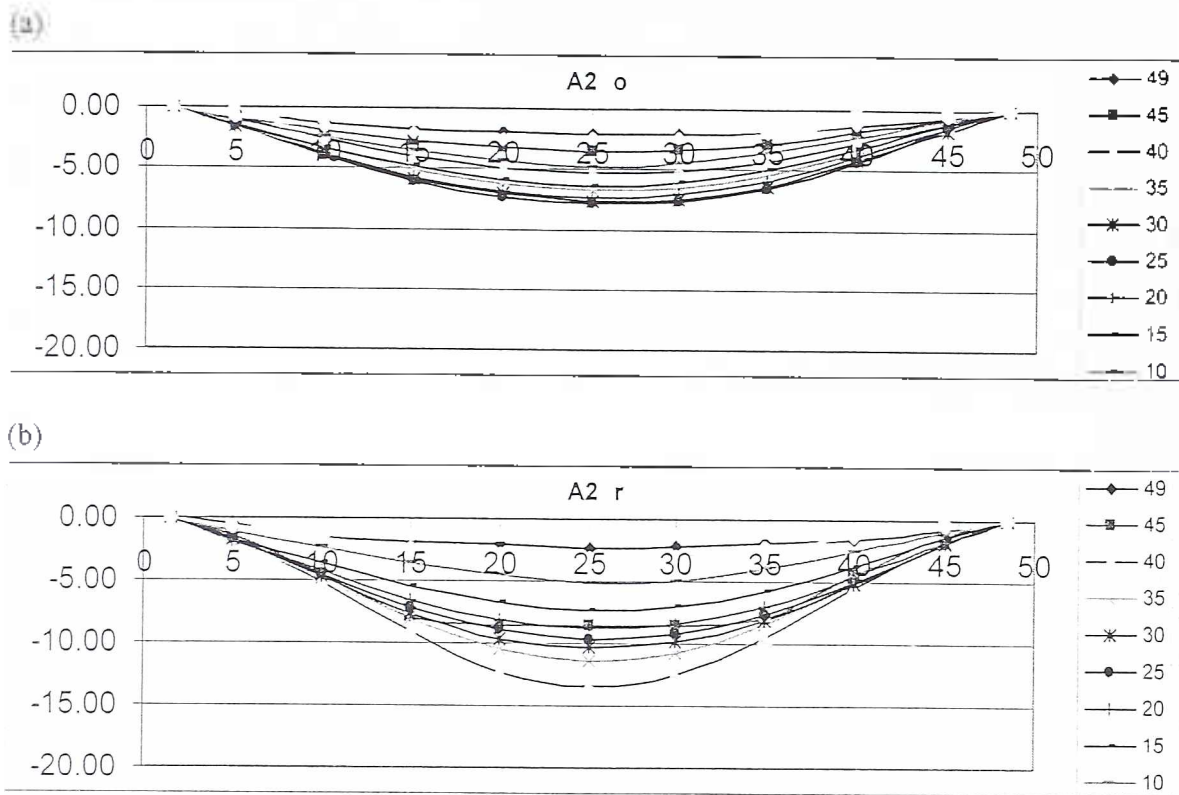
4.5. POČETNE I REZIDUALNE DEFORMACIJE - HORIZONTALNI PRESECI REBRA



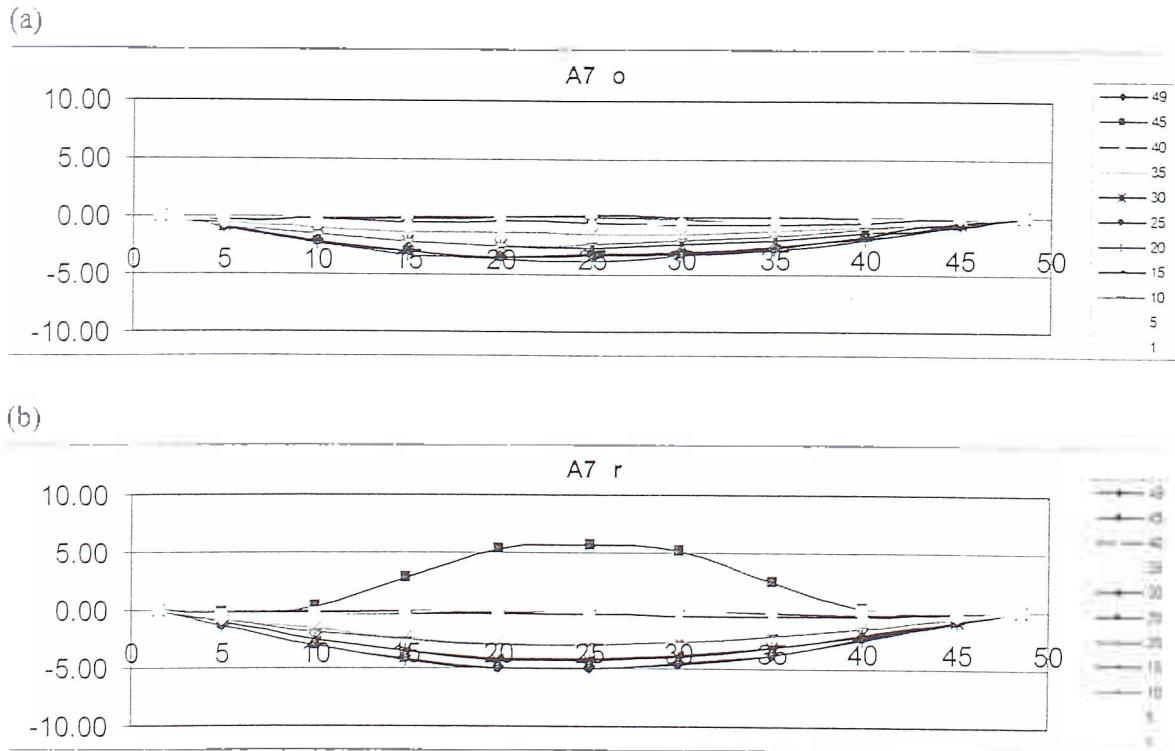
Slika 4.5.1 Nosač A1 (a) početne i (b) rezidualne deformacije - horizontalni preseki rebra



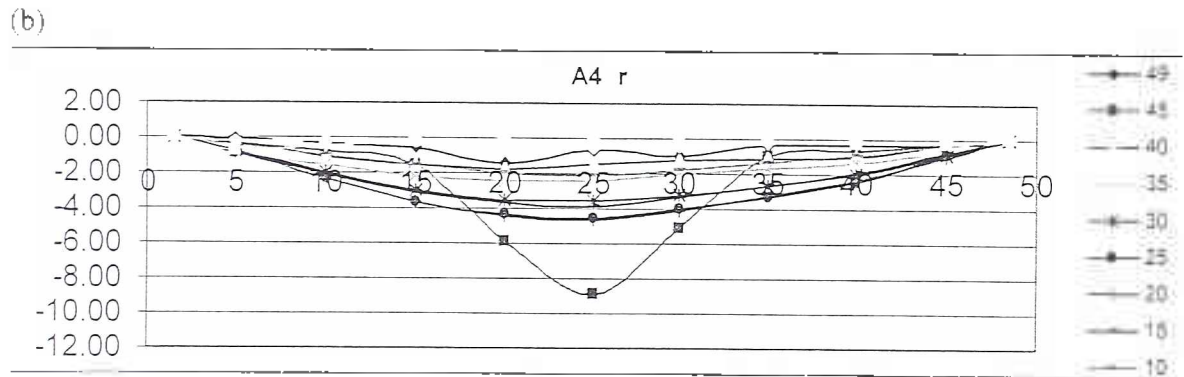
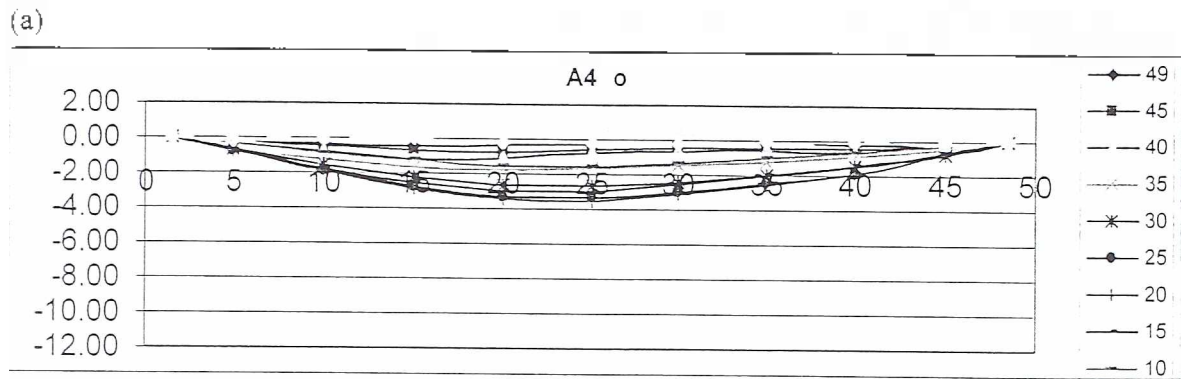
Slika 4.5.2 Nosač A3 (a) početne i (b) rezidualne deformacije - horizontalni preseki rebra



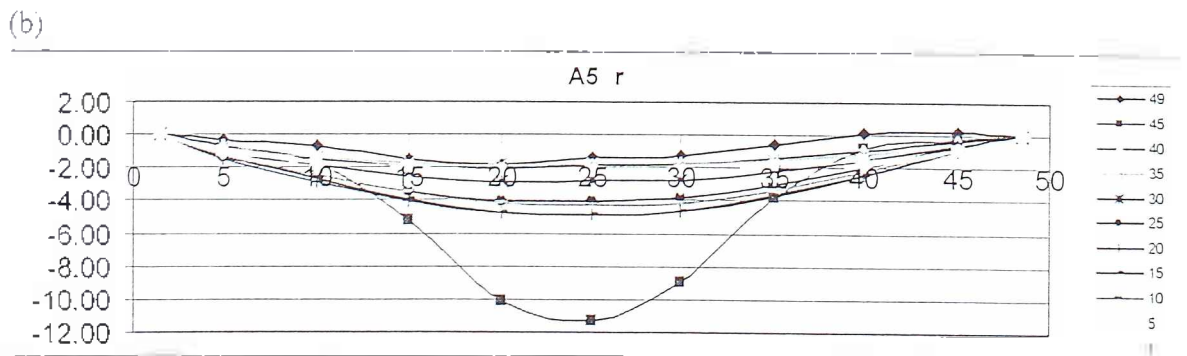
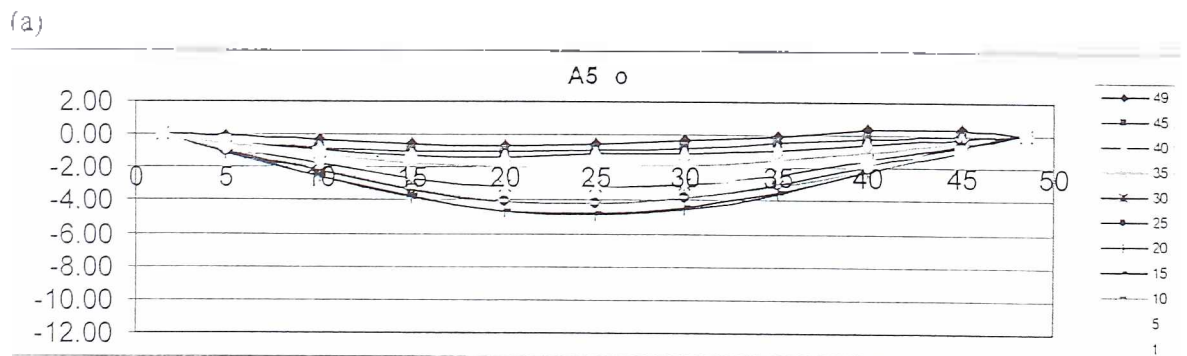
Slika 4.5.3 Nosač A2 (a) početne i (b) rezidualne deformacije - horizontalni preseki rebra



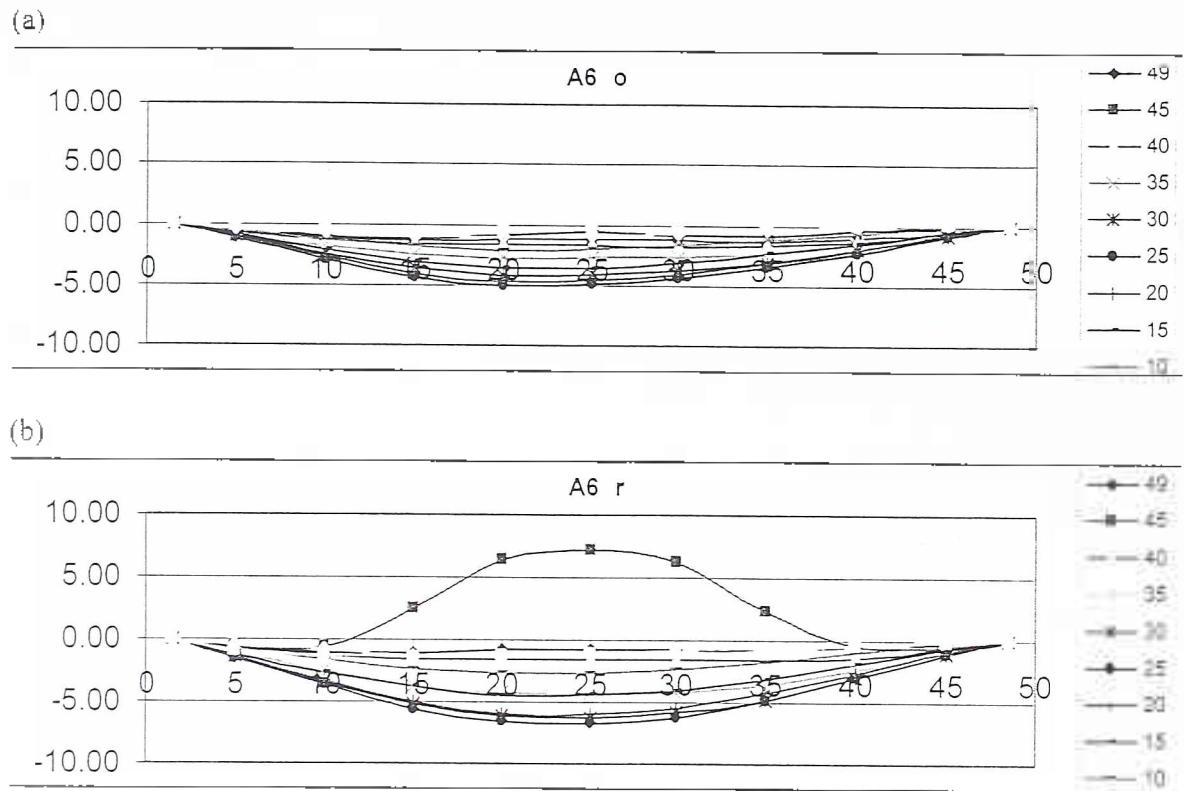
Slika 4.5.4 Nosač A7 (a) početne i (b) rezidualne deformacije - horizontalni preseki rebra



Slika 4.5.5 Nosač A4 (a) početne i (b) rezidualne deformacije - horizontalni preseki rebra



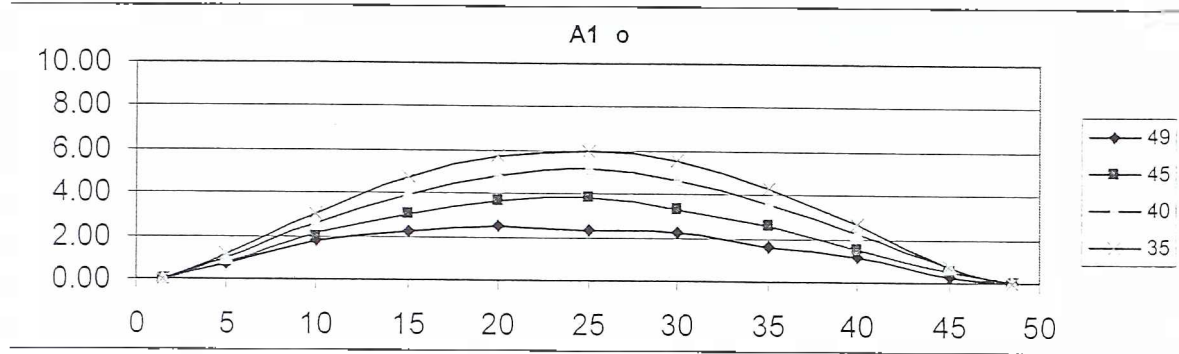
Slika 4.5.6 Nosač A5 (a) početne i (b) rezidualne deformacije - horizontalni preseki rebra



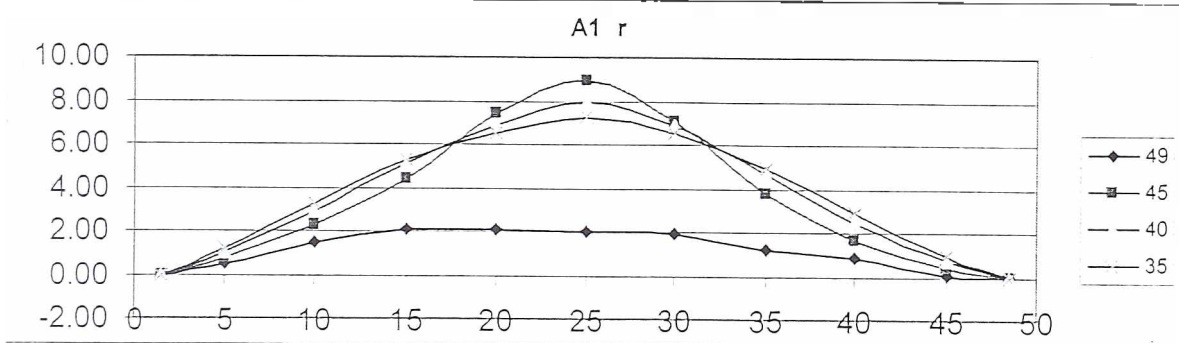
Slika 4.5.7 Nosač A6 (a) početne i (b) rezidualne deformacije - horizontalni preseki rebra

4.6. POČETNE I REZIDUALNE DEFORMACIJE - HORIZONTALNI PRESECI REBRA U ZONI UNOŠENJA OPTEREĆENJA

(a)

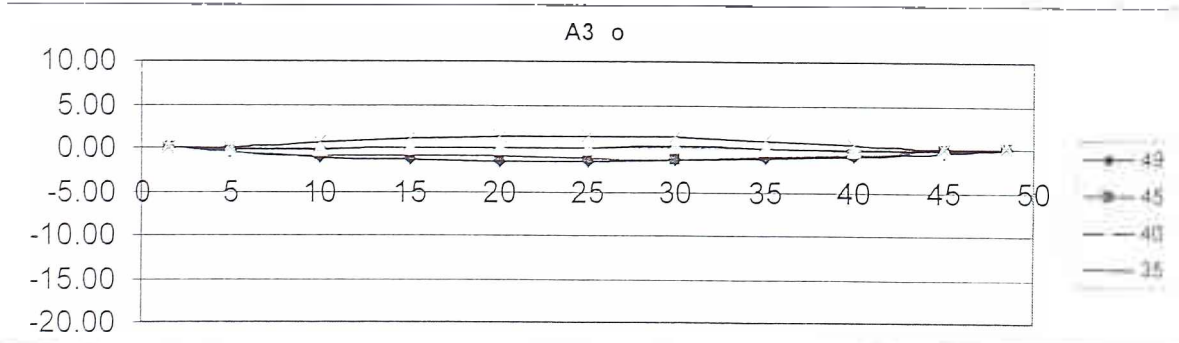


(b)

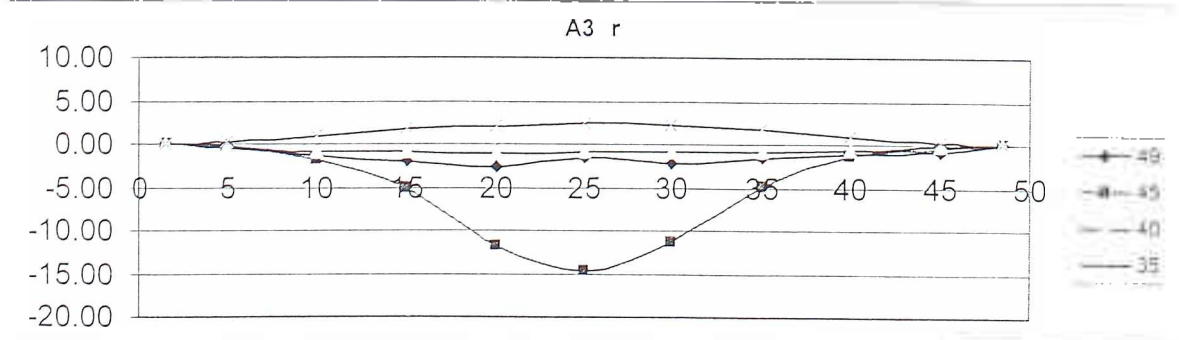


Slika 4.6.1 Nosač A1 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – horizontalni preseki rebra u zoni unošenja opterećenja

(a)

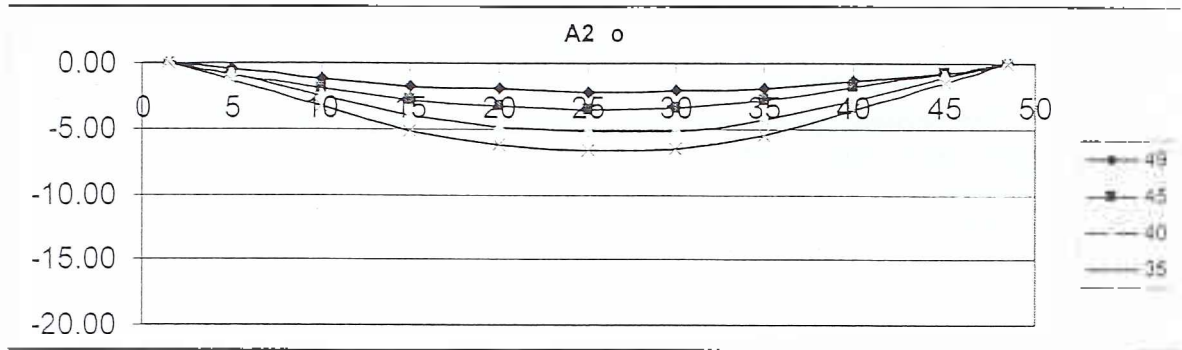


(b)

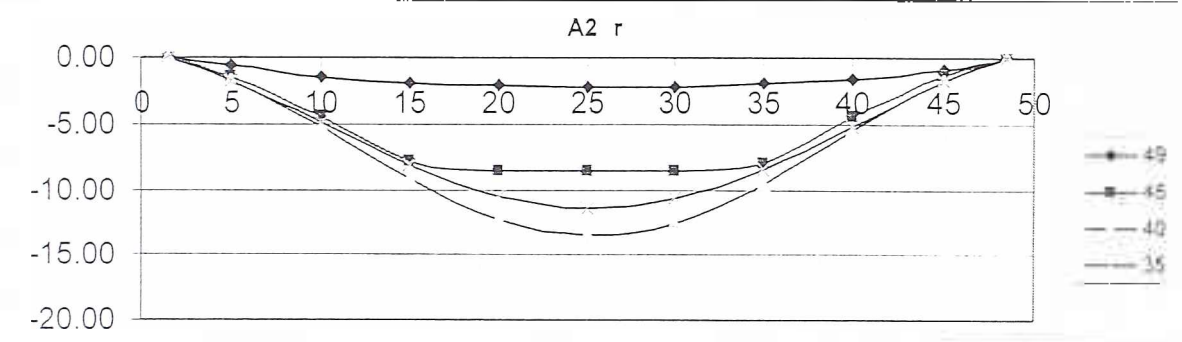


Slika 4.6.2 Nosač A3 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – horizontalni preseki rebra u zoni unošenja opterećenja

(a)

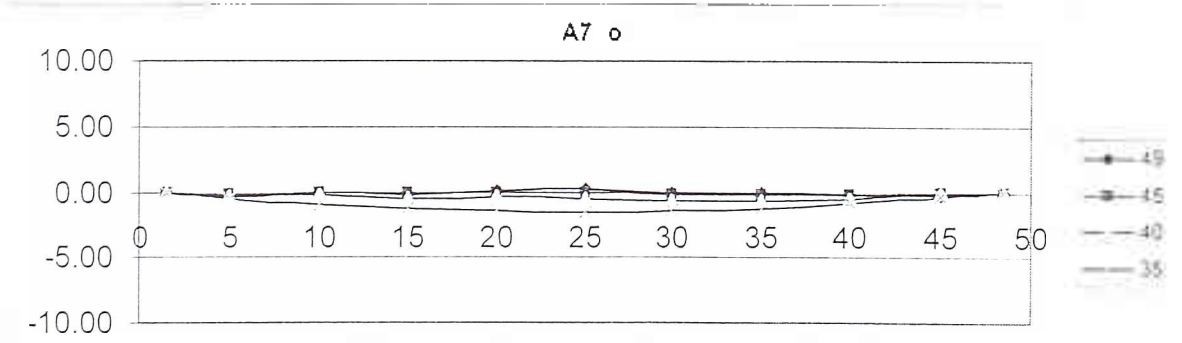


(b)

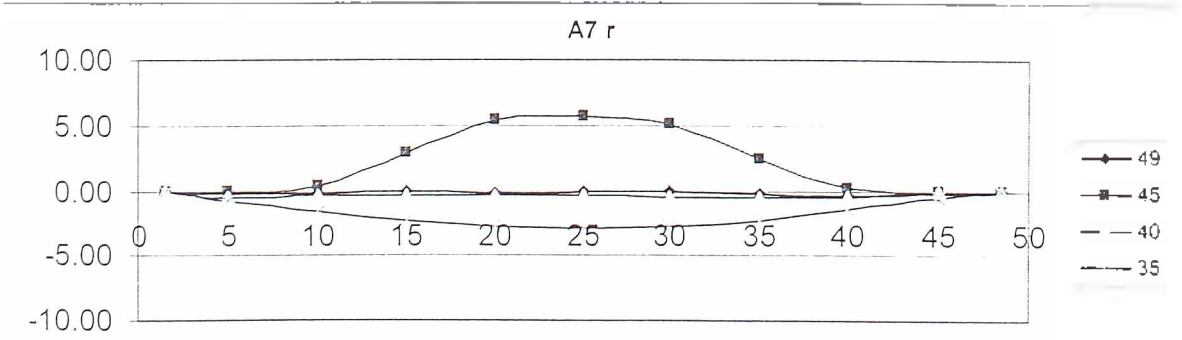


Slika 4.6.3 Nosač A2 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – horizontalni preseki rebra u zoni unošenja opterećenja

(a)

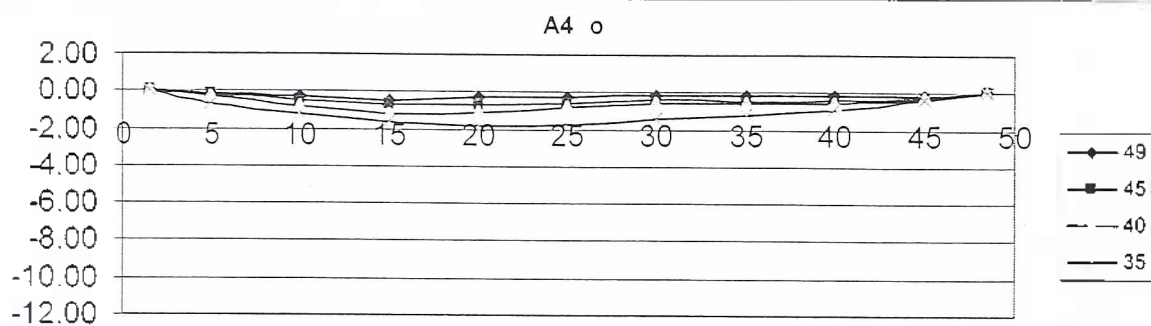


(b)

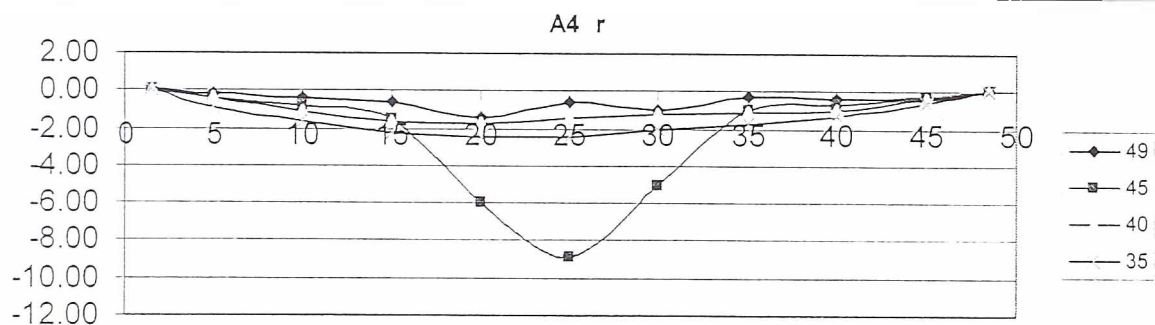


Slika 4.6.4 Nosač A7 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – horizontalni preseki rebra u zoni unošenja opterećenja

(a)

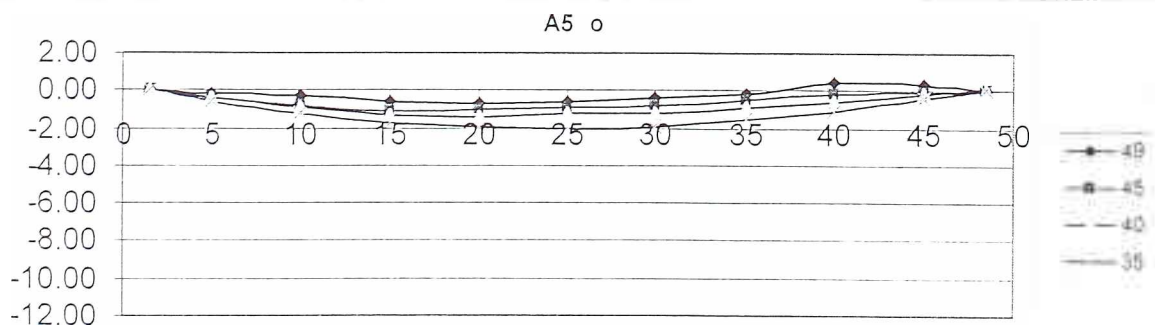


(b)

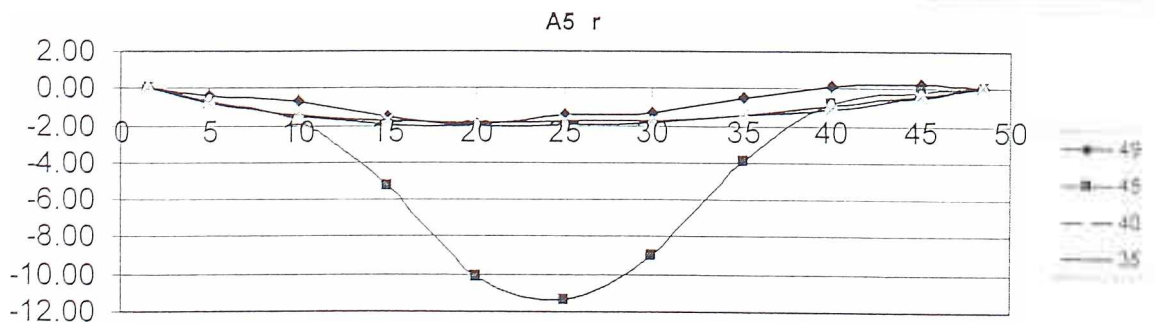


Slika 4.6.5 Nosač A4 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – horizontalni preseki rebra u zoni unošenja opterećenja

(a)

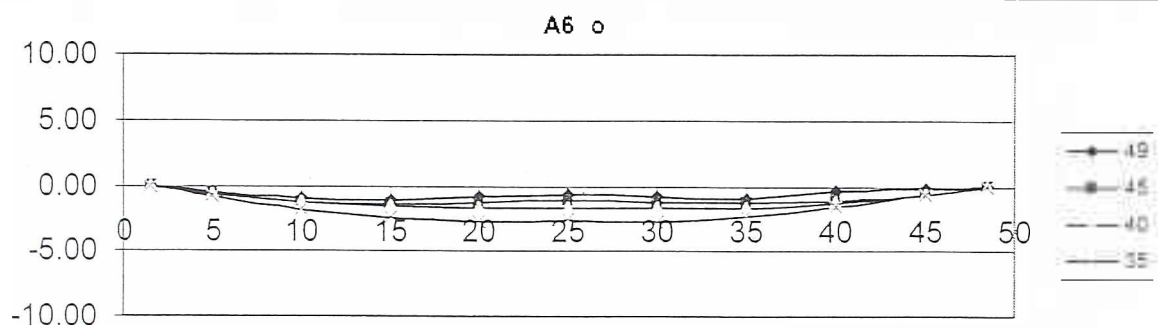


(b)

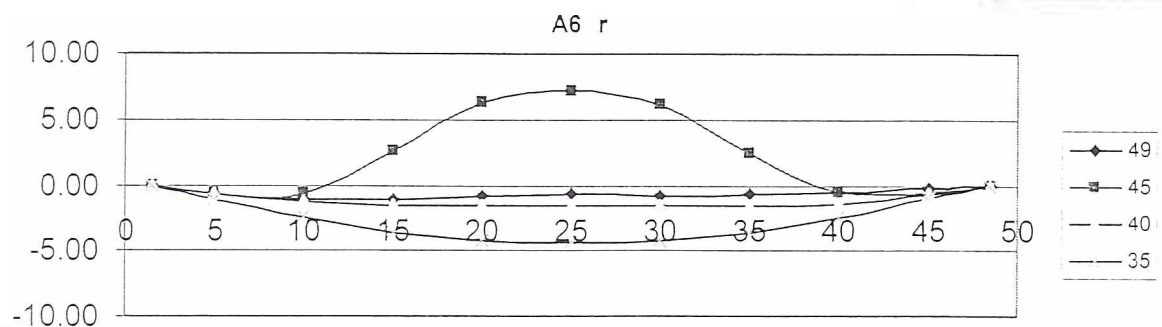


Slika 4.6.6 Nosač A5 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – horizontalni preseki rebra u zoni unošenja opterećenja

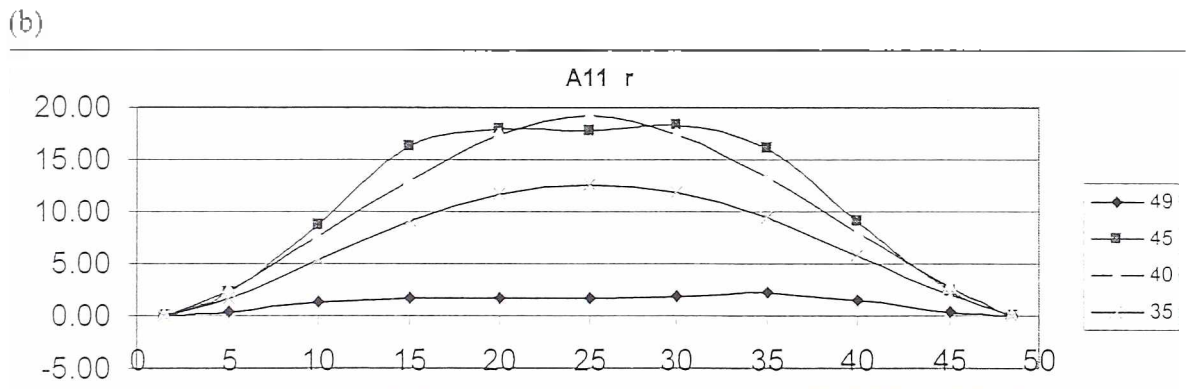
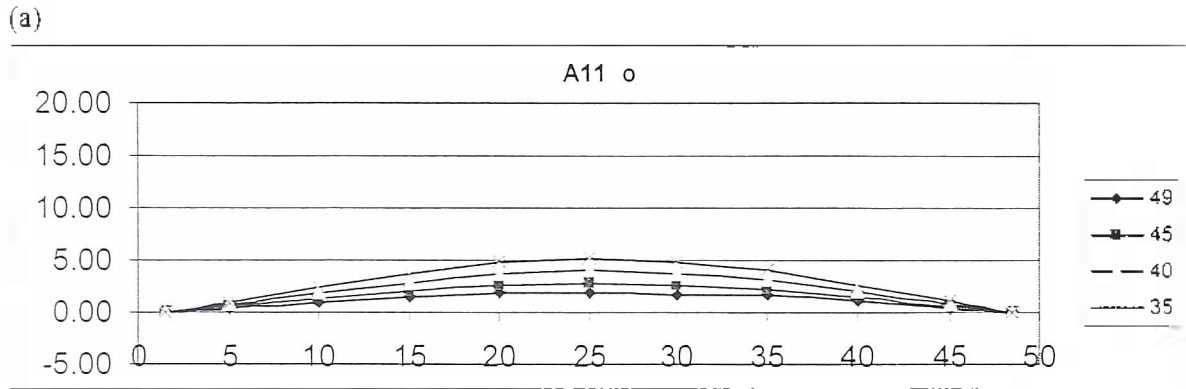
(a)



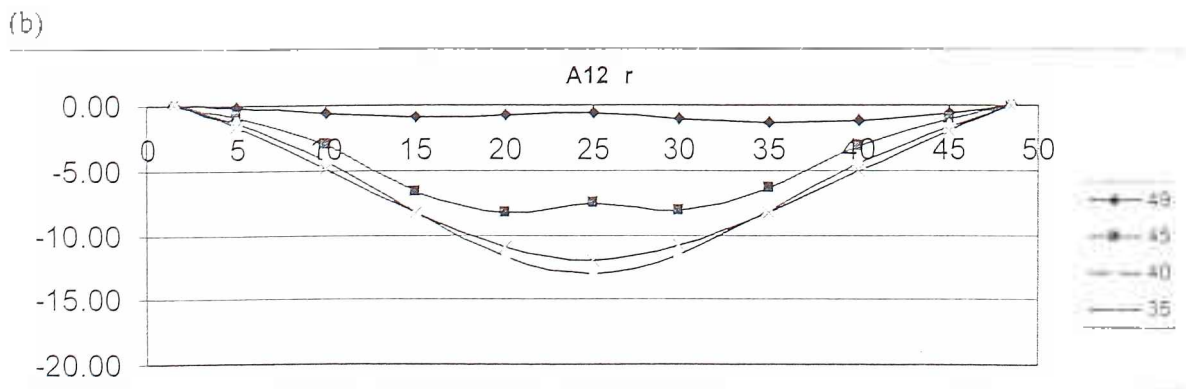
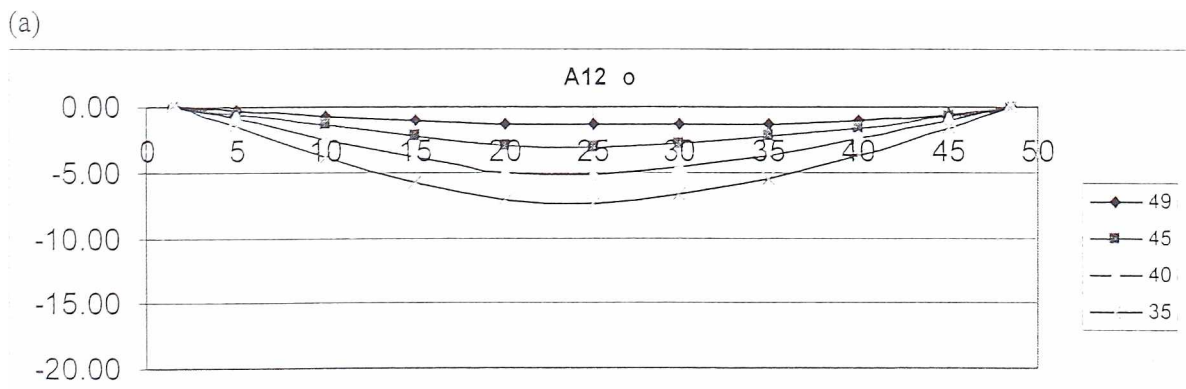
(b)



Slika 4.6.7 Nosač A6 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – horizontalni preseki rebra u zoni unošenja opterećenja

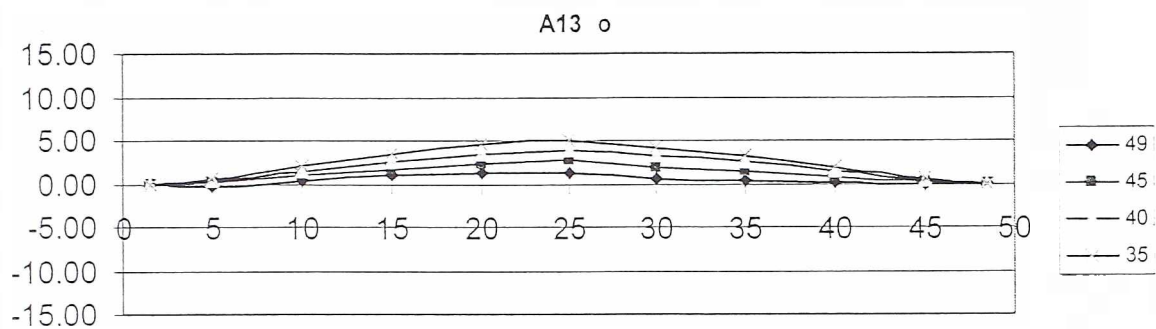


Slika 4.6.8 Nosač A11 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – horizontalni preseki rebra u zoni unošenja opterećenja

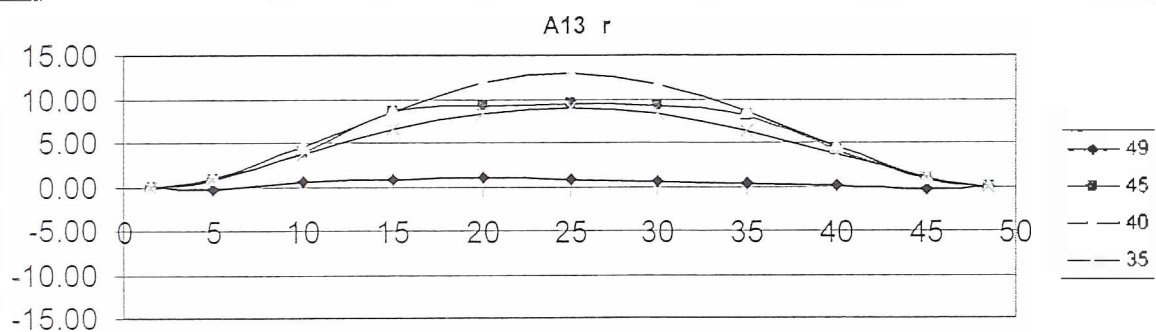


Slika 4.6.9 Nosač A12 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – horizontalni preseki rebra u zoni unošenja opterećenja

(a)

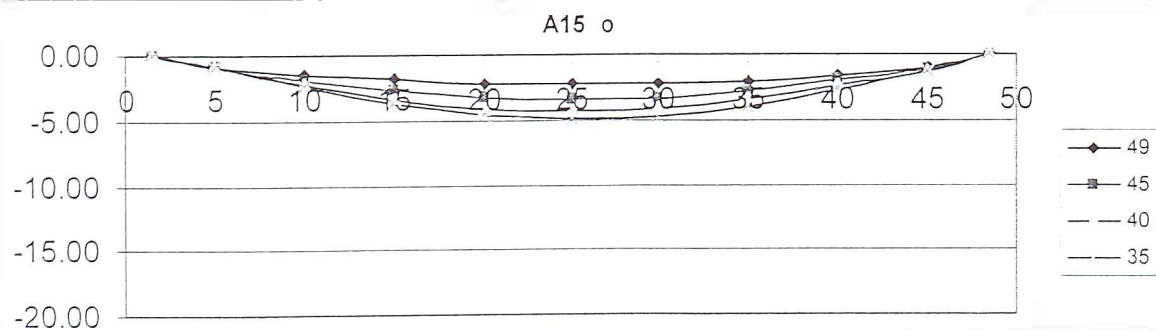


(b)

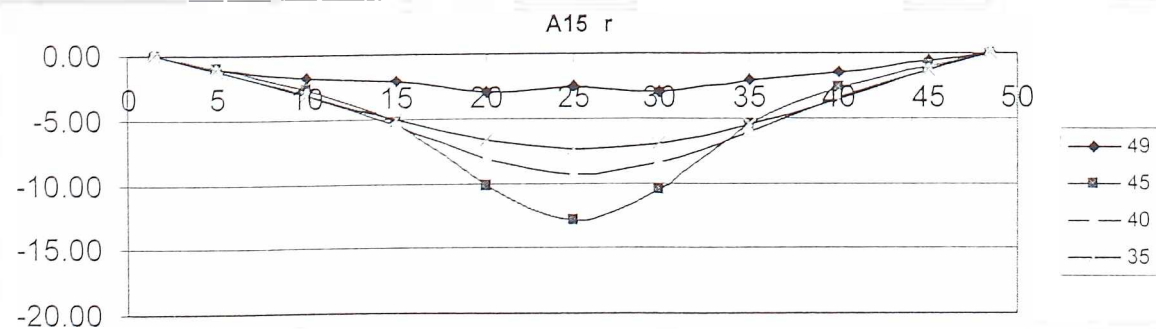


Slika 4.6.10 Nosač A13 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – horizontalni preseći rebra u zoni unošenja opterećenja

(a)

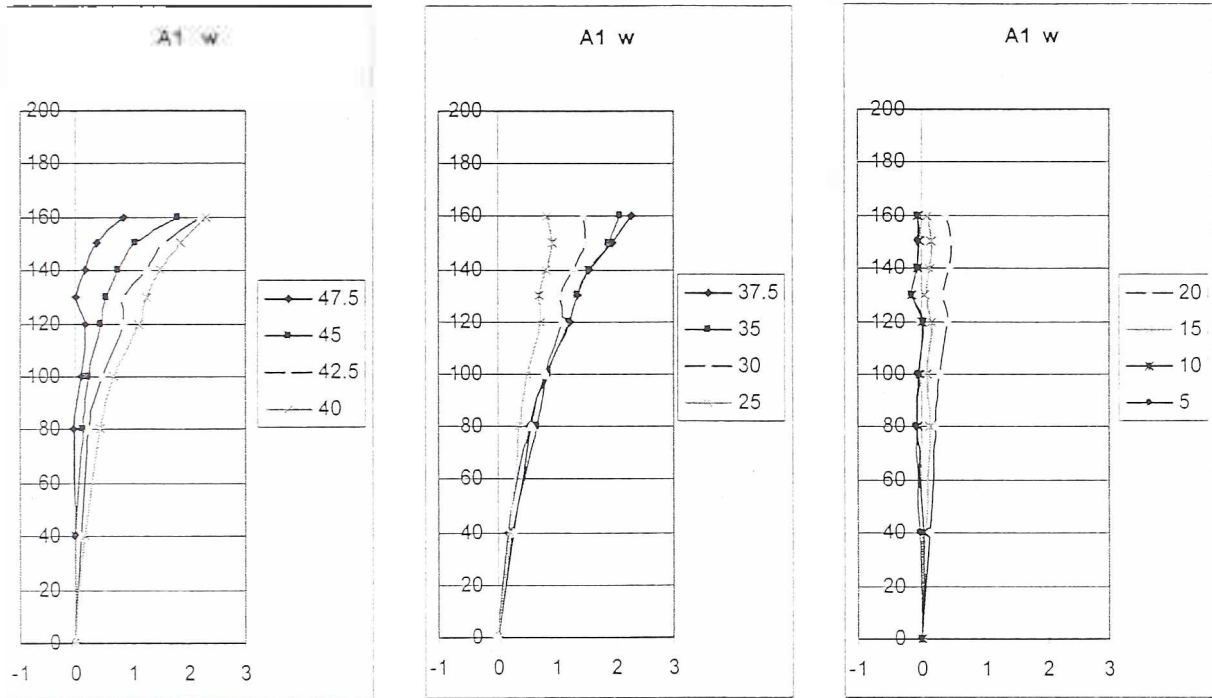


(b)

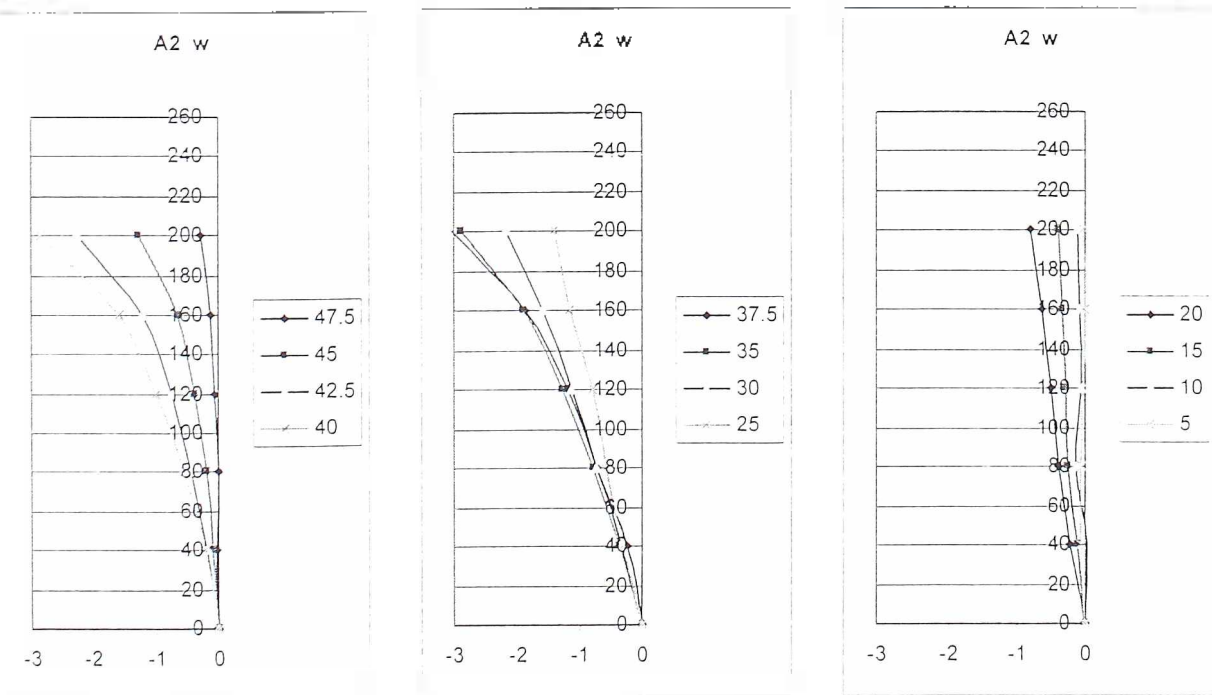


Slika 4.6.11 Nosač A15 (a) početne i (b) rezidualne deformacije – horizontalni preseći rebra u zoni unošenja opterećenja

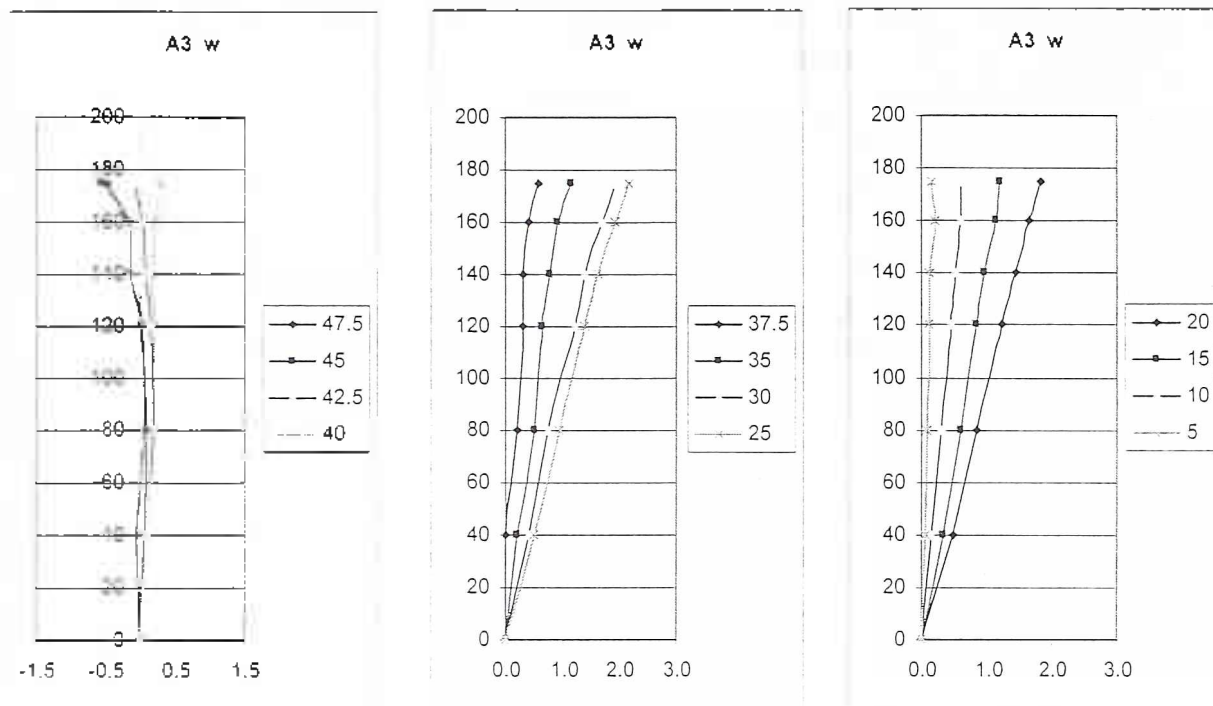
4.7 POMERANJA TAČAKA U SREDNJEM VERTIKALNOM PROFILU SA PORASTOM SILE



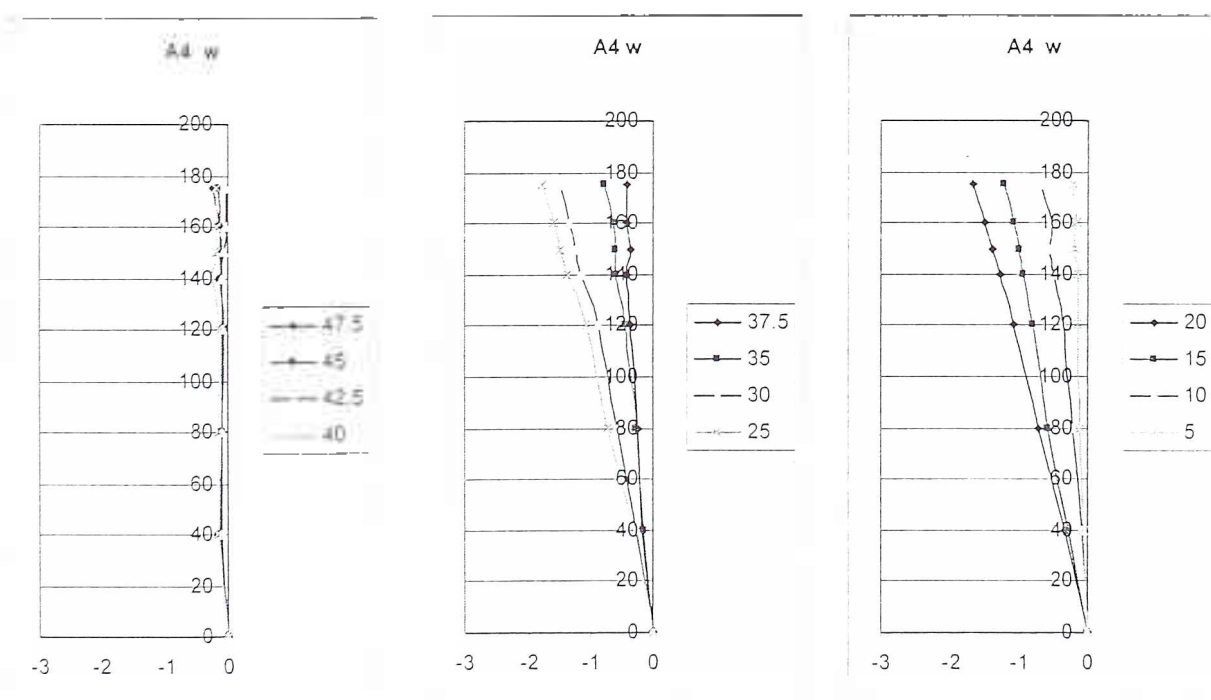
Slika 4.7.1. Nosač A1 : pomeranja tačaka u srednjem vertikalnom profilu sa porastom sile



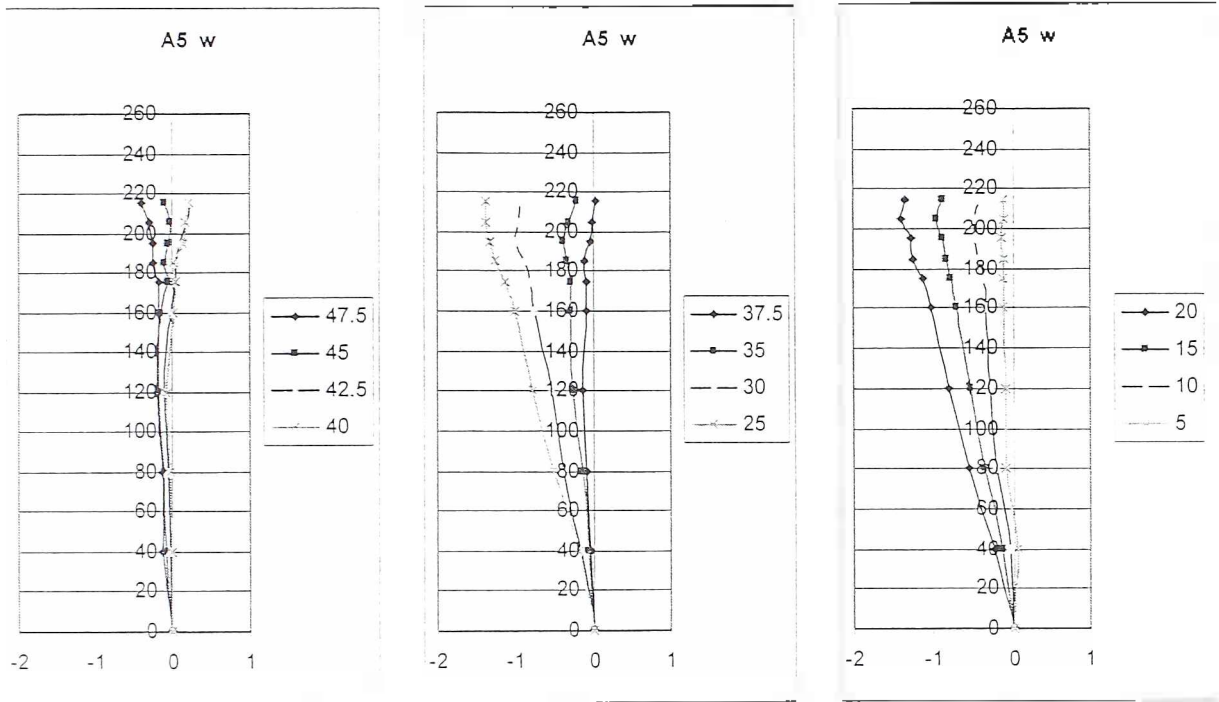
Slika 4.7.2. Nosač A2 : pomeranja tačaka u srednjem vertikalnom profilu sa porastom sile



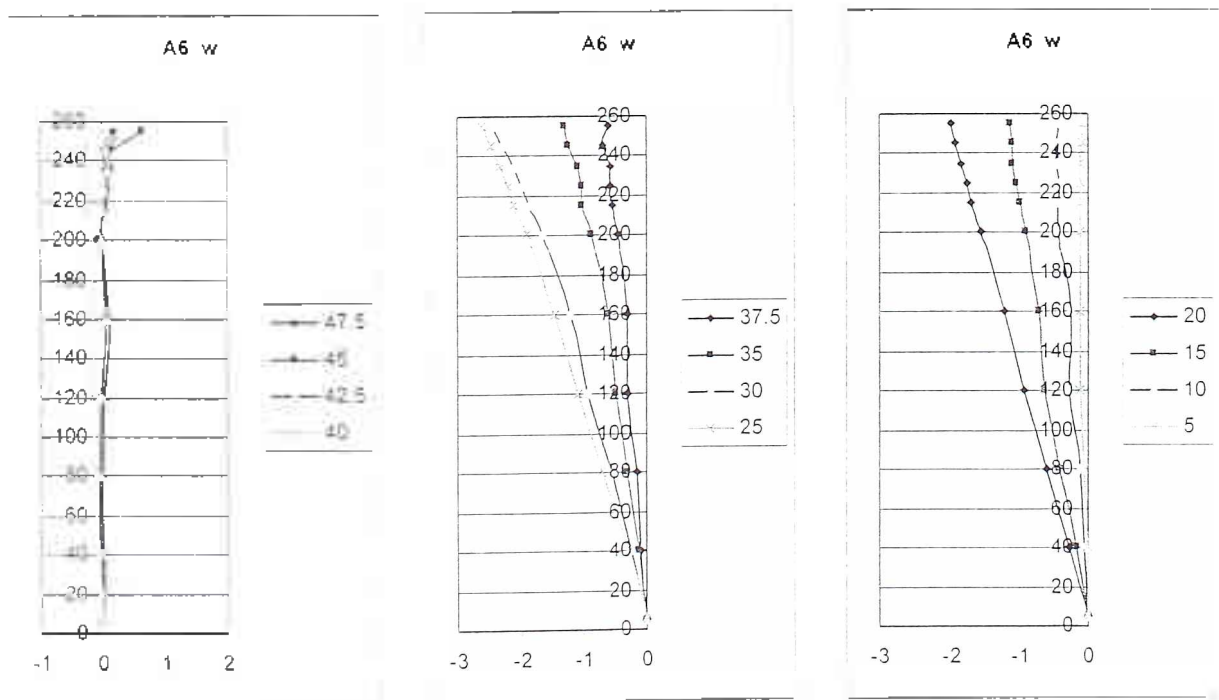
Slika 4.7.3. Nosač A3: pomeranja tačaka u srednjem vertikalnom profilu sa porastom sile



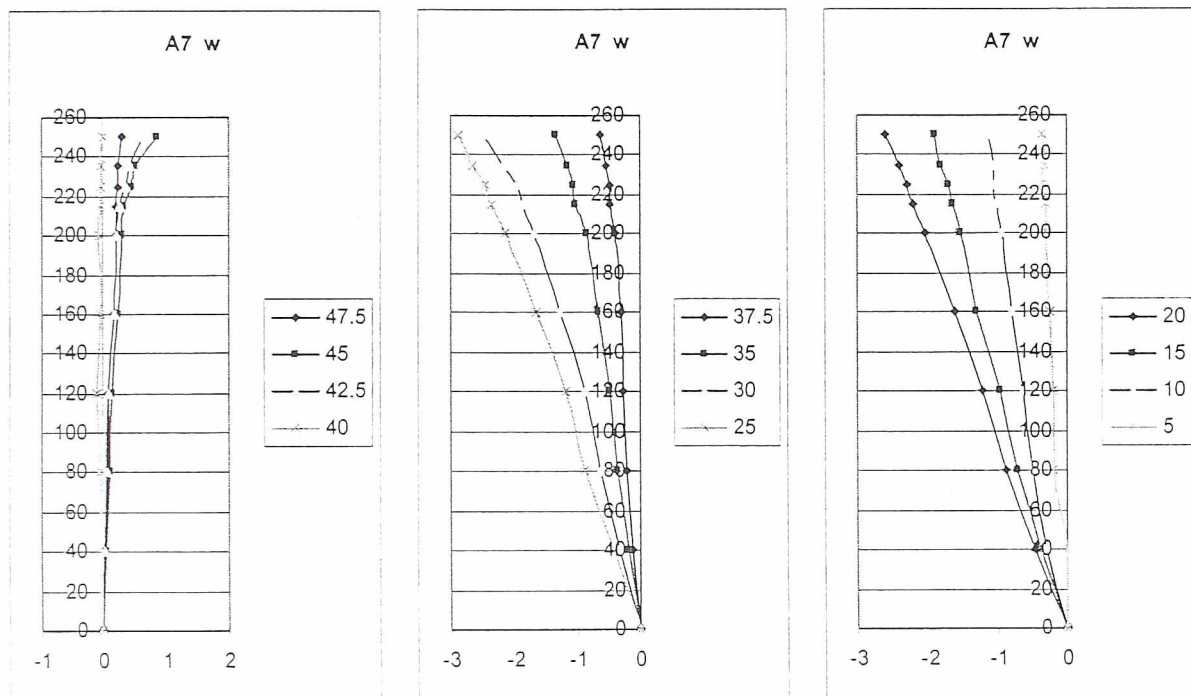
Slika 4.7.4. Nosač A4: pomeranja tačaka u srednjem vertikalnom profilu sa porastom sile



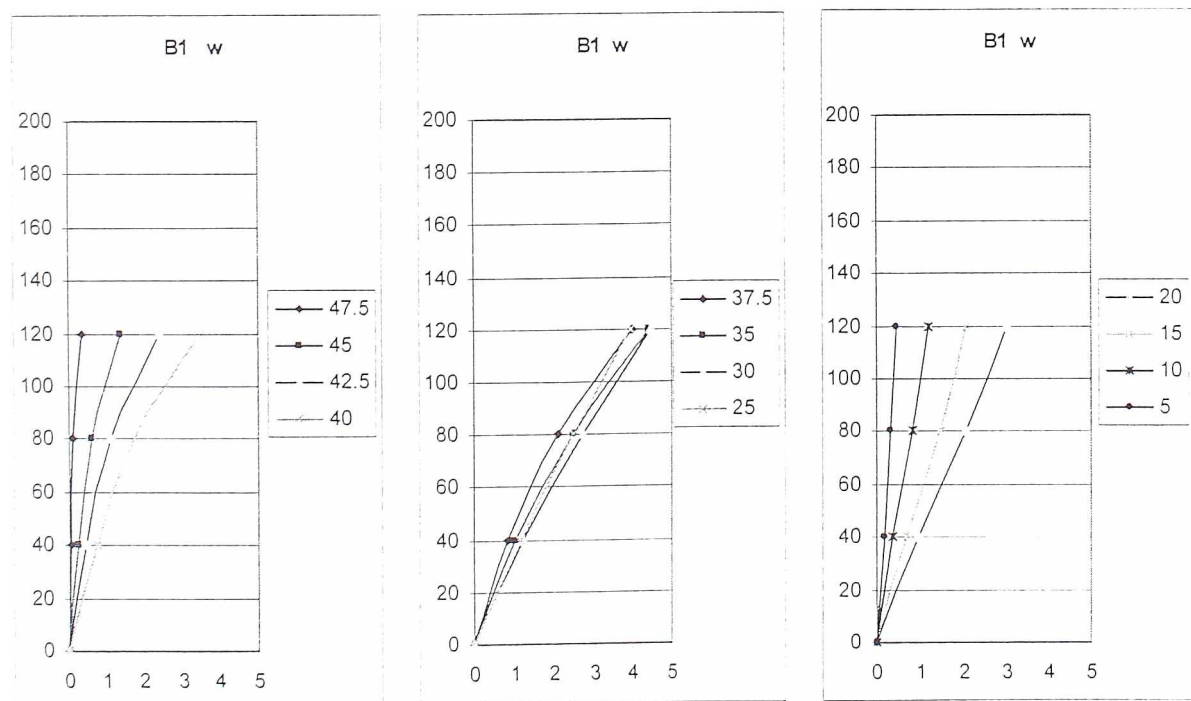
Slika 4.7.5. Nosač A5: pomeranja tačaka u srednjem vertikalnom profilu sa porastom sile



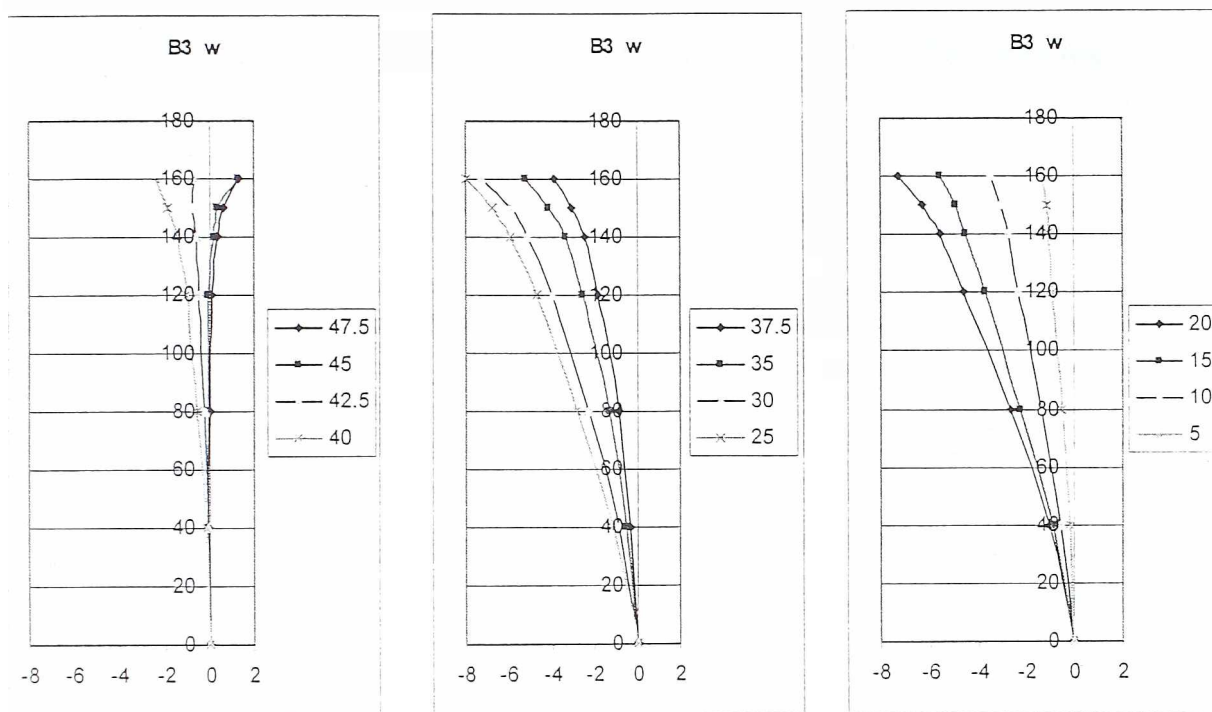
Slika 4.7.6 Nosač A6: pomeranja tačaka u srednjem vertikalnom profilu sa porastom sile



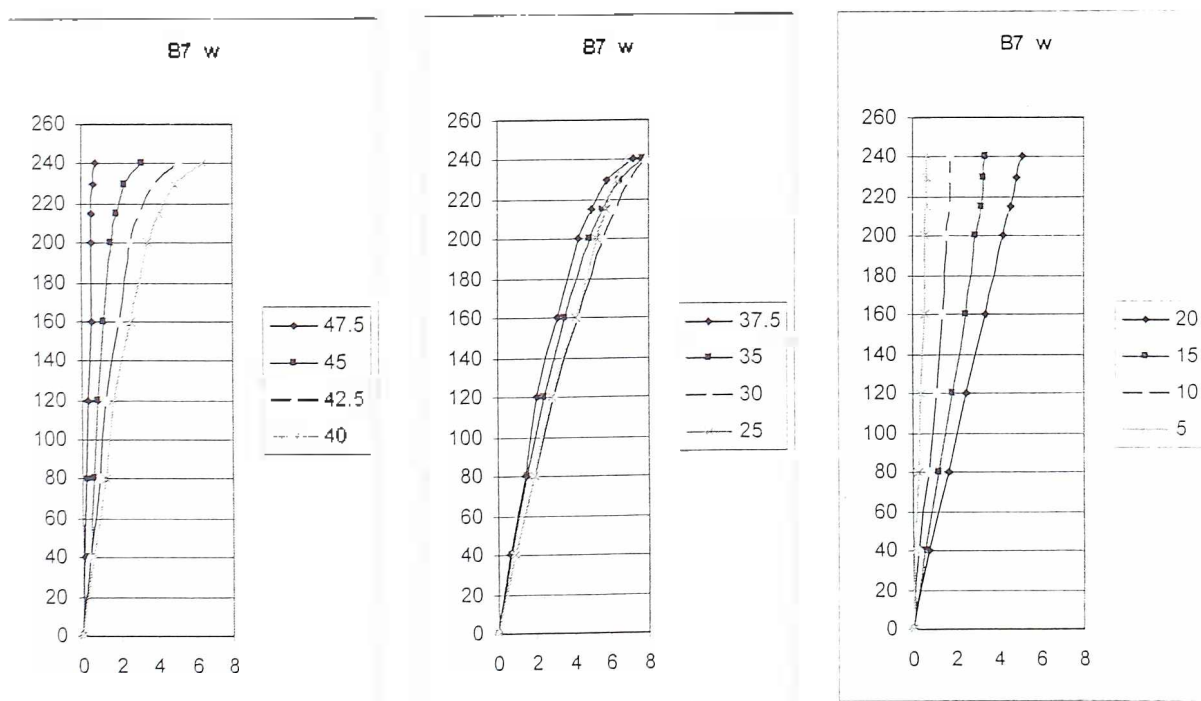
Slika 4.7.7. Nosač A7: pomeranja tačaka u srednjem vertikalnom profilu sa porastom sile



Slika 4.7.8 Nosač B1: pomeranja tačaka u srednjem vertikalnom profilu sa porastom sile



Slika 4.7.9. Nosač B3: pomeranja tačaka u srednjem vertikalnom profilu sa porastom sile

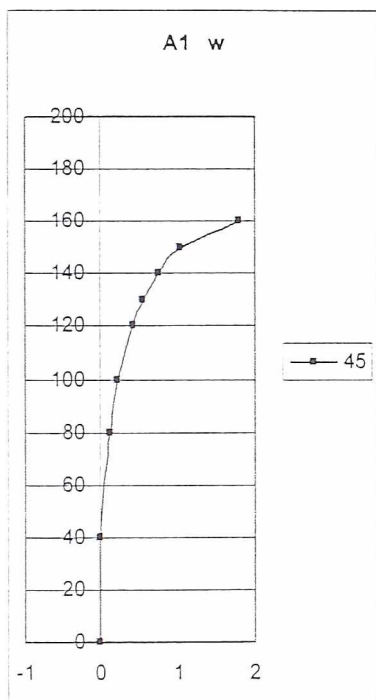


Slika 4.7.10. Nosač B7: pomeranja tačaka u srednjem vertikalnom profilu sa porastom sile

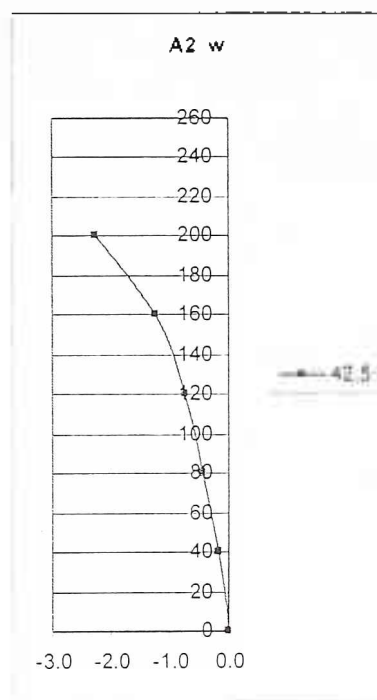
napomena : dimenzije nosača na svim dijagramima su u cm a veličine deformacija u mm.

4.8 DIJAGRAMI SILA – POMERANJE KARAKTERISTIČNE TAČKE REBRA

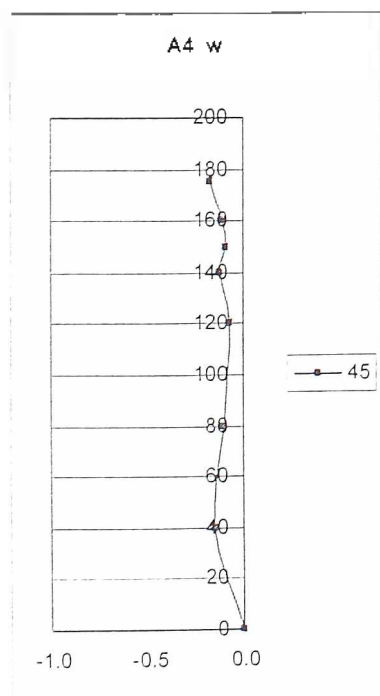
sila P - pomeranje w



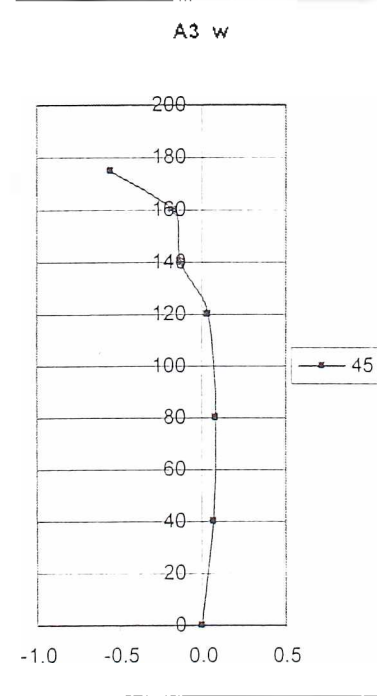
Slika 4.8.1



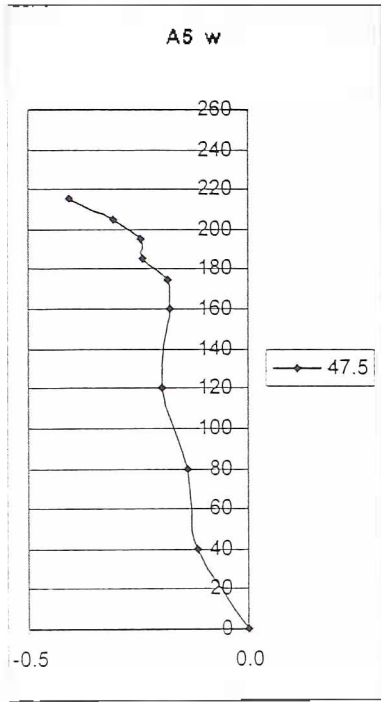
Slika 4.8.2



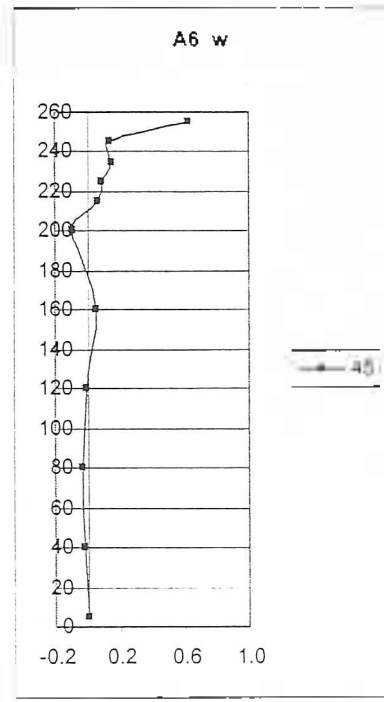
Slika 4.8.3



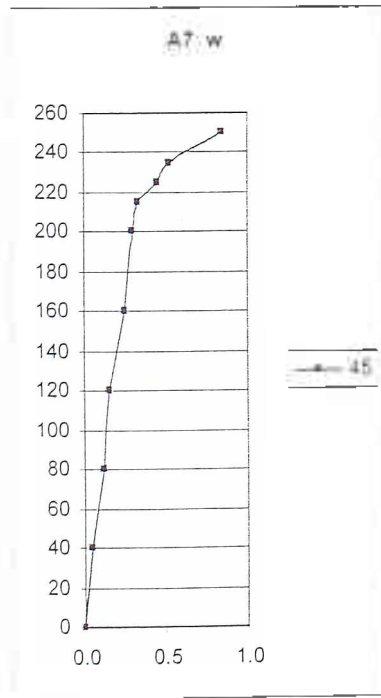
Slika 4.8.4



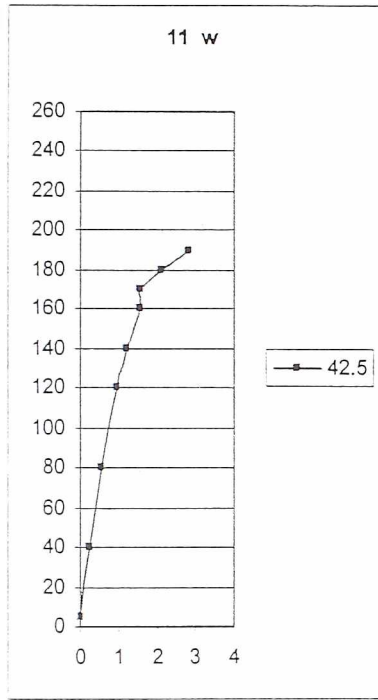
Slika 4.8.5



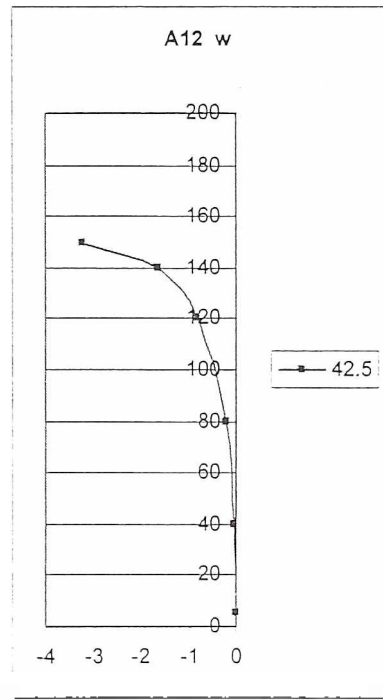
Slika 4.8.6



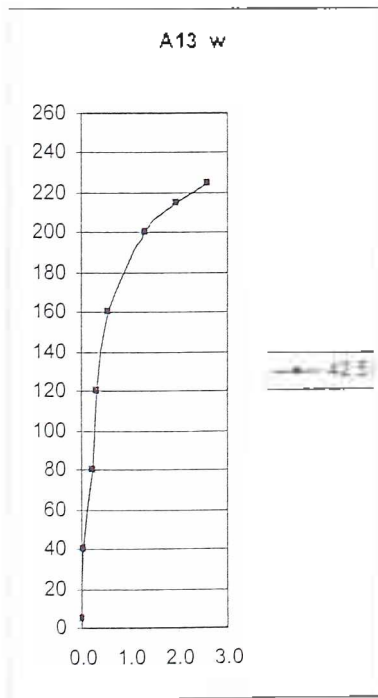
Slika 4.8.7



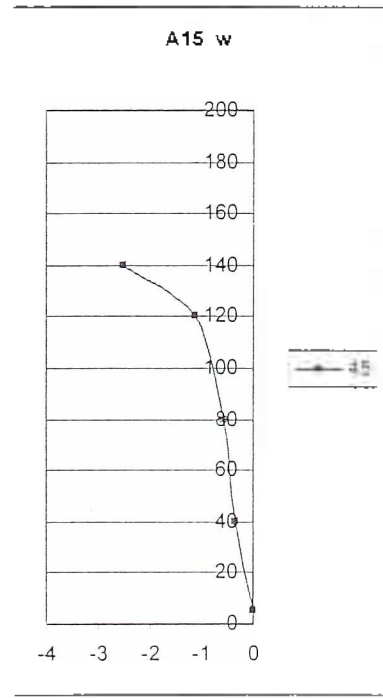
Slika 4.8.8



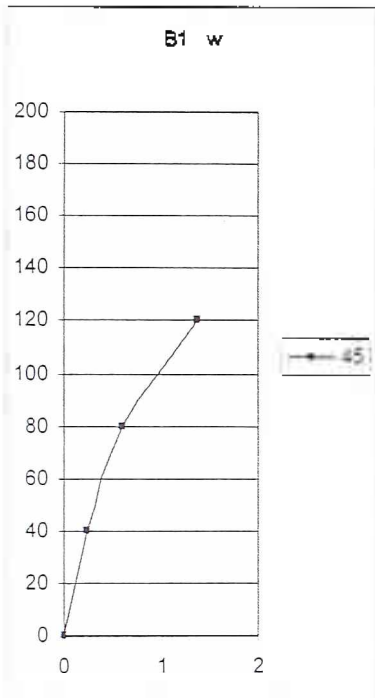
Slika 4.8.9



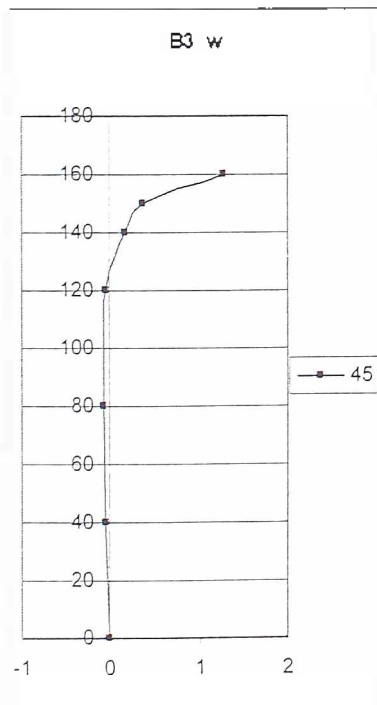
Slika 4.8.10



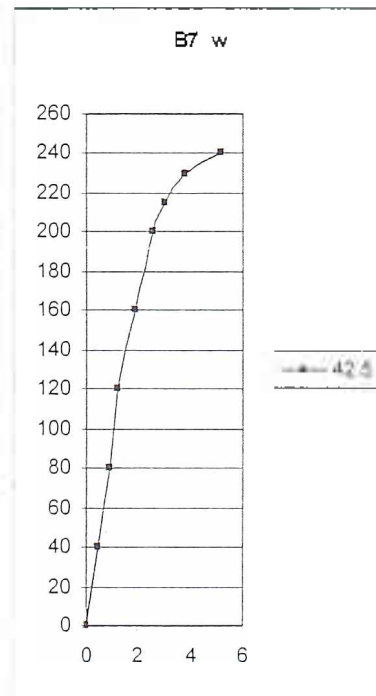
Slika 4.8.11



Slika 4.8.12



Slika 4.8.13

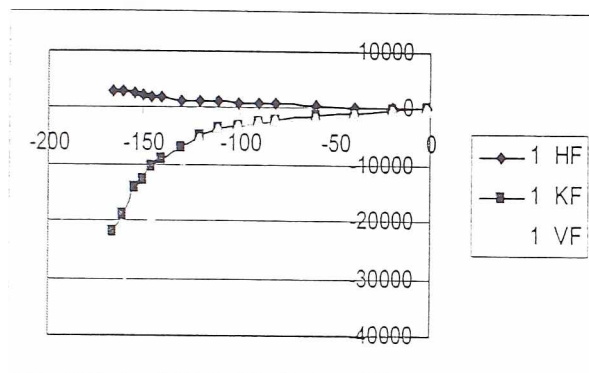


Slika 4.8.14

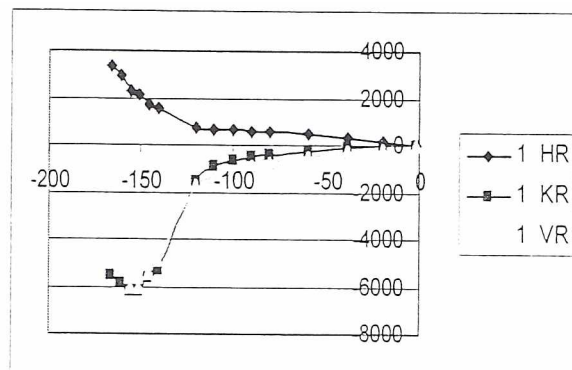
4.9 REZULTATI DOBIJENI POMOĆU MERNIH TRAKA

H – horizontalna merna traka K – kosa merna traka V – vertikalna merna traka

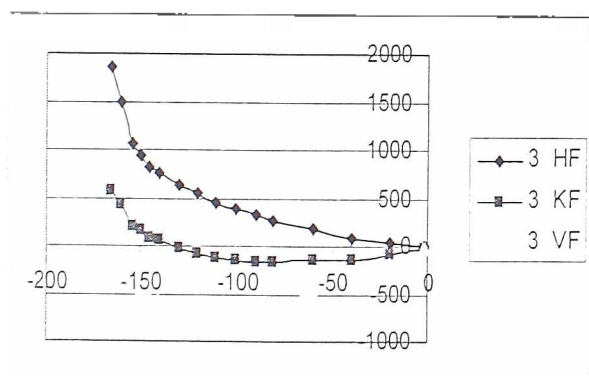
F – prednja strana R – zadnja strana dilatacije se množe sa 10^{-6}



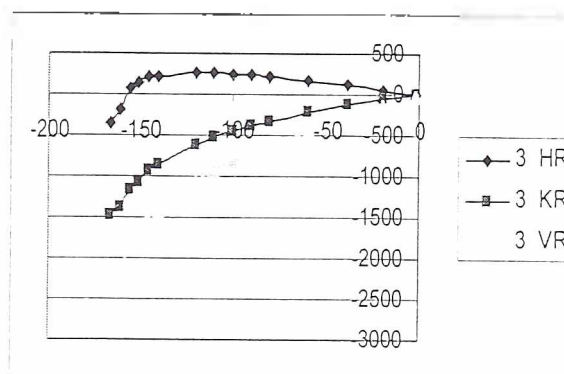
Slika 4.9.1 Nosač A1 rozeta 1 prednja strana



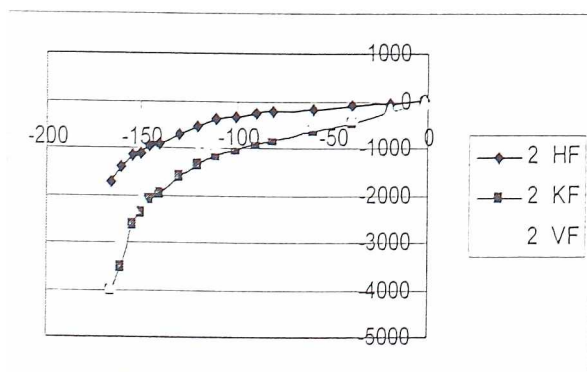
Slika 4.9.2 Nosač A1 rozeta 1 zadnja strana



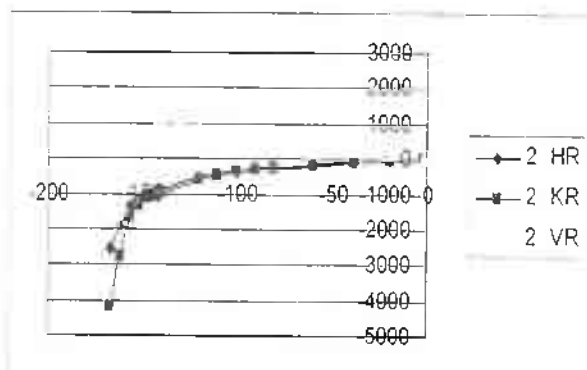
Slika 4.9.3 Nosač A1 rozeta 3 prednja strana



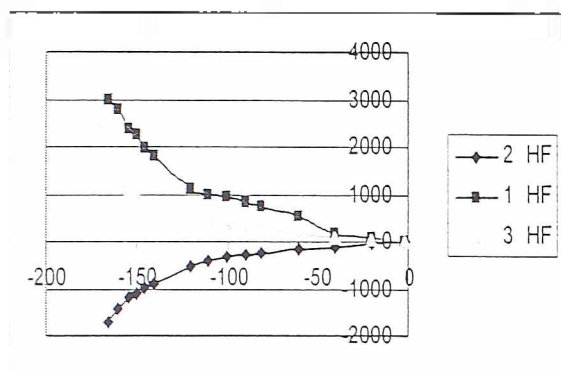
Slika 4.9.4 Nosač A1 rozeta 3 zadnja strana



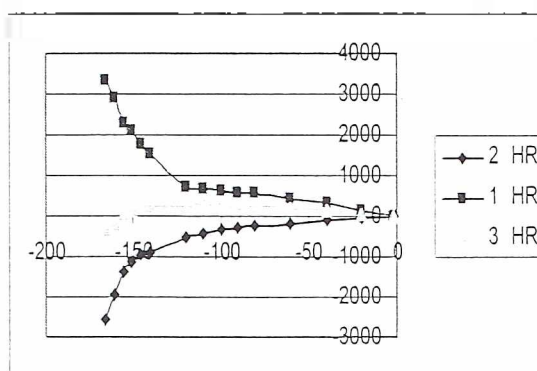
Slika 4.9.5 Nosač A1 rozeta 2 prednja strana



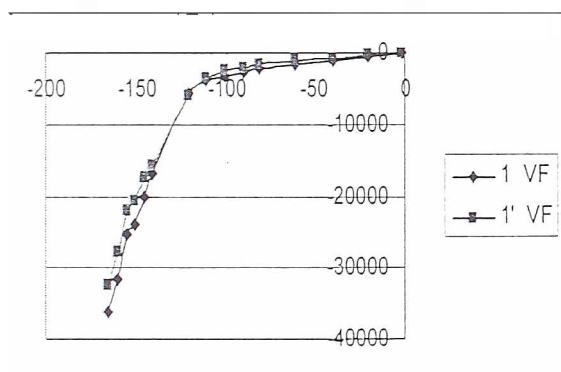
Slika 4.9.6 Nosač A1 rozeta 2 zadnja strana



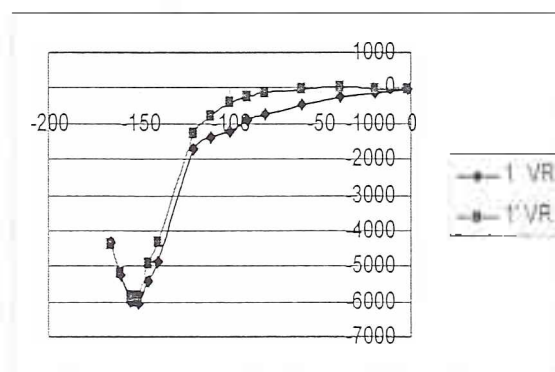
Slika 4.9.7 Nosač A1 poredjenje dilatacija sa horizontalnih memih traka na rozetama 1, 2, 3 prednja strana



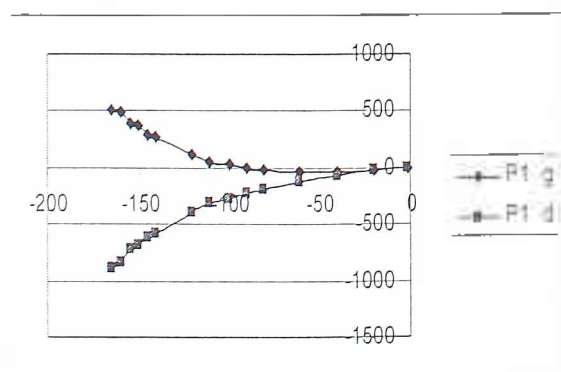
Slika 4.9.8 Nosač A1 poredjenje dilatacija sa horizontalnih memih traka na rozetama 1, 2, 3 zadnja strana



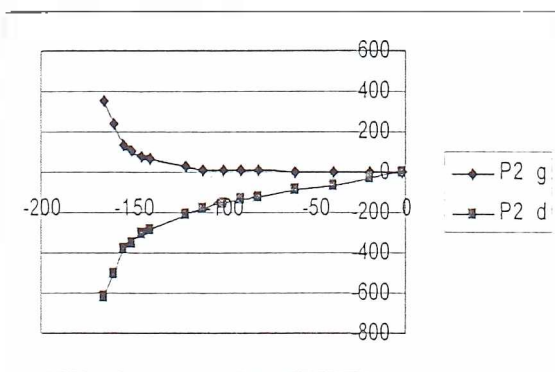
Slika 4.9.9 Nosač A1 poredjenje dilatacija sa vertikalnih simetrično postavljenih memih traka u odnosu na sredinu nosača prednja strana



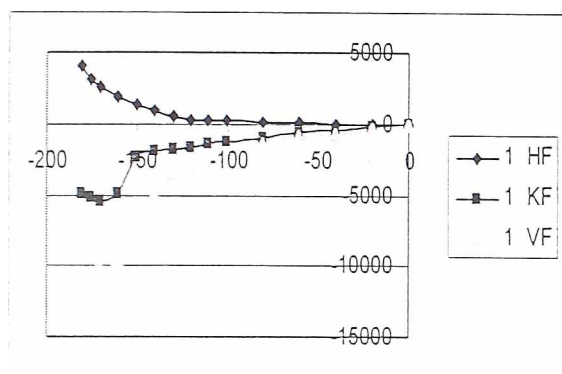
Slika 4.9.10 Nosač A1 poredjenje dilatacija sa vertikalnih simetrično postavljenih memih traka u odnosu na sredinu nosača zadnja strana



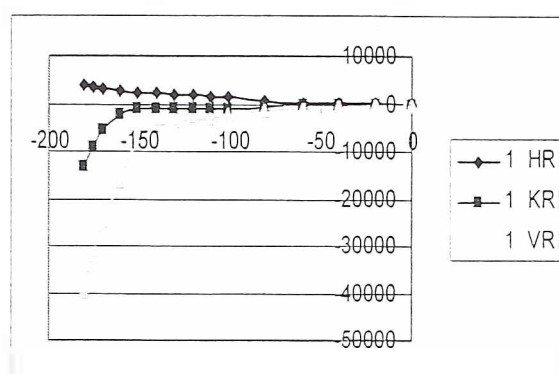
Slika 4.9.11 Nosač A1 dilatacije sa memih traka na pojasu



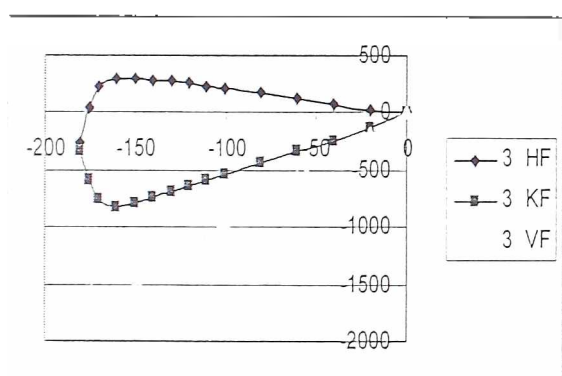
Slika 4.9.12 Nosač A1 dilatacije sa memih traka na pojasu



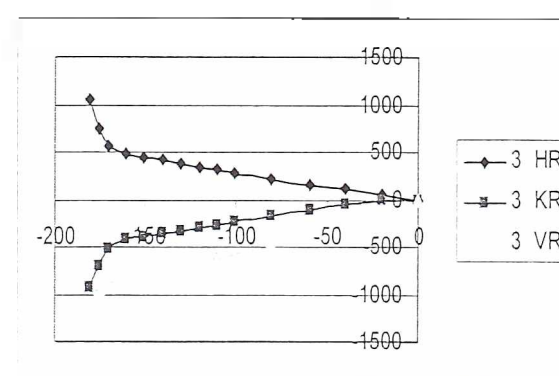
Slika 4.9.13 Nosač A3 rozeta 1 prednja strana



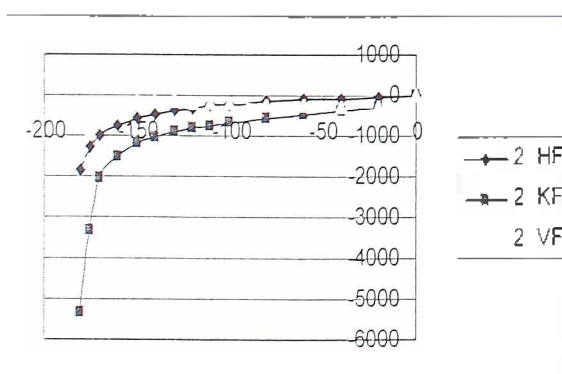
Slika 4.9.14 Nosač A3 rozeta 1 zadnja strana



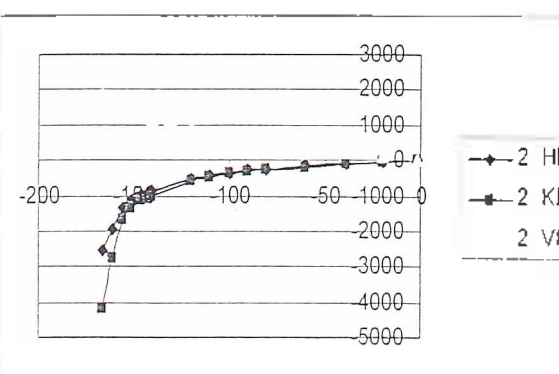
Slika 4.9.15 Nosač A3 rozeta 3 prednja strana



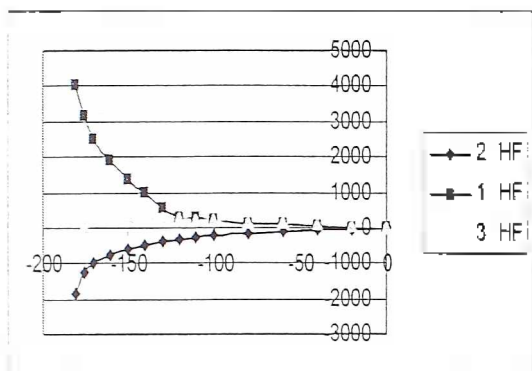
Slika 4.9.16 Nosač A3 rozeta 3 zadnja strana



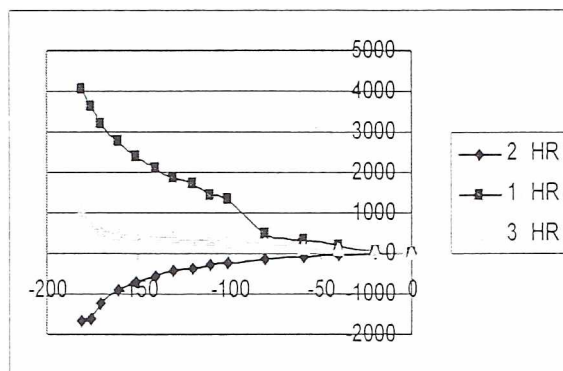
Slika 4.9.17 Nosač A3 rozeta 2 prednja strana



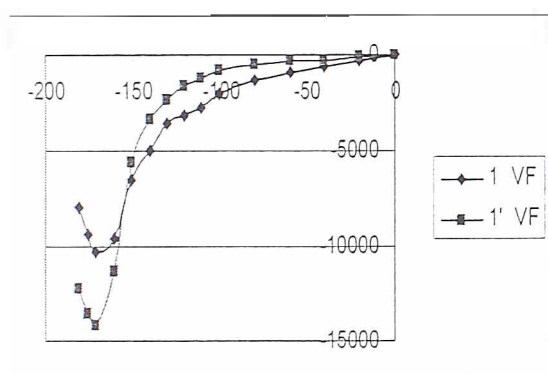
Slika 4.9.18 Nosač A1 rozeta 2 zadnja strana



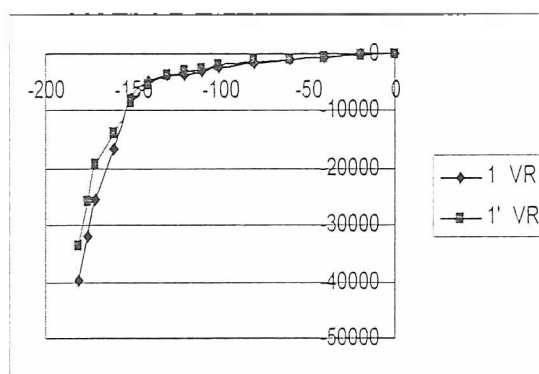
Slika 4.9.19 Nosač A3 poredjenje dilatacija sa horizontalnih mernih traka na rozetama 1, 2, 3 prednja strana



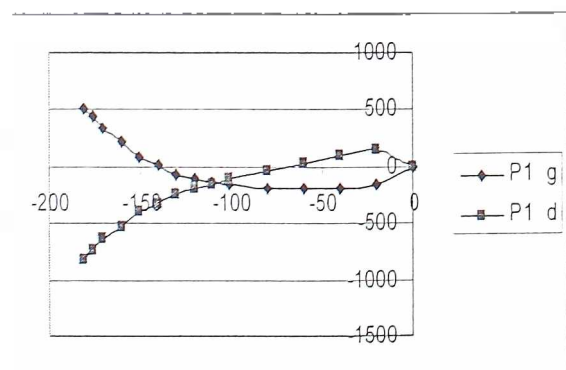
Slika 4.9.20 Nosač A3 poredjenje dilatacija sa horizontalnih mernih traka na rozetama 1, 2, 3 zadnja strana



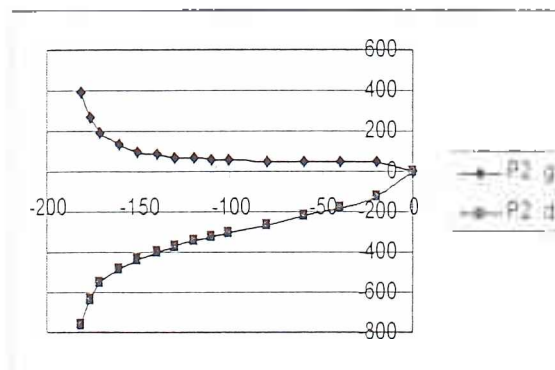
Slika 4.9.21 Nosač A3 poredjenje dilatacija sa vertikalnih simetrično postavljenih mernih traka u odnosu na sredinu nosača prednja strana



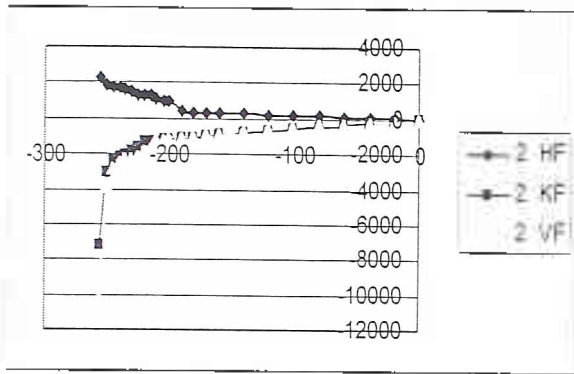
Slika 4.9.22 Nosač A3 poredjenje dilatacija sa vertikalnih simetrično postavljenih mernih traka u odnosu na sredinu nosača zadnja strana



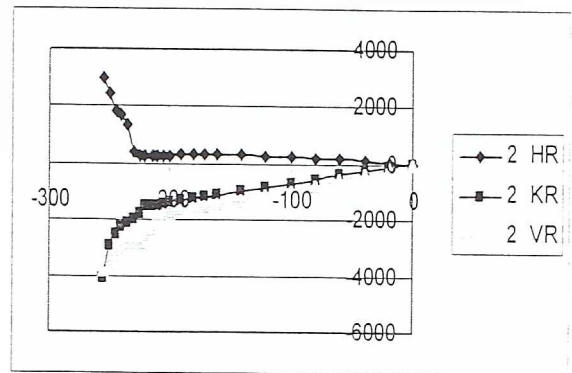
Slika 4.9.23 Nosač A3 dilatacije sa mernih traka na pojasu



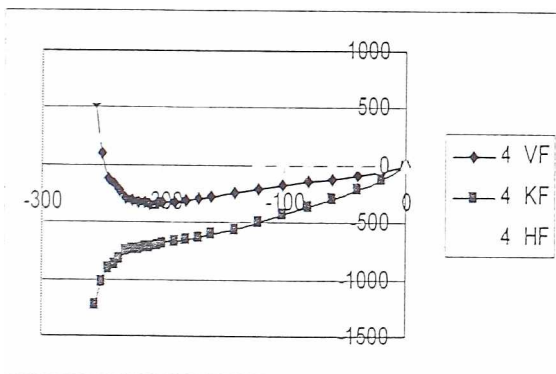
Slika 4.9.24 Nosač A3 dilatacije sa mernih traka na pojasu



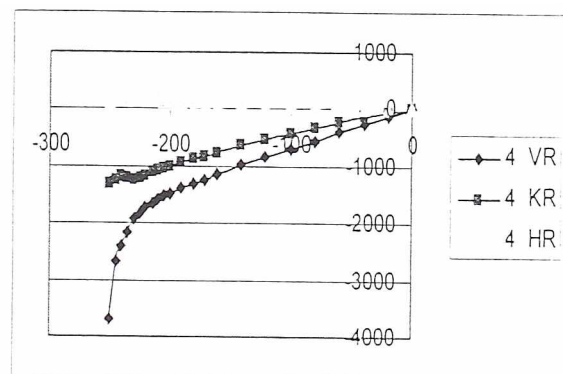
Slika 4.9.25 Nosač A7 rozeta 2 prednja strana



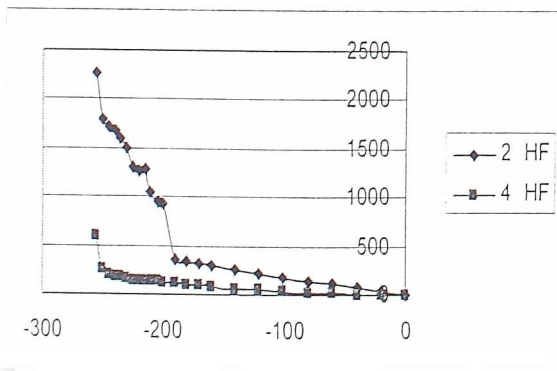
Slika 4.9.26 Nosač A7 rozeta 2 zadnja strana



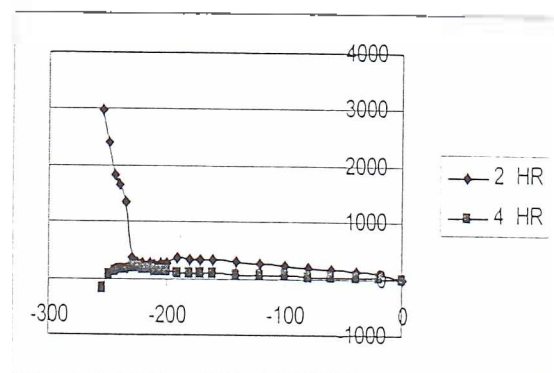
Slika 4.9.27 Nosač A7 rozeta 4 prednja strana



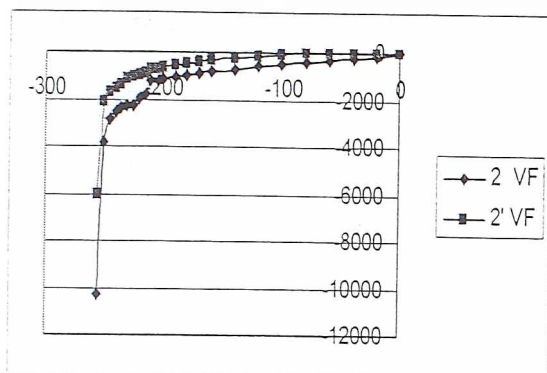
Slika 4.9.28 Nosač A7 rozeta 4 zadnja strana



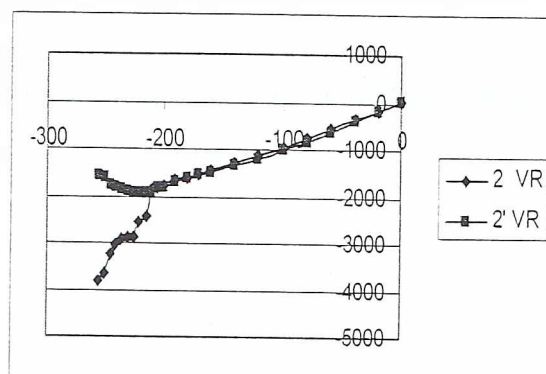
Slika 4.9.29 Nosač A7 poredjenje dilatacija sa horizontalnih mernih traka na rozetama 1, 2, 3 prednja strana



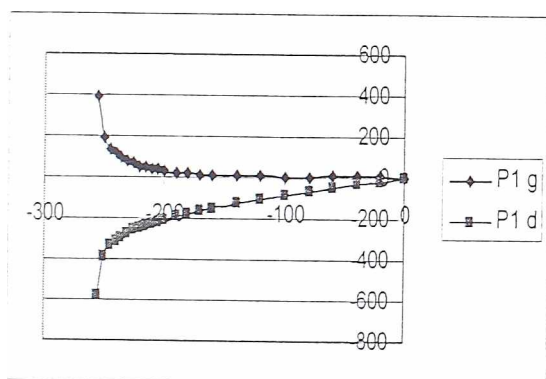
Slika 4.9.30 Nosač A7 poredjenje dilatacija sa horizontalnih mernih traka na rozetama 1, 2, 3 zadnja strana



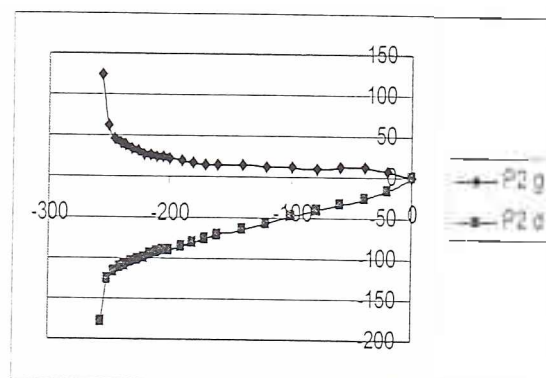
Slika 4.9.31 Nosač A7 poredjenje dilatacija sa vertikalnih simetrično postavljenih mernih traka u odnosu na sredinu nosača prednja strana



Slika 4.9.32 Nosač A7 poredjenje dilatacija sa vertikalnih simetrično postavljenih mernih traka u odnosu na sredinu nosača zadnja strana



Slika 4.9.33 Nosač A7 dilatacije sa mernih traka na pojasu

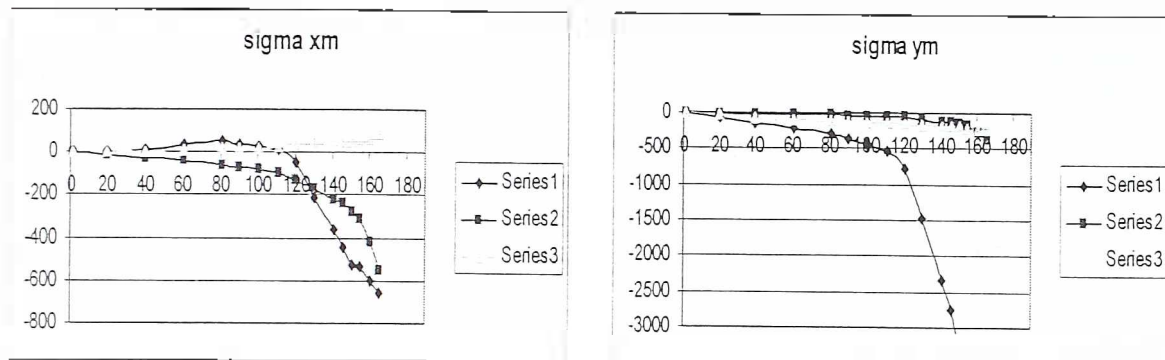


Slika 4.9.34 Nosač A7 dilatacije sa mernih traka na pojasu

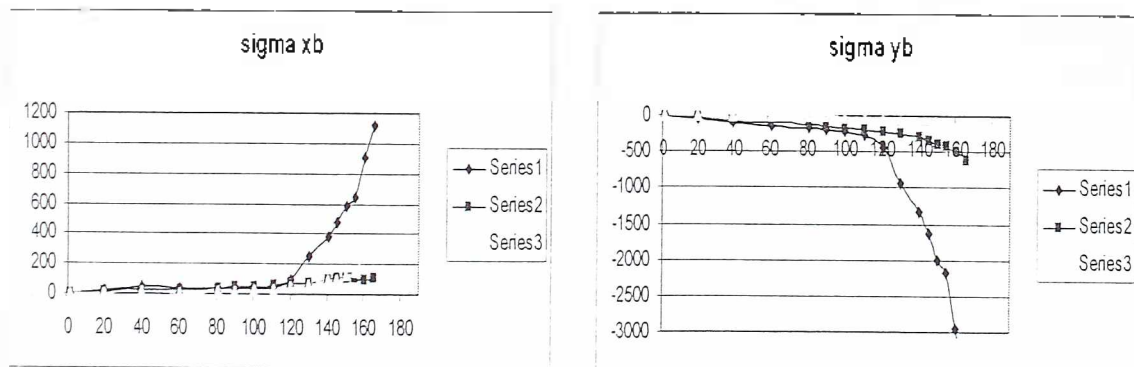
4.10 SRAČUNATI NAPONI

napomena: dijagrami važe samo do vrednosti napona jednakih naponu tečenja (razvlačenja)

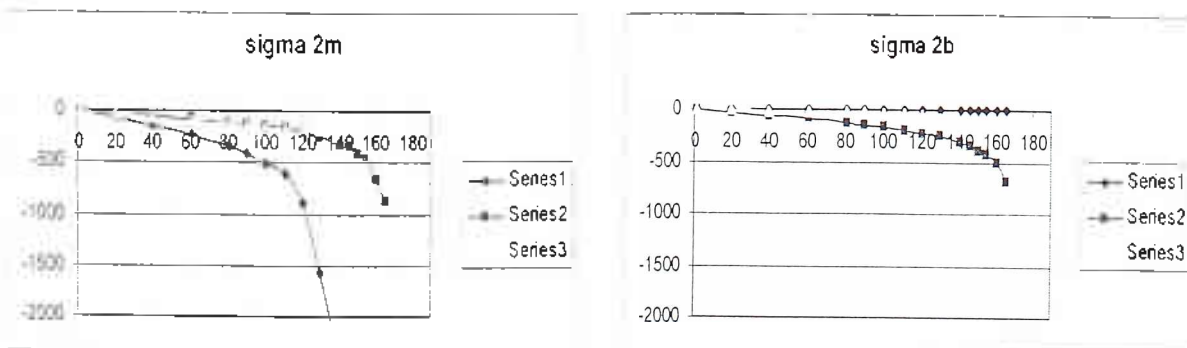
naponi su izraženi u N/mm^2 x – horizontalni y – vertikalni



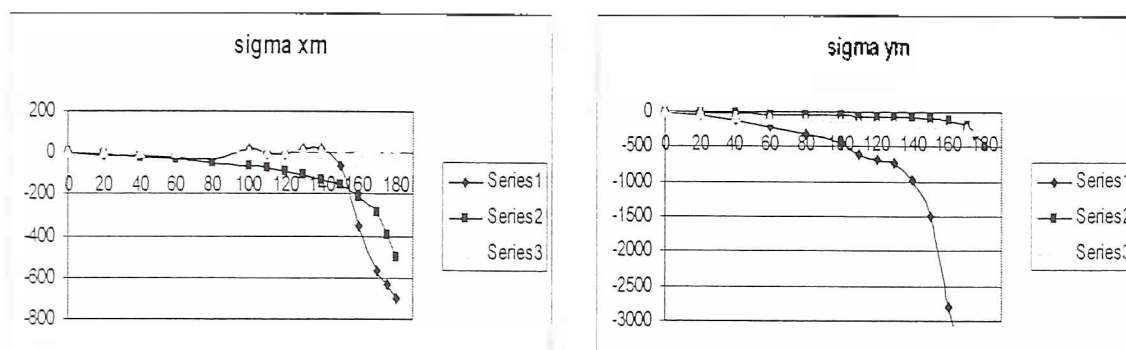
Slika 4.10.1. Nosač A1 naponi (membranski) na mestu rozete 1, 2, 3



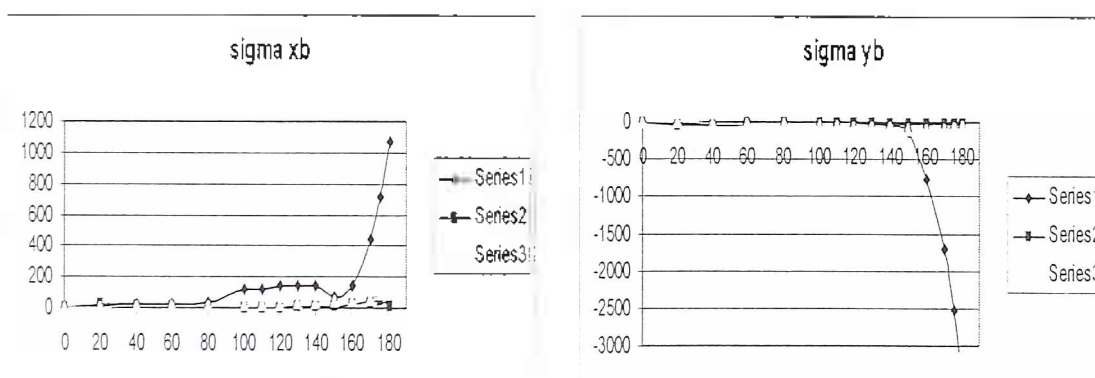
Slika 4.10.2. Nosač A1 naponi (savijanja) na mestu rozete 1, 2, 3



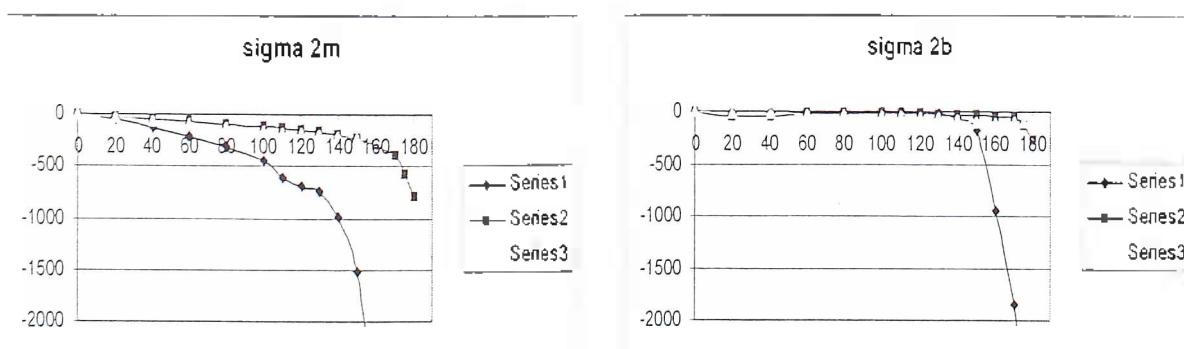
Slika 4.10.3 Nosač A1 Glavni naponi na mestu rozete 1, 2, 3



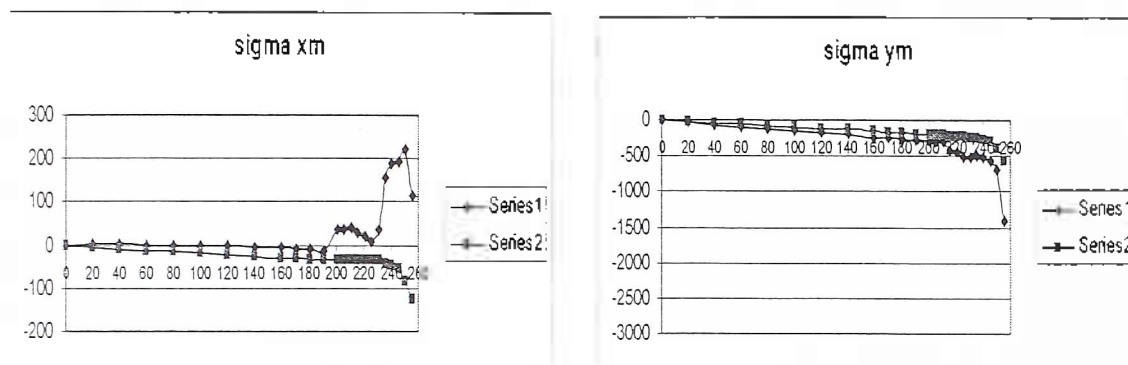
Slika 4.10.4. Nosač A3 naponi (membranski) na mestu rozete 1, 2, 3



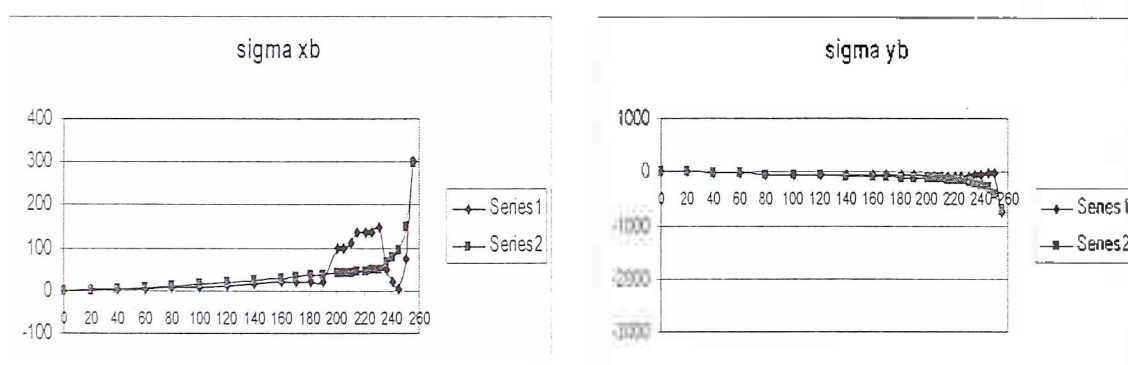
Slika 4.10.5. Nosač A3 naponi (savijanja) na mestu rozete 1, 2, 3



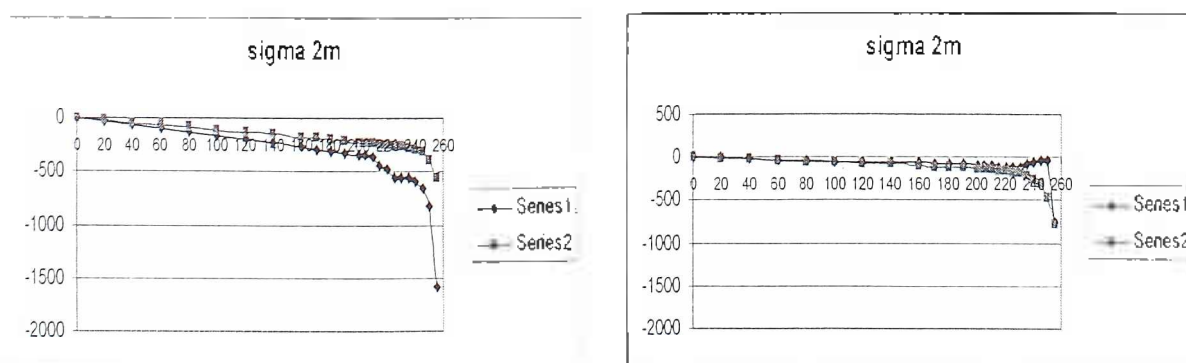
Slika 4.10.6 Nosač A3 Glavni naponi na mestu rozete 1, 2, 3



Slika 4.10.7. Nosač A7 naponi (membranski) na mestu rozete 2, 4



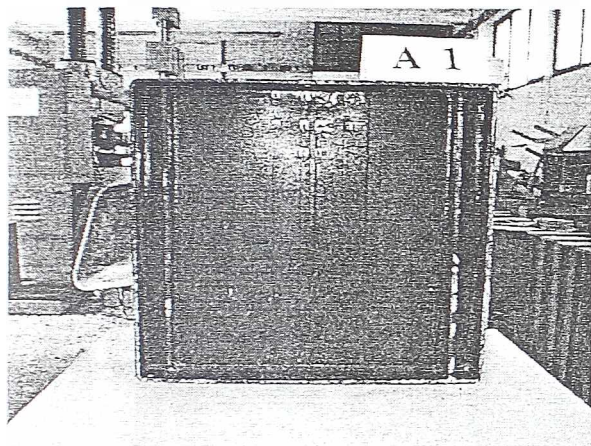
Slika 4.10.8. Nosač A7 naponi (savijanja) na mestu rozete 2, 4



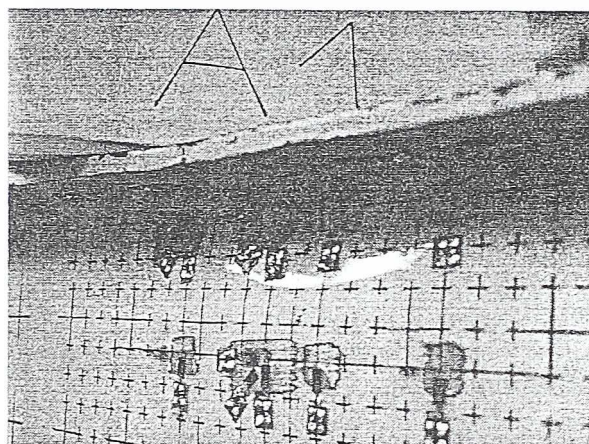
Slika 4.10.9 Nosač A7 Glavni naponi na mestu rozete 2, 4

4.11 FOTOGRAFIJE NOSAČA ZA VREME I POSLE ISPITIVANJA

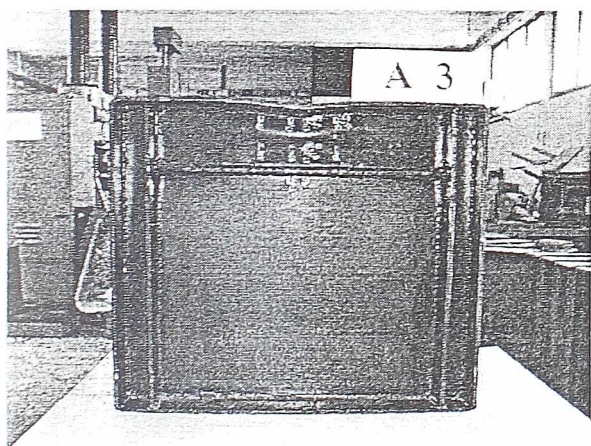
Na sledećim fotografijama su prikazani nosači posle ispitivanja (sa rezidualnim deformacijama)



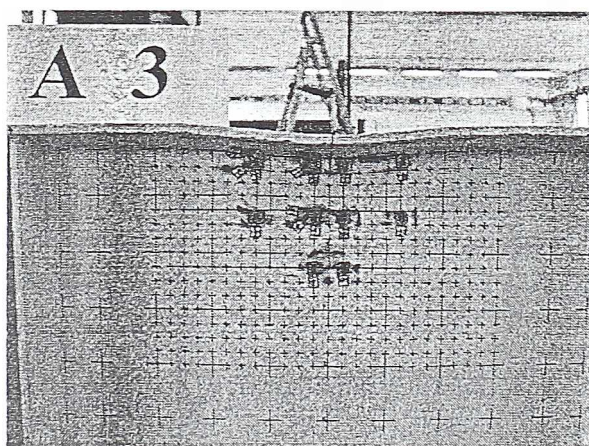
Slika 4.11.1 a Nosač A1 zadnja strana



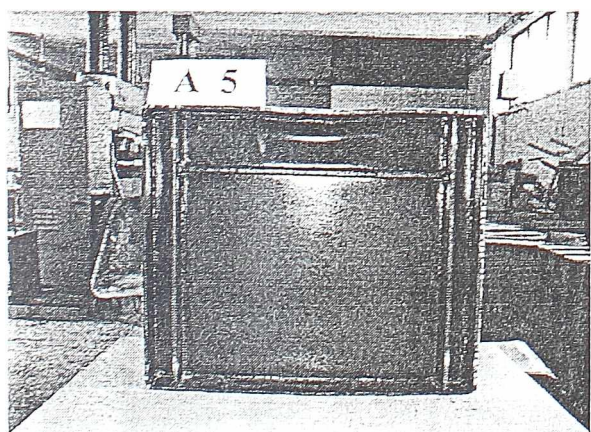
Slika 4.11.1 b Nosač A1 prednja strana



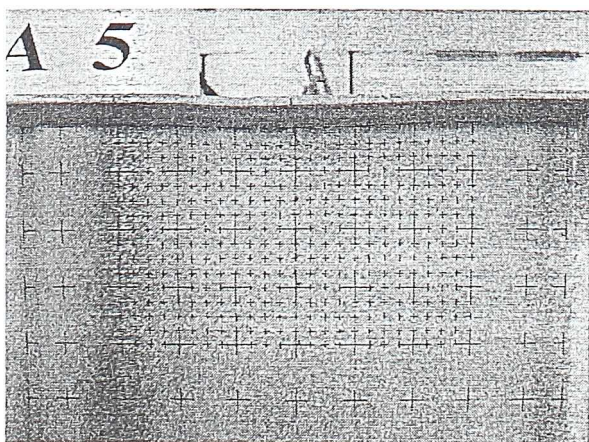
Slika 4.11.2 a Nosač A3 zadnja strana



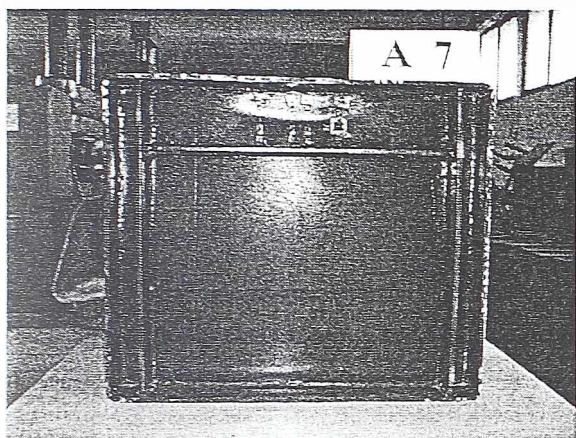
Slika 4.11.2 b Nosač A3 prednja strana



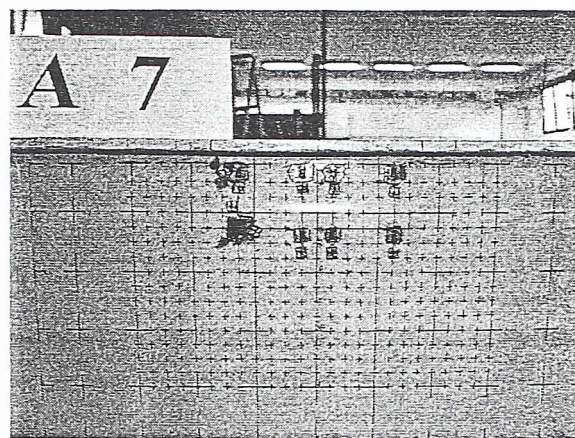
Slika 4.11.3 a Nosač A5 zadnja strana



Slika 4.11.3 b Nosač A5 prednja strana

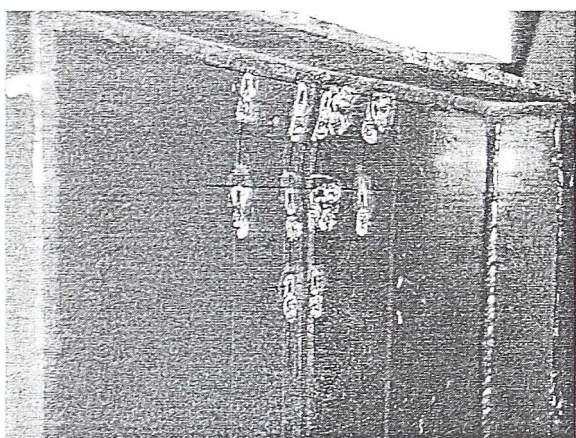


Slika 4.11.4 a Nosáč A7 zadnja strana

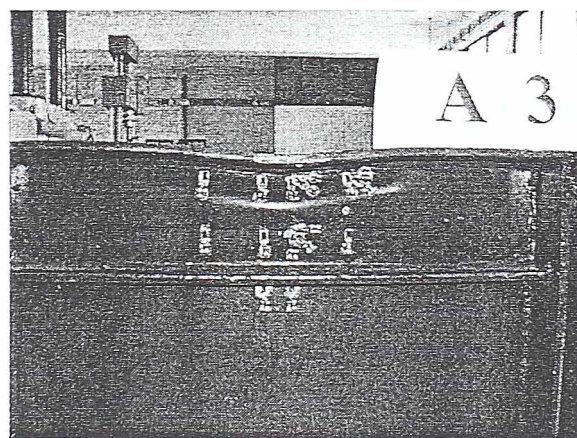


Slika 4.11.4 b Nosáč A7 prednja strana

Na sledečim slikama su prikazani detalji sa izbočenim delom



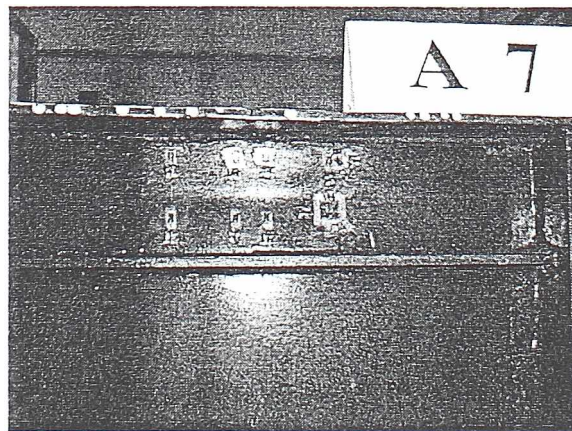
Slika 4.11.5 a Nosáč A1 zadnja strana



Slika 4.11.5 b Nosáč A3 zadnja strana

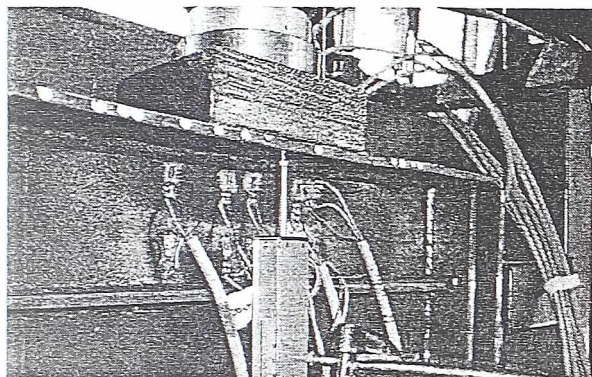


Slika 4.11.6 c Nosáč A5 zadnja strana

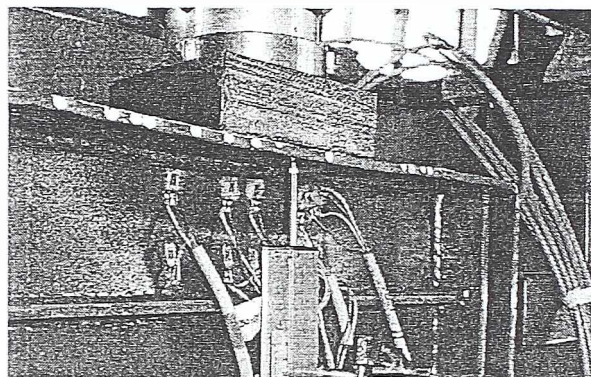


Slika 4.11.6 d Nosáč A7 zadnja strana

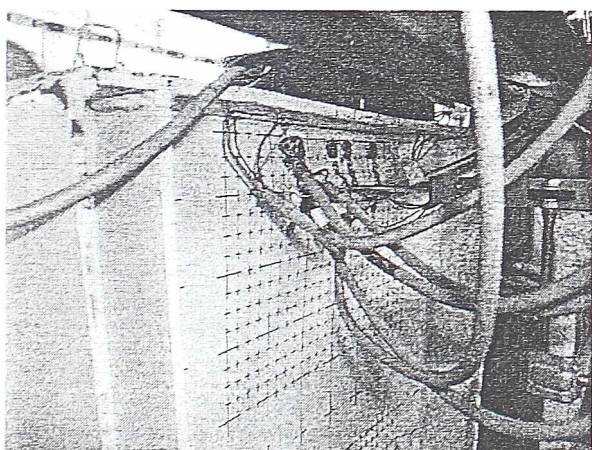
Na slici 4.3.7 su prikazani detalji izbočenja nosača A7 za vreme opita pri dostizanju graničnog opterećenja.



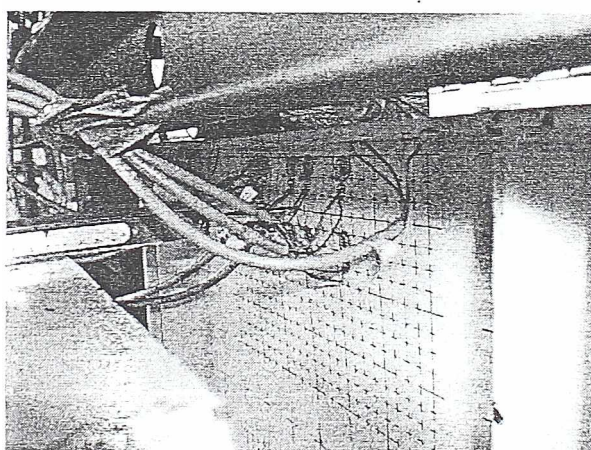
Slika 4.11.7 a Nosač A7 zadnja strana



Slika 4.11.7 b Nosač A7 zadnja strana

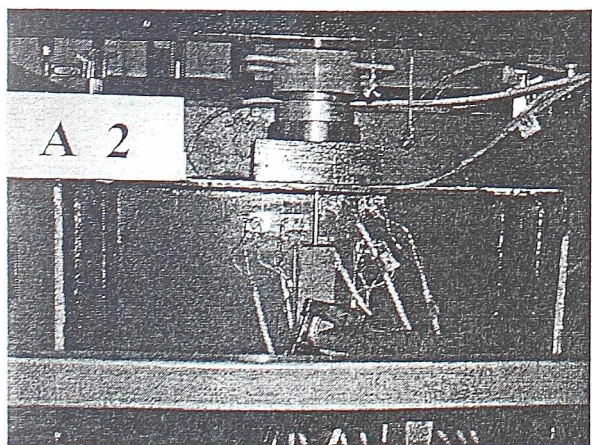


Slika 4.11.7 c Nosač A7 prednja strana

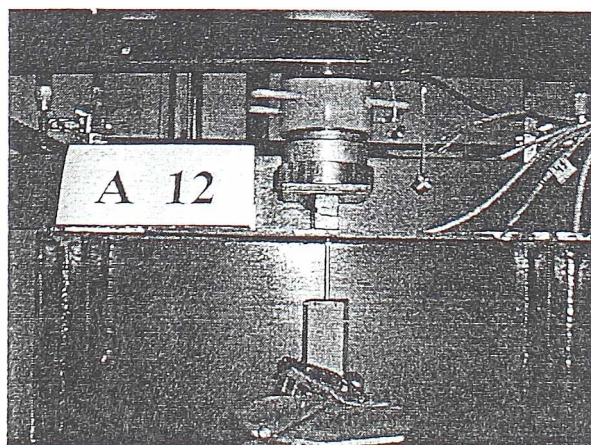


Slika 4.11.7 d Nosač A7 prednja strana

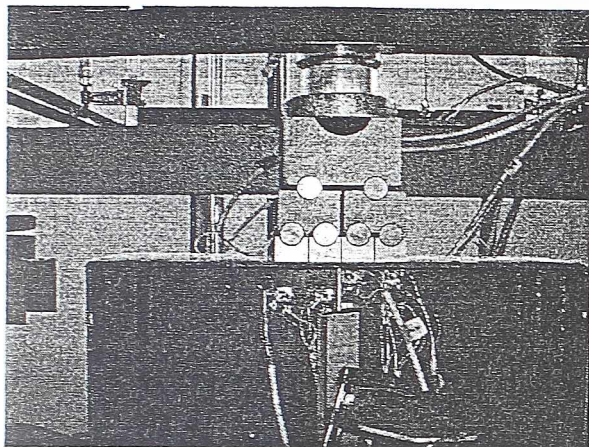
Na sledećim fotografijama su prikazani nosači za vreme ispitivanja



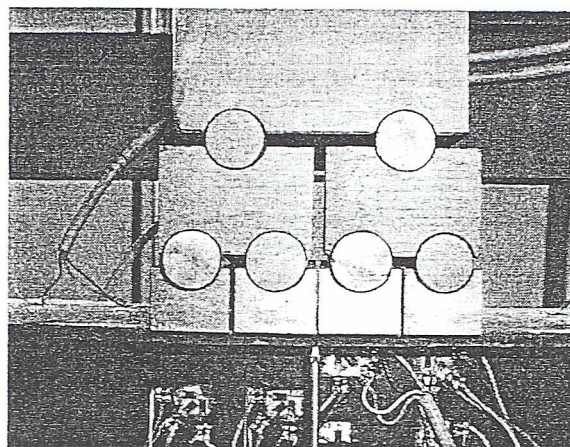
Slika 4.11.8 a Nosač A2 zadnja strana



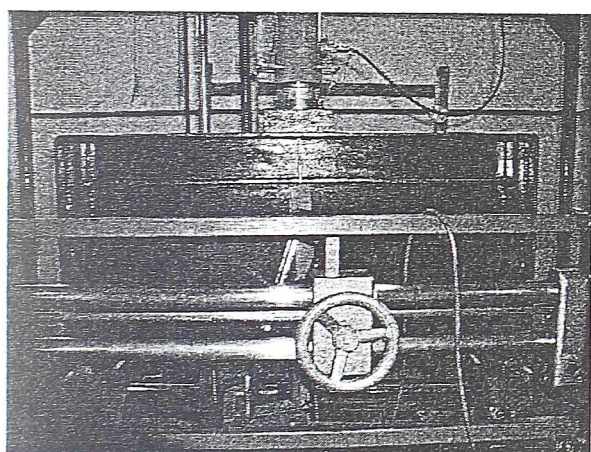
Slika 4.11.8 b Nosač A12 zadnja strana



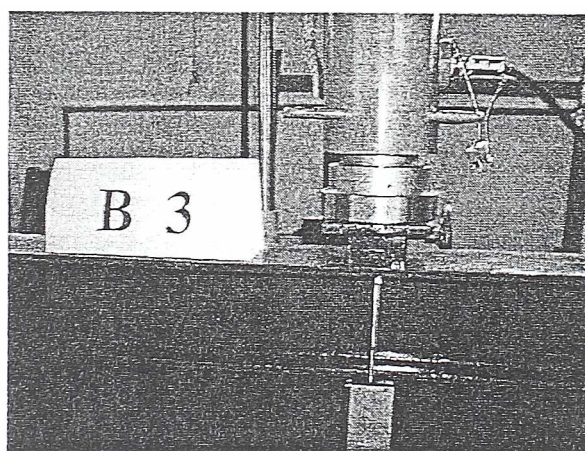
Slika 4.11.9 a Nosač A7 zadnja strana



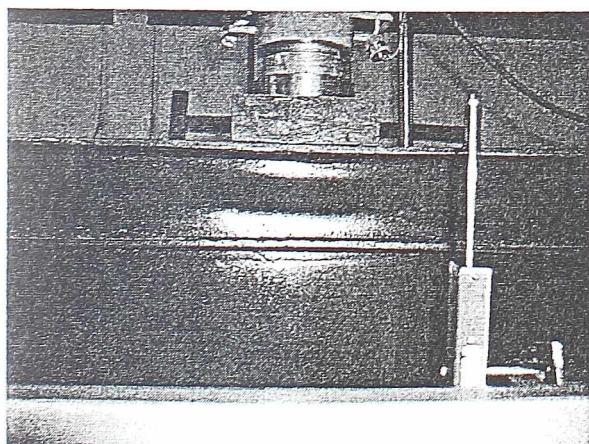
Slika 4.11.9 b Nosač A7 zadnja strana



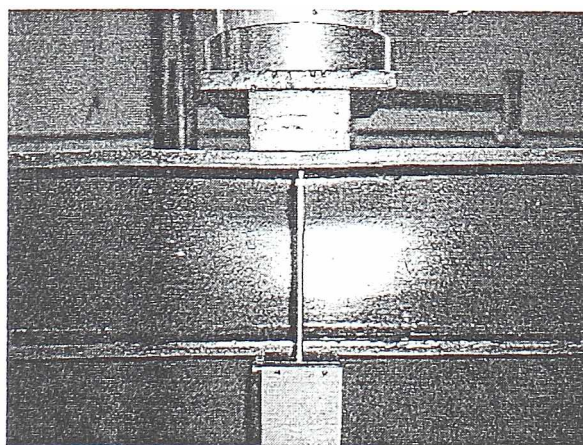
Slika 4.11.10 a Nosač B7 zadnja strana



Slika 4.11.10 b Nosač B3 zadnja strana



Slika 4.11.11 a Nosač B7 zadnja strana



Slika 4.11.11 b Nosač B3 zadnja strana

4.12 ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

4.12.1 PONAŠANJE NOSAČA TOKOM ISPITIVANJA

Pri izradi nosača nisu se zahtevali posebni uslovi izrade, niti specijalne kontrole, kako bi oni odgovarali uobičajenim uslovima proizvodnje čeličnih konstrukcija u praksi. Nosači su zato imali svoje početne deformacije, kako rebra tako i pojasa. Zbog toga nije moglo da bude ostvareno idealno naleganje svih elemenata u sistemu, pa kada se posmatraju apsolutna pomeranja pojedinih tačaka u funkciji sile, uočavaju se u početku, pri manjim opterećenjima, različite nepravilnosti, koje odgovaraju samopodešavanju sistema. Ubrzo, međutim uočava se u većem delu linearna promena svih veličina. Pri tome deformacije rebra se postepeno povećavaju, a deformacije pojasa u manjem obimu.

Do izraženijih nelinearnosti dolazi tek blizu dostizanje granične vrednosti sile.

Deformacija rebra u vertikalnim presecima

Kod rebra se može pratiti deformacija rebra na 5 cm ispod opterećenog pojasa (na koje mesto se postavlja ugibomer pri promeni sile) za sve vrednosti inkremenata, i može se pratiti deformacija celog srednjeg preseka rebra (14 tačaka) za vrednosti sile u kojima su vršena merenja.

Srednji presek pri povećanju sile kod nosača bez podužnih ukrućenja prati početnu deformaciju, s tim da se maksimum krive blago pomera ka opterećenom pojasu. Promena pomeranja je linearna do 90% od granične sile, a onda se zapaža nelinearnost i povećanje deformacija u zoni unošenja opterećenja. Nema приметnog nagoveštaja mesta izbočenja. Do pojave izbočenja i njegovog registrovanja dolazi naglo tek pri dostizanju granične sile. Za nosače serije A dodatno bočno pomeranje iz početne deformacije manje je u toku celog procesa od polovine početne deformacije, sem, naravno, na mestu izbočenja. Veličina izbočenja zavisi od toga koliko se održava granična sila. Kod nosača serije B koji imaju duplo veće početne deformacije od nosača serije A deformacije su u toku opterećivanja nešto veće, ali rezidualne su opet izražene samo u zoni unošenja opterećenja.

Ima razlike u ponašanju nosača bez podužnih ukrućenja i onih sa ukrućenjima. Kod nosača bez podužnih ukrućenja izraženija je deformacija rebra u zoni unošenja opterećenja. Kod nosača sa podužnim ukrućenjima deformacija u donjem panelu se slično odvija kao kod nosača bez ukrućenja ali u panelu između opterećenog pojasa deformacija su veoma male i nema očiglednih nagoveštaja izbočenja. Jedino pažljivim posmatranjem sukcesivnih stanja mogu se naknadno uočiti izvesni nagoveštaji. Nakon dostizanja granične nosivosti dolazi izraženog izbočenja u gornjem panelu. Rezidualna deformacija u donjem panelu je manja od deformacije pre dostizanja granične vrednosti.

Nosač A1 je imao početnu deformaciju u obliku slova C i taj oblik je očuvan do kraja sa superponiranim izbočenjem na istu stranu u gornjoj četvrtini visine.

Kod nosača A2 koji je takodje bez ukrućenja, ali sa većom dužinom opterećenja sličan je tok deformacije kao za A1 samo je vrh izbočenja nešto niže.

Nosač A3 je imao S oblik koji je ostao očuvan do kraja.

Nosač A5 je imao E oblik koji je ostao očuvan do kraja (taj oblik je nepovoljan za deformaciju jer je na mestu ukrućenja uklještenje u donji panel izraženije nego u slučaju S oblika, kada je na mestu ukrućenja praktično prevoj) Kod ovog nosača nepravilnost pojasa u poprečnom pravcu je bila takva da je podsticala deformaciju u E oblik. Ovo ukazuje da početne deformacije mogu da imaju i povoljan uticaj na nosivost, pa je pri proceni rezultata raznih eksperimenata korisno imati i podatke o početnoj deformaciji, kako bi se na pravi način vrednovali rezultati. Nosač A4 je imao sličnu deformaciju kao i A5.

U slučaju ispitivanja sa malim brojem ispitivanih uzoraka, kada ima razlike kod rezultata koji bi trebalo da budu isti, često se postavlja pitanja da li je neka vrednost manja od neke realne ili je pak druga ustvari veća od realne za taj problem.

Nosač A7 je imao početno E oblik koji je vrlo brzo prešao u S i ostao takav do kraja.

Nosač A6 je imao sličnu deformaciju kao A7. Njegova nosivost je veća od nosivosti A7 iako je njegova dužina opterećenja manja.

Kod nosača od A11 do A17 ne primećuje se uticaj deformacije iz prethodnog eksperimenta, već su promene izražene jedino u gornjoj polovini nosača.

Nosač B1 ima sličnu deformaciju kao A2 takodje bez ukrućenja.

Kod nosača B7 koji je imao ukrućenje koje je već pre opterećenja imalo zakrivljenje i deformaciju ponašao se slično nosačima bez ukrućenja, što upućuje na zaključak da postojeće ukrućenje nije bilo dovoljno da pri velikim početnim deformacijama i većoj dužini opterećenja održi početni oblik.

Deformacija rebra u horizontalnim presecima

Iz priloženih dijagrama se jasno uočava povećanje dužine angažovane zone rebra sa povećanjem dužine opterećenja i to odgovara onome što se uočava i kod pojasa.

Deformacije pojasa

Deformacije pojasa su veoma male, pa zbog lokalnih nepravilnosti teško je uočiti trend u ponašanju u toku opterećivanja.

Medjutim rezidualne deformacije pojasa naknadno merene direktno iznad rebra (gde nije bilo moguće za vreme eksperimenta meriti deformacije) jasno ukazuju na trend porasta angažovane dužine pojasa sa povećanjem dužine opterećenja. Za dužinu $c=150$ ova se zona pruža do vertikalnih ukrućenja.

Vrednost granične nosivosti

Kod svake od grupa nosača (A bez ukrućenja, A sa ukrućenjima, B bez ukrućenja, B sa ukrućenjima) sa porastom dužine opterećenja povećava se i nosivost. Ona se povećava uglavnom ujednačeno, osim kod nosača kraćeg raspona sa ukrućenjima, gde je prirast nosivost sporiji do povećanja dužine opterećenja do 75 mm, nakon čega se uočava brži prirast opterećenja.

Svi nosači serije B imaju manju nosivost od odgovarajućih nosača iz serije A. Osnovni razlozi za to bi mogli da budu duplo veće početne deformacije kod serije B nego kod A, a takodje i to da su kod nosača serija A sa manjim rasponom i manja rastojanja između vertikalnih ukrućenja tako da je sistem pojasa, podužnog ukrućenja i rebra između njih znatno krući nego kod serije B.

U odnosu na način prenošenja opterećenja, preko krute ploče ili preko sistema za ravnomernu raspodelu, kod nosača bez ukrućenja ravnomerna raspodela je podigla nosivost. Medjutim kod nosača sa podužnim ukrućenjem nosivost pri ravnomernoj raspodeli je bila manja nego pri prenošenju opterećenja preko krute ploče. Odnosno pri ravnomernoj raspodeli ukrućenje manje utiče na povećanje nosivosti nego kod krute ploče.

Iz dobijenih rezultata takodje se može zaključivati o povećanju nosivosti kod nosača sa ukrućenjima u odnosu na neukrućene nosače. Uočava se veće povećanje pri većim dužinama opterećenja.

Elasto – plastično ponašanje

Na osnovu rezultata dobijenih pomoću mernih traka potvrđuju se zapažanja iz drugih istraživanja, da u zoni unošenja opterećenja u rebru dolazi do plastifikacije znatno pre dostizanja granične nosivosti, ali da se to ne manifestuje приметnim deformacijama u zoni unošenja opterećenja. Praktično se analizom dijagrama pomeranja uočavaju nelinearnosti tek blizu dostizanja

granične nosivosti, na oko 90% od njene vrednosti, dok do plastifikacije u pojedinim tačkama dolazi i pri nivou od 50 – 60 odsto od granične nosivosti.

Deformacije savijanja su izražene od početka opterećivanja, tako da dolazi i do površinske plastifikacije pri nižim nivoima sile.

Ovakvo ponašanje ukazuje na opravdanost korišćenja modela sa mehanizmom loma za teorijsko određivanje vrednosti sile.

U sledećoj tabeli 4.12.1.1 se daje prikaz poredjenja povećanja nosivosti u odnosu na pojedine širine raspodeljenog opterećenja.

serija/ duž.opt	0	25	50	75	100	125	150	150 rasp
A bez ukruć	143.3	154.6	165.0		199.0		215.0	230.0
A sa ukruć	165.9	180.0	183.0	194.3	225.0	259.0	255.0	244.6

P_i/P_0 bez uk *		1.079	1.151		1.389		1.500	1.605
P_i/P_0 sa uk *		1.085	1.103	1.171	1.356	1.561	1.537	1.474
P_i/P_{25} bez uk *			1.067		1.287		1.391	1.488
P_i/P_{25} sa uk *			1.017	1.079	1.250	1.439	1.417	1.359
P_i/P_{50} bez uk *					1.206		1.303	1.394
P_i/P_{50} sa uk *				1.062	1.230	1.415	1.393	1.337
P_i/P_{75} bez uk *								
P_i/P_{75} sa uk *					1.158	1.333	1.312	1.259
P_i/P_{100} bez uk *							1.080	1.156
P_i/P_{100} sa uk *						1.151	1.133	1.087
P_i/P_{125} bez uk *								
P_i/P_{125} sa uk *							0.985	0.959
P_i/P_{150} bez uk *								1.070
P_i/P_{150} sa uk *								0.959

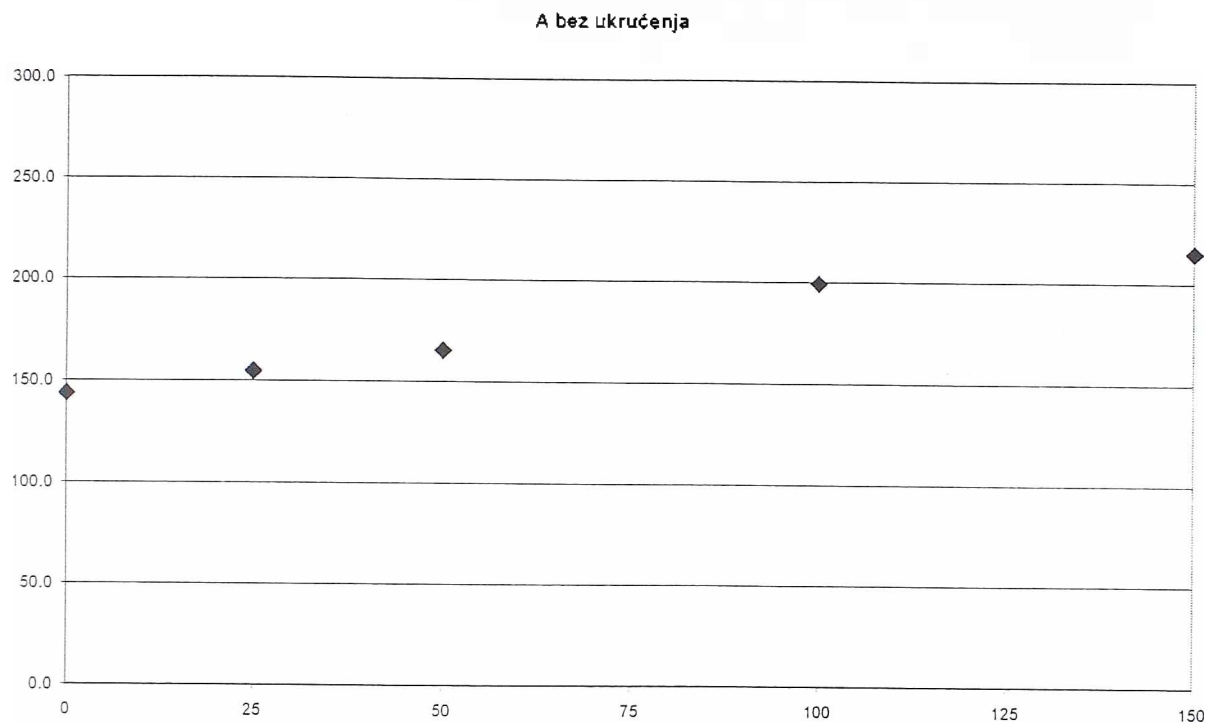
serija/ duž.opt	0	25	50	75	100	125	150
B bez ukruć			140.0				179.0
B sa ukruć			165.0		200.0		244.0

P_i/P_{50} bez uk *							1.279
P_i/P_{50} sa uk *					1.212		1.479
P_i/P_{100} bez uk *							
P_i/P_{100} sa uk *							1.220

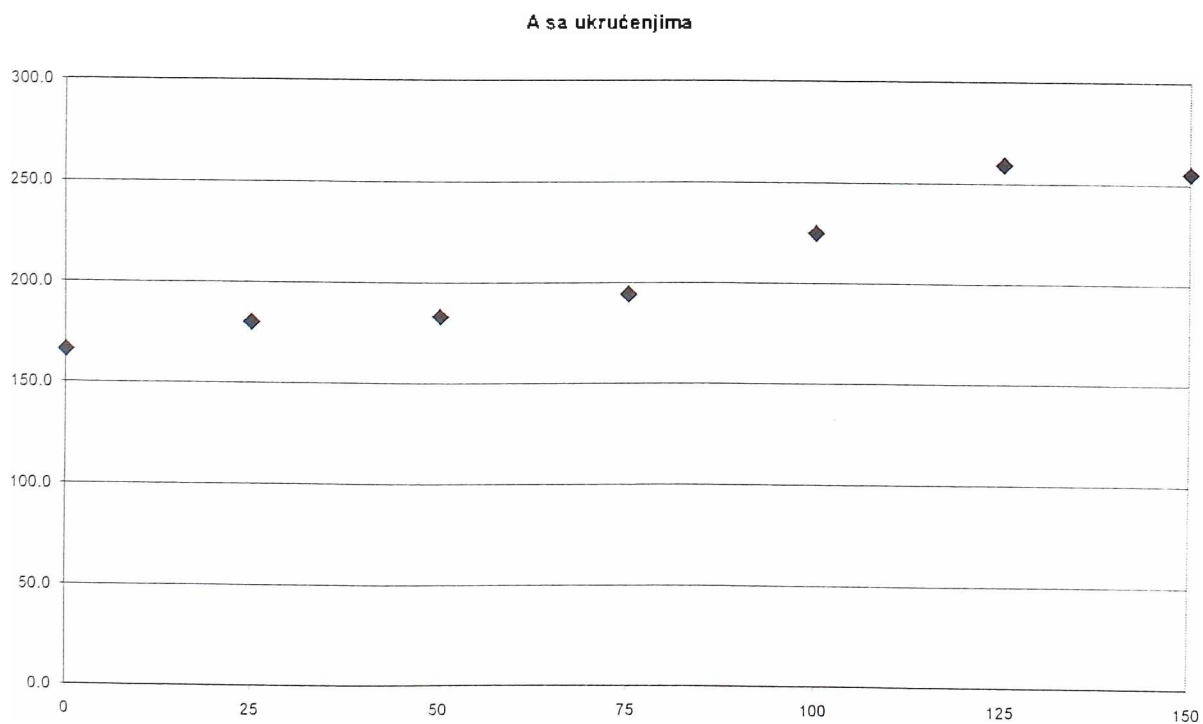
Tabela 4.12.1.1

Uočava se nešto veće povećanje nosivosti kod nosača bez ukrućenja nego kod nosača sa ukrućenjima, mada je sem u nekoliko slučajeva razlika mala.

Na sledećim dijagramima prikazane su vrednosti granične nosivosti u funkciji dužine opterećenja c po grupama nosača : serija A bez ukrućenja, serija A sa ukrućenjima, serija B bez ukrućenja, serija B sa ukrućenjima

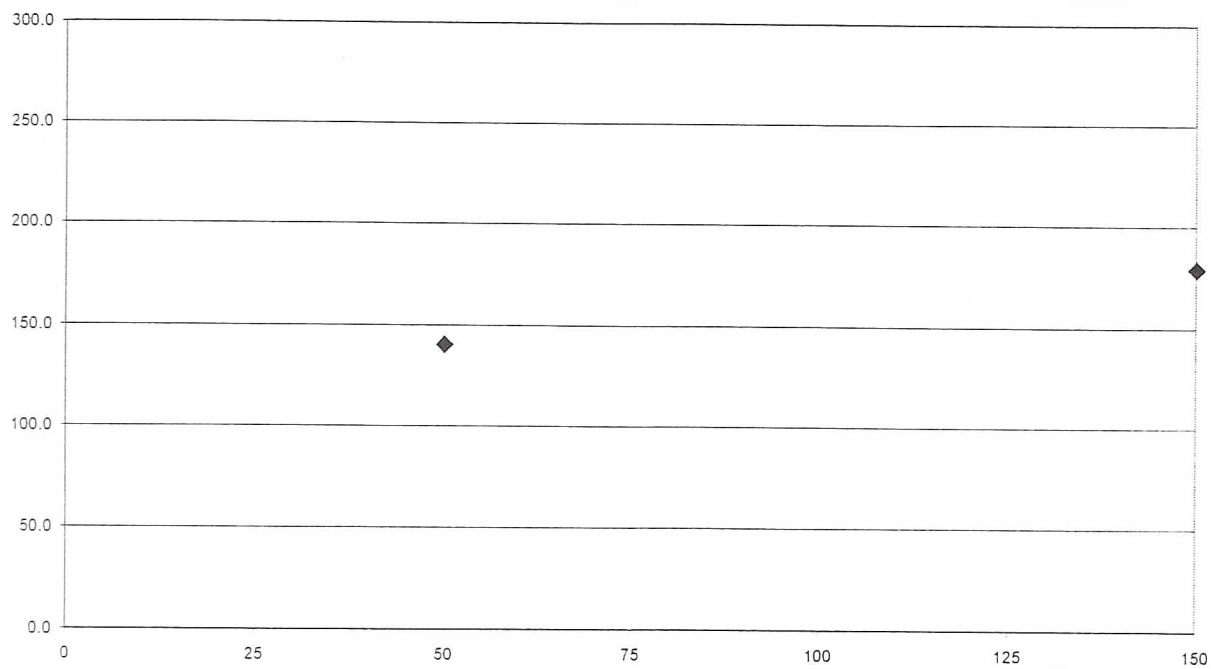


Slika 4.12.1



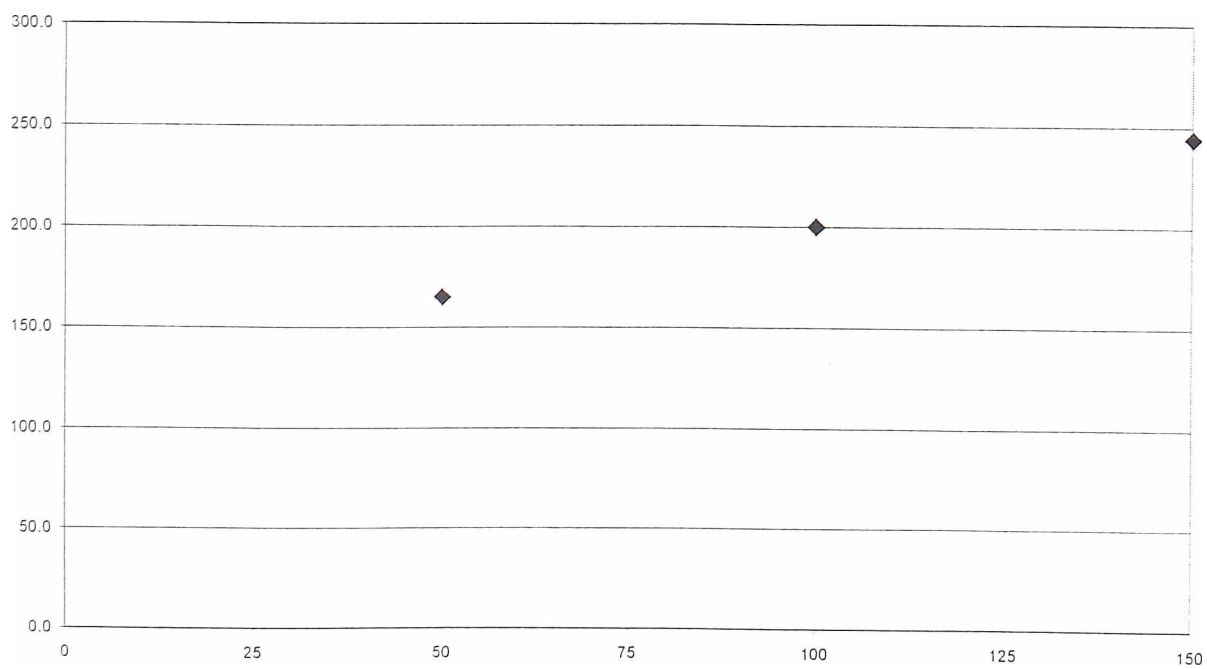
Slika 4.12.2

B bez ukrucenja



Slika 4.12.3

B sa ukrucenjima



Slika 4.12.4

Kada se vrši poredjenje izmedju nosača sa ukrućenjima i nosača bez ukrućenja u seriji A ima pet parova rezultata sa prenošenjem opterećenja preko krute ploče i jedan par rezultata sa ravnomernim prenošenjem opterećenja. U seriji B ima dva para rezultata sa prenošenjem opterećenja preko krute ploče. U tabeli 4.12.1.2 su dati odnosi nosivosti odgovarajućih nosača sa ukrućenjima i bez ukrućenja.

c	0.00	25.00	50.00	75.00	100.00	125.00	150.00	150 rasp
Ps/P za A	1.1577	1.1643	1.1091		1.1307		1.1860	1.0635
Ps/P za B			1.1786				1.3631	
							1.3106	

Tabela 4.12.1.2 Uticaj ukrućenja na povećanje nosivosti

Srednje vrednosti odnosa nosivosti

svi nosaci	1.184843
bez raspod	1.200014
samo A	1.149559
samo B	1.284105

Povećanje nosivosti nosača sa ukrućenjima u odnosu na nosača bez ukrućenja se kreće kod nosača sa prenošenjem opterećenja preko krute ploče izmedju 10.91 % i 18.60 % za nosače serije A (prosečno 14.96 %), a kod nosača serije B izmedju 17.86% i 36.31%.

U seriji A gde ima dovoljno rezultata nemože se uočiti povezanost ovih vrednosti sa veličinom c , ali je ipak najveće povećanje kod nosača sa najvećim c (150 mm), što je takodje slučaj i u seriji B gde ima malo rezultata da bi se izvodili neki obuhvatni zaključci.

Za isti slučaj $c=150$ kod koga su za prenošenje opterećenja preko krute ploče povećanja nosivosti veće od svih drugih slučajeva, za slučaj ravnomernog prenošenja opterećenja to povećanje je relativno malo 6.35 %.

Ranije prikazano rešenje za uzimanje u obzir uticaja ukrućenja :

$$f(s) = 1.28 - 0.7 \cdot s/d \quad \text{za } 0.1 < s/d < 0.4$$

daje za slučaj $s/d = 0.2$ vrednost koeficijenta uvećanja $f(s) = 0.14$ što se veoma dobro slaže sa rezultatima serije A, a za seriju B je na strani sigurnosti. Jedino za prikazani slučaj ravnomerne raspodele opterećenja povećanje je znatno manje od predvidjenog.

5. TEORIJSKA RAZMATRANJA

5.1 ANALIZA DOSADAŠNJIH REZULTATA

Razmatranjem rezultata prethodnih istraživanja uočava se da često nosači nominalno istih svih prikazanih karakteristika imaju različite vrednosti nosivosti. Razlike prelaze u brojnim slučajevima i 10% do 20%. Ponekad je u literaturi ukazano na moguće razloge, ali ne uvek. Ovo se javlja i kod jednog istraživanja nekog autora, a takodje kada se uporede i rezultati različitih istraživanja istog ili različitih autora. Razlozi za ovo mogu da budu različiti. Moguće su razlike u načinu izvodjenja eksperimenta, ili su to uticaji koji nisu evidentirani, kao recimo početne deformacije, ili odstupanja u kvalitetu materijala koja nisu registrovana ili nisu mogla biti registrovana ili neke druge greške. Nekad su date nominalne, a ne stvarne vrednosti dimenzija ili karakteristika materijala. Pri tome često je broj uzoraka mali pa nije moguće primeniti zakone verovatnoće i statističke metode. Kada je moguće dodatni razlozi se uključuju u analizu i donete zaključke.

U svakom slučaju i ovaj detalj ukazuje na složenost problematike, i na to da nekad nije moguće odrediti potpuno precizno rešenje, već da se ono mora tražiti u nekim granicama.

5.2 PREDLOG MEHANIZMA LOMA

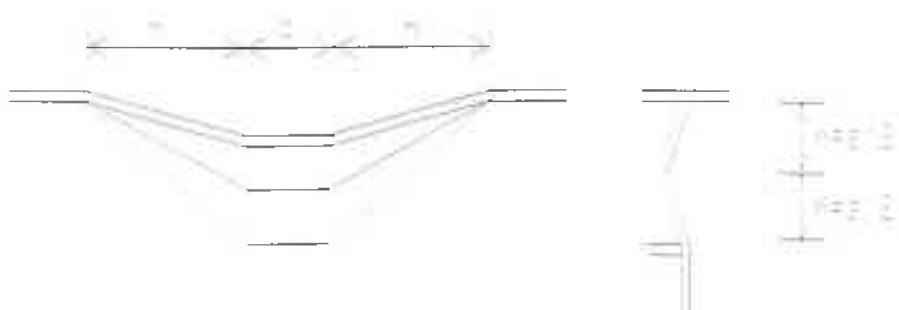
Poznato je nekoliko predloga za dobijanje granične nosivosti polazeći od mehanizma loma do čijih se karakteristika dolazi na osnovu eksperimenata. Poznati su mehanizmi koje su formulisali Roberts, Ćorić, Shimizu, Lučić.

Iz analize ovde prikazanih eksperimentalnih rezultata može se doći do zaključka kako formulisati mehanizam loma za slučaj nosača sa podužnim ukrućenjima.

Glavne karakteristike predloženog mehanizma su da on u osnovi odgovara Robertsovom mehanizmu uz određene izmene. Uzima se u obzir tačnija dužina linija loma. Iako to nešto usložnjava postupak sa savremenim matematičkim kompjuterskim programima lako je sprovesti i iterativan postupak koji u nekoliko koraka vodi ka rezultatu. Osim toga pri određivanju karakteristika pojasa uključen je u presek i deo rebra visine 7 debljina rebra zbog sadejstva sa pojansom.

Predloženi mehanizam loma uzima u obzir činjenicu da kada ukrućenja imaju dovoljnu krutost, deformacija loma odnosno izbočenje se svodi u prostor između gornjeg pojasa i ukrućenja. Tako da je po visini poznat položaj linija loma. Odnosno rastojanje n između linija loma je jednako polovini rastojanja s između pojasa i ukrućenja. Iako se uočava da kod manjih dužina opterećenja poslednje linija loma se formira iznad ukrućenja odnosno da je $n < s/2$ nije potrebna korekcija jer se sa istim mehanizmom dobijaju zadovoljavajući rezultati. Dužina do koje se pružaju linije loma odnosno položaj plastičnih zglobova u pojasu se određuje iz uslova o minimumu granične nosivosti kada se ona posmatra kao funkcija ove dužine.

Mehanizam loma je prikazan na slici 5.1 sa odgovarajućim oznakama. Sastoji se od linija loma u rebu i plastičnih zglobova u pojasu.



Ugao između vertikale i deformisanog rebra označen je sa θ a ugao između horizontale i deformisanog pojasa je označen sa φ .

Dužina prve kose linije loma zbog malog ugla φ je jednaka m ali se za dužinu srednje kose linije loma donje kose linije loma uzimaju stvarne dužine

$$s_1 = \sqrt{m^2 + n^2} \quad s_2 = \sqrt{m^2 + 4n^2}$$

iz geometrijskih uslova sledi $\delta\varphi = \frac{\delta v}{m}$ i $\delta\theta = \frac{\delta v}{2n \cdot \cos \theta}$

Izjednačavanjem rada spoljašnjih sila i promene unutrašnje energije pri nastajanju mehanizma loma, a u njegovoj deformisanoj konfiguraciji čije se karakteristike određuju približno izjednačavanjem vertikalnog pomeranja pojasa i promene položaja ivice rebra usled njegove deformacije za ugao θ dolazi se do sledećeg izraza za graničnu nosivost.

Sa $M_{fl} = \frac{\sigma_f b_f t_f^2}{4}$ i $M_w = \frac{\sigma_w t_w^2}{4}$

momentima loma pojasa i momenta loma rebra po jedinici dužine, a c je dužina opterećenja

$$P = \frac{4M_{fl}}{m} + (m + 2s_1 + s_2) \frac{M_w}{n \cdot \cos \theta} + 2c \frac{M_w}{n \cdot \cos \theta} - 2\mu \frac{M_w}{n \cdot \cos \theta}$$

gde η predstavlja fiktivnu dužinu koja ne učestvuje u linijama loma usled plastifikacije. Ova vrednost određuje se iz uslova da doprinos rebra graničnoj nosivosti (poslednja tri člana u gornjem izrazu) se prenosi preko dužine η .

$$(m + 2s_1 + s_2 + 2c - 2\eta) \frac{M_w}{n \cdot \cos \theta} = \sigma_w \cdot t_w \cdot \mu$$

Odatavde se dolazi do izraza

$$\eta = \frac{(m + 2s_1 + s_2 + 2c - 2\eta)}{2 + \frac{\sigma_w t_w n \cdot \cos \theta}{M_w}}$$

Nalaženjem prvog izvoda funkcije za P po m (i vodeći računa da su s_1 i s_2 funkcije od m) i njegovim izjednačavanjem sa nulom dolazi se do uslova

$$\frac{4M_{fl}}{n \cdot \cos \theta} \left[1 - \frac{2}{2 + \frac{\sigma_w t_w n \cdot \cos \theta}{M_w}} \right] = m^2 + \frac{2m^3}{\sqrt{m^2 + n^2}} + \frac{m^3}{\sqrt{m^2 + 4n^2}}$$

Ovaj izraz se može iterativno rešiti polazeći od neke realne pretpostavke za m recimo $m = s_1$ i od uslova

$$\sin \theta = 1 - \frac{m^2 M_{f1}}{12 E I_{f1} n}$$

i naći vrednost m koja ga ispunjava. Sa tom vrednosti m određuje se η , ulazi se u izraz za P i određuje granična nosivost.

Na osnovu predloženog postupka sproveden je proračun za sve ispitivane nosače serije A sa ukrućenjima. Kao primer se prikazuje proračun za nosač sa $c=0$. A potpuno je identičan postupak i za ostalo slučajeve.

Podaci

$$c := 0 \quad bf := 120 \quad tf := 8 \quad tw := 4 \quad sf := 283 \quad sw := 280 \quad E := 210000$$

$$cl = c \quad cl = 0$$

samo pojas

$$Mf := sf \cdot bf \cdot \frac{tf^2}{4} \quad Mw := sw \cdot \frac{tw^2}{4} \quad If := bf \cdot \frac{tf^3}{12} \quad Spif := bf \cdot \frac{tf^2}{4}$$

$$Mf = 5.434 \times 10^5 \quad Mw = 1.12 \times 10^5 \quad If = 5.12 \times 10^3 \quad Spif = 1.92 \times 10^3$$

pojas i deo rebra

$$hw1 := 7 \cdot tw \quad hw1 = 28$$

$$Ffa := bf \cdot tf \quad Ffb := hw1 \cdot tw$$

$$Ffa = 960 \quad Ffb = 112 \quad Ff1 := Ffa + Ffb \quad Ff1 = 1.072 \times 10^3$$

$$x1 := \frac{\left(\frac{Ff1}{2}\right)}{bf} \quad x1 = 4.467 \quad x11 := tf - x1 \quad x11 = 3.533$$

$$Spf1 := \left(bf \cdot \frac{x1^2}{2}\right) + \left(bf \cdot \frac{x11^2}{2}\right) + hw1 \cdot tw \cdot (0.5 \cdot hw1 + x11) \quad Spf1 = 3.91 \times 10^3$$

$$Mf1 := sf \cdot Spf1 \quad Mf1 = 1.106 \times 10^6 \quad \frac{Mf1}{Mf} = 2.036$$

teziste

$$z1a := 0.5 \cdot tf \quad z1b := tf + 0.5 \cdot hw1$$

$$z1a = 4 \quad z1b = 22 \quad z1 := \frac{(Ffa \cdot z1a + Ffb \cdot z1b)}{Ff1} \quad z1 = 5.881$$

$$z11a := z1a - z1 \quad z11b := z1b - z1$$

$$z11a = -1.881 \quad z11b = 16.119$$

$$If1 := bf \cdot \frac{tf^3}{12} + mw \cdot \frac{hw1^3}{12} + Ffa \cdot z11a^2 + Ffb \cdot z11b^2 \quad If1 = 4.493 \times 10^4$$

$$st := 100 \quad n := \frac{st}{2} \quad n = 50 \quad ms := st \quad ms = 100$$

$$tgg1 := \frac{n}{ms} \quad tgg1 = 0.5 \quad g1 := \text{atan}(tgg1) \quad g1 = 0.464$$

$$tgg2 := \frac{n \cdot 2}{ms} \quad tgg2 = 1 \quad g2 := \text{atan}(tgg2) \quad g2 = 0.785$$

$$s1a := \frac{n}{\sin(g1)} \quad s2a := \frac{2n}{\sin(g2)}$$

$$s1 := \sqrt{ms^2 + n^2} \quad s2 := \sqrt{ms^2 + 4n^2}$$

$$s1 = 111.803 \quad s2 = 141.421 \\ s1a = 111.803 \quad s2a = 141.421$$

prvi korak

$$\text{sintetal} := 1 - \left(\frac{Mf1 \cdot ms^3}{(12 \cdot n \cdot E \cdot If1)} \right) \quad \text{sintetal} = 0.998 \quad \text{tetal} := \text{asin}(\text{sintetal}) \quad \text{tetal} = 1.508$$

$$\text{costetal} := \cos(\text{tetal}) \quad \text{costetal} = 0.062$$

$$\text{levo} := \frac{(4Mf1)}{\left[1 - \frac{2}{2 + \frac{(sw \cdot tw \cdot n \cdot \text{costetal})}{Mw}} \right]} \cdot \frac{Mw}{n \cdot \text{costetal}} \quad \text{levo} = 2.025 \times 10^4$$

$$\text{za} \quad \text{mms} := 78.3$$

$$\text{desno} := \text{mms}^2 + \frac{(2\text{mms}^3)}{\sqrt{(\text{mms}^2 + n^2)}} + \frac{(\text{mms}^3)}{\sqrt{(\text{mms}^2 + 4n^2)}} \quad \text{desno} = 2.025 \times 10^4$$

drugi korak

$$\text{sintetal} := 1 - \left(\frac{Mf1 \cdot \text{mms}^3}{(12 \cdot n \cdot E \cdot If1)} \right) \quad \text{sintetal} = 0.999 \quad \text{tetal} := \text{asin}(\text{sintetal}) \quad \text{tetal} = 1.522$$

$$\text{costetal} := \cos(\text{tetal}) \quad \text{costetal} = 0.049$$

$$\text{levo} := \frac{(4Mf1)}{\left[1 - \frac{2}{2 + \frac{(sw \cdot tw \cdot n \cdot \text{costetal})}{Mw}} \right]} \cdot \frac{Mw}{n \cdot \text{costetal}} \quad \text{levo} = 1.757 \times 10^4$$

$$\text{za} \quad \text{mms} := 73.56$$

$$\text{desno} := mms^2 + \frac{(2mms^3)}{\sqrt{(mms^2 + n^2)}} + \frac{(mms^3)}{\sqrt{(mms^2 + 4n^2)}} \quad \text{desno} = 1.757 \times 10^4$$

pretpostavljeno $mms := 71$

treći korak

$$\text{sintetal} := 1 - \frac{(Mf1 \cdot mms^2)}{(12 \cdot n \cdot E \cdot If1)} \quad \text{sintetal} = 0.999 \quad \text{tetal} := \text{asin}(\text{sintetal}) \quad \text{tetal} = 1.526$$

$$\text{costetal} := \cos(\text{tetal}) \quad \text{costetal} = 0.044$$

$$\text{levo} := \frac{(4Mf1)}{2} \cdot \frac{Mw}{n \cdot \text{costetal}} \quad \text{levo} = 1.667 \times 10^4$$

za $mms := 71.8\%$

$$\text{desno} := mms^2 + \frac{(2mms^3)}{\sqrt{(mms^2 + n^2)}} + \frac{(mms^3)}{\sqrt{(mms^2 + 4n^2)}} \quad \text{desno} = 1.667 \times 10^4$$

usvojeno $mms := 71$

$$\text{sintetal} := 1 - \frac{(Mf1 \cdot mms^2)}{(12 \cdot n \cdot E \cdot If1)} \quad \text{sintetal} = 0.999 \quad \text{tetal} := \text{asin}(\text{sintetal}) \quad \text{tetal} = 1.526$$

$$\text{costetal} := \cos(\text{tetal}) \quad \text{costetal} = 0.044$$

$$\text{tgg1} = \frac{n}{mms} \quad \text{tgg1} = 0.704 \quad \text{g1} := \text{atan}(\text{tgg1}) \quad \text{g1} = 0.614$$

$$\text{tgg2} = \frac{n \cdot 2}{mms} \quad \text{tgg2} = 1.408 \quad \text{g2} := \text{atan}(\text{tgg2}) \quad \text{g2} = 0.953$$

$$s1 := \sqrt{mms^2 + n^2} \quad s2 := \sqrt{mms^2 + 4n^2}$$

$$s1 = 86.839 \quad s2 = 122.642$$

$$\text{eta} := \frac{(mms + 2s1 + s2 + 2c1)}{2 + \frac{(sw \cdot tw \cdot n \cdot \text{costetal})}{Mw}} \quad \text{eta} = 87.065$$

$$P1 := 4 \cdot \frac{Mf1}{mms} + (mms + 2s1 + s2 + 2c1 - 2\text{eta}) \cdot \frac{Mw}{n \cdot \text{costetal}} \quad P1 = 1.599 \times 10^5$$

U sledećoj tabeli 5.1 su prikazane vrednosti nosivosti dobijene eksperimentalno i pomoću napred predloženog mehanizma loma. Uočava se dobro i kvantitativno slaganje i da mehanizam loma uključuje i uticaj promene dužine opterećenja dobro.

serija/ duž.opt A sa ukruc	0 A14	25 A4	50 A3	75 A17	100 A5	125 A6	150 A7	150 rasp A16
eksperiment	165.9	180.0	183.0	194.3	225.0	259.0	255.0	244.6
mehanizam loma	159.9	173.1	186.4	199.7	212.9	226.2	239.5	

Tabela 5.1 Vrednosti granične nosivosti dobijene eksperimentalno i pomoću mehanizma loma

5.3 PREDLOG ZA UZIMANJE U OBZIR UTICAJA DUŽINE OPTEREĆENJA

Uticaj dužine opterećenja može se uzeti preko formule

$$P(c) = P(0) (1+k c/tw)$$

$k=0.012$ za nosače bez ukrucenja

$k=0.008$ za nosače sa ukrucenjima i $c < 75$ mm

$k=0.014$ za nosače sa ukrucenjima i $c > 75$ mm

serija/ duž.opt	0	25	50	75	100	125	150
A bez ukruc	A15	A12	A1		A11		A2
Pex	143.3	154.6	165.0		199.0		215.0
Ppr	143.3	154.0	164.8		186.3		207.8
A sa ukruc	A14	A4	A3	A17	A5	A6	A7
Pex	165.9	180.0	183.0	194.3	225.0	259.0	255.0
Ppr	165.9	174.2	182.5	190.8	224.0	238.5	253.0

6. ZAKLJUČCI I PREPORUKE ZA DALJI RAD

Problematika ponašanja čeličnih I nosača pod dejstvom lokalizovanog opterećenja po pojasu u ravni rebra predstavlja aktuelnu problematiku ne samo zbog teorijskog aspekta, kao izazovna i složena problematika koja nije još uvek dobila sve zadovoljavajuće odgovore i rešenja, već pre svega zbog praktičnih problema u projektovanju konstrukcija, kada se traže precizna i sigurna rešenja. Radi dobijanja potrebnih objašnjenja pojedinačna istraživanja ne mogu da daju sve odgovore, ali mogu da daju dragoceni doprinos u razjašnjenju složenih problema. U tome svetlu rezultati ovog istraživanja svojim eksperimentalnim delom pre svega obogaćuju bazu podataka na osnovu koje će se vršiti verifikacija svih daljih teorijskih rešenja koja se zahtevaju i očekuju. Sva takva rešenja, pre same potvrde u inženjerskoj praksi zahtevaju i provere i dokaze u eksperimentalnim naučnim istraživanjima. Očekuje se da će i ovi rezultati postati deo tog nezaobilaznog fonda podataka koje se obogaćuje svakim novim istraživanjem. To su na primer već o postali rezultati prethodnog istraživanja u kome je autor učestvovao u Kardifu, gde su eksperimentalni rezultati postali deo baze podataka na osnovu koje su izvršene verifikacije usvojenih rešenja iz ove oblasti u okviru Evrokoda 3, za čelične konstrukcije (dela usaglašenih evropskih propisa za proračun inženjerskih konstrukcija). U naučnoj literaturi se ukazuje na tu potrebu za obogaćivanjem baze podataka iz ove predmetne oblasti. Posebno u pogledu činjenice na koju je ukazano u pregledu dosadašnjih istraživanja problema razmatranog u ovom radu (uticaja dužine dejstva opterećenja kod nosača sa podužnim ukrućenjima) da nema dovoljno sistematskih istraživanja te problematike, a da postojeći rezultati ne pružaju dovoljno elemenata za pouzdane zaključke.

Analiza dobijenih rezultata ukazuje na njihovu pouzdanost i doslednost odnosno na dobro sproveden istraživački postupak. Pošto neminovno moraju da budu ograničena po broju parametara koje mogu da uzmu u obzir, očekuje se da povezani sa rezultatima drugih istraživanja omoguće celovita rešenja.

Osim ovog opšteg značaja, iz rezultata istraživanja uočavaju se i direktni odgovori na pitanja u okviru razmatrane oblasti. Na primer, u okviru konstruisanja mostova često se kao veoma efikasan primenjuje postupak prevlačenja mostova, koji su montirani van konačnog svog položaja preko privremenih ili stalnih oslonaca u definitivni položaj. Pri tome sile koje samo privremeno deluju na pojedine delove konstrukcije mogu da predju njihovu nosivost. Rezultati ovih istraživanja ukazuju kvalitativno na alternativna rešenja ovog problema: povećanje dužine preko koje se prenosi opterećenje ili uzimanje u obzir podužnih ukrućenja ili smanjenje rastojanja vertikalnih ukrućenja ili kombinacija ovih mogućnosti, ali su dobijeni i kvantitativni, brojni pokazatelji uticaji pojedinih od ovih mera.

Već su i teorijska rešenja do kojih se došlo u priprema fazi rada na ovom istraživanju o uticaju podužnih ukrućenja na graničnu nosivost dobila svoju verifikaciju prihvatanjem u najnovijoj verziji britanskih standarda za proračun čeličnih mostova iz 2000 godine. Takodje i eksperimentalni rezultati dobijeni u ovom istraživanju potvrđuju ta predložena rešenja.

Predloženi teorijski model za proračun granične nosivosti preko mehanizma loma, zadovoljavajuće obuhvata uticaj dužine delovanja opterećenja kod nosača sa podužnim ukrućenjima i predstavlja dopunu postojećih modela, pokrivajući segment koji još nije bio obuhvaćen i koji se na osnovu rezultata novih istraživanja može dopuniti i poboljšati.

Stečena su dragocena iskustva u organizovanju eksperimentalnog rada (za koji nema dovoljno pogodnih uslova u sadašnjoj situaciji i koji nije dovoljno razvijen u našim institucijama), i razvijanju neophodne prateće opreme za registrovanje rezultata. Primenjeno je korišćenje više nezavisnih postupaka radi obezbeđenja pouzdanosti rezultata (provera elektronskog merenja uz korišćenje lično razvijenog sistema preko nezavisnog geodetskog merenja). Time se i ukazuju na neophodnost i mogućnost korišćenja različitih postupaka iz različitih inženjerskih oblasti (kao ovde geodetskih postupaka) u proveri dobijenih rezultata.

Takodje detaljno i recizno registrovane početne deformacije za veliki broj uzoraka mogu da posluže za numeričko modeliranje pri parametarskim analizama. Na primer numerički model se može (i mora) verifikovati na primeru konkretne deformacije konkretnog uzorka, a zatim se može

numerički istraživati uticaj drugih realnih i dokumentovanih deformacija i ocenjivati njihov značaj za graničnu nosivost.

Na osnovu analize rezultata ovog istraživanja uočava se i potreba za daljim istraživanjima u ovoj oblasti da bi se uzela u obzir šira varijacija parametara koji utiču na ponašanje razmatranih nosača i njihovu graničnu nosivost. Ovde se posebno uočava potreba za kvantifikacijom uticaja početnih deformacija (imperfekcija) jer ovo istraživanje ukazuje na mogućnost njihovog većeg značaja nego što je do sada smatrano. Pri tome putevi dolaženja do rešenja treba da kombinuju eksperimente (koji kao skuplji treba da posluže za verifikaciju pristupačnijih postupaka) i numeričku simulaciju ponašanja nosača gde se efikasno može varirati veliki broj parametara od značaja za rešenje problema. U svetu je razvijen jedan broj već i komercijalnih programa koji mogu poslužiti u ovu svrhu (i to brojni istraživači u svetu već i koriste).

U pogledu konkretnih parametara koje treba dalje razmatrati su i drugi oblici podužnih ukrucenja, kao i optimalna njihova veličina da bi se došlo do racionalnih rešenja.

Zbog složenosti problema potrebno je rešenja tražiti u okviru saradnje različitih istraživačkih timova. Kod nas postoji ta mogućnost u okviru saradnje Građevinskih fakulteta iz Beograda i Podgorice. Tu saradnju treba nastaviti i u međunarodnim okvirima, jer je kao takva i dosada postojala i doprinela razvoju naših istraživanja.

7. LITERATURA

Napomena

Pregled literature se daje sredjen po autorima ili oblastima :

- | | | |
|-----|--|-------------------|
| 1. | problemi stabilnosti i odredjivanja napona | [1.1] do [1.29] |
| 2. | Roberts | [2.1] do [2.18] |
| 3. | Bergfelt | [3.1] do [3.12] |
| 4. | Škaloud | [4.1] do [4.24] |
| 5. | Drdacky , Kratena. Ravinger | [5.1] do [5.26] |
| 6. | nemački autori | [6.1] do [6.45] |
| 7. | francuski autori | [7.1] do [7.14] |
| 8. | Shimizu, švedski istraživači, najnovija istraživanja | [8.1] do [8.38] |
| 9. | istraživači iz Srbije i Crne Gore | [9.1] do [9.32] |
| 10. | monografije, knjige i propisi | [10.1] do [10.21] |
| 11. | vlastita saopštenja | [11.1] do [11.13] |
-
- 1.1. Girkmann,K. **Stability of the webs of plate girders taking account of concentrated loads**, International Association of Bridge and Structural Engineering, Final Report, 1936, 607-11. (Le Raport Final du 2^e Congres de l'AIPC, Berlin, 1936, 610-614. ?)
 - 1.2. Zetlin, L. **Elastic instability of flat plates subjected to partial edge loads**. Proc. ASCE, 81 (795), 1955, 1-24.
 - 1.3. White,R.M., Cottingham,W. **Stability of plates under partial edge loadings**. Proc. ASCE, J.EM 5, 85, oct.1962, 67.
 - 1.4. Khan,M.Z., Walker,A.C. **Buckling of plates subjected to localized edge loading**. Structural Engineer, 50, 1972, 235-32.
 - 1.5. Khan,M.Z., Johns,K.C. **Buckling of web plates under combined loadings**. J. Struc. Div. ASCE, 101, ST10, 1975, 2079-92.
 - 1.6. Khan,M.Z., Johns,K.C, Hayman,B. **Buckling of plates with partially loaded edges**. J. Struc. Div. ASCE, 103, ST3,1977, 547-58.
 - 1.7. Graves Smith,T., Sridharan,S. **Finite strip method for the buckling of plate structures under arbitrary loading**. Int. J. Mech. Sci., Vol.20, 1978, 685-693.
 - 1.8. Graves Smith,T., Gierlinski,J. **Buckling of stiffened webs by local edge loads**. Jour. of Struct. Div. ASCE, Vol.108, ST6, June 1982, 1357-1366
 - 1.9. Leggett, B.A. **The effect of two isolated forces on the elastic stability of a flat rectangular plate**. Proc. Cambridge Phil. Soc., Vol.33, 1937, 325-39.
 - 1.10. Alfutov,N.A., Balabukh,L.I. **On the possibility of solving plate stability problems without a preliminary determination of the initial state of stress**. PMM (Journal of Applied Mathemat. and Mechanics), 31(4), 1967, 716-722.
 - 1.11. Alfutov,N.A., Balabukh,L.I. **Energy criterion of the stability of elastic bodies which does not require the determination of the initial strain state**. PMM, 32(4), 703-707, 1968.
 - 1.12. Chow,L., Conway,H.D., Winter,G. **Stresses in deep beams**. Proc. ASCE, V 78, Separ. No.127, May, 1952.
 - 1.13. Conway,H., Chow,L., Morgan,G.W. **Analysis of deep beams**. Jour. of Applied Mechanics, Vol.18, 1951, 163.
 - 1.14. Salvadori,M.G. **Numerical computation of buckling loads by finite differences**. Trans. ASCE, Vol.116, 1951, 590.
 - 1.15. Geer,E. **Stresses in deep beams**. Jour. of the Amer. Conc. Inst., No 7, jan. 1960.
 - 1.16. Newmark,N.M. **Numerical procedure for computing deflections, moments, and buckling loads**. ASCE, May, 1942, Papers, 691.
 - 1.17. Carskaddan,P. **Bending of deep girders with a 514 steel flanges**. Proc.ASCE, ST10, 1969, 2219.
 - 1.18. Cheng,D. Pei,M.L. **Continuous deep beams**. Proc. ASCE, V80, Separ. No 450, June 1954.
 - 1.19. Bryla,S., Chmielowiez,A. **Experiments on rolled sections strengthened by welding**. IABSE, Berlin. 1936. Final Report.
 - 1.20. Okubo,T., Nethercot,D. **Web post strength in castelated steel beams**. Proc. Inst. Civ. Eng., P2, 1985, Vol.79, Sept, 533-557.
 - 1.21. Graves Smith,T.R.-Sridharan,S. **A finite strip method for the post locally buckled analysis of plate structures**. Int.J.Mech.Sci. Vol.20, 1978, 833-842.
 - 1.22. Basler,K., Thürlimann,B. **Strength of plate girders in bending**. Proc. ASCE, ST6, Aug. 1961. 153-180.

- 1.23. Basler,K **Strength of plate girders in shear.** Jour. Struct. Div., ASCE, ST7, Oct. 1961, 151-180.
- 1.24. Basler,K **Strength of plate girders under combined bending and shear.** Jour. Struct. Div., ASCE, ST7, Oct. 1961, 181-197.
- 1.25. Massonet,C. **Stability considerations in the design of steel plate girders.** Jour. of Struct. Div. ASCE, Vol 86, ST1, Jan, 1960, 71-97.
- 1.26. Thurliman,B. **New aspects concerning inelastic instability of steel structures.** Jour. of Struct. Div. ASCE, Vol. 86, ST1, Jan. 1960, 99-120.
- 1.27. Chajes,A. **Post-buckling behaviour.** Jour. of Struct. Div. ASCE, Vol. 109, No.10, Oct. 1983, 2450-2462.
- 1.28. Dawe,J., Grondin,G. **Inelastic buckling of steel plates.** Jour. of Struct. Div. ASCE, Vol. 111, No.1, Jan. 1985, 95-107.
- 1.29. Kristek,V. **Methods of theoretical analysis of plated structures.** Lecture notes for the Advanced School "Steel Plated Structures", International Centre for Mechanical Sciences, Udine, Septembre 26-30, 1994, 67.

- 2.1. Roberts,T.M., Rockey,K.C. **A method for predicting the collapse load of a plate girder when subjected to patch loading in the plane of the web.** University College, Cardiff, 1977, and Report 5.15 to ECCS Group 8:3 Meeting .
- 2.2. Roberts,T.M., Rockey,K.C. **An assessment of the accuracy of different formulae for the prediction of the failure load of plate girders subjected to patch loading.** Dept. Civil and Struc. Eng., Univ. College Cardiff, Internal Report, 1978.
- 2.3. Roberts,T.M. **Experimental and theoretical studies on slender plate girders subjected to edge loading.** Univ. College Cardiff, Dept. Civil and Struc. Eng., Int. Report, 1980.
- 2.4. Roberts,T.M. **Stocky and stiffened plate girders subjected to edge loading.** Univ. College Cardiff, Dept. Civil and Struc. Eng., Int. Report, 1981.
- 2.5. Roberts,T.M., Rockey,K.C. **Collapse of plate girders subjected to patch loading.** Jug. druš. gradj. konst., VI kongres, Bled, Z56, 1978, 561-568.
- 2.6. Roberts,T.M., Rockey,K.C. **Méthode pour prédire la charge de ruine d'une poutre a ami mince soumise a une charge semi-répartie dans le plan de l'ame.** Construction Metallique, No. 3, 1978, 3-13.
- 2.7. Roberts,T.M., Rockey,K.C. **A mechanism solution for predicting the collapse load of slender plate girders when subjected to in-plane patch loading.** Proc. Instn. Civ. Engrs, Part 2, 67, Mar. 1979, 155-175.
- 2.8. Roberts,T.M. **Slender plate girders subjected to edge loading.** Proc. Instn. Civ. Engrs, Part 2, 71, Sept. 1981, 805-819.
- 2.9. Roberts,T.M., Chong,C.K. **Collapse of plate girders under edge loading.** Proc. ASCE, ST 8, 1981, 1503-9.
- 2.10. Roberts,T.M., Markovic, N. **Stocky plate girders subjected to edge loading.** Proc. Instn. Civ. Engrs, Part 2, 75, Sept. 1983, 539-50.
- 2.11. Roberts,T.M. **Patch loading on plate girders (Plated structures).** Applied Science Publishers, London, 1983.
- 2.12. Roberts,T.M., Newark,A.C.B **Strength of Webs Subjected to Compressive Edge Loading.** Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.123, No.2 , February, 1997, 176-183.
- 2.13. Shahabian,F., Roberts,T.M. **Buckling of slender web plates subjected to combinations of in-plane loading.** J.Construct. Steel Research, Vol. 51, No. 2, 1999, 99-121.
- 2.14. Shahabian,F., Roberts,T.M. **Combined Shear-and-Patch Loading of Plate Girders.** Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.126, No.3 , March, 2000, 316-321.
- 2.15. Roberts,T.M., Shahabian.F. **Ultimate resistance of slender web panels to combined bending shear and patch loading.** J.Construct. Steel Research, Vol. 57, No. 7, 2001, 779-790.
- 2.16. Rockey,K.C., Bagchi,D.K. **Buckling of plate girder webs under partial edge loadings.** Int. J. Mech.Sci., 12, 1970. 61-76.
- 2.17. Rockey,K.C., El Gaaly,M.A **Ultimate strength of plates when subjected to in plane patch loading.** IABSE, Coll. London, 1971, Proc., 401.
- 2.18. Rockey,K.C., El Gaaly,M.A., Bagchi,D.K. **Failure of thin-walled members under patch loading.** Jour. of the Struct. Div., ASCE, Vol.98, ST12, Paper 9409, Dec. 1972, 2739-2752.

- 3.1. Bergfelt,A., Høvik,J. **Thin-walled deep plate girders under static loads.** IABSE 1968. Final report. 8th Congress, New York, 465-478.
- 3.2. Bergfelt,A., Høvik,J. **Shear failure and local web crippling in thin walled plate girders.** Chalmers University of Technology, Göteborg, Inst. for Konst., Stal Och Trabyggnad, Int. skr S70:11b, 1970, 20.

- 3.3. Bergfelt, A. **Studies and tests on slender plate girders without intermediate stiffeners: I shear test results, II web crippling.** IABSE Coll., proc. p70 (Rep. WC, Vol II), London, 1971. ili Univ. of Tech. Göteborg, Inst. for Konst., Stal Och Trab. Publ. S71:2, 1971, 17.
 - 3.4. Bergfelt, A. **Post-buckling behaviour of webs under concentrated loads, discussion.** IABSE 9th Congress, Amsterdam, Final Rep. 1972, 83-87.
 - 3.5. Bergfelt, A., Lindgren, S. **Livintryckning vid slanka i balkar vid upprepad balasning och speciellt vid höghallpast stal.oth (Web crippling at repeated loading and especially in high-strength steel).** Nordiske Forskningsdager for Stalkonstruksjoner, Raport II 2/4, Oslo, 1973, 12.
 - 3.6. Bergfelt, A. **Incremental collapse of thin webs subjected to cyclic concentrated loads.** IABSE Symposium Lisboa, 1973, Preliminary report, 39-43.
 - 3.7. Bergfelt, A., Wilson, R. **Choice of steel quality of steel bridge girders with regard to support forces during launching.** Preliminary Report, 10th Congress IABSE, 1976, Tokyo, 497-502.
 - 3.8. Bergfelt, A. **The behaviour and design of slender webs under patch edge loading.** Int. Conf. on Steel Plated Structures, Imperial Coll. London, U.K., 1976, P.J. Dowling et al, Crosby Lockwood Staples, 486-502.
 - 3.9. Bergfelt, A. **Patch loading on a slender web.** Institut for Construction, Chalmers University of Technology, Göteborg, Stal-Och Trabvggnad, S79:1, 1979.
 - 3.10. Bergfelt, A. **Girder web stiffening for patch loading.** Chalmers University of Technology, Department of Structural Engineering, Goteborg, 1983, S83:1, 1-78.
 - 3.11. Edlund, Bo L.O. **Buckling and failure modes in slender plate girders under patch loading.** Der Metalbau, Im Konstruktiven-Ingenieurbau (K-I), pp461-469, Karlsruhe, 1988.
 - 3.12. Höglund, T. **Local buckling of steel bridge girder webs during launching.** IUTAM Simp. Contact Loading, Prel. Rep, Vol. 2., Prague, 1990, 5.
-
- 4.1. Škaloud, M., Novak, P. **Prepared discussion in regard to the post-buckled behaviour and incremental collapse of webs subjected to concentrated loads.** Colloquium IABSE, London, Vol.11, proc., 1971, 419-424.
 - 4.2. Škaloud, M. **Únosnost a mechanismus zhroucení tenkých stěn namáhaných osamělým bremenem.** Stavebnický časopis, 21, 6-8, Bratislava, 1973, 452-465.
 - 4.3. Novak, P., Škaloud, M. **Incremental collapse of thin webs subjected to cyclic concentrated loads.** IABSE Symposium Lisboa, Preliminary report, 1973, 179-184
 - 4.4. Škaloud, M., Novak, P. **Post-buckled behaviour of webs under partial edge loading.** Rada Techn. Ved, Roč.85, s.3, 1975, 95.
 - 4.5. Škaloud, M., Drdacky, M. **Vpočet stěn ocelových nosníků podle únosnosti část 3. stěny namáhané osamělým bremenem.** Staveb. Čas., 23, č.3, VEDA, Bratislava 1975, 140-160.
 - 4.6. Kristek, V., Škaloud, M. **Napjatost stěn ocelových nosníků od soustředěných tlaků (State of stress of girders webs steel due to concentrated compressive loads).** Staveb. Čas., 26, č7, 1977, 545-564.
 - 4.7. Kárníková, I., Novak, P., Škaloud, M. **Ultimate load behaviour of longitudinally stiffened steel webs subjected to partial edge loading.** Staveb. Čas., 27, č.10, VEDA, Bratislava, 1979, 752-755.
 - 4.8. Kárníková, I., Novak, P., Škaloud, M. **Únosnost podélně vyztužených ocelových stěn zatížených soustředěným tlakem na části jedné hrany.** Staveb. Čas., 29, č.11/12, VEDA, Bratislava, 1981, 879-888.
 - 4.9. Škaloud, M., Kárníková, I. **Experimental research on the limit state of the plate elements of steel bridges.** Trans. Czech. Acad. Sci., 95, 1985, 1-141.
 - 4.10. Kárníková, I., Škaloud, M. **Experimental research on the ultimate load behaviour of steel plated structures.** Steel Struct., Proc. Intern. Conf., Part I, Budva, 1986, 497-510.
 - 4.11. Kárníková, I., Škaloud, M., Januš, K. **Effect of longitudinal stiffening on the ultimate strength of thin webs under patch loading.** Second Reg. Coll. on Stab. of Steel Struct., proc. II, p83-89, Hungary, Sept., 1986, 83-89.
 - 4.12. Januš, K., Kutmanová-Kárníková, I., Škaloud, M. **Stíhle ocelové stěny s podélnou vyztuhou zatížené tlakem na části jedné hrany.** Staveb. čas., 36, č 2, VEDA, Bratislava, 1988, 133-160.
 - 4.13. Januš, K., Kárníková, I., Škaloud, M. **Experimental investigation into the ultimate load behaviour of longitudinally stiffened steel webs under partial edge loading.** Acta Technica ČSAV, No.2, 1988, 158-195.
 - 4.14. Januš, K., Kutmanová, I., Škaloud, M. **Návrh stěn ocelových nosníků namáhaných místním tlakem od pohyblivého zatížení.** Inž. Stavby 3, 1989, 135- 139.

- 4.15. Kutmanová,I., Škaloud,M., Januš,K. **Ultimate load behaviour of longitudinally stiffened steel plate girders subject to (i) stationary or (ii) variable repeated patch loading.** International Colloquium on Structural Stability, Beijing, 1989, 229-242.
- 4.16. Januš,K., Kutmanová Kárníková,I., Škaloud,M. **Design of longitudinally stiffened thin webs under patch loading.** Int. Coll. Stability of Steel Struct., Budapest, Prel. Rep, Vol II, 1990, 37-44.
- 4.17. Kutmanová Kárníková,I., Škaloud,M., Januš,K. **"Breathing" of thin webs under variable repeated patch loading.** Int. Coll. Stability of Steel Struct., Budapest, Prel. Rep, Vol II, 1990, 69-76.
- 4.18. Kutmanová,I., Škaloud,M., Januš,K., Lowitova,O. **Ultimate load behaviour of longitudinally stiffened steel webs subject to partial edge loading.** IUTAM Simp. Contact Loading, Prel. Rep, Vol. 2., Prague, 1990, 10.
- 4.19. Kutmanová,I., Škaloud,M., Januš,K. **"Breathing" of longitudinally stiffened steel webs subject to repeated partial edge loading.** IUTAM Simp. Contact Loading, Prel. Rep, Vol. 2., Prague, 1990, 7.
- 4.20. Škaloud,M. **Plated structures part II. Chapter III.** Post-graduate advanced course, Budapest, 1990, 37.
- 4.21. Kristek,V., Škaloud,M. **Local Effects in Steel Plated Structures (in Advanced analysis and Design of Plated Structures).** Academia Prague, 1991, 333.
- 4.22. Kutmanová,I., Škaloud,M. **Ultimate Limit State of Slender Steel Webs Subject do (i) Constant and (ii) Repeated Partial Edge Loading.** J. Construct. Steel Research, 21, 1992, 147 - 162.
- 4.23. Januš,K., Kutmanová,I., Škaloud,M. **Ultimate Load Behaviour of Steel Plate Girders Subject to (i) Constant and (ii) Repeated Patch Loading.** Constructional Steel Design, World Developments, Proceedings of the First World Conference on Constructional Steel design, Acapulco, Mexico, December 1992, p118-127.
- 4.24. Škaloud,M. **Shear lag and "breathing" in steel plated structures.** Lecture notes for the Advanced School "Steel Plated Structures", International Centre for Mechanical Sciences, Udine, Septembre 26-30, 1994. (78) 51-79.
- 5.1. Drdáček,M. **Thin plate girder web under partial edge loadings.** (Tenká stena plnostenného nosníku pamahána zatížením soustředěným na části okraje). Report of YTAM ČSAV (in Czech), Prague, May 1974 (51).
- 5.2. Drdáček,M.,Novotny,R. **Partial edge load carrying capacity tests of thick plate girder webs.** Acta Technika ČSAV, No5, 1977 , 614-620.
- 5.3. Drdáček,M. **Experimental determination of the displacement field and the stress state of the plate girder web.** Reg.Coll. on Stability of Steel Struct., Budapest. Hungary, proced.,1977, 483-488.
- 5.4. Drdáček,M., Zömerova,M. **Initial imperfections of steel plate girders (in Czech).**(Poznámka k problému počátečních imperfekci ocelových plnostenných nosníků) Proc. of the Conf. on Theor. and Exp. Research of Real Behaviour of Steel Struct., Karlovy Vary, 1980, 140-146.
- 5.5. Drdáček,M. **A method for predicting the partial edge load carrying capacity of webs with flanges.** Proc. of the 3-rd Inter. Coll. on Stability, Timisoara, 1982, 219-225.
- 5.6. Drdáček,M. **Steel webs with flanges subjected to partial edge loading.** Chalmers Tekniska Hogskola, Stal-och Trabyggnad, Int. Skr. s 82:14, Goteborg, 1982, 21.
- 5.7. Drdáček,M., Jaroš,P., Škaloud,M. **Plastification of webs under a partial edge loading.**(in Czech) (Plastifikace tenké steny zatíženév tlakem na části hrany). Proc. of the 21st Conf. on Exp. Stress Analysis, Luhačovice, Czechoslovakia, May 1983, 220-224.
- 5.8. Drdáček,M. **Výzkum kovových sten lokálne nambaných tlakem.** Vybrané práce Ústavu teoretické a aplikované mechaniky ČSAV z období 1981 až 1985, Academia Praha, 1985, 153-160.
- 5.9. Drdáček,M. **Limit states of steel plate girder webs under patch loading.** Second Reg. Coll. on Stab. of Steel Struct., proc. II, p49-56, Hungary, Sept., 1986, 687-694.
- 5.10. Drdáček,M., Jaroš,P., Weinberg,O. **Experimental investigations into the plastification of thin webs.** Proc. of the 25th Conf. IMEKO on Stress Analysis, Pilsen, 1987, 5.
- 5.11. Drdáček,M. **Tests of the influence of different structural and loading parameters on the behaviour of thin plate girders.** Proc. Intern. Sci. Tech. Conference Metal Struct., Gdansk, 1989, 8.
- 5.12. Drdáček,M. **On two particular problems of plate girder webs under partial edge loads.** (Prepared for Tihany Conf.1990.) Int. Coll. Stability of Steel Struct., Budapest, Prel. Rep, Vol II, 1990, 29-36.
- 5.13. Drdáček,M. **Non-stiffened steel webs with flanges under patch loading.** IUTAM Simp. Contact Loading, Prel. Rep, Vol. 2., Prague, 1990, 8.
- 5.14. Kratena,J. **Vyšetřování membránových napětí ve stenách tenkostenných nosníků v pokrytí oblasti pomocí fotoelasticimetrie.** Staveb.Čas., XXI, 6-8, Bratislava, 1973, 466-477

- 5.15. Kratena,J. Photoelastic investigation into the influence of flange thickness and loading width upon the stress of webs. VDI Berichte, Nr.313, 1978, 761-766.
- 5.16. Kratena,J. Photoelastic investigation into the post buckled state of stress in webs subjected to partial edge loading. Acta Technica ČSAV, No.1, 1978, 24-50.
- 5.17. Kratena,J. A contribution to the solution to the stress state of webs of small depth-to-thickness ratios subjected to uniform partial edge loading. Acta Technica ČSAV, No.1, 1979, 98-107.
- 5.18. Kratenová,M., Kratena,J. Experimental investigation into the stress state of webs with horizontal stiffeners subjected to uniform partial edge loading. 8th All-union Conf. on Photoelast, Vol IV, Tallin, 1979, 209-212.
- 5.19. Kratena,J., Škaloud,M. Effect of longitudinal stiffeners upon the stress state of thin webs subjected to a partial edge load. 2nd Conf. on Steel Struct., Vol.I, Timisoara, 1979, 45-53.
- 5.20. Kratena,J., Kratenová,M. Experimental approach to the post-buckled behaviour of web girders under uniform patch loading. 2nd Conf.on Steel Struct., Vol.I, Timisoara, 1979, 55-62.
- 5.21. Kratena,J., Javornicky,J. Photoelastic model investigation into box girder of bridge crane track. II Simp. Nation.de ensomet., Cluj-Napoca, 1980, 47-54.
- 5.22. Kratena,J., Kratenová,M. Use of shadow-moire technique in the investigation into the buckled patterns of thinwalled steel structures. 3rd Intern. Coll.on Stab.,Timisoara, Vol.II, 1982, 7.
- 5.23. Kratenová,M.,Kratena,J. Použití metody stínového moiré při řešení stabilitních problému tenkostenných nosníků. Proc. of the 20th Conf. on Exp. Stress Analysis, Karlove Vary, 1982, Vol.III, 51-56.
- 5.24. Kratena,J., Kratenová,M. Modern optical methods as a tool for the investigation into the buckling of web structures. Second Reg. Coll. on Stab. of Steel Struct., proc. II, p91-98, Hungary, Sept., 1986, 91-98.
- 5.25. Ravinger,J. Posobenie čiastočne rovnomerného zataženia na štihlu stenu ocelového nosníka, 1. Staveb. Čas., 27, č.8, VEDA, Bratislava, 1979, 521-534.
- 5.26. Ravinger,J. Posobenie čiastočne rovnomerného zataženia na štihlu stenu ocelového nosníka, 2. Staveb. Čas., 27, č.9, VEDA, Bratislava, 1979, 603-630.
- 6.1. Wilkesmann, F.M. Stegblechbeulung bei Längsrandbelastung. Der Stahlbau, No.10, 1960, 314-322.
- 6.2. Klöppel,K., Wagemann,C.H. Beulen Eines Bleches unter einseitiger Gleichstreckenlast. Der Stahlbau. Vol. 7, 1964, 216-220.
- 6.3. Warkenthin,W. Zur Beurteilung der Beulsicherheit querbelasteter Stegblechfelder. Der Stahlbau. Vol.34, 1965, 28-29.
- 6.4. Protte,W. Zum Scheiben- und Beulproblem längsversteifter Stegblechfelder bei örtlicher Lasteinleitung und bei Belastung aus Haupttragwirkung. Der Stahlbau, 8, 1976, 251-252.
- 6.5. Protte,W. Beulwerte für längsrandversteifte Rechteckplatten unter symmetrischer Querbelastung nur eines Längsrandes. Stahlbau, 63, Heft 2, 1994, 33-40.
- 6.6. Weber,N., Oxfort,J. Stegblechbeulen unter Einzellasten am drehelastisch gestützten Längsrand. Der Stahlbau, Heft 11, 1982, 332-335.
- 6.7. Vögele,H.G. Ermittlung der Spannungen im Steg von I-Trägern im Lasteinleitungs-bereich bei Lastangriff an den Gurten. Der Stahlbau. 41.J, Heft 8, August 1972, 225-231.
- 6.8. Dimitrov,D.G. Spannungsverteilung querbelasteter Stegbleche mit abgestuften Dicken unter einseitiger begrenzter Belastung. Stahlbau, 55, 1986, S.233-236.
- 6.9. Kutzelnigg,E. Beulwerte nach der linearen Theorie für längs-versteifte Platten unter Längsrandbelastung. Der Stahlbau, Heft 3, 1982, 76-84.
- 6.10. Klöppel,K., Scheer,J. Das praktische Aufstellen von Beuldeterminanten für Rechteckplatten mit randparallelen Steifen und Navierschen Randbedingungen. Stahlbau, 25, 1956, H.5, S.117-126.
- 6.11. Barth,W., Börsch-Supan,W., Scheer,J. Beulsicherheit ausgesteifter Rechteckplatten bei zusammengesetzten Beanspruchung. Der Stahlbau, 28, 1959, H.3, S.68-74.
- 6.12. Herzog,M. Die Krüppellast sehr dünner Vollwandträgerstege nach Versuchen. Der Stahlbau, 1/1974, 26-28.
- 6.13. Herzog,M. Die Krüppellast von Blechträger- und Walzprofilstegen. Der Stahlbau. Heft 3, 1986, 87-88.
- 6.14. Oxfort,J. Versuche zum Beul- und Krüppelverhalten von unversteiften Trägerstegblechen unter zentrischen und exzentrischen Einzellasten auf dem Obergurt. Der Stahlbau, Heft 10, 1983, 309-312.
- 6.15. Oxfort,J.,Gauger,H.U.Beultraglast von Vollwandträgern unter Einzellasten. Der Stahlbau, 58, Heft 11, 1989, 331-339.
- 6.16. Scheer,J. Gemeinschaftsprogramm "Plattenbeulversuche" des Deutschen Ausschusses für Stahlbau. Bauingenieur, 58, 1983, S.375-379.

- 6.17. Scheer, J., Liu, X.L., Falke, J., Peil, U. Traglastversuche zur Lasteinleitung an I-förmigen geschweissten Biegeträgern ohne Steifen. Der Stahlbau, 57, Heft 4, 1988, 115-121.
- 6.18. Tschamper, H. Interaktion zwischen Biegung und konzentrierter rippenloser Lasteinleitung an schlanken Trägern. Publikation Nr. 89-1, Baustatik und Stahlbau, Eidg. Techn. Hochschule, Höggerberg, 8093 Zürich, 1989, 1-119.
- 6.19. Dubas, P., Tschamper, H. Interaktion von Einzellast und Biegung an Trägern hoher Stegslaukheit. Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie. Office fédéral des routes. Projet no 8/84, Publication 177, Zurich, mai 1989.
- 6.20. Tschamper, H. Konzentrierte Lasteinleitung und Biegung an unversteiften schlanken Trägern. Stahlbau, 60, 1, 1991, 5-14.
- 6.21. Glas, H.D., Johné, H. Noch einmal: Beultraglast von Vollwandträgern unter Einzellast. Stahlbau, 60, 4, 1991, 111-20.
- 6.22. Ungermann, D., Sedlacek, G. Herleitung eines Modells zur Berechnung der Tragfähigkeit unausgesteifter Stegbleche von Walzprofilen bei Einleitung konzentrierter Einzellasten. Stahlbau, 63, Heft 4, 1994, 97-100.
- 6.23. Bamm, D., Lindner, J., Voss, R.P. Traglastversuche an ausgesteiften Trägerschlagern. Der Stahlbau, Heft 10, 1983, 296-300.
- 6.24. Voss, R.-P. Lasteinleitung in geschweisste Vollwandträger aus Stahl im Hinblick auf die Bemessung von Lagersteifen. Dissertation, TU Berlin, 1983. Kurzfassung in: Stahlbau, 56, 1987, S.97-106.
- 6.25. Schmidt, J.S. Elastisch-plastisches Rechenmodell zur Bestimmung der örtlichen Tragfähigkeit eines I-Trägers unter Druckbelastung. Der Stahlbau, Heft 2, 1982, 53-55.
- 6.26. Tschammer, F. Zur Entwicklung der steifenlosen Stahlbauweise. Der Stahlbau, Heft 7, 1982, 201-206.
- 6.27. Ramm, E.-Weimar, K. Traglasten unversteifter Trägerstegbleche unter konzentrierten Lasten. Der Stahlbau, Heft 4, 1986, 113-118.
- 6.28. Stein, E., Lambert, K.H., Plank, L. Traglastberechnung dünnwandiger Strukturen bei grossen elastoplastischen Deformationen. Der Stahlbau 54, Heft 1, 1985, 9-13.
- 6.29. Kuhlmann, U. and Seitz, M.: Zum Tragverhalten längsversteifter Blechträger unter konzentrierter Lasteinleitung. In: Ofner, R. (Hrsg.) ; Unterwiesing, H. (Hrsg.): Festschrift Univ.-Prof. Richard Greiner. Institut für Stahlbau, Holzbau und Flächentragwerke – Universität Graz, 2001, S. 19 – 28
- 6.30. Kuhlmann, U. and Seitz, M.: Behaviour Of Longitudinally Stiffened Girder Webs Subjected To Patch Loading, Eurosteel, 2002, Coimbra, Portugal (submitted for publication)
- 6.31. Scheer, J. Zum Problem der Gesamtstabilität von einfach-symmetrischen I-Trägern. Stahlbau, 28, 1959, S.113-126, 165-171.
- 6.32. Fischer, M. Auswertungsergebnis der Kipptheorie für den durch eine Einzellast in Feldmitte und gleiche Stabendmomente belasteten einfach-symmetrischen Druckstab mit den Randbedingungen $\beta_0 = \beta = 0.5$. Der Stahlbau, Vol.34, 1, 1965, 30-31.
- 6.33. Fischer, M. Das Kipp-Problem querbelasteter, exzentrisch durch Normalkraft beanspruchter I-Träger bei Verzicht auf die Voraussetzung der Querschnittstreue. Stahlbau, 36, 1967, S.77-86.
- 6.34. Fischer, M. Das Stabilitätsproblem des in Höhe des oberen Flansches wirklichkeitsnah belasteten I-Trägers. Der Stahlbau, 42, J, Heft 5, Mai 1973, 129-138.
- 6.35. Lindner, J. Anschlussmomente von Trägern, die zur Kippaussteifung herangezogen werden. Die Bautechnik, 10, 1973, 342-344.
- 6.36. Kutzelnigg, E. Beulwertdiagramme für Stegbleche ohne Zwischensteifen nach der linearen Beultheorie bei Berücksichtigung von in Trägerlängsrichtung veränderlichen Spannungen und der Torsionssteifigkeit der Trägergurte. Stahlbau, 47, 1978, S.329-338 und S.370-373.
- 6.37. Protte, W. Zur Gesamtstabilität querbelasteter I-Träger mit schmalen Gurten. Der Stahlbau, Heft 9, 1982, 281-282.
- 6.38. Protte, W. Zur Gesamtstabilität querbelasteter I-Träger mit abgestufter Stegblech-dicke. Stahlbau, 54, 1985, S.119-124.
- 6.39. Lindner, J., Gietzelt, R. Stabilisierung von Biegeträgern mit I-Profil durch angeschweisste Kopfplatten. Stahlbau, 53, 1984, S.69-74.
- 6.40. Herzog, M. Die erforderliche Grösse des Sicherheitskoeffizienten. Die Bautechnik 47, 1970, H. 4, S.135-136.
- 6.41. Herzog, M. Die Traglast der Lagerquerscheiben stänlerner Kastenträger nach Versuchen. Bauingenieur, 52, 1977, S.263-265.
- 6.42. Herzog, M. Tragfähigkeit und Bemessung unversteifter und versteifter Blechträger auf Schub in einfachster Näherung. Bauingenieur, 63, 3, 1988, 133-7.

- 6.43. Klöppel,K., Reuschling,D. **Beulwerte von Rechteckplatten mit linear veränderlichen Normalspannungen der Querränder und konstanten Druckspannungen an den Längsrändern.** Der Stahlbau 34, 1965, H.11, S.346-349.
- 6.44. Yoshizuka,J., Naruoka,M. **Buckling coefficients of simply supported rectangular plates under combined bending and compressive stresses in two perpendicular directions.** Der Stahlbau, 40, 1971, H. 7, S.217-221.
- 6.45. Oxfort,J.K. **Beitrag zum exzentrischen Lastangriff an Kranbahnträgern.** Der Stahlbau, H.7, 1963, 213-216.
- 7.1. Massonnet,Ch. **Essais de voilement sur poutres a âme raidie.** AIPC, Mem.14, 1954, 125-186.
- 7.2. Aribert,J.M., Lachal.A. **Etude elasti-plastique par analyse des contraintes de la compression locale sur l'âme d'un profilé.** Constr. Métallique, 1977, 4, 51-56.
- 7.3. Bouaziz,J.P. **Assemblages poutre-poteau soudés,** Constr. Métallique, 1977, 4, 37-50.
- 7.4. Aribert,J.M., Lachal.A., El Nawawy,O. **Modélisation elasto-plastique de la résistance d'un profilé en compression locale.** Constr. Métallique, 1981, 2, 3-26.
- 7.5. Yung-Min Tsai, Crisinel,M. **Etude des formules de résistance à l'écrasement des âmes de profils à parois minces.** Constr. Métallique, 1988, 1, 43-49.
- 7.6. Aribert,J.M., Ammari,F., Lachal.A. **Influence du mode d'application d'une charge de compression locale sur la résistance plastique de l'âme d'un profilé cas des assemblages tubulaires.** Constr. Métallique. 1988, 2, 3-30.
- 7.7. Aribert,J.M., Lachal.A., Moheissen.M. **Interaction du voilement et de la résistance plastique de l'âme d'un profilé laminae soumis à une double compression locale (nuance d'acier allant jusqu'à FeE 460).** Constr. Métallique, 1990, 2, 3-23.
- 7.8. Dubas,P., Tschamper,H. **Stabilité des âmes soumises à une charge concentrée et à une flexion globale.** Constr. Métallique, 1990, 2, 25-39.
- 7.9. Aribert,J.M., Lachal.A., Moheissen,M. **Modelling and experimental investigation of plastic resistance and local buckling of H or I steel sections submitted to concentrated or partially distributed loading.** IUTAM Simp. Contact Loading, Prel. Rep, Vol. 2., Prague,1990, 10.
- 7.10. Galea,Y. **Seuil de bifurcation d'équilibre d'un panneau non raidi soumis à des charges transversales agissant dans son plan.** Constr. Métallique, Technique et applications, 1984, 1, 1-19.
- 7.11. Gachon,H. **Sur le flambage des plaques modèle de calcul modèles expérimentaux.** Constr. Métallique. 1980, 4, 23-52.
- 7.12. Jetteur,Ph., Maquoi,R., Massonnet,Ch., Skaloud,M. **Calcul des âmes et semelles raidies des ponts en acier.** Constr. Métallique, 1983, 4, 15-27.
- 7.13. Carretero, A., Lebet, J.-P. **Introduction des forces concentrées dans les poutre elancees.** Constr. Métallique. 1998, 1, 5-18.
- 7.14. Jetteur,Ph., Maquoi,R., Massonnet,Ch., Skaloud,M. **Calcul des âmes et semelles raidies des ponts en acier.** Construction Métallique, n° 4, 1983, 15-27.
- 8.1. Shimizu,S., Yoshida,S., Okuhara,H. **An experimental study on patch-loaded web plates.** ECCS Coll. on Stab. of Plate and Shell Struct., Ghent Univ.,April 1987, 85-94.
- 8.2. Shimizu,S., Yabana,H., Yoshida,S. **A new collapse model for patch-loaded web plates.** J.Construct. Steel Research, 13, 1989, 61-73.
- 8.3. Shimizu,S., Horii,S., Yoshida,S. **The collapse mechanisms of patch loaded web plates.** J.Construct. Steel Research, 14, 1989, 321-337.
- 8.4. Shimizu,S., Horii,S., Yoshida,S. **Behaviour of stiffened web plates subjected to the patch load.** IUTAM Simp. Contact Loading, Prel. Rep, Vol. 2., Prague,1990, 8.
- 8.5. Shimizu,S., Sakata,S. **The collapse behaviour of web plates on the launching shoe.** Constructional Steel Design, World Developments, Proceedings of the First World Conference on Constructional Steel design. Acapulco, Mexico, December 1992, p170- 173.
- 8.6. Shimizu,S. **The collapse behaviour of web plates on the launching shoe.** J.Construct. Steel Research, 31, 1994, 59-72.
- 8.7. Dogaki, M., Nishijima, Y., Yonezawa, H. **Nonlinear behaviour of longitudinally stiffened webs in combined patch loading and bending.** Constructional Steel Design, World Developments, Proceedings of the First World Conference on Constructional Steel design, Acapulco, Mexico, December 1992, p141- 150.

- 8.8. Dubas,P.,Gehri,E. **Behaviour of webs under concentrated loads acting between widely spaced vertical stiffeners**. Raport 5.13 to ECCS Group 8:3, Meeting in Zürich, 1978, 11
- 8.9. Sedlacek,G.,Ungermann,D. **Background dokumentation for Eurocode no 3 , chapter 5, document 5.06**. April 1989, 31. /9/
- 8.10. Dubas,P **Some Remarks on the Post-Critical Behaviour of Plated Structures**. Steel structures, ed. M.N.Pavlović. Elsevier, 1986, 247-263.
- 8.11. Dubas,P. **Limit State Design of Plate Girders**. Steel Structures - Advances, Design and Construction, Ed. Narayanan,R., Elsevier Applied Science, 1987, 98-107.
- 8.12. Dubas,P **Zwei Beiträge zur Stabilitätstheorie im Stahlbau**. Miscellany Dedicated to the 65th Birthday of Academician Professor Dr Nikola Hajdin, University of Belgrade, Belgrade, ed. N.Naerlović-Veljković. 1988. 19-28.
- 8.13. Spinassas,I.,Raoul,J. **Comportement d'une âme métallique soumise a une charge appliquée dans son plan**. Annales des ponts et Chaussées, No 51, 3e trimestre 1989, 3-9.
- 8.14. Spinassas,I., Raoul,J., Virlogeux,M. **Parametric study on plate girders subjected to patch loading**. IUTAM Simp. Contact Loading, Prel. Rep, Vol. 2., Prague,1990, 12.
- 8.15. Raoul,J., Schaller,L., Theillout,J.-N. **Tests of buckling of panels subjected to in-plane patch loading**. IUTAM Simp. Contact Loading, Prel. Rep, Vol. 2., Prague,1990, 1.
- 8.16. Elgaaly,M., Nunan,W. **Behaviour of rolled section web under eccentric edge compressive loads**. Journal of Struct. Eng.,ASCE. Vol. 115, No.7, July, 1989, 1561-1578.
- 8.17. Elgaaly,M., Salkar, R.K. **Behaviour of webs under eccentric compressive edge loads**. IUTAM Simp. Contact Loading, Prel. Rep, Vol. 2., Prague,1990, 7.
- 8.18. He Desheng, Le Chengjun **Buckling of crane girder webs under wheel loads**. International Colloquium on Structural Stability, Beijing, 1989, 200-208.
- 8.19. Herzog,A.M. **Web Crippling with Bending and Shear of Thin-Walled Plate Girders**. J.Construct. Steel Research, 22, 1992, 87-97.
- 8.20. Tryland,T., Hopperstad, O.S., Langseth,M. **Steel girders subjected to concentrated loading - Validation of numerical simulations**. J.Construct. Steel Research, Vol. 50, No. 2, 1999, 199-216.
- 8.21. Maquoi,R. **Ultimate load behaviour of plated structures**. Lecture notes for the Advanced School "Steel Plated Structures", International Centre for Mechanical Sciences, Udine, Septembre 26-30, 1994. p
- 8.22. Souza, R.S., Silva Vellasco, P.C.G., Andrade, S.A.L. **Patch load instability by the finite element method**. Proc. 5th Int. Coll. on Structural Stability "Stability problems in Designing, Construction and Rehabilitation of Metal Structures", Rio de Janeiro, Brasil, 1996, 561-571.
- 8.23. Souza, R.S., Silva Vellasco, P.C.G., Andrade, S.A.L **A Design Study of the Patch Load Instability Phenomenon**. Proceedings of the 5th Int. Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures SDSS '97. Nagoya, Japan, 1997, 197-204.
- 8.24. Navarro. M.G., Lebet, J-P. **Viaduc des Vaux - Control Measurements for a 130 m Span Bridge Launching**, M.G. Navarro, R.Pinol&F. Guex / EPFL-ICOM&Realini&Bader (sa Interneta 2002)
- 8.25. Dauner, H-G., Decorges,G., Stucki, d. **Web buckling strength for the launching of a box girder with a 130 m main span**. Stahlbau, 69, H.10, 2000, 775-780.
- 8.26. Lebet, J-P. **Viaduc des Vaux -Krafteinleitungs- fragen beim Brückeneinschub**. Stahlbau, 71, H.8, 2002. 558-563.
- 8.27. Johansson,B., Lagerqvist,O. **Resistance of Plate Edges to Concentrated Forces**. J.Construct. Steel Research, 32, 1995, 69-105.
- 8.28. Lagerqvist,O., Johansson,B. **Resistance of I- girders to Concentrated Loads**. J.Construct. Steel Research, Vol. 39, No.2, 1996, 87-119.
- 8.29. Lagerqvist,O., Johansson,B. **Résistance des âmes de poutres de pont pendant le lancement**. Constr. Métallique. 1996, 2, 3-16.
- 8.30. Granath,P. **Behavior of Slender Plate Girders Subjected to Patch Loading**. J.Construct. Steel Research, Vol. 42, NO. 1, 1997, 1-19.
- 8.31. Lagerqvist,O. **Resistance of Bridge Girder Webs Subjected to Concentrated Forces**. J.Construct. Steel Research, Vol. 46, Nos 1-3, 1998, 62-64.
- 8.32. Granath,P. **Distribution of support reaction against a steel girder on a launching shoe**. J.Construct. Steel Research, Vol. 47, No. 3, 1998, 245-270.
- 8.33. Granath,P., Lagerqvist,O. **Behaviour of girder webs subjected to patch loading**. J.Construct. Steel Research, Vol. 50, No. 1, 1999, 49-69.

- 8.34. Granath,P. **Serviceability limit state of I-shaped steel girders subjected to patch loading.** J.Construct. Steel Research. Vol. 54, No. 3, 2000, 387-408.
- 8.35. Granath,P., Thorsson,A., Edlund,B. **I-shaped steel girders subjected to bending moment and travelling patch loading.** J.Construct. Steel Research, Vol. 54, No. 3, 2000, 409-421
- 8.36. Graciano, C.A., Edlund,B. **Nonlinear FE analysis of longitudinally stiffened girder webs under patch loading.** J.Construct. Steel Research, Vol. 58, No. 9, 2002, 1231-1245.
- 8.37. Johansson, B., Maquoi, R., Sedlacek, G. **New design rules for plated structures in Eurocode 3,** J.Construct. Steel Research, Vol. 57, , 2001, 279-311.
- 8.38. Aribert,J.M., Lachal,A., Moheissen,M. **Modeling and experimental investigation of plastic resistance and local buckling of H or I steel sections submitted to concentrated or partially distributed loading.** IUTAM Simp. Contact Loading, Prel. Rep. Vol. 2., Prague,1990, 10.
- 9.1. Hajdin,N. **Izbočavanje vitkih vertikalnih limova.** Srp. akad. nauka i umet., Glas CCXCV, kn.11, Beograd, 1976, 61.
- 9.2. Hajdin,N. **Teorijske podloge za dimenzionisanje I nosača sa tankim rebrom.** Izgradnja, pos. izd. Čel. konstr., Beograd, 1977, s168-192.
- 9.3. Hajdin,N. **Novija istraživanja stabilnosti limova i njihov uticaj na izmenu postojećih i budućih propisa.** Naše gradj., 35, 1, 1981, (19-25) 1-7.
- 9.4. Ćorić,B. **Postupak za proračun izbočavanja vertikalnih limova usled dejstva koncentrisanog opterećenja.** Simp. Inov. jug. prop., S-5, Trogir, maj 1980, s39-46
- 9.5. Ćorić,B. **Proračun bočnog izvijanja nosača metodom konačnih elemenata.** Simp. Savr. prob. nelin. Meh., Tara, febr. 1980, II-6.
- 9.6. Roberts,T.M., Ćorić,B. **Collapse of plate girders subjected to localized edge loading.** 15. Jug. kong. teor. i prim. meh., Kupari, 1981, 451-458.
- 9.7. Ćorić,B., Roberts,T.M. **Stabilnost tankozidnog nosača nedeformabilnog poprečnog preseka primenom metode konačnih elemenata.** 15. jug. kong. teor. i prim. meh., Kupari, 1981, C-36, 297-304.
- 9.8. Ćorić,B. **Teorijska i eksperimentalna analiza lokalnog i bočnog izvijanja čeličnog I nosača deformabilnog poprečnog preseka.** Dokt. dis., Gradjevinski fakultet, Beograd, mart, 1982, s174.
- 9.9. Ćorić,B. **Primena metode konačnih elemenata pri proračunu tankozidnih nosača.** II sem. inov. Met. kon. elem., Beograd, 1982, 451-458.
- 9.10. Ćorić,B. **Prilog analizi bočnog izvijanja nosača deformabilnog poprečnog preseka.** Simpozijum Savremeni problemi opšte stabilnosti i stabilnosti kontinuuma, Tara, 22-24. febr.,1982, 163-169.
- 9.11. Ćorić,B., Roberts,T.M. **Influence of Cross-Section Distortion on the Behaviour of Slender Plate Girders.** In Instability and Plastic Collapse of Steel Structures, ed. L.J. Morris, Granada Publishing, London, Toronto, Sydney, New York, 1983, pp 352-59.
- 9.12. Hajdin,N., Ćorić,B. **Prilog analizi lokalnog izbočavanja vertikalnih limova.** Naučni skup Čelične konstr. danas, knj.II, 1983, 255.
- 9.13. Hajdin,N., Ćorić,B. **Bočno izvijanje čeličnog I nosača deformabilnog poprečnog preseka.** Zborn. rad. Matem.inst., Nov.ser., kn. 4 (12), 1984.
- 9.14. Ćorić,B. **Collapse of plate girders subjected to patch loading.** ZAMM, Zangew Math. Mech., 66, 1986. 4, T130-T131.
- 9.15. Radenković,G., Ćorić,B. **Nelinearna analiza lokalnog izbočavanja limenih I nosača.** 17. jug. kong. teor. i prim. meh., Zadar, 1986, C1-57, 355-360.
- 9.16. Radenković,G., Ćorić,B. **The elastic-plastic analysis of pre and post lateral buckling of I girders using finite element method.** Proc. Inter. Conf. Steel Struct., Part II, Budva, 1986, 527.
- 9.17. Ćorić,B. **Transversely reinforced plate girders subjected to patch load.** International Colloquium on Structural Stability, Beijing, 1989, .
- 9.18. Roberts,T.M., Ćorić,B. **Collapse of a Plate Girders Subjected to Patch Loading.** Miscellany Dedicated to the 65th Birthday of Academician Professor Dr Nikola Hajdin, University of Belgrade, Belgrade, ed. N.Naerlović-Veljković, 1988, 203-209.
- 9.19. Debeljković,M. **Kranske staze u čeličnoj konstrukciji.** Izgradnja, 11/1978.
- 9.20. Debeljković,M. **Uloga lokalnih napona pritisaka u slučaju bavarije odlagača jalovine na dnevnom kopu jednog našeg rudnika.** Naučni skup Čelične konstr. danas, knj.II, 1983, 233.

- 9.21. Bojović, A. **Unošenje sila u pojaseve i vertikalne limove punih nosača čeličnih konstrukcija**. VII kong. SDGKJ, Cavtat, 1983, TE-8, 77.
- 9.22. Lucic, D. **Problemi granične nosivosti tankozidnih nosača usljed dejstva usko podijeljenog opterećenja**, Istraživanja, Monografija posvećena petnaestogodišnjici rada fakulteta, Podgorica, 1995, str. 285-299.
- 9.23. Lucic, D. **Eksperimentalno istraživanje**, Univerzitet Crne gore, Građevinski fakultet u Podgorici, Interna publikacija, Podgorica, 1998, 454 str.
- 9.24. Lucic, D. **Prilog analizi stabilnosti tankozidnih nosača**. Doktorska disertacija, Beograd, 1999, s. 151.
- 9.25. Lucic, D. **Experimental Investigation on I - girders under eccentric patch loading**, Proc. of the Conf. Eurosteel '99, CVUT Praha, 47-50.
- 9.26. Lucic, D. **Prilog analizi stabilnosti tankozidnih nosača - prikaz nagradjene doktorske disertacije**. Jug. društvo gradj. konstr., Simpozijum novembar 2000, Vrnjačka Banja, 55- 62.
- 9.27. Lucic, D. **A method for estimating ultimate load of thin-walled beams subjected to patch loading in the plane of the web**, Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS 2002) (Ed. M. Ivanyi), International Colloquium, 26-28 September 2002, Budapest, Hungary, p449-456.
- 9.28. Lucic, D., Scepanovic, B. **I nosaci pod dejstvom lokalnog ekscentricnog opterećenja - eksperimentalno istraživanje**, Jug. društvo gradj. konstr., Saopštenja 11 kongres , 25-27. septembas 2002, Vrnjačka Banja, Knjiga 2, 251-256.
- 9.29. Lucic, D., Scepanović, B. **Experimental investigation on locally pressed I - beams subjected to eccentric patch loading**, Proceedings of the 3rd European conference on steel structures, Volume I, Coimbra, Portugal, 19-20 September 2002, 473-481.
- 9.30. Lucic, D. **Experimental research, Thin - walled I girders subjected to centric and eccentric patch loading**, University of Montenegro, Faculty of Civil Engineering, Podgorica 2002, 348.
- 9.31. Ščepanović, B. **Eksentrično lokalno opterećeni I - nosači - eksperimentalno - teorijska analiza**, Magistarski rad, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2003. 120s.
- 9.32. Lucic, D. **Experimental research on I- girders subjected to eccentric patch loading**, J.Construct. Steel Research, 59, 2003, 1147-1157.
- 10.1. Ann. Travaux Publiqs de Belgique. 1856-57.
- 10.2. Timošenko, S. **Istorija Otpornosti materijala**, (McGraw-Hill Book Co. 1953), Građevinska knjiga, Beograd, 1965.
- 10.3. Timoshenko, S.- Goodier, J.N. **Theory of Elasticity**, McGraw-Hill Book Co., 2nd ed., New York. 1951.
- 10.4. Girkmann, K. **Površinski sistemi nosača**, (Spr.-Ver. Wien, 1959) Građevinska knjiga, Beograd, 1965.
- 10.5. Timošenko, S. **Teorija elastične stabilnosti**, (1st ed. McGraw -Hill New York-London, 1936) Naučna knjiga, 1952.
- 10.6. Timoshenko, S.- Gere, J.M. **Theory of elastic stability**, 2nd ed., McGraw Hill, Tokyo, 1961.
- 10.7. Bleich, F. **Buckling strenght of metal structures**. McGraw-Hill Book Co., New York, 1952.
- 10.8. Home, M.R. **Plastic theory of structures**, Pergamon Press, Inc. New York, 1979.
- 10.9. Johnson, W -Mellor, P.B. **Plasticity for mechanical engineering**, D. Van Nostrand, New York, 1962.
- 10.10. Zimmermann, H. **Die berechnung des eisenbahnoberbaues**, Berlin, 1988.
- 10.11. ***** Stability of steel structures**, II Reg. Coll. Proc., Vol. II, Hungary, Sept. 1986.
- 10.12. ***** Plated structures stability and strength**. Ed. R. Narayanan, Applied Science Publishers, London. 1983.
- 10.13. ***** SIA Norme 161 Čelične konstrukcije**. izdanje 1979, JGC Naučni skup Čelične konstr. danas, knj. I.
- 10.14. Dubas, P., Gehri, E. **Behaviour and design of steel plated structures**. ECCS-CECM-EKS. Jan. 1986., Appl. Stat. and Steel Struct., Zürich,
- 10.15. Pippard, A.J.S, Baker, J. **The analysis of engineering structures**. Edward Arnold (Publishers), Ltd.
- 10.16. Ballio, G., Mazzolani, F.M. **Theory and Design of Steel Structures**, Chapman and Hall, 1983.
- 10.17. SNIP II-23-81*, Str. 26-30.
- 10.18. ENV 1993 - 2 : Annex 5.2 , p1-12.
- 10.19. ENV 1993-1-1 : 1992/A2 Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-1: General - General rules and rules for buildings, (October 1998).
- 10.20. ENV 1993-1-5 : 1997 Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-5 : General rules - Supplementary rules for planar plated structures without transverse loading (Novembre 1998)
- 10.21. ENV 1993-2 : 1997 Eurocode 3: Design of steel structures, Part 2: Steel Bridges , (October 1997)

- 10.22. BS 5400-3 : 2000, Steel, concrete and composite bridges, Part 3 Code of practice for design of steel bridges
- 11.1. Roberts, T.M., Marković, N. **Stocky Plate Girders Subjected To Edge Loading**, Proc. Instn Civ. Engrs, Part 2, 1983, 75, Sept., 539-550.
- 11.2. Marković, N. **Lokalno izbočavanje I nosača sa podužnim ukrucenjima usled koncentrisanog opterećenja**, 18. Jugoslovenski kongres teorijske i primenjene mehanike, Vrnjačka Banja, juna 1988, 185-188.
- 11.3. Marković, N. **Prilog analizi plastičnog ponašanja tankozidnih nosača**, Magistarski rad (mentor N. Hajdin), Građevinski fakultet u Beogradu, 1989. godine.
- 11.4. Marković, N. **Eksperimentalno ispitivanje lokalnog izbočavanja I nosača pod dejstvom koncentrisanog opterećenja**, Simpozijum 89 SDGKJ, Dubrovnik, april 1989, D-62, 374-379.
- 11.5. Marković, N., Hajdin, N. **Lokalno izbočavanje I nosača pod dejstvom koncentrisanog opterećenja**, Simpozijum 89 SDGKJ, Dubrovnik, april 1989, D-61, 368-373.
- 11.6. Hajdin, N., Marković, N. **Uticao dužine raspodeljenog opterećenja na graničnu nosivost čeličnih I nosača (Influence of the length of patch load on the ultimate load of plate girders)**, Zbornik radova IX kongres Saveza društava građevinskih konstruktera Jugoslavije, Cavtat, april 1991.
- 11.7. Hajdin, N., Marković, N. **Lokalno izbočavanje čeličnih I nosača pod dejstvom koncentrisanog opterećenja**, poglavlje u monografiji "Teorija konstrukcija-savremeni problemi nelinearne analize", ed. M. Sekulović, Građevinska knjiga, Beograd, 1992, 263-278.
- 11.8. Marković, N., Hajdin, N. **A Contribution to the Analysis of the Behaviour of Plate Girders Subjected to Patch Loading**, J. Construct. Steel Research, Vol 21, No 1-3, 1992, 163-173.
- 11.9. Hajdin, N., Marković, N., Salatić, R. **Granična nosivost pri lokalnom izbočavanju**, Simpozijum "Teorija Konstrukcija - Savremeni problemi nelinearne analize", Kopaonik, 1993, 4p.
- 11.10. Marković, N. **Ultimate load behaviour of plate girder subjected to patch loading**, Second Serbian-Greek Symposium on solid mechanics, 14-15. November 1996, Belgrade, 1996, 53-54.
- 11.11. Marković, N. **Ultimate load behaviour of plate girder subjected to patch loading**, Solid Mechanics, Proceedings of the Second Serbian-Greek Symposium on solid mechanics, 14-15. November 1996, Belgrade, SANU, Department of Technical Sciences, Vol. LXXXVII, Book 3, 1997, 215-222.
- 11.12. Hajdin, N., Coric, B., Markovic, N., Lucic, D. **Yugoslav investigations concerning the patch loading on girders**, Proceedings 6th National Congress of Mechanics of Hellenic Society of Theoretical and Applied Mechanics, Thessaloniki, July 19-21, 2001, p 282-289.
- 11.13. Hajdin, N., Coric, B., Markovic, N., Lucic D. **Theoretical and Experimental Investigations Concerning the Patch Loading on Girders, Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS 2002)** (Ed. M. Ivanyi), International Colloquium, 26-28 September 2002, Budapest, Hungary, p441-448.



BIOGRAFIJA

Nenad G. Marković je rođen 16.5.1951. godine u Beogradu.

Srednju školu - gimnaziju - završio je u Zaječaru 1970. godine sa odličnim uspehom i sa diplomom "Vuk Karadžić"

Na Gradjevinski fakultet u Beogradu se upisao školske 1970/71. godine. Studije na odseku za konstrukcije je završio 1976. godine sa prosečnom ocenom 8.47. Nagrade Univerziteta u Beogradu povodom Dana republike za uspeh u studijama je dobio dva puta, posle I i posle II godine. Diplomski rad iz oblasti Teorije površinskih nosača sa temom "Aktivna sadejstvujuća širina I nosača sa širokim pojasevima" odbranio je sa ocenom 10.

Magistarski rad sa temom "Prilog analizi plastičnog ponašanja tankozidnih nosača" odbranio je aprila 1989.

Od 28.4. do 3.5.1990. pohađao je poslediplomski kurs (Post-graduate Course) "Ultimate Load Behaviour of Steel Plated, Shell and Framed Structures" u organizaciji Tehničkog univerziteta u Budimpešti (Technical University of Budapest) a u okviru međunarodnog kolokvijuma "Stability of Steel Structures".

Od decembra 1975. godine do aprila 1977. godine Nenad Marković je saradnik, a zatim do septembra 1977. godine, programer pripravnik u Inženjerskom računskom centru Gradjevinskog fakulteta. Septembra 1977. godine izabran je za asistenta-pripravnika za predmet Otpornost materijala na Gradjevinskom fakultetu u Beogradu, januara 1983. godine ponovo izabran u isto zvanje, a novembra 1986. godine izabran za stručnog saradnika. Aprila 1990. godine izabran je u zvanje asistenta za predmet Otpornost materijala. Marta 1994., maja 1998 i 2003 je reizabiran u isto zvanje.

Učestvovao je i u izvodjenju vežbi na Gradjevinskom fakultetu u Podgorici (Titogradu) i to iz Statike konstrukcija (1985 i 1988. godine) i vežbi iz Stabilnosti i dinamike konstrukcija 1986. i 1987. godine

Učestvovao je u izvodjenju vežbi iz Otpornosti materijala na Vojnoj akademiji KOV u Beogradu između 1977 i 1982. godine, i predavanja i vežbe iz Otpornosti materijala i Inženjerskih konstrukcija na Vojnoj akademiji KOV u Beogradu od 1985 do 1988. godine.

Držao je predavanja iz Osnova železničkog gradjevinarstva na Višoj Železničkoj školi u Beogradu od školske 1983 do 1988. god.

Vojni rok je odslužio tokom školske 1978/79. godine.

Na studijskom boravku na University College Cardiff u Kardifu je proveo 8 meseci školske 1980/81. godine.

Objavio je sa Biljanom Deretić-Stojanović Zbirku rešenih ispitnih zadataka iz Otpornosti materijala.

Objavio je niz naučno istraživačkih radova i saopštenja u razlicitim stranim i domaćim publikacijama i na naučnim skupovima u zemlji i inostranstvu.

Učestvovao je u radu na projektovanju različitih objekata i posebno u Inženjerskom računskom centru u izradi niza statičkih proračuna za razne objekte.



РД 18209



300127088

СЕРТИФИКАТ

1

002155